

DOI: 10.20103/j.stxb.202401300277

郭志强, 臧振华, 徐卫华, 范馨悦, 孔令桥, 欧阳志云. 耦合栖息地适宜性和个体扩散过程的大熊猫种群动态模拟. 生态学报, 2024, 44(23): 10525-10534.

Guo Z Q, Zang Z H, Xu W H, Fan X Y, Kong L Q, Ouyang Z Y. Coupled modeling of habitat suitability and individual dispersal processes in population dynamics of giant pandas. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10525-10534.

耦合栖息地适宜性和个体扩散过程的大熊猫种群动态模拟

郭志强^{1,2}, 臧振华^{1,3,*}, 徐卫华^{1,2,3}, 范馨悦^{1,3}, 孔令桥^{1,3}, 欧阳志云^{1,2,3}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 国家林业和草原局, 中国科学院国家公园研究院, 北京 100085

摘要: 大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 是我国特有珍稀濒危动物和全球生物多样性保护旗舰物种。通过长期的生态保护修复努力, 野生大熊猫的种群数量有所增长, 受威胁等级从濒危 (EN) 下降为易危 (VU), 但其种群仍面临着栖息地破碎化、种群隔离等威胁。为及时掌握大熊猫种群数量和扩散动态, 更有效支撑大熊猫种群保护及栖息地恢复, 提出了耦合栖息地适宜性和个体扩散过程的大熊猫种群动态模型。并以四川省平武县为案例, 模拟了全国第三次大熊猫调查 (1999—2003 年) 至第四次调查 (2011—2013 年) 期间大熊猫数量和分布变化情况。研究结果显示: 研究区内大熊猫适宜和较适宜栖息地主要分布在平武县北部和西部, 占全县面积的 41%。海拔、主食竹分布、降水季节性变异系数、与道路的距离是影响大熊猫栖息地适宜性的主要因素, 海拔中等偏高、有主食竹分布、降水季节性变异小、与道路较远的区域大熊猫栖息地适宜性较高。以第三次大熊猫调查的个体数量为初始状态, 模拟到第四次调查时的大熊猫个体数量平均值为 309 只, 与实际调查结果的误差率为 7.76%。模拟的大熊猫种群密度与实际调查结果之间的 Gini 系数为 0.06, 分布匹配指数平均值为 0.95, 表明大熊猫个体空间分布的模拟结果和调查结果一致性较高。王朗与小河沟之间、王朗与余家山之间大熊猫轨迹密度较高, 表明这些区域是大熊猫重要的扩散通道。小河沟与余家山之间轨迹密度低, 表明该区域存在扩散障碍。建议通过加强管护、建设生态廊道、制定社区管理办法等措施加强大熊猫种群及栖息地整体保护, 促进大熊猫国家公园高质量建设。

关键词: 大熊猫; 栖息地适宜性; 种群动态; 基于代理的模型; 国家公园

Coupled modeling of habitat suitability and individual dispersal processes in population dynamics of giant pandas

GUO Zhiqiang^{1,2}, ZANG Zhenhua^{1,3,*}, XU Weihua^{1,2,3}, FAN Xinyue^{1,3}, KONG Lingqiao^{1,3}, OUYANG Zhiyun^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of National Parks, National Forestry and Grassland Administrations, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) is a rare and endangered animal endemic to China. It is also a flagship species for global biodiversity conservation. The wild giant panda population has increased and the threatened level has dropped from endangered (EN) to vulnerable (VU) through long-term ecological conservation and restoration efforts. However, habitat fragmentation and population isolation still pose challenges to the survival of the wild giant pandas. To

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31971542); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32101402)

收稿日期: 2024-01-30; **采用日期:** 2024-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zh Zhang@rcees.ac.cn

further understand the dynamics of the number and distribution of the panda population and support conservation and restoration measures, this study established a population dynamics model incorporating panda habitat suitability and individual dispersion. Taking Pingwu County, Sichuan Province, as a case study, we simulated the number and distribution of wild pandas during the period of the third national survey (1999—2003) to the fourth national survey (2011—2013) on giant panda. The results showed that suitable and moderately suitable habitats for giant pandas are mainly distributed in the north and west of Pingwu County, accounting for 41% of the county's area. Altitude, distribution of staple bamboos, precipitation seasonality (coefficient of variations), and distance from roads were the main factors affecting habitat suitability for giant pandas, and areas with moderately high altitude, distribution of staple bamboos, low precipitation seasonality (coefficient of variations), and distance from roads had higher habitat suitability for giant pandas. Based on the number and distribution of pandas at the time of the third national survey on giant panda, the simulation produced an average of 309 panda individuals at the time of the fourth survey national survey on giant panda, with an error rate of 7.76% compared to the actual survey results. The Gini coefficient of the panda population density between the simulation and national survey on giant panda is 0.06, and the average Distribution Matching Index is 0.95, indicating a high consistency of the distribution between the simulation and national survey on giant panda. Density of panda trails in the areas between Wanglang and Xiaohegou, and between Wanglang and Yujiashan, is relatively high, indicating the areas are significant for panda dispersion. While density of panda trails in the areas between Xiaohegou and Yujiashan is relatively low, indicating the presence of dispersion barriers. To enhance the overall conservation of panda populations and habitats and promote the high-quality construction of Giant Panda National Park, it is recommended to take measures such as strengthening management and protection, constructing ecological corridors, and formulating management regulations of local communities.

Key Words: giant panda; habitat suitability; population dynamics; agent-based model; national park

大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)是我国特有的珍稀濒危动物,也是全球生物多样性保护的旗舰物种,目前仅分布在青藏高原东缘的六大山系中^[1]。随着“天然林保护”和“退耕还林”等生态工程的实施和自然保护地的建立,大熊猫的栖息地得到了有效保护和恢复^[2],野生大熊猫种群数量有所增长,其受威胁等级从濒危(EN)下降为易危(VU)^[3]。

尽管大熊猫保护取得了显著成效,种群数量有所上升,但野生大熊猫仍面临着栖息地破碎化、局域种群隔离加剧、气候变化等威胁^[4-7]。已有研究显示,过去半个世纪气候变暖导致大熊猫遭受潜在高温胁迫的频率和强度都明显增加,大熊猫与主食竹之间的空间匹配性下降^[8-9]。未来气候情景下大熊猫适宜栖息地将向高海拔和高纬度地区转移,受保护的栖息地面积减少、破碎度增加^[10-11]。为掌握野生大熊猫种群及栖息地状况,我国已开展了4次全国大熊猫调查。调查结果显示,放牧^[12]、公路交通^[13]等人为活动仍然对大熊猫及栖息地有较强影响,放牧强度加剧导致大熊猫适宜栖息地海拔上移。

种群个体数量和扩散动态是准确评价物种受威胁程度的重要依据^[14],也是实施物种保护行动和措施的重要参考^[15]。全国大熊猫调查为掌握野生大熊猫种群数量和栖息地质量奠定了扎实基础,但是调查周期长、人力物力成本高,往往10年组织一次,时效性不足^[16]。已有研究大多基于调查数据评估大熊猫栖息地状态,能为指导大熊猫保护和栖息地修复提供一定的科技支撑^[17-18],但是缺乏对野生大熊猫种群数量和扩散过程的准确模拟研究,无法满足新形势下大熊猫保护的需求^[19-20]。

为及时掌握大熊猫种群数量和扩散动态,更有效支撑大熊猫种群保护及栖息地恢复,本研究利用第三次(1999—2003年)和第四次(2011—2013年)全国大熊猫调查数据(以下简称三调、四调),采用机器学习算法、ABM(Agent Based Model)等方法,模拟野生大熊猫种群数量及扩散动态,并验证模拟结果的精度。研究结果能为指导大熊猫保护政策制定提供参考。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域为四川省绵阳市平武县,总面积 5974km²。平武县位于北纬 30°59′31″—33°02′41″,东经 103°50′31″—104°58′13″之间,处于岷山山系东部,地势西北高,东南低,海拔范围 600—5000m。气候随海拔高度变化呈垂直带性分布,低地河谷属亚热带山地湿润性季风气候,低山、中山、高山、极高山分处温带气候、寒温带气候、亚寒带气候和寒带气候。研究区内拥有比较完整的植被垂直带谱,从低海拔到高海拔分布有常绿阔叶林带、针阔混交林带、高山针叶林带、高山灌丛草甸^[21]。

三调和四调结果显示,平武县内野生大熊猫个体数量分别为 205 只和 335 只^[22],是野生大熊猫数量分布最多的县,约占全球种群数量的 20%。平武县原有自然保护区 4 处(图 1),为加强对大熊猫的保护,我国在 2021 年正式设立了大熊猫国家公园^[23],平武县西部和北部现已划入大熊猫国家公园范围,约占平武县面积的 52%(图 1)。

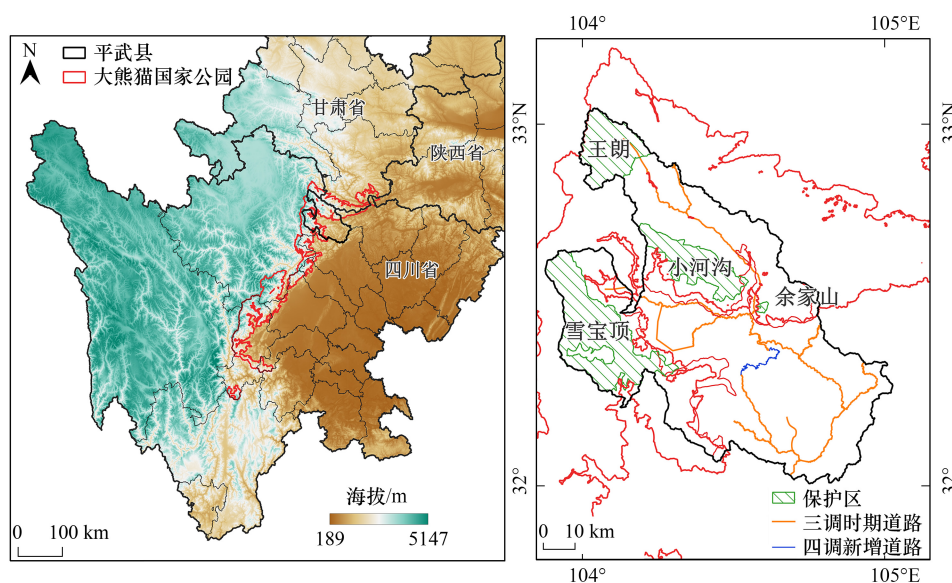


图 1 四川省平武县地理位置

Fig.1 Geographic location of Pingwu County, Sichuan Province

1.2 研究方法

本研究首先构建物种分布模型,分析大熊猫栖息地适宜性(图 2)。然后,使用 ABM 构建大熊猫种群动态模型,以三调时(1999 年 1 月 1 日)野生大熊猫个体分布为起始状态,模拟三调至四调(2013 年 12 月 31 日)期间大熊猫的繁殖和扩散过程(图 2)。最后,使用四调的大熊猫数量和分布对模型模拟结果进行精度验证(图 2)。

1.2.1 大熊猫栖息地适宜性分析

本研究采用 XGBoost(Extreme Gradient Boosting,极限梯度提升)算法,选择地形(海拔、坡度、坡向)、生态系统类型、主食竹分布情况、气候变量、与最近道路的距离等环境变量构建大熊猫栖息地适宜性模型(表 1)^[24—25]。为避免不同气候变量之间的多重共线性,选择方差膨胀因子小于 5 的气候变量^[26]。

XGBoost 是一种对梯度提升决策树算法的改进,具有准确度高、不易过拟合的优点^[28],为探索环境变量与物种分布之间的机理关系提供了良好的框架^[29—30]。模型以大熊猫分布点作为大熊猫的出现样本点,在调查得到的大熊猫潜在栖息地以外生成等量随机点作为伪缺席样本点^[31]。将 70%的样本点作为训练集,30%

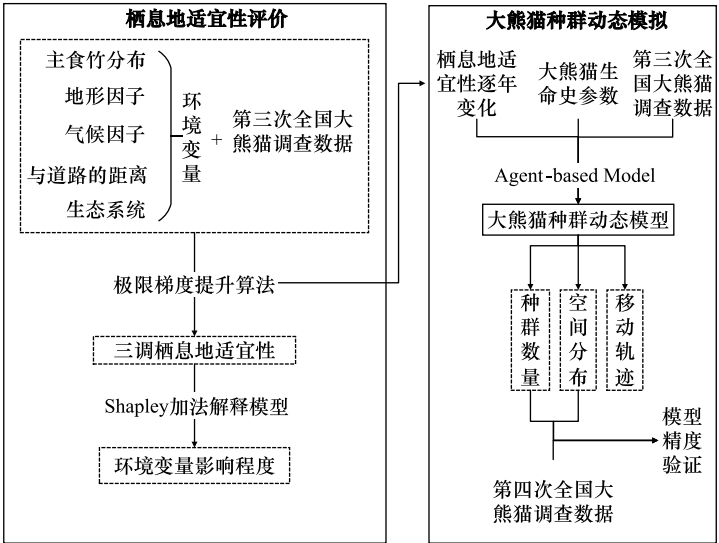


图2 研究方法流程图

Fig.2 Research methodology flowchart

的样本点作为测试集。模型对每个像元的环境变量进行分类,输出每个像元的适宜性。根据自然断点法将适宜性划分为适宜区域、较适宜区域和不适宜区域。采用 MAE(Mean Absolute Error,平均绝对误差)、AUC(Area Under Curve,受试者操作特征的曲线下面积)评价模型精度。为模拟栖息地适宜性在研究期内的变化,本研究基于每年的道路情况^[32]计算了研究区内任一位置与道路的距离,基于三调至四调期间大熊猫主食竹的分布变化,将变化区域均匀分配至每一年以模拟大熊猫主食竹的空间分布。

表1 大熊猫栖息地适宜性分析中使用的变量

Table 1 Variables used in habitat suitability analysis for giant pandas		
变量 Variable	来源 Source	分辨率 Resolution
海拔 Altitude	NASA 航天飞机雷达地形图任务 (SRTM; http://srtm.csi.cgiar.org)	90 m
坡度 Slope	使用 ArcGIS 的坡度工具计算得到	90 m
坡向 Aspect	使用 ArcGIS 的坡向工具计算得到	90 m
生态系统类型 Ecosystem type	2000 年和 2015 年全国生态系统调查评估数据 (https://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp)	90 m
主食竹分布 Bamboo distribution	第三次和第四次全国大熊猫调查报告	90 m
最干燥月份降水量 Precipitation of driest month	当前气候条件(1950—2000 年的平均值, https://worldclim.org/data/index.html)	30'
降水季节性变异系数 Precipitation seasonality		30'
与最近道路的距离 Distance to nearest road, DNR	2000 年和 2015 年的道路数据来自人民交通出版社 ^[27] , 使用 ArcGIS 的欧氏距离工具计算与道路的距离	90 m

本研究采用 SHAP (Shapley Additive explanation, Shapley 加法解释) 分析栖息地适宜性的影响因素^[33]。该方法通过计算每个自变量的 SHAP 值量化其对因变量的影响,各自变量的 SHAP 值与基线值相加即为当前像元适宜性的预测值。

$$L(\varphi) = \sum_i l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_k (\gamma T + \frac{1}{2} \lambda \omega^2) \tag{1}$$

$$\hat{y}_i = \text{SHAP}_0 + \text{SHAP}(X_{1i}) + \text{SHAP}(X_{2i}) + L + \text{SHAP}(X_{ni}) \tag{2}$$

式中, $L(\varphi)$ 为 XGBoost 算法的目标函数,其中第一个加项为损失函数, i 表示第 i 个像元,第二个加项是用于控

制树模型复杂程度的正则项, k 表示第 k 棵树。 $SHAP_0$ 是所有预测值的平均值, $SHAP(X_{ni})$ 表示第 i 个样本的第 n 个变量的 SHAP 值, 代表了该变量对预测的边际贡献。

1.2.2 大熊猫种群动态模拟

本研究根据 ABM 建模思想构建大熊猫种群动态模型, 该方法能充分考虑个体特征, 通过模拟个体扩散行为反映种群总体的时空变化动态^[34], 对复杂系统有较强的处理能力, 在人或动物的行为模拟中已有广泛应用^[35]。种群动态模型的构建和运行在 Python 环境中完成。

选用三调时 205 只大熊猫个体的空间分布作为模型内大熊猫个体的初始位置。根据历史调查和相关文献中的大熊猫种群年龄分布概率^[36-37], 为 205 只大熊猫个体分配了不同的日龄。基于已有调查和研究确定了大熊猫个体的寿命、发育时间、迁移节律和活动能力等参数^[38-39]。将模拟单元的大小设置为 500m^[40], 并假定大熊猫个体扩散概率与栖息地适宜性成正相关。基于以上参数, 逐天模拟从三调(1999 年 1 月 1 日)至四调(2013 年 12 31 日)期间大熊猫个体的行为与活动(图 3)。模拟结束后输出大熊猫种群的个体数量、空间分布以及每个个体的移动轨迹, 为降低随机误差, 模型运行 100 次。每次模拟结束后, 使用 ArcGIS 的点密度工具计算大熊猫种群密度分布, 使用线密度工具计算大熊猫个体移动轨迹的密度分布。

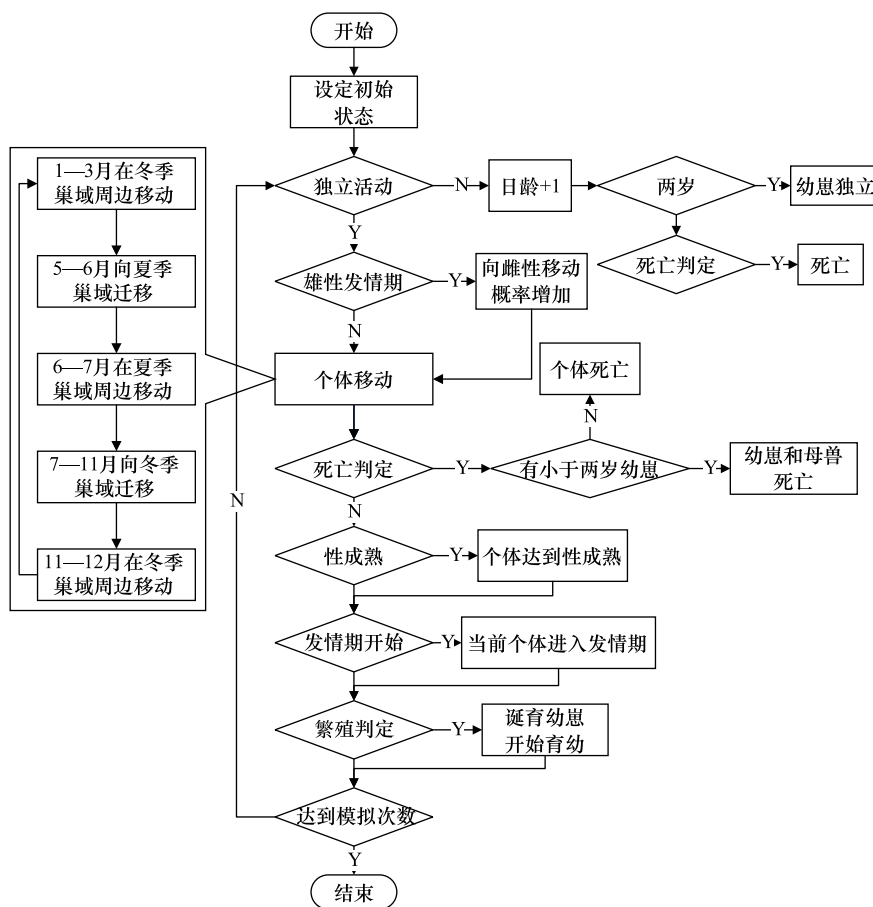


图 3 大熊猫种群动态模拟流程

Fig.3 Giant panda population dynamics simulation process

1.2.3 模型精度验证

本研究将模拟得到的个体数量和种群密度分布(100 次模拟结果的平均值)与四调结果进行对比以验证模型精度。采用 MAE 验证野生大熊猫种群数量的准确性, 采用 Gini 系数和 DMI(Distribution Matching Index, 分布匹配指数)验证种群空间分布格局的匹配性^[41]。Gini 系数被定义为绝对匹配线和洛伦兹曲线之间的面

积与绝对匹配线下面积之间的比值,目前被广泛应用于衡量资源供需之间的匹配程度^[42]。

$$\text{Gini} = \frac{S_A}{S_A + S_B} \quad (3)$$

$$\text{DMI}_i = \begin{cases} 1 & r_i = 0, s_i = 0 \\ 2 & r_i = 0, s_i \neq 0 \\ \frac{s_i}{r_i} & r_i \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_A 是绝对匹配线与洛伦兹曲线之间的面积, S_B 是洛伦兹曲线下面积。Gini 系数的值域为 0 到 1, 若 Gini 系数小于 0.4 则表明模拟的分布情况与调查的分布情况匹配性较高^[43]。 r_i 是实际调查情况下大熊猫点密度占总密度的比例, s_i 是模拟情况下大熊猫点密度占总密度的比例。若 DMI 的值为 1, 则表明模拟的分布情况和调查的分布情况完全一致; DMI 值与 1 的偏离程度越大, 则表明模拟空间分布精度越低。为提高 DMI 值的空间显示效果, 本研究采用最大最小值法, 将大于 1 的 DMI 值进行标准化^[44], 使 DMI 的值域为 $[0, 2]$ 。

2 研究结果

2.1 大熊猫栖息地适宜性

大熊猫栖息地适宜性分析的 MAE 和 AUC 分别为 0.02 和 0.97, 模拟精度高。研究区内适宜、较适宜和不适宜栖息地面积分别占 32.97%、8.00% 和 59.03% (图 4)。适宜栖息地主要分布在平武县北部和西部, 不适宜栖息地主要分布在平武县南部和中部 (图 4)。

海拔、主食竹分布、降水季节性变异系数、与道路的距离对大熊猫栖息地适宜性的影响较大 (图 5)。海拔中等偏高 (约 2300—3300m)、有主食竹分布、降水季节性变异相对较小的区域大熊猫栖息地适宜性更高, 与道路越远的区域大熊猫栖息地适宜性越高。

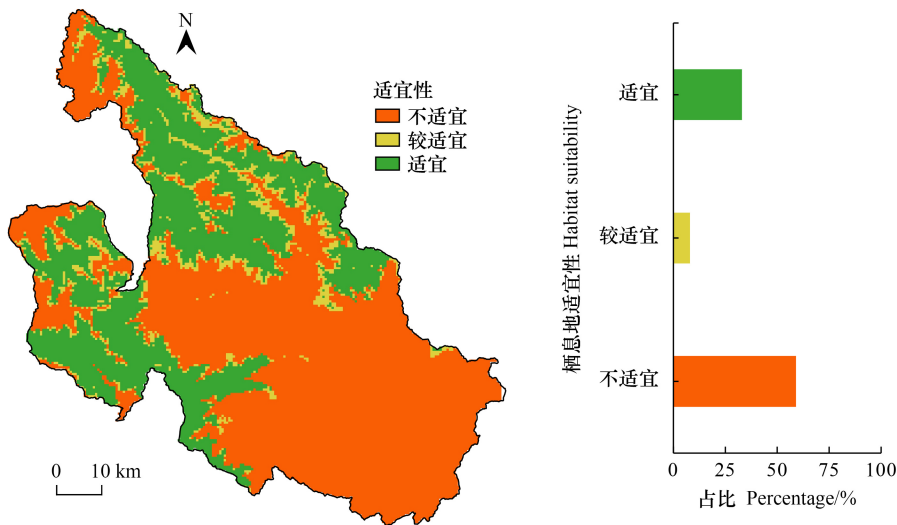


图 4 大熊猫栖息地适宜性

Fig.4 Giant panda habitat suitability

2.2 大熊猫种群动态模拟

大熊猫种群动态模型的模拟结果显示, 四调时大熊猫个体数量为 (309 ± 22) 只, 模拟结果略少于实际调查得到的 335 只, 误差率为 7.76%, 100 次模拟得到大熊猫个体数量的平均绝对误差为 28.73。

模拟的大熊猫密度和实际密度之间的 Gini 系数为 0.06, 小于阈值 0.4; DMI 平均值为 0.95, 接近于 1, 表明

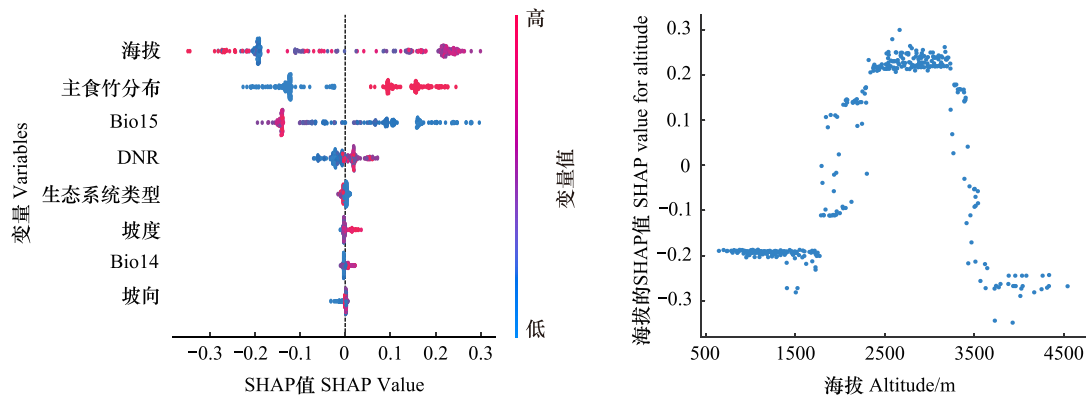


图5 大熊猫栖息地适宜性影响因素

Fig.5 Factors affecting habitat suitability for giant pandas

Bio15:降水季节性变异系数;DNR:与最近道路的距离;Bio14:最干燥月份降水量;SHAP:Shapley 加法解释

大熊猫个体空间分布的模拟结果和调查结果一致性较高。平武县的北部、中部以及西部部分地区的 DMI 值接近 1(图 6),模型对这些区域的大熊猫分布模拟准确度最高。平武县西南部、北部部分地区的 DMI 值低于 0.5,表明模拟密度与调查密度之间的偏差较大。

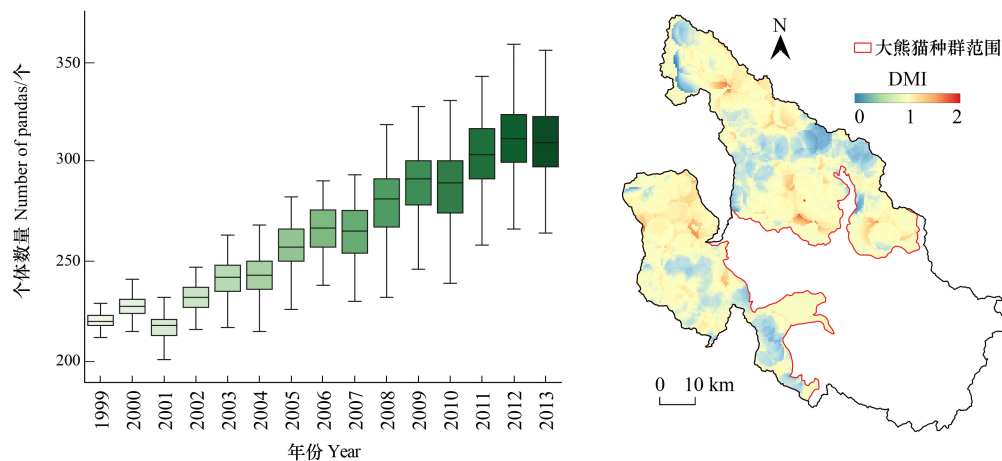


图6 大熊猫种群动态模型对大熊猫个体数量和空间分布的模拟精度

Fig.6 Simulation accuracy of giant panda population dynamics model on number and spatial distribution of giant pandas

DMI:分布匹配指数

模拟的大熊猫平均密度为 $(0.02 \pm 0.04) \text{ a/km}^2$,平武县北部、西部密度最高,与四调得到的大熊猫分布情况基本一致(图 7)。平武县大熊猫分布范围基本位于大熊猫国家公园范围内。大熊猫个体移动轨迹密度揭示了大熊猫的移动路径和活动范围,研究区北部和西部是轨迹密度较高的区域,王朗与小河沟之间、王朗与余家山之间存在轨迹密度较高的区域,表明这些区域是大熊猫扩散的重要区域。小河沟和余家山之间的区域轨迹密度低,存在扩散障碍(图 7)。

3 讨论

本研究以平武县为案例,分析了大熊猫栖息地适宜性并识别了影响适宜性的主要因素,构建了大熊猫种群动态模型,模拟了平武县大熊猫种群的个体数量和空间分布格局变化。研究发现,海拔、主食竹分布情况、降水季节性变异系数、与道路的距离是影响平武县大熊猫栖息地适宜性的主要因素,模拟得到的大熊猫种群

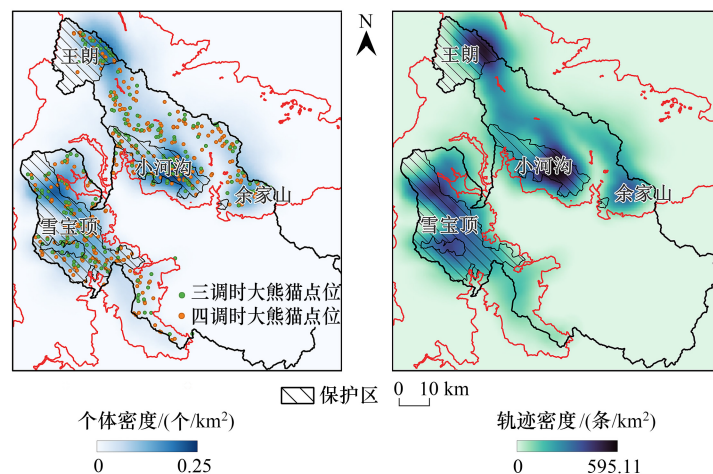


图7 大熊猫种群动态模型模拟结果

Fig.7 Giant panda population dynamics model simulation results

个体数量和空间分布格局与调查结果具有较高的匹配性,能够反应研究区内大熊猫种群动态过程。研究结果能为准确评估大熊猫受威胁程度、制定针对性保护对策提供参考依据。

研究发现主食竹分布与否、海拔、降水季节性变异系数和与道路的距离能较好地解释平武县大熊猫栖息地适宜性。平武县的大熊猫适宜栖息地位于有主食竹分布、海拔中等偏高、季节性降水变异较小的区域。以上发现与已有研究结果表现出相似规律,如在邛崃山系开展的研究显示森林和竹子覆盖率是驱动大熊猫分布的重要指标^[45],卧龙地区的研究发现大熊猫对中高海拔区域利用较多^[25],凉山地区的研究则发现降水量对大熊猫栖息地扩张具有较大影响^[30]。基于以上发现,建议对主食竹分布、气候因子等影响栖息地适宜性的重要环境变量开展深入研究,如进一步加强对主食竹分布与开花风险评估研究^[46],识别气候变化情景下的适宜栖息地,制定阶段性保护方案,降低竹子开花、气候变化对大熊猫种群生存的风险^[47]。

研究发现,平武县大熊猫种群高密度区和轨迹密集区基本被纳入国家公园范围内。其中,雪宝顶以南的部分区域栖息地适宜性较高,但大熊猫种群密度和轨迹密度较低,建议加强监测评估,通过生态修复和野外放归等方式,促进大熊猫种群生存繁衍^[1]。王朗与小河沟之间、王朗与余家山之间大熊猫种群密度和轨迹密度较高,建议加强对这些区域的保护监测,确保大熊猫个体顺利扩散与交流。小河沟和余家山之间的大熊猫轨迹密度较低,该区域在大熊猫国家公园设立以前不属于自然保护地、人类干扰活动较强,建议选择条件合适的区域建设生态廊道或通道,提升大熊猫栖息地连通性,促进小河沟、余家山之间的大熊猫个体扩散。此外,鉴于当地居民生产生活和国家重大战略的需要,研究区中有部分大熊猫适宜栖息地未纳入国家公园范围,这些区域的人类活动干扰可能影响国家公园内大熊猫对栖息地的利用,阻碍大熊猫种群扩散和基因流动^[48]。建议制定大熊猫国家公园社区管理办法,加强协作管理,探索政府部门和当地居民共同参与的社区管理新路径,并通过宣传和教育手段提高当地社区居民的保护意识,降低人类活动对国家公园内大熊猫生存的负面影响^[49]。

研究将大熊猫栖息地适宜性的逐年变化和个体生理行为参数相结合,逐日模拟个体扩散过程,有利于精细刻画大熊猫种群数量和空间分布动态。已有研究表明,ABM模型的模拟精度受数据准确性、模型参数以及随机性的影响^[50]。本研究模拟的大熊猫个体数量略少于实际数量,可能是由于大熊猫初始性别、年龄结构、繁殖率和存活率与实际情况之间存在误差导致。本研究模拟的大熊猫种群分布与四调时大熊猫种群分布基本一致,可能导致误差的因素包括大熊猫初始分布位置、实际扩散能力、以及人类活动干扰等。

受大熊猫种群性比、年龄结构等数据可获得性的限制,本研究的模拟精度仍有待提升。在掌握更加翔实、准确的种群年龄结构、大熊猫个体出生率、繁殖率、扩散能力,以及不同季节、不同年龄大熊猫个体活动能力等

相关参数后,可进一步优化大熊猫种群扩散模型。通过设定不同的环境变化情景,实现对整个大熊猫国家公园以及全部野生大熊猫种群变化的动态预测,为构建以国家公园为主体的自然保护地体系提供科技支撑,为其他珍稀濒危物种的种群动态模拟和受威胁程度评估研究提供借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 李天满, 张旭晨, 郑重, 向可文. 稳步推进大熊猫国家公园高质量发展. 国家公园(中英文), 2023, 1(2): 126-134.
- [2] Li Y, Vina A, Yang W, Chen X D, Zhang J D, Ouyang Z Y, Liang Z, Liu J G. Effects of conservation policies on forest cover change in giant panda habitat regions, China. Land Use Policy, 2013, 33: 42-53.
- [3] Swaisgood R, Wang D J, Wei F W. IUCN redlist of threatened species: *Ailuropoda melanoleuca*. (2016) [2023]. <https://www.iucnredlist.org/species/712/121745669>.
- [4] Swaisgood R R, Wang D J, Wei F W. Panda downlisted but not out of the woods. Conservation Letters, 2018, 11(1): e12355.
- [5] Xu W H, Vina A, Kong L Q, Pimm S L, Zhang J J, Yang W, Xiao Y, Zhang L, Chen X D, Liu J G, Ouyang Z Y. Reassessing the conservation status of the giant panda using remote sensing. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(11): 1635-1638.
- [6] Wei W, Swaisgood R R, Dai Q, Yang Z S, Yuan S B, Owen M A, Pilfold N W, Yang X Y, Gu X D, Zhou H, Han H, Zhang J D, Hong M S, Zhang Z J. Giant panda distributional and habitat-use shifts in a changing landscape. Conservation Letters, 2018, 11(6): e12575.
- [7] Fu M X, Pan H, Song X Q, Dai Q, Qi D W, Ran J H, Hou R, Yang X Y, Gu X D, Yang B, Xu Y, Zhang Z J. Back-and-forth shifts in habitat selection by giant pandas over the past two decades in the Daxiangling Mountains, southwestern China. Journal for Nature Conservation, 2022, 66: 126129.
- [8] Zang Z H, Deng S Y, Ren G F, Zhao Z X, Li J Q, Xie Z Q, Shen G Z. Climate-induced spatial mismatch may intensify giant panda habitat loss and fragmentation. Biological Conservation, 2020, 241: 108392.
- [9] Zang Z H, Shen G Z, Ren G F, Wang C L, Feng C Y, Xu W T, Xie Z Q, Chen Q S, Yang X Y, Li J Q. Thermal habitat of giant panda has shrunk by climate warming over the past half century. Biological Conservation, 2017, 211: 125-133.
- [10] Shen G Z, Pimm S L, Feng C Y, Ren G F, Liu Y P, Xu W T, Li J Q, Si X F, Xie Z Q. Climate change challenges the current conservation strategy for the giant panda. Biological Conservation, 2015, 190: 43-50.
- [11] 晏婷婷, 冉江洪, 赵晨皓, 钟雪, 梁敏仪. 气候变化对邛崃山系大熊猫主食竹和栖息地分布的影响. 生态学报, 2017, 37(7): 2360-2367.
- [12] 周世强, V Hull, 张晋东, 黄金燕, 刘巖, 黄炎, 李德生, 张和民. 野生大熊猫与放牧家畜的空间利用格局比较. 兽类学报, 2016, 36(2): 138-151.
- [13] He K, Dai Q, Gu X H, Zhang Z J, Zhou J, Qi D W, Gu X D, Yang X Y, Zhang W, Yang B, Yang Z S. Effects of roads on giant panda distribution: a mountain range scale evaluation. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1110.
- [14] IUCN Species Survival Commission. IUCN red list categories and criteria. Gland, Switzerland: IUCN, 2001.
- [15] Lomolino M V. Biogeography: a very short introduction. USA: Oxford University Press, 2020: 129-130.
- [16] 钟义, 张玲, 张健嵩, 王梦君. 野外大熊猫种群调查监测方法概述. 林业建设, 2023, 41(4): 6-11.
- [17] 马佳雯, 杨志娇, 王宇航, 文菀玉, 刘刚, 李惠鑫, 高军, 虎永胜, 李斌, 九落, 龚明昊. 基于目标物种栖息地适宜性和景观特征的保护地功能区划研究——以甘肃多儿国家级自然保护区为例. 生态学报, 2023, 43(7): 2703-2710.
- [18] 白文科, 张晋东, 董鑫, 李程, 古晓东, 周材权. 卧龙自然保护区大熊猫空间利用格局动态变化特征. 兽类学报, 2017, 37(4): 327-335.
- [19] Barnes M. Protect biodiversity, not just area. Nature, 2015, 526(7572): 195.
- [20] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- [21] 平武县人民政府. 平武概况. (2022) [2023]. <http://www.pingwu.gov.cn/zjpw/pwgk/index.html>.
- [22] 国家林业和草原局. 全国第四次大熊猫调查报告. 北京: 科学出版社, 2021: 21-25.
- [23] 唐小平, 欧阳志云, 蒋亚芳, 马伟, 徐卫华, 陈尚, 刘增力. 中国国家公园空间布局研究. 国家公园(中英文), 2023, 1(1): 1-10.
- [24] Wang F, Zhao Q, McShea W J, Songer M, Huang Q Y, Zhang X F, Zhou L G. Incorporating biotic interactions reveals potential climate tolerance of giant pandas. Conservation Letters, 2018, 11(6): e12592.
- [25] Hull V, Zhang J, Huang J, Zhou S, Vina A, Shortridge A, Li R, Liu D, Xu W, Ouyang Z Y, Zhang H, Liu J G. Habitat use and selection by giant pandas. Plos One, 2016, 11(9): e0162266.
- [26] 刘明. 一类新的多重共线性检验方法. 统计与信息论坛, 2012, 27(10): 14-16.
- [27] 交通部公路司. 中国公路地图. 北京: 人民交通出版社, 2006: 141-150.
- [28] Chen T Q, Guestrin C. Xgboost: a scalable tree boosting system. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco, California, USA. ACM, 2016: 785-794.

- [29] Huang Q Y, Lothspeich A, Hernández-Yúñez H, Mertes K, Liu X H, Songer M. What drove giant panda *Ailuropoda melanoleuca* expansion in the Qinling Mountains? An analysis comparing the influence of climate, bamboo, and various landscape variables in the past decade. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8): 84036.
- [30] Li Y H, Rao T, Luo G, Price M L, Liu Y X, Ran J H. Giant pandas are losing their edge: population trend and distribution dynamic drivers of the giant panda. *Global Change Biology*, 2023, 29(16): 4480-4495.
- [31] Barbet-Massin M, Jiguet F, Albert C H, Thuiller W. Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(2): 327-338.
- [32] 平武县人民政府.平武县公路水路交通“十一五”规划.(2008) [2023]. <http://www.pingwu.gov.cn/public/12471/12895741.html>.
- [33] Lundberg S M, Erion G, Chen H, DeGrave A, Prutkin J M, Nair B, Katz R, Himmelfarb J, Bansal N, Lee S. From local explanations to global understanding with explainable ai for trees. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2(1): 56-67.
- [34] Macal C, North M. Introductory tutorial: agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. Savannah, GA, USA. IEEE, 2014:6-20.
- [35] An L, Zvoleff A, Liu J G, Axinn W. Agent-based modeling in coupled human and natural systems (CHANS): lessons from a comparative analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 2014, 104(4): 723-745.
- [36] Kong L Q, Xu W H, Xiao Y, Pimm S L, Shi H, Ouyang Z Y. Spatial models of giant pandas under current and future conditions reveal extinction risks. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(9): 1309-1316.
- [37] 王昊, 李松岗, 潘文石. 秦岭大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)的种群存活力分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(6): 756-761.
- [38] Zhang Z J, Sheppard J K, Swaisgood R R, Wang G, Nie Y G, Wei W, Zhao N X, Wei F W. Ecological scale and seasonal heterogeneity in the spatial behaviors of giant pandas. *Integrative Zoology*, 2014, 9(1): 46-60.
- [39] 魏辅文, 胡锦矗. 卧龙自然保护区野生大熊猫繁殖研究. *兽类学报*, 1994, (4): 243-248.
- [40] 胡锦矗. 大熊猫研究. 上海: 上海科技教育出版社, 2001: 118.
- [41] Gini C. Concentration and dependency ratios. *Rivista Di Politica Economica*, 1997, 87: 769-792.
- [42] Yan X R, Song C, Pei T, Wang X, Wu M B, Liu T Y, Shu H, Chen J. Revealing spatiotemporal matching patterns between traffic flux and road resources using big geodata - a case study of beijing. *Cities*, 2022, 127: 103754.
- [43] Lin Y W, Zhang Q, Chen W, Ling L. The social income inequality, social integration and health status of internal migrants in China. *International Journal for Equity in Health*, 2017, 16(1): 139.
- [44] Ait Issad H, Aoudjit R, Rodrigues J J P C. A comprehensive review of data mining techniques in smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2019, 12(4): 511-525.
- [45] Sun X, Long Z X, Jia J B. Identifying core habitats and corridors for giant pandas by combining multiscale random forest and connectivity analysis. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(2): e8628.
- [46] Tian Z X, Liu X H, Fan Z Y, Liu J G, Pimm S L, Liu L, Garcia C, Songer M, Shao X M, Skidmore A, Wang T J, Zhang Y K, Chang Y D, Jin X L, Gong M H, Zhou L G, He X B, Dang G D, Zhu Y, Cai Q. The next widespread bamboo flowering poses a massive risk to the giant panda. *Biological Conservation*, 2019, 234: 180-187.
- [47] 王小珊, 乔纳森·贾维斯, 赵智聪, 杨锐. 美国国家公园气候变化应对关键机制及启示. *国家公园(中英文)*, 2023, 1(1): 34-43.
- [48] 欧阳志云, 唐小平, 杜傲, 臧振华, 徐卫华. 科学建设国家公园:进展、挑战与机遇. *国家公园(中英文)*, 2023, 1(2): 67-74.
- [49] 李新婷, 魏钰, 张丛林, 黄宝荣. 国家公园如何平衡生态保护与社区发展:国际经验与中国探索. *国家公园(中英文)*, 2023, 1(1): 44-52.
- [50] Ceia-Hasse A, Navarro L M, Borda-De-Água L, Pereira H M. Population persistence in landscapes fragmented by roads: disentangling isolation, mortality, and the effect of dispersal. *Ecological Modelling*, 2018, 375: 45-53.