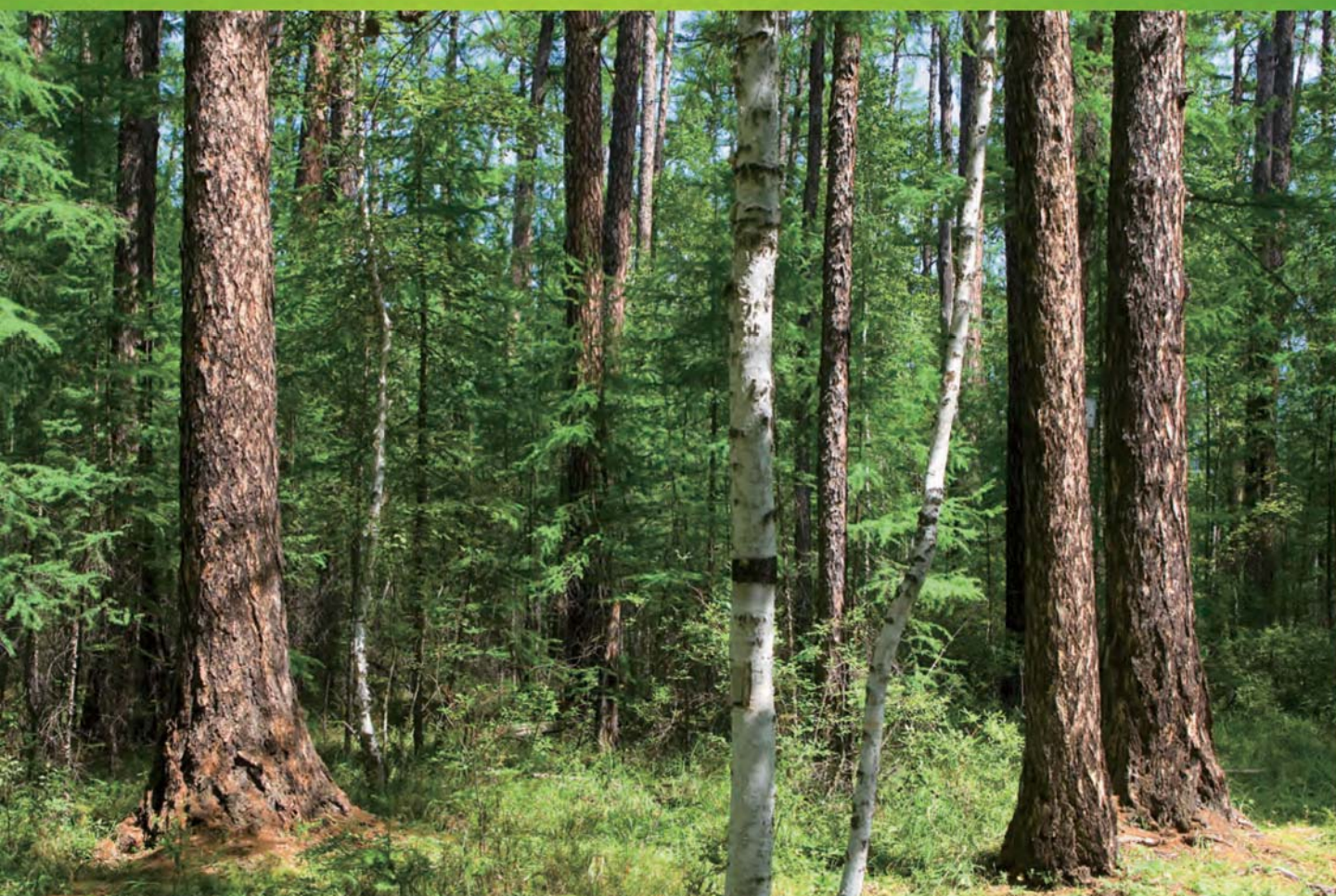


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

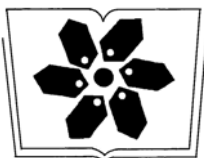
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学会
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 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

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/stxb201208221185

张桂铭, 朱阿兴, 杨胜天, 秦承志, 肖文, Steve K Windels. 基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法. 生态学报, 2013, 33(23): 7590-7600.

Zhang G M, Zhu A X, Yang S T, Qin C Z, Xiao W, S K Windels. Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7590-7600.

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法

张桂铭^{1,2}, 朱阿兴^{2,3,*}, 杨胜天¹, 秦承志², 肖文⁴, Steve K. Windels⁵

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 美国威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 麦迪逊 WI53706; 4. 大理学院东喜玛拉雅资源与环境研究所, 大理 671003;

5. 美国 Voyageurs 国家公园, 国际瀑布城 MN56649)

摘要: 生境适宜度制图能提供动物适宜生境的空间分布信息, 对野生动物种群管理、保护地规划等非常重要。生境适宜度制图的关键是构建生境适宜度模型(habitat suitability model, HSM), 只基于动物出现位置数据构建 HSM 的方法在实践中得到了非常广泛的应用。然而现有的只基于动物出现位置数据构建 HSM 的方法还不能很好地直接表达动物生境适宜度和环境因子之间具有生态学意义的数量关系, 因此也就不能很好地体现环境因子对动物生境利用的生态学作用。提出了一种基于核密度估计构建 HSM 的方法, 在地理信息系统技术支持下, 通过运用核密度估计从代表性的动物出现位置数据中估计出动物出现对各个环境因子的概率密度函数来直接表达生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系, 以体现环境因子对动物生境利用的生态学作用, 在此基础上对生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系进行综合构建了具有明确生态学意义的 HSM 用于动物生境适宜度制图。以美国 Voyageurs 国家公园的白尾鹿(*Odocoileus virginianus*)生境适宜度制图为例, 基于 365 个出现位置点位数数据并结合积雪深度、地表覆被类型、森林边界长度和坡度等环境因子数据, 开展了该方法的案例研究。通过交叉验证计算连续 Boyce 指数对制图结果进行评价, 结果表明: 基于核密度估计方法构建的 HSM 预测能力强, 所得出的生境适宜度图经 10 次交叉验证, 连续 Boyce 指数平均值为 0.75, 标准差为 0.11, 达到了较高精度。此外, 由于基于核密度估计的方法能以“生境适宜度和环境因子之间具有生态学意义的数量关系”的形式来直接体现环境因子对动物生境利用的生态学作用, 就模型的可解释性而言, 该方法要优于现有的其他构建 HSM 的方法。

关键词: 核密度估计; 生境适宜度制图; 地理信息系统; 白尾鹿; 连续 Boyce 指数

Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation

ZHANG Guiming^{1,2}, ZHU A'xing^{2,3,*}, YANG Shengtian¹, QIN Chengzhi², XIAO Wen⁴, Steve K. WINDELS⁵

1 School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison WI53706, USA

4 Institute of Eastern-Himalaya Biodiversity Research, Dali University, Dali 671003, China

5 Voyageurs National Park, International Falls, MN56649, USA

Abstract: Habitat suitability mapping can provide information on spatial variation of wildlife habitat suitability which is useful for wildlife population management and conservation planning. The key issue of habitat suitability mapping is how to construct habitat suitability model (HSM). Existing presence-only based methods of constructing HSM cannot explicitly express the quantitative relationship between wildlife habitat suitability and environmental factors. So the resulted HSM

基金项目: 国家自然科学基金项目(30960085, 40971236, 31260149)

收稿日期: 2012-08-22; 修订日期: 2013-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: axing@lreis.ac.cn

would be insufficient to express the ecological effects of environmental factors on wildlife habitat use. In this paper we proposed a kernel density estimation-based method of using wildlife occurrence data to construct HSM for wildlife habitat suitability mapping, which can obtain the quantitative ecological relationship between habitat suitability and environmental factors. Under the assumption that habitat should be more suitable where wildlife presented more frequently, the presence probability density function (PDF) estimated from wildlife occurrence data was used to express the quantitative ecological relationship between habitat suitability and each individual environmental factor. Then, assuming that habitat suitability is determined by the limiting factor, a minimum operation was applied to construct the final HSM by synthesizing all these relationships on an environmental factor set. In the case study we applied the proposed kernel density estimation-based method to habitat suitability mapping of the White-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) in Voyageurs National Park based on 365 deer occurrence points from aerial survey and environmental data characterizing its living environment, with the aid of geographic information system techniques. The environmental factors selected were snow depth, land cover type, forest edge length, and slope gradient. Cross validation was used to evaluate the performance of the proposed method. Results showed that the mean of continuous Boyce Indexes calculated from 10 repetitions of 2-fold cross validation was 0.75 with a standard deviation of 0.11. This suggests that the HSM from the proposed method has a good predictive capability. The proposed kernel density estimation-based method well captures the ecological effects of environmental factors on the wildlife habitat use in the form of quantitative relationship between wildlife habitat suitability and environmental factors. From the perspective of model interpretability, the proposed method is better than other HSM-constructing methods.

Key Words: kernel density estimation; habitat suitability mapping; geographic information system (GIS); white-tailed deer; continuous Boyce Index

动物生境是动物生存和繁衍的场所,为动物提供资源、庇护所、筑巢位置和交配场所^[1]。自然界的动物经过长期的生境选择都形成了自己特定的生境,生境质量的优劣,对于物种的延续和繁衍非常重要^[2]。生境适宜度是衡量生境质量的重要指标,生境适宜度制图能提供野生动物适宜生境的空间分布信息,从而为野生动物种群管理及保护地规划提供决策依据^[3]。

生境适宜度制图是通过构建生境适宜度模型(HSM)来实现的^[4]。生境适宜度模型表达生境适宜度与环境因子之间的关系,可以简单地写成 $HS=f(E)$,式中 HS 为生境适宜度; E 为环境因子的集合; f 为生境适宜度和环境因子之间的数量关系,一般通过对动物生境利用数据(例如出现位置数据)的分析来建立。随着地理信息系统(GIS)和遥感技术的发展,快速获取和分析大量环境因子数据以刻画动物生存的环境特征已经成为可能,它们目前已经在种群动态的时空分析与模拟、野生动物生境等方面得到越来越多的应用^[5-8]。根据建模所需动物出现位置数据的不同,HSM可以分为两类:第一类只需要动物的出现位置数据来构建的模型,第二类同时需要动物的出现位置和不出现位置数据来构建的模型。虽然有研究表明第二类模型的精度要高于第一类模型^[9],但是由于动物不出现位置的数据通常难以获取并且精度难以保证^[10],因此只需要动物出现位置数据进行建模的第一类HSM的应用更加广泛^[11]。目前,收集动物出现位置数据的手段包括野外直接跟踪观测、痕迹法、无线电遥测定位、热红外相机自动感应照相以及GPS追踪定位技术等^[12-15]。运用这些方法与技术,研究者能够获得丰富的动物出现位置数据,但如何利用这些动物出现位置数据并结合环境因子数据提取准确的生境适宜度与环境因子之间的数量关系 f 仍然是一个值得研究的问题。

生境适宜度和环境因子之间的数量关系 f 可以通过分析动物出现与环境因子之间的关系来建立^[16]。现有的只基于动物出现位置数据分析 f 的方法主要包括早期发展起来的生物气候分析预测系统(BIOCLIM)^[17]和环境距离模型DOMAIN^[18],以及当前国内外应用最为广泛的生态位因子分析法(ENFA)^[19]、规则集生成遗传算法(GARP)^[20]和最大熵法(MaxEnt)^[21]。生境适宜度与环境因子之间的关系可能相当复杂,这体现在生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系往往为非线性且不符合固定的函数形式^[22],而基于环境包络线的

BIOCLIM 和基于环境距离的 DOMAIN 等简单方法尚不能表达这种复杂的非线性关系。基于最大熵理论的 MaxEnt 和基于遗传算法的 GARP 都是机器学习方法,虽然它们通常能够很好地拟合数据并表达生境适宜度与环境因子之间复杂的非线性数量关系,但是通常这种数量关系及其生态学意义都是隐含的。基于生态位理论的 ENFA 首先将环境因子进行主成分变换得到几个相互独立的生态位因子,然后在这些生态位因子的基础上计算生境适宜度值,虽然这个计算过程有一定的生态学依据,但是由于该方法依赖于将环境因子进行主成分变换后得到的生态位因子,所以也不能直接表达生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系。综上所述,现有的只基于动物出现位置数据分析 f 的方法还不能很好地直接表达动物生境适宜度和各个环境因子之间具有生态学意义的数量关系,也就不能很好地体现各个环境因子对动物生境利用的生态学作用,从而导致模型的可解释性较差。

本文提出了一种基于核密度估计构建 HSM 进行动物生境适宜度制图的方法。该方法首先运用核密度估计对动物出现位置数据进行分析,估计出动物出现对各个环境因子的概率密度函数来直接表达动物生境适宜度与各个环境因子之间具有生态学意义的数量关系;然后对生境适宜度与多个环境因子之间的数量关系进行综合构建 HSM;最后在 GIS 支持下基于构建的 HSM 进行生境适宜度制图。本文运用该方法对美国 Voyageurs 国家公园的白尾鹿 (*Odocoileus virginianus*) 进行了生境适宜度制图的案例研究以验证方法的有效性。

1 理论基础

自然界的动物具有可移动性特征,能够通过生境选择来调整其与环境之间的相互关系,使其处于最佳状态^[23]。可以假定动物在某种环境条件下出现的概率大小直接指示了它在这种环境条件下的生境适宜度高低^[24]。因此可以用动物出现对某一环境因子的概率密度函数(PDF)来表达动物生境适宜度与该环境因子之间具有生态学意义的数量关系并体现该环境因子对动物生境利用的生态学作用。

在自然界中,环境因子对生物不会单独地、孤立地起作用,各个环境因子对于生物是共同起作用的,即因子的综合作用^[25]。动物生境是各种环境因子的组合,因此需要按照一定的原则对动物生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系进行综合,才能得到动物在某种环境特征条件(由多个环境因子刻画)下的生境适宜度。

2 研究方法

2.1 基于核密度估计的 HSM 构建方法

2.1.1 生境适宜度与单个环境因子之间数量关系的建立

动物出现位置数据中包含了动物分布与环境因子之间关系的信息,可以通过对它们的分析来估计动物出现对各个环境因子的 PDF。如引言部分所述,动物出现位置数据可以通过多种手段获得,然而无论运用哪种手段,往往都是按照一定的采样方法进行的,由此得到的动物出现位置数据是这种动物分布数据总体中的样本。

核密度估计(KDE)是一种能从样本估计总体的 PDF 的方法。一方面,应用 KDE 估计总体 PDF 不需要引入对数据分布的先验假设,只从样本本身出发获取数据分布特征,因此可以用来估计任意形状的 PDF;另一方面,相比于直方图等其他密度估计方法,通过 KDE 得到的 PDF 连续性更好,并且不会依赖于选取的区间长度^[26-27]。KDE 的基本表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

式中, $f(x)$ 为根据环境因子 x 在 n 个出现位置处的值 x_1, x_2, \dots, x_n 估计得到的动物出现对环境因子 x 的 PDF; K 为核函数; h 为带宽,其取值影响 PDF 曲线的形状和平滑程度^[28]。本文选用高斯核作为核函数,并根据经验法则计算带宽 h ^[27,29]:

$$K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}}, \quad h = 1.06 \times \sigma \times n^{-1/5}$$

式中, σ 为样本标准差, n 为出现位置个数。

利用动物出现位置数据和环境因子数据, 运用核密度估计方法得到动物出现对每一个环境因子的 PDF (对于类别型环境因子数据, 如地表覆被类型, 直接用频率分布统计来估计 PDF), 对这些 PDF 进行归一化处理, 作为动物生境适宜度和每一个环境因子之间具有生态学意义的数量关系:

$$HS^x = \frac{f(x)}{f_{\max}(x)}$$

式中, $f(x)$ 是动物出现对环境因子 x 的 PDF; $f_{\max}(x)$ 是概率密度函数 $f(x)$ (也即 PDF) 的最大值; HS^x 是将该 PDF 归一化后得到的结果。

2.1.2 生境适宜度与多个环境因子之间数量关系的综合

各个环境因子对动物生境适宜度的影响是综合起作用的, 生境适宜度建模方法体现这种因子综合作用通常采用“加权平均”或“最小限制因子”的处理方式。采用“加权平均”的处理方式需要依据专家知识赋予各个环境因子不同权重来表达它们对动物生境适宜度的不同贡献, 然后加权平均计算生境适宜度值^[30-31]。因此, 采用“加权平均”的处理方式要求对各个环境因子影响动物生境适宜度的相对重要性有深入的认识并且能够给出权重将这种知识定量化。然而, 这方面的专家知识通常难以获得而且往往具有较强的主观性^[30]。“最小限制因子”处理方式基于利比希的“最小因子定律”^[25], 具有一定的生态学理论依据。采用“最小限制因子”的处理方式只需要根据少量定性专家知识挑选出适当的影响动物生境适宜度的环境因子, 并不要求将各个环境因子的重要性进行定量化, 可以避免引入过多的主观性。因此, 在对于环境因子影响动物生境适宜度的知识不够全面或不够准确的情况下, “最小限制因子”的处理方式不失为一种简单而行之有效的办法^[32-33]。所以, 本文按照“最小限制因子”对生境适宜度与各个环境因子之间的关系进行综合, 以对各个环境因子生境适宜度值中的最小值作为最终的动物生境适宜度值:

$$HS_j = \min(HS^1_j, HS^2_j, HS^3_j, \dots, HS^m_j)$$

式中, HS_j 为位置 j 处的动物生境适宜度值; HS^k_j 是位置 j 处动物对第 k 个环境因子的生境适宜度值; m 为环境因子个数。

2.2 基于 HSM 的生境适宜度制图

基于以上构建 HSM 的思路, 可分三步计算研究区内每一个栅格处动物的生境适宜度值: 首先基于动物出现位置数据结合环境因子数据, 运用核密度估计建立动物生境适宜度和单个环境因子之间的数量关系; 然后根据这些数量关系以及每个栅格处的环境因子值计算动物对各个环境因子的生境适宜度值; 最后以对各个环境因子生境适宜度值中的最小值作为该栅格的生境适宜度值。

2.3 生境适宜度图验证

本文运用 Hirzel 等提出的连续 Boyce 指数^[34]对生境适宜度制图结果进行定量评价。该指数的计算只需要以动物出现位置作为验证数据, 它常被用来评价只基于动物出现位置数据构建的 HSM 及生境适宜度制图结果。

连续 Boyce 指数是对 Boyce 指数^[35]的改进。计算 Boyce 指数时首先将生境适宜度分成 r 个等级 (如 $r=10$), 然后依次计算验证数据中所在位置生境适宜度值落入第 l ($l=1, 2, \dots, r$) 级生境适宜度范围的动物出现位置点频率 P_l 和期望频率 E_l 的比值 F_l :

$$F_l = \frac{P_l}{E_l}$$

其中

$$P_l = N_l / \sum_{k=1}^r N_k; E_l = e_l / \sum_{k=1}^r e_k$$

式中, P_l 为验证数据中值落入第 l 级生境适宜度范围的 N_l 个动物出现位置点个数占验证数据的动物出现位置点总数的比例; E_l 为生境适宜度图上值落入第 l 级生境适宜度范围的栅格数 e_l 占生境适宜度图栅格总数的比例。

如果 HSM 能正确地预测出适宜生境分布,则 F_l 的值应该随着生境适宜度等级 l 的上升而单调增加。Boyce 指数 B_l 即用于度量这种单调增加的趋势,它是 F_l 和 l 之间的 Spearman 等级相关系数,取值范围在 -1.0 到 1.0 之间。 $B_l > 0$ 且越接近 1.0 表示基于生境适宜度模型的生境适宜度制图结果与验证数据中的动物出现位置数据分布符合越好(即验证数据中越多的出现位置落在了预测的生境适宜度高的区域),模型预测能力越强; $B_l < 0$ 表示模型预测的生境适宜度图与验证数据分布相反; $B_l = 0$ 表示模型的预测能力和随机模型相当。

Boyce 指数的一个不足之处是它对生境适宜度的分级数目 r 和边界很敏感,为此 Hirzel 等^[34] 提出连续 Boyce 指数 $B_{\text{cont}}(w)$ 作为对它的改进。Hirzel 等^[34] 在宽度为 w (如 $w = 0.1$) 的滑动窗口内计算 F_l ; 第 1 次计算的生境适宜度等级区间为 $[0, w]$; 第 2 次计算的生境适宜度等级区间为 $[\Delta x, \Delta x + w]$ (Δx 为窗口滑动距离,本文取 $\Delta x = 0.01$; w 为窗口宽度,本文取 $w = 0.1$), ..., 第 l 次计算的生境适宜度等级区间为 $[(l-1)\Delta x, (l-1)\Delta x + w]$, ..., 直到 $(l-1)\Delta x \geq 1.0$ 时计算结束。由此计算 F_l 和 l 之间的 Spearman 等级相关系数就得到 $B_{\text{cont}}(w)$, 它的取值范围及对模型预测能力的指示意义均和 Boyce 指数相同。

3 应用案例

3.1 研究区

Voyageurs 国家公园 ($48^{\circ}18'N$ — $48^{\circ}38'N$, $92^{\circ}27'W$ — $93^{\circ}11.5'W$) 位于美国明尼苏达州北部美国和加拿大交界处。公园总面积约为 828 km^2 , 其中湖泊和其他水域面积约占总面积的 40%; 公园内地势平缓, 最大地形起伏为 80 — 90 m ^[36]。公园内分布的主要哺乳动物除了白尾鹿外, 还有驼鹿 (*Alces alces*)、灰狼 (*Canis lupus*)、黑熊 (*Ursus americanus*) 和山猫 (*Felis rufus*)。灰狼是白尾鹿冬季主要的捕食者, 黑熊和山猫只会在春季和夏季捕食白尾鹿的幼崽。白尾鹿和驼鹿是公园内仅有的两种有蹄类动物, 但是它们之间并不存在对食物和生存空间的竞争关系^[37]。公园内白尾鹿当前的种群数量大约为 2000 — 3000 只。

3.2 出现位置数据

公园管理部门于 2009、2010 和 2011 连续 3a 冬季(具体时间: 2009 年 1 月 16、24—25、27 日; 2010 年 1 月 11—13 日; 2011 年 1 月 18—20 日)以空中调查^[38]的方式对公园内的驼鹿和白尾鹿的种群数量和分布状况进行了调查^[39]。调查将公园全区分分为 33 个调查单元(面积为 9.8 — 27.0 km^2)^[36]并对所有调查单元都进行了调查。对每个调查单元进行野外调查时, 搭载着观察员的小型飞机沿着事先设计好的西—东向平行样线飞行(样线间距约 550 m , 飞行速度 125 — 145 km/h , 飞行高度 150 — 215 m , 采样强度约 1.5 min/km^2), 观察员沿途记录观察到的驼鹿或白尾鹿的性别、年龄、种群数量和位置等信息。其中观察到的驼鹿或白尾鹿所在的位置通过参照高分辨率航空摄影影像图和大比例尺地形图上的山峰、沟谷、湖泊、湿地和道路等特征来确定, 以点的形式标注在影像图或地形图上。后续室内处理时将野外调查记录的原始数据进行了数字化, 得到公园内白尾鹿出现位置点总共 391 个(图 1)。

391 个白尾鹿出现位置点中有 26 个点落入了离湖边不远的湖泊内。调查在冬季(1 月)进行, 此时公园内湖面已经冻结, 由于湖边冰面上的积雪较浅, 白尾鹿在上面行走相对容易, 这些落入湖泊的点是白尾鹿在冰面上行走时被记录的点。考虑到白尾鹿出现在冰面上仅仅是为了行走方便而不会在冰面上停留进行取食等其他活动, 这些点对于白尾鹿的生境适宜度并无指示意义, 因此本文剔除这 26 个点, 只基于剩余的 365 个白尾鹿出现位置点进行分析。

3.3 环境特征的刻画

选择环境因子刻画白尾鹿生活的环境特征遵循两个原则: 一是要依据已有知识选择影响其生境利用的主要环境因子, 二是用于刻画环境因子的数据可以获得。已有对白尾鹿冬季生境选择和利用的研究^[40-42]表明: 白尾鹿冬季生境选择和利用一般会尽量避开积雪较深的地方, 地表覆被类型会影响白尾鹿对冬季庇护所的选择, 白尾鹿在冬季倾向于到森林边界处觅食。此外, 研究区内地形起伏不大(最大地形起伏为 80 — 90 m), 海拔高度变化对白尾鹿的生境利用的影响较小, 但局部地区陡峭的地形仍然会限制白尾鹿的生境利用。除了这些影响白尾鹿冬季庇护所选择、取食条件和活动通达性的环境因子外, 人为干扰因素对白尾鹿的生境选择和

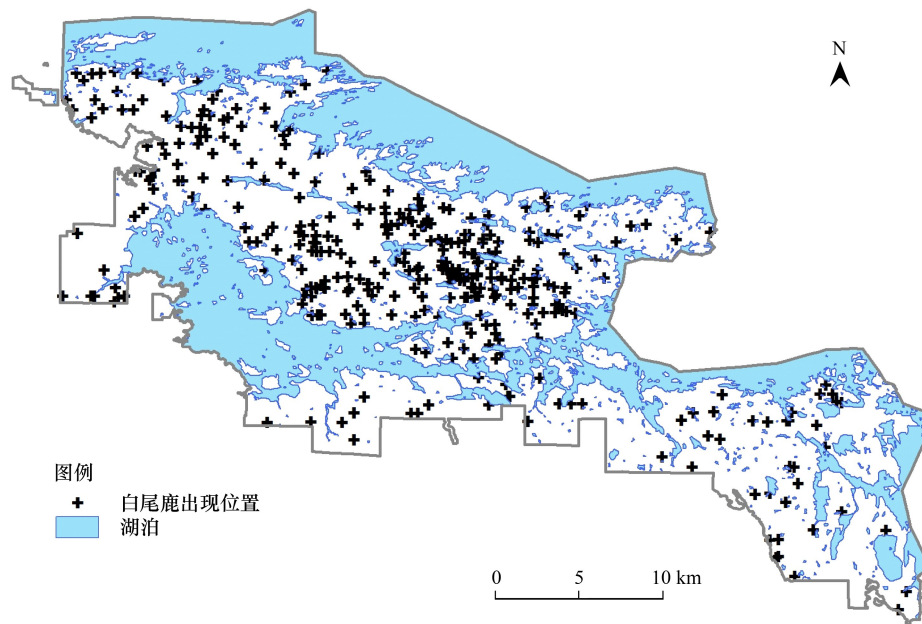


图1 白尾鹿出现位置

Fig.1 White-tailed deer occurrence data in study area

利用的影响很小(Voyageurs 国家公园属于自然保护区);白尾鹿与驼鹿之间不存在对食物和生存空间的竞争^[37];白尾鹿冬季的生境选择和利用会受捕食者灰狼的影响^[43],但目前无法获得相关数据来刻画这一捕食者因素。因此本文选择1月平均积雪深度、地表覆被类型、半径150 m圆形区域内的森林边界线长度(后文称为森林边界长度)、坡度等4个环境因子来刻画冬季白尾鹿生活的环境特征(表1)。

表1 刻画白尾鹿生活环境特征的环境因子

Table 1 Environmental factors characterizing the living environment of White-tailed deer

环境因子 Environmental factor	数据来源和描述 Data source & description	处理方法 Processing method
1月平均积雪深度 Jan. average snow depth	NOAA NOHRSC 雪数据同化系统 ^[44] (http://www.nohrsc.noaa.gov/archived_data/) 日尺度积雪深度/1 km 分辨率栅格数据	2009/2010/2011 年1月共93d的数据算术平均得到1月平均积雪深度估计,再空间插值并重采样到30 m (ArcGIS ^[45] 普通克里格插值、双线性重采样)
地表覆被类型 Land cover type	USGS 地表覆被数据库 ^[46] (http://www.mrlc.gov/nlcd2006.php) 地表覆被类型/30 m 分辨率栅格数据	使用2011年最新发布的2006年地表覆被类型数据
森林边界长度 Forest edge length	USGS 植被调查分类数据 ^[47] (http://biology.usgs.gov/npsveg/voya/index.html) 植被类型/矢量多边形	将森林边界转化为30 m 分辨率栅格数据并计算每个栅格周围半径150 m 圆形区域内森林边界栅格总数
坡度 Slope gradient	USGS 国家高程数据集 ^[48] (http://ned.usgs.gov/) 数字高程模型(DEM)/30 m 分辨率栅格数据	基于DEM使用ArcGIS计算坡度

3.4 生境适宜度图

基于365个出现位置结合环境因子数据运用核密度估计方法建立了白尾鹿生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系(图2),在此基础上构建HSM进行生境适宜度制图得到了研究区内白尾鹿的生境适宜度图(图3)。由图2可知,公园内白尾鹿生境适宜度最高的区域1月平均积雪深度在0.42 m左右、地表覆被类型为混合林或落叶林、150 m圆形区域内处于森林边界总长度在1050—1500 m(即35—50个栅格)之间、坡度约

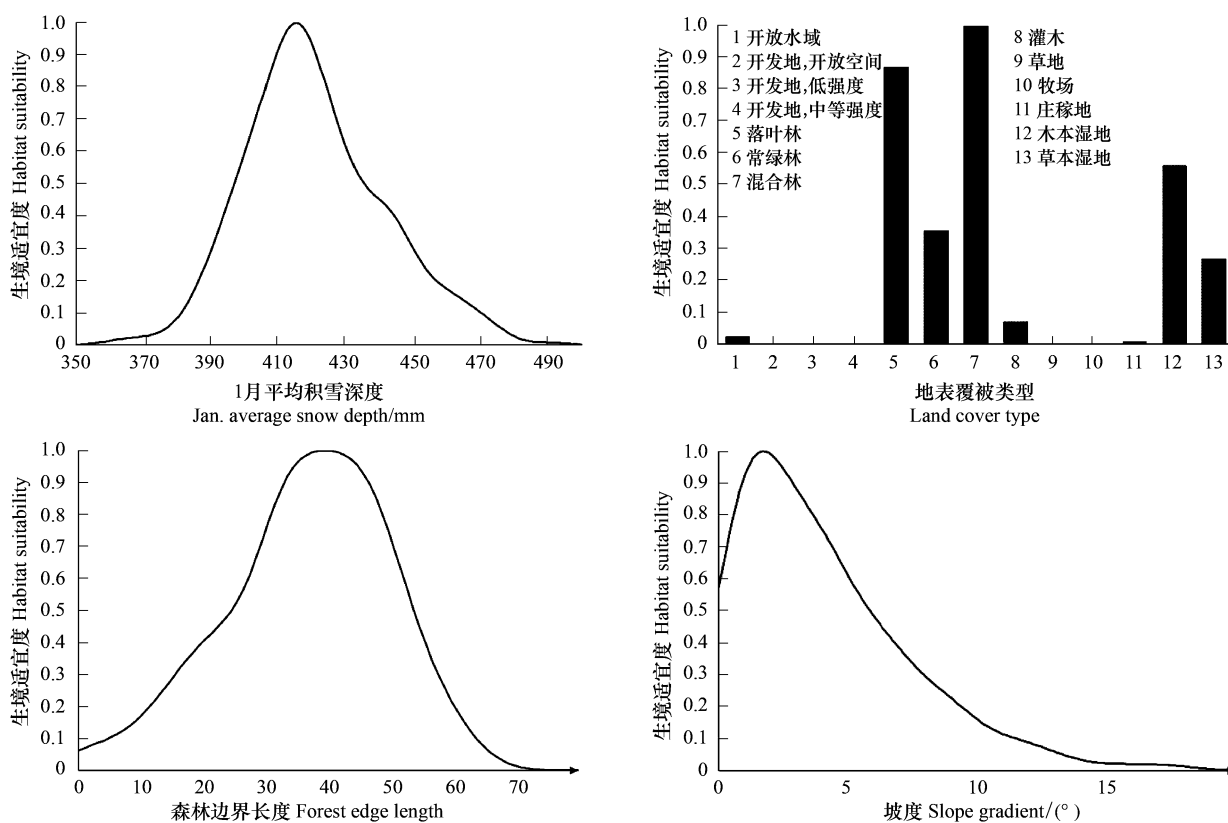


图2 白尾鹿生境适宜度与各个环境因子的数量关系

Fig.2 The quantitative relationship between White-tailed deer habitat suitability and environmental factors

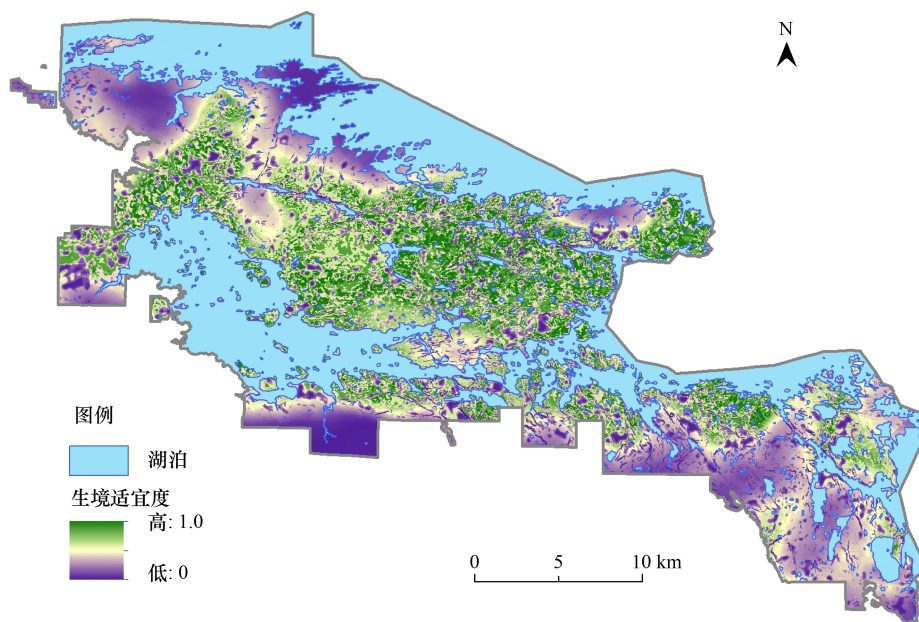


图3 白尾鹿生境适宜度图

Fig.3 White-tailed deer habitat suitability map

在 3°左右。生境适宜度图上几处范围较大的低值区主要由积雪深度这一环境因子决定:这些区域的 1 月平均积雪较深,不宜于白尾鹿的生境利用;生境适宜度图上的高值区分布呈现较破碎的斑块状,一方面是由于众

多湖泊和河流水域的分割,另一方面是环境因子(坡度、地表覆被类型、森林边界长度)空间异质性较强造成的。

3.5 验证

由于缺少独立获取的出现位置作为验证数据,本文以交叉验证^[49]的方式计算连续 Boyce 指数对生境适宜度制图结果进行定量评价,检验基于核密度估计进行生境适宜度制图方法的有效性。每次将 365 个白尾鹿出现位置点随机平均分为两组^[50],其中一组用于构建生境适宜度模型进行生境适宜度制图,另一组作为验证数据计算连续 Boyce 指数 $B_{\text{cont}}(0.1)$ 。该过程重复 10 次,计算得到 10 个相应的 $B_{\text{cont}}(0.1)$ 值(表 2)。10 次交叉验证 $B_{\text{cont}}(0.1)$ 的平均值到达了 0.75(标准差为 0.11),表明生境适宜度制图结果达到了较高精度,按照本文方法构建的生境适宜度模型预测能力强($B_{\text{cont}}(0.1)$ 达到 0.7 以上即可视为表现优秀^[34])。

表 2 10 次交叉验证计算的连续 Boyce 指数 $B_{\text{cont}}(0.1)$

Table 2 Continuous Boyce Indexes calculated from 10 repetitions of 2 folds cross validation

序号 ID	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
$B_{\text{cont}}(0.1)$	0.70	0.50	0.83	0.86	0.70	0.82	0.79	0.77	0.68	0.81	0.75	0.11

所有连续 Boyce 指数 $B_{\text{cont}}(0.1)$ 均在 0.01 显著性水平上显著

4 结论与讨论

4.1 本文方法的优点

本文基于代表性动物出现位置结合环境因子数据,运用核密度估计得到动物出现对各个环境因子的 PDF 来表达动物生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系,然后对这些关系进行综合构建 HSM 进行生境适宜度制图,验证表明生境适宜度制图结果达到了较高精度,按照本文方法建立的 HSM 预测能力强。此外,该方法能建立并直接表达生境适宜度和环境因子之间具有生态学意义的数量关系(图 2),以此体现环境因子对动物生境利用的生态学作用,就模型的可解释性而言,本文方法要优于 MaxEnt、GARP、ENFA 等其他构建 HSM 的方法,有助于增进对动物生境选择和生境利用的认识。

目前,研究者或野生动物保护部门可以利用多种技术和手段方便地收集动物出现位置数据,GIS 和遥感技术的发展也使得快速获取各种环境因子数据成为可能。本文方法只需要动物出现位置数据和相应环境因子数据即可进行动物生境适宜度制图服务于野生动物保护工作,因此,与那些同时需要动物出现位置和不出出现位置进行 HSM 建模的方法相比,本文方法在保护工作中也具有更大的实际应用价值。

4.2 应用中需要注意的问题

4.2.1 对动物出现位置数据的要求

基于核密度估计进行动物生境适宜度制图方法的关键是根据有限的动物出现位置数据样本估计出动物出现对各个环境因子的 PDF,以此表达动物生境适宜度与环境因子之间的数量关系。为了使得到的动物生境适宜度与环境因子之间的数量关系能代表实际的动物生境适宜度与环境因子之间的关系,要求动物出现位置数据样本具有良好的代表性^[51],即能代表动物出现的各种典型环境条件。如果收集动物出现位置数据时运用的采样方法没有偏差(如随机采样、规则采样),则收集的动物出现位置数据样本应该能代表动物出现的各种典型环境条件(文中使用的白尾鹿出现位置数据即是通过规则采样方式收集的代表性出现位置数据);反之,如果收集的动物出现位置数据样本代表性差,那么在此基础上运用核密度估计方法构建的 HSM 可能就无法正确预测该动物在某些环境条件下的生境适宜度。

此外,动物出现位置样本数量也可能影响基于本文方法构建 HSM 进行生境适宜度制图的精度。一般而言,用于 HSM 建模的动物出现位置样本数量越多越好。至于本文方法最少需要多少动物出现位置样本才能保证生境适宜度制图精度,本文没有设计专门的试验对该问题进行讨论,在后续研究中需要对该问题进行深入研究。

4.2.2 环境因子的选择

选择环境因子刻画动物生存的环境特征需要了解动物的生态学特征,基于动物生境选择和利用的知识选取那些对目标动物生境利用产生影响的主要环境因子。一般可以从生境的基本要素例如地形条件、庇护所、食物、水源、与其他物种之间的相互作用(竞争、捕食)等出发,选择相应环境因子来刻画这些要素。本文应用案例选择环境因子时就是根据已有知识选择了1月平均积雪深度、地表覆被类型、森林边界长度和坡度四个影响白尾鹿冬季庇护所选择、取食条件和活动通达性环境因子来刻画白尾鹿生存的环境特征。此外,选择环境因子还会受到数据源的限制,虽然目前已经有越来越多的遥感和GIS数据可供选择,但有些用于刻画动物生境利用影响因素的数据仍然难以获得。在本文应用案例中,捕食者是白尾鹿冬季生境选择和利用的重要因素之一,但由于无法获得相应数据来刻画这一因素,在进行白尾鹿生境适宜度制图时并没有考虑其冬季主要捕食者灰狼对白尾鹿生境适宜度的影响。

4.2.3 对动物生境适宜度与多个环境因子之间的数量关系的综合

本文依据“最小限制因子”对动物生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系进行综合,其中隐含假设了各个环境因子对动物生境适宜度的影响同等重要且各因子间不能相互补偿,其生态学理论依据是利比希的“最小因子定律”^[25]。“加权平均”处理方式基于的假设是在影响动物生境适宜度时各个环境因子可以相互补偿^[25],采用这种处理方式要求能够获得客观准确的关于环境因子之间的补偿作用机制、相对重要性的知识。然而,环境因子之间的补偿作用机制可能相当复杂而难以认知,实际工作中也难以获取全面准确的专家知识来确定各个环境因子的重要性权重并避免主观性^[30]。因此,在选择环境因子时充分考虑动物的生态学特征只选择那些对其生境适宜度会产生显著影响的环境因子的前提条件下,依据“最小限制因子”对动物生境适宜度与各个环境因子之间的关系进行综合是一种简单可行的解决办法^[32-33]。但是,无论采用哪一种处理方式对动物生境适宜度与各个环境因子之间的数量关系进行综合,对所采用的处理方式的前提假设没有清楚的认识将有助于正确理解由此产生的结果。

References:

- [1] Reunanen P, Monkkonen M, Nikula A. Habitat requirements of the Siberian flying squirrel in northern Finland: comparing field survey and remote sensing data. *Annales Zoologici Fennici*, 2002, 39(1): 7-20.
- [2] Dai Q, Gu H J, Wang Y Z. Theories and models for habitat selection. *Zoological Research*, 2007, 28(6): 681-688.
- [3] Jin L R, Sun K P, He H S, Zhou Y F. Research advances in habitat suitability index model. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5): 841-846.
- [4] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [5] Sanchez-Hernandez C, Boyd D S, Foody G M. Mapping specific habitats from remotely sensed imagery: support vector machine and support vector data description based classification of coastal saltmarsh habitats. *Ecological Informatics*, 2007, 2(2): 83-88.
- [6] Wang J L, Chen Y. Applications of 3S technology in wildlife habitat researches. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(6): 44-47.
- [7] Wang Z J, Zhang A B, Cheng J A, Li D M. The development of spatiotemporal analysis and simulation of population dynamics based on GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 104-110.
- [8] Tian B, Zhou Y X, Zhang L Q, Ma Z J, Yang B, Tang C D. A GIS and remote sensing-based analysis of migratory bird habitat suitability for Chongming Dongtan Nature Reserve, Shanghai. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3049-3059.
- [9] Václavík T, Meentemeyer R K. Invasive species distribution modeling (iSDM): are absence data and dispersal constraints needed to predict actual distributions? *Ecological Modelling*, 2009, 220(23): 3248-3258.
- [10] Gu W D, Swihart R K. Absent or undetected? Effects of non-detection of species occurrence on wildlife-habitat models. *Biological Conservation*, 2004, 116(2): 195-203.
- [11] Remm K. Case-based predictions for species and habitat mapping. *Ecological Modelling*, 2004, 177(3/4): 259-281.
- [12] Guan H L, Tong K G F. Review on satellite tracking of migratory birds and its prospect. *Zoological Research*, 2000, 21(5): 412-415.
- [13] Liu B W, Jiang Z G. Feces analysis and its role in wildlife research. *Zoological Research*, 2002, 23(1): 71-76.
- [14] Ma M, Xu F, Chundawat R S, Jumabay K, Wu Y Q, Ai Z Z, Zhu M H. Camera trapping of snow leopards for the photo capture rate and population size in the Muzat Valley of Tianshan Mountains. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52(4): 788-793.
- [15] Harris S, Cresswell W J, Forde P G, Trehwella W J, Woollard T, Wray S. Home-range analysis using radio-tracking data-a review of problems and

- techniques particularly as applied to the study of mammals. *Mammal Review*, 1990, 20(2/3): 97-123.
- [16] Ortigosa G R, de Leo G A, Gatto M. VVF: integrating modelling and GIS in a software tool for habitat suitability assessment. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15(1): 1-12.
- [17] Busby J R. BIOCLIM: a bioclimatic analysis and prediction system // Margules C R, Austin M P, eds. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. East Melbourne, Australia: CSIRO, 1991: 64-68.
- [18] 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.
- [19] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 2002, 83(7): 2027-2036.
- [20] Stockwell D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(2): 143-158.
- [21] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [22] Lek S, Delacoste M, Baran P, Dimopoulos I, Lauga J, Aulagnier S. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. *Ecological Modelling*, 1996, 90(1): 39-52.
- [23] Yan Z C, Chen Y L. Habitat selection in animals. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(2): 43-49.
- [24] Braunisch V, Bollmann K, Graf R F, Hirzel A H. Living on the edge-Modelling habitat suitability for species at the edge of their fundamental niche. *Ecological Modelling*, 2008, 214(2/4): 153-167.
- [25] Sun R Y. *Principles of Animal Ecology*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001: 19-29.
- [26] Sheather S J. Density estimation. *Statistical Science*, 2004, 19(4): 588-597.
- [27] Silverman B W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman and Hall, 1986: 34-72.
- [28] Wand M P, Jones M C. *Kernel Smoothing*. London: Chapman and Hall, 1995.
- [29] Sheather S J, Jones M C. A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1991, 53(3): 683-690.
- [30] Robinson V B. A Perspective on the fundamentals of fuzzy sets and their use in geographic information systems. *Transactions in GIS*, 2003, 7(1): 3-30.
- [31] Bolívar-Cimé B, Gallina S. An optimal habitat model for the White-tailed deer (*Odocoileus Virginianus*) in central Veracruz, Mexico. *Animal Production Science*, 2012, 52(8): 707-713.
- [32] Zhu A X, Band L E. A knowledge-based approach to data integration for soil mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1994, 20(4): 208-218.
- [33] Zhu A X. *Detail Digital Soil Survey: Models and Methods*. Beijing: Science Press, 2008: 103-106.
- [34] Hirzel A H, Le Lay G, Helfer V, Randin C, Guisan A. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological Modelling*, 2006, 199(2): 142-152.
- [35] Boyce M S, Vernier P R, Nielsen S E, Schmiegelow F K A. Evaluating resource selection functions. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 281-300.
- [36] Gogan P J P, Kozie K D, Olexa E M, Duncan N S. Ecological status of moose and white-tailed deer at Voyageurs National Park, Minnesota. *Alces*, 1997, 33: 187-201.
- [37] Cobb M A, Gogan P J P, Kozie K D, Olexa E M, Lawrence R L, Route W T. Relative spatial distributions and habitat use patterns of sympatric moose and white-tailed deer in Voyageurs National Park, Minnesota. *Alces*, 2004, 40: 169-191.
- [38] Gasaway W C, Dubois S D, Reed D J, Harbo S J. Estimating moose population parameters from aerial surveys. *University of Alaska Biological Papers*, 1986, 22: 1-108.
- [39] Windels S K. 2009 aerial moose survey protocol for Voyageurs National Park. Unpublished report, Voyageurs National Park, Minnesota, 2009.
- [40] Ozoga J J, Gysel L W. Response of White-tailed deer to winter weather. *The Journal of Wildlife Management*, 1972, 36(3): 892-896.
- [41] Blouch R I. Northern Great Lakes states and Ontario forests // Halls L K, ed. *White-Tailed Deer Ecology and Management*. Harrisburg: Stackpole Books, 1984.
- [42] Kie J G, Bowyer R T, Nicholson M C, Boroski B B, Loft E R. Landscape heterogeneity at differing scales: effects on spatial distribution of mule deer. *Ecology*, 2002, 83(2): 530-544.
- [43] National Park Service, U.S. Department of the Interior. Gray wolves in and adjacent to Voyageurs National Park, Minnesota: research and synthesis 1987-1991. [2012-04-12]. http://www.nrmnc.usgs.gov/files/norock/products/VOYA_wolves_1987-1991.pdf.

- [44] National Operational Hydrologic Remote Sensing Center. Snow Data Assimilation System (SNODAS) data products at NSIDC. [2012-03-20]. http://www.nohrsc.noaa.gov/archived_data/.
- [45] Environmental Systems Resource Institute. ArcMap version 10.0. [2012-05-15]. <http://resources.arcgis.com/content/arcgisdesktop/10.0/about>.
- [46] Fry J A, Xian G, Jin S, Dewitz J A, Homer C G, Yang L, Barnes C A, Herold N D, Wickham J D. Completion of the 2006 National Land Cover Database for the Conterminous United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, 77(9): 858-864.
- [47] U. S. Geological Survey. USGS-NPS Vegetation Mapping Program. [2012-04-13]. <http://biology.usgs.gov/npsveg/voya/index.html>.
- [48] Gesch D, Oimoen M, Greenlee S, Nelson C, Steuck M, Tyler D. The national elevation dataset. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(1): 5-11.
- [49] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J H. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. New York: Springer-Verlag, 2001
- [50] Beyer H L. Geospatial Modelling Environment. [2012-06-23]. <http://www.spatialecology.com/gme/>.
- [51] 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.

参考文献:

- [2] 戴强, 顾海军, 王跃招. 栖息地选择的理论与模型. *动物学研究*, 2007, 28(6): 681-688.
- [3] 金龙如, 孙克萍, 贺红土, 周宇飞. 生境适宜度指数模型研究进展. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 841-846.
- [6] 王金亮, 陈姚. 3S 技术在野生动物生境研究中的应用. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 44-47.
- [7] 王正军, 张爱兵, 程家安, 李典谟. 基于 GIS 的种群动态的时空分析与模拟研究的方法进展. *生态学报*, 2002, 22(1): 104-110.
- [8] 田波, 周云轩, 张利权, 马志军, 杨波, 汤臣栋. 遥感与 GIS 支持下的崇明东滩迁徙鸟类生境适宜性分析. *生态学报*, 2008, 28(7): 3049-3059.
- [12] 关鸿亮, 通口广芳. 卫星跟踪技术在鸟类迁徙研究中的应用及展望. *动物学研究*, 2000, 21(5): 412-415.
- [13] 刘丙万, 蒋志刚. 粪样在野生动物研究中的作用. *动物学研究*, 2002, 23(1): 71-76.
- [14] 马鸣, 徐峰, Chundawat R S, Jumabay K, 吴逸群, 艾则孜, 朱玛洪. 利用自动照相术获得天山雪豹拍摄率与个体数量. *动物学报*, 2006, 52(4): 788-793.
- [23] 颜忠诚, 陈永林. 动物的生境选择. *生态学杂志*, 1998, 17(2): 43-49.
- [25] 孙儒泳. *动物生态学原理*. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 19-29.
- [33] 朱阿兴. *精细数字土壤普查模型与方法*. 北京: 科学出版社, 2008: 103-106.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《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 王德利

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 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元