

猫科动物从历史到未来的适生区分布变化

黄洁明^{1,2} 白杨^{1,2*}

1 中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心

2 中国科学院大学

DOI:10.32629/eep.v9i2.3069

[摘要] 气候变化正深刻影响全球生物多样性格局。本研究利用MaxEnt模型,整合古气候(LIG、LGM、MH)、现今及未来(2041–2060、2081–2100)多时空尺度数据,分析了24种受威胁猫科动物的适生区演变特征。结果显示:猫科动物适生区呈独特的“暖缩冰扩”格局,末次盛冰期(LGM)面积达全时期峰值($2.44 \times 10^7 \text{ km}^2$);最冷月最低温(Bio6)和温度季节性(Bio4)是驱动其分布的主导因子,累计贡献率达62%;全球保护区对识别出的长期稳定适生区覆盖率仅为19.15%。研究建议应优先保护高韧性的气候避难所,并构建跨区域生态廊道。

[关键词] 猫科,气候变化;物种分布模型;;适生区

中图分类号: P462 文献标识码: A

Long-term Climate Stability Shapes Past and Future Habitat Dynamics of Threatened Felidae

Jieming Huang^{1,2} Yang Bai^{1,2*}

1 Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese

2 University of Chinese Academy of Sciences

[Abstract] Climate change is profoundly reshaping global biodiversity patterns. In this study, the MaxEnt model was applied to integrate multi-temporal climate data, including paleoclimate periods (Last Interglacial, LIG; Last Glacial Maximum, LGM; Mid-Holocene, MH), the present, and future scenarios (2041–2060 and 2081–2100), to analyze the evolutionary characteristics of suitable habitats for 24 threatened Felidae species. The results show that Felidae exhibit a distinctive pattern of “contraction during warm periods and expansion during glacial periods,” with the suitable habitat area reaching its peak during the LGM ($2.44 \times 10^7 \text{ km}^2$). The minimum temperature of the coldest month (Bio6) and temperature seasonality (Bio4) are the dominant factors driving their distribution, with a cumulative contribution rate of 62%. The global protected area network covers only 19.15% of the identified long-term stable suitable habitats. This study suggests prioritizing the conservation of climate-resilient refugia and establishing transregional ecological corridors.

[Key words] Felidae; Climate change; Species distribution model; Habitat suitability

引言

全球气候变化正持续重塑生物多样性格局,并深刻影响物种分布范围与生态系统稳定性(Vermeiren, et al., 2020)。在未来气温持续升高的背景下(Bongaarts, 2024) {IPCC, 2021#338}, 气候适宜性空间的动态变化将驱动物种发生收缩、迁移与破碎化,从而显著增加灭绝风险(Scholze, et al., 2006)。

猫科动物作为高营养级捕食者,对生态系统结构具有关键调控作用(Yue, et al., 2024),其分布动态不仅受气候直接影响,还通过气候-植被-猎物级联过程放大响应(Khosravi, et al., 2021)。由于其家域需求大、对栖息地连通性依赖强(Jones and Harris, 2025),猫科物种对气候变化表现出较高敏感性。

第四纪以来的气候波动(如LIG、LGM和MH)深刻影响了物种分布格局。然而,现有研究多集中于单物种或单一时间尺度,缺乏跨古气候—现今—未来的系统分析框架。基于此,本研究利用MaxEnt模型,系统分析猫科动物潜在适生区的时空演变特征,识别长期稳定栖息地,并评估保护空缺。

1 材料和方法

1.1 数据来源

本研究从GBIF和Movbank收集24种受威胁猫科动物分布点,经1km空间稀疏化处理,获得8,554个有效点。本研究参考全球尺度受威胁物种分布研究的变量体系(Huang, et al., 2025),并结合食肉捕食者的生态特性进行筛选。考虑到研究横跨12万年

(LIG) 至本世纪末的长时序尺度, 为确保多时期变量的一致性与生态相关性, 最终选取了11个环境因子, 包括反映热量梯度的年均温 (Bio1)、最热月最高温 (Bio5)、最冷月最低温 (Bio6)、最干季均温 (Bio9) 和最暖季均温 (Bio10), 反映季节波动的温度季节性 (Bio4), 以及反映水分条件的年降水量 (Bio12)、最湿季降水量 (Bio16)、最干季降水量 (Bio18) 和最冷季降水量 (Bio19), 辅以海拔数据 (Ele)。

现今与未来时期气候数据源自WorldClimv2.1; 古气候阶段 (LIG, LGM, MH) 数据源自PaleoClim。未来情景采用SSP2-4.5中等排放路径。本研究从古生物数据库提取了1,469条猫科化石记录, 根据地质年代归纳至对应古气候阶段 (LIG、LGM、MH), 作为历史时期模拟结果的独立验证集。保护区数据源自世界保护区数据库 (WDPA, 2025年9月版), 仅保留陆地保护区范围以聚焦陆生生态系统。

1.2 模型构建

采用MaxEntv3.4.1进行适生区模拟 (75%训练集, 25%测试集, Bootstrap重复10次)。以AUC和TSS评估模型性能 (Allouche, et al., 2006)。本研究获得的猫科动物TSS均值为 0.88 ± 0.007 , 平均AUC为0.876, 表明模型预测精度极高。

基于10%训练存在阈值, 本研究确定0.338为潜在适生区划分界限 (Radosavljevic and Anderson, 2014)。适宜性 ≥ 0.338 划分为“潜在适生区”, 反之则为“非潜在适生区”。为量化不同气候时期潜在适生区在研究区域内的相对变化程度, 进一步计算潜在适生区占比, 其计算公式2-1:

$$P = \frac{A}{A + A_u} \times 100\% \quad (2-1)$$

其中, P表示潜在适生区占比 (%), A为二值化后潜在适生区的面积, A_u 为二值化后非适生区面积。该过程为后续时空变化分析与适生性的空间稳定性识别提供基础数据支持。在分析猫科潜在适生区的稳定性时, 我们将在LIG、LGM、MH、Current及两个未来情景下均保持适宜的区域定义为长期稳定适生区。将两个及以上时期保持适宜的区域定义为稳定适生区。

2 结果

2.1 猫科受威胁物种潜在适生区的时空分布特征

猫科动物适生区在不同气候阶段表现出显著波动。LIG时期适生区较小 ($1.24 \times 10^7 \text{ km}^2$), 占研究区总面积的9.25%, 空间分布呈现高度碎片化, 主要局限于撒哈拉以南非洲、南美洲中西部及东南亚群岛。LGM时期显著扩张至最大 ($2.44 \times 10^7 \text{ km}^2$), 占比达15.63%, 呈现高度连片化。MH时期再次收缩。现今适生区有所恢复, 而未来表现为短期稳定-远期收缩趋势, 到2081年至2100年降至 $1.07 \times 10^7 \text{ km}^2$ (占研究区面积的7.99%)。

适生区在各时期之间经历明显扩张与收缩交替。LIG至LGM阶段以扩张为主, 而LGM至MH阶段显著收缩。现今至未来早期变化相对稳定, 但远期阶段呈现明显收缩趋势, 且主要发生于分布边缘区域。

猫科适生区质心在古气候阶段迁移幅度较大 (图1), 表现为显著的周期性移动; 而在现今及未来阶段迁移幅度减小, 整体趋于稳定。在LIG至LGM阶段, 质心向西南方向剧烈迁移 (南移 6.80° , 经度西移 6.49°)。从末次冰盛期 (LGM) 到全新世中期 (MH), 质心转向西北方向回移 (北移 3.56° , 西移 3.12°), 显示出冰期向间冰期转换阶段的周期性调整。

从MH到现今阶段, 质心表现出向东南方向的周期性回移 (南移 7.11° , 东移 7.55°), 其迁移幅度与古气候阶段相当。现今至2041-2060年阶段, 质心向东北方向移动 (北移约 4.18° , 东移约 7.09°); 随后在2081-2100年阶段略向西南回移 (南移 3.00° , 西移 1.71°)。相较之下, 未来情景下的质心移动轨迹趋于平缓, 位移幅度远小于古气候时期。猫科潜在适生区质心呈现出古气候时期剧烈波动、现今-未来阶段相对平缓的空间迁移特征。

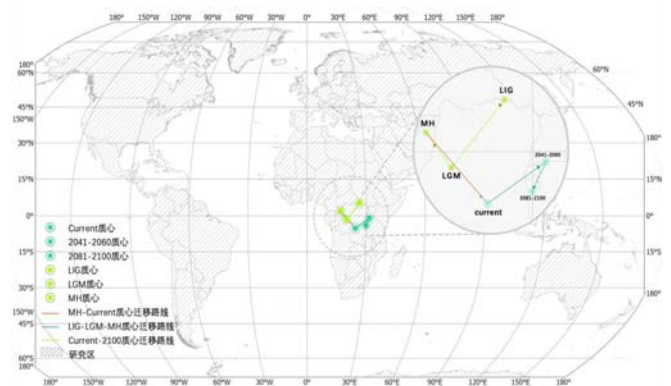


图1 猫科质心迁移路线图

研究通过多时期空间叠加分析 (图2), 识别出猫科不同时间跨度的稳定适生区以及空间演变热点。结果显示, 猫科的古气候稳定适生区在空间上呈现出相对集中但与现今格局部分分离的特征。长期稳定适生区面积约为 $5.67 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占比极低, 主要分布于低纬度热带森林边缘及地形复杂的山地过渡带 (如安第斯山脉东麓、刚果盆地周边及东南亚部分岛屿), 呈现核心区与离散斑块复合的结构。

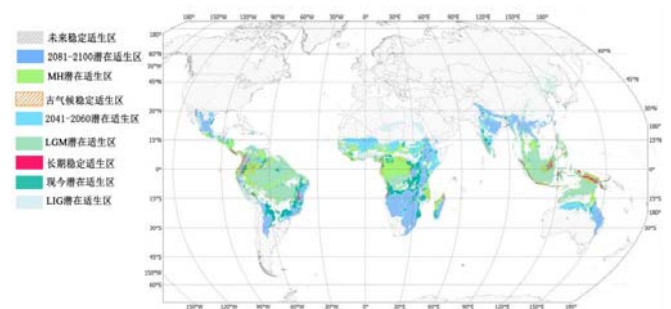


图2 猫科适生区空间稳定性热点图

环境变量分析表明, Bio6 (33.3%) 和 Bio4 (28.7%) 为最主要驱动因子, 其次为降水相关变量。猫科动物对低温具有明显限制, 对温度与降水存在适宜区间。

响应曲线分析表明 (图3), 在最冷月最低温 (Bio6) 梯度上,

适宜性随温度升高剧烈上升,并在12°C左右达到峰值,呈现明显的单峰型曲线结构。低于5°C时适宜性迅速下降,表明猫科对极端低温具有明显限制。温度季节性(Bio4)表现出相对缓慢的负相关趋势,在100°C-600°C的区间内具有较高的适宜性,显示其对中等程度季节波动具有一定耐受性。最湿季降水量(Bio16)呈现单峰型结构,在约400mm附近出现适宜性峰值,随后趋于平缓,适宜区间约为300mm-2500mm,表明猫科偏好水分供应充足但不过度湿润的环境。年平均气温(Bio1)表现出典型的单峰响应,在15°C-25°C的区间适宜性最高,温度过高或过低均导致适宜性下降,说明其对热量条件存在较为明确的最适区。

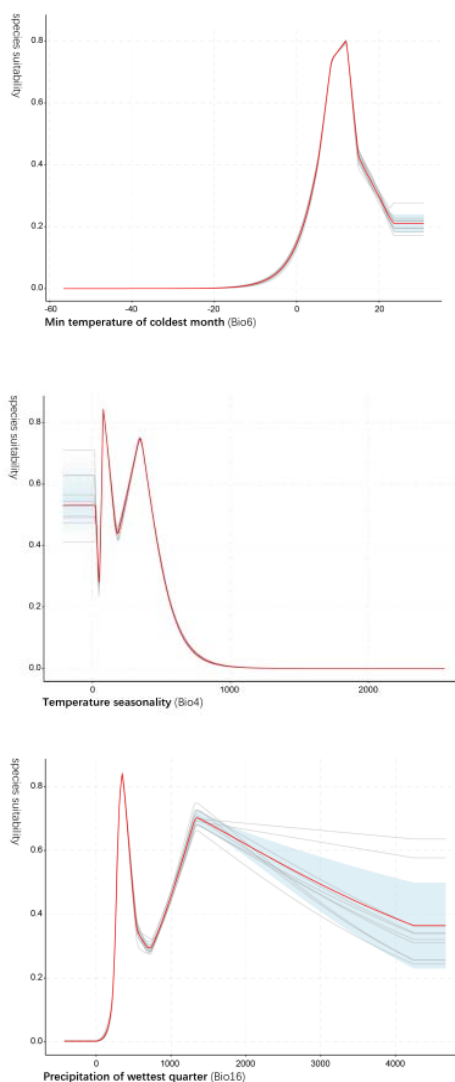


图3 影响受威胁猫科动物潜在生境适宜性的主要气候变量的响应曲线

空间叠加分析显示(图4),当前全球保护区网络(WDPA)对猫科动物长期稳定适生区的覆盖不足。全球陆地保护区总面积约为 $2.78 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。在识别出的 $5.67 \times 10^9 \text{ km}^2$ 长期稳定适生区中,仅有约 $1.09 \times 10^5 \text{ km}^2$ 位于现有保护区内,保护覆盖率为19.15%。这意味着超过80%具备极高生态韧性的关键避难所处于保护体系

之外,且空间上呈明显破碎化。

3 讨论

本研究表明,猫科动物在冰期表现出显著扩张趋势,这主要与开阔景观增加及猎物资源提升有关,从而产生生态位释放效应。相反,在暖湿时期,森林扩张可能降低捕食效率,导致适生区收缩。在末次盛冰期(LGM)冷干气候下,全球森林覆盖率大幅下降,取而代之的是广袤的稀树草原、荒漠灌丛及开阔景观(Cowling, et al., 2020, Ricankova, et al., 2014)。对于多数受威胁猫科物种而言,这种景观重塑非但未构成生存屏障,反而通过生态位释放效应拓宽了其利用空间。一方面,猫科动物具备较强的生境适应性,能够利用开阔或半干旱生境进行大尺度扩散(Bashir, et al., 2023, Tambling, et al., 2018);另一方面,冰期景观的连通性增强了大型有蹄类猎物的迁徙与繁衍,为处于高营养级的猫科捕食者提供了充足的能量支撑(Mann, et al., 2019)。相反,在末次间冰期(LIG)及中全新世(MH)等暖湿时段,密闭森林的扩张虽然增加了初级生产力,但可能限制了部分偏好开阔生境猫科物种的捕食效率,导致其适生区向赤道核心区收缩(Gomes, et al., 2020, Wei, et al., 2024)。

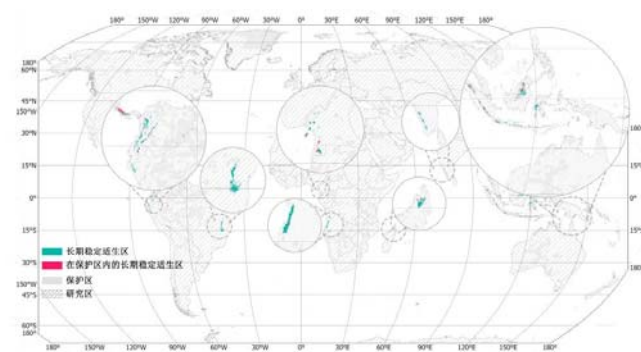


图4 保护空缺分析图

本研究证实,猫科动物的潜在分布不仅受气候因子的直接生理约束,更通过“气候-植被-猎物”的级联路径间接体现(Ripple, et al., 2024, Khosravi, et al., 2021)。其中,最冷月最低温(Bio6)不仅代表热生理耐受极限(Singh, et al., 2025),还通过限制寒冷季节猎物活动与分布范围间接塑造其潜在适生区边界;温度季节性(Bio4)则可能通过改变猎物季节性活动节律和资源可获得性,影响捕食效率与能量收益(Johansson, et al., 2022),从而导致空间分布调整;而Bio16(最湿季降水量)主要通过调控植被生产力与猎物密度(Ripple, et al., 2024),间接影响捕食者的栖息地稳定性和空间连通性。

长期稳定适生区作为气候避难所,在维持物种持续存在方面具有关键作用。这些区域多位于地形复杂地区,可通过垂直气候梯度缓冲气候变化(Hoffren, et al., 2022)。目前保护区对这些区域覆盖不足,反映出有保护体系在应对长期气候变化方面的局限。

因此,未来保护策略应优先识别并保护气候避难所,同时通过构建生态廊道提升栖息地连通性,以增强猫科动物对气候变

化的适应能力。

4 结论

猫科动物潜在适生区在长时序气候变化下呈现“暖缩冰扩”动态格局,未来将显著收缩。长期稳定适生区主要分布于低纬山地过渡带,但面积有限且破碎化明显。然而,约80.85%的长期稳定适生区未被现有保护体系覆盖,应优先保护气候避难所并加强生态连通性,以应对未来气候变化带来的挑战。

[基金项目]

本研究得到国家自然科学基金(编号:32471735)的资助。

[参考文献]

- [1] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223–1232.
- [2] Bashir T, Bhattacharya T, Poudyal K, et al. Wild Felid Diversity, Space Use and Activity Patterns in the Eastern Himalaya, India[J]. *Ecolgies*, 2023, 4(1): 41–54.
- [3] Bongaarts J. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report[J]. *Population and Development Review*, 2024, 50(2): 577–580.
- [4] Cowling RM, Potts AJ, Franklin J, et al. Describing a drowned Pleistocene ecosystem: Last Glacial Maximum vegetation reconstruction of the Palaeo-Aguhas Plain[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 235.
- [5] Gomes SD, Fletcher WJ, Rodrigues T, et al. Time-transgressive Holocene maximum of temperate and Mediterranean forest development across the Iberian Peninsula reflects orbital forcing[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2020, 550.
- [6] Hoffren R, Miranda H, Pizarro M, et al. Identifying the Factor behind Climate Diversification and Refugial Capacity in Mountain Landscapes: The Key Role of Forests[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7).
- [7] Huang Z, Wang Q, Wang J, et al. Integrating biodiversity hotspots, ecological gradients, and ecosystem services for transboundary conservation in the Gaoligong Mountains[J]. *Conservation Biology*, 2025: e70133.
- [8] Johansson O, Mishra C, Chapron G, et al. Seasonal variation in daily activity patterns of snow leopards and their prey[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1).
- [9] Jones EM, Harris NC. Forecasting habitat suitability across large carnivore ranges with climate and land use change[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 177.
- [10] Khosravi R, Hemami M-R, Malakoutikhah S, et al. Prey availability modulates predicted range contraction of two large felids in res-

ponse to changing climate[J]. *Biological Conservation*, 2021, 255.

[11] Mann DH, Groves P, Gaglioti B, V, et al. Climate-driven ecological stability as a globally shared cause of Late Quaternary megafauna extinctions: the Plaids and Stripes Hypothesis[J]. *Biological Reviews*, 2019, 94(1): 328–352.

[12] Radosavljevic A, Anderson RP. Making better MAXENT models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation[J]. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(4): 629–643.

[13] Ricankova VP, Robovsky J, Riegert J. Ecological Structure of Recent and Last Glacial Mammalian Faunas in Northern Eurasia: The Case of Altai–Sayan Refugium[J]. *PloS One*, 2014, 9(1).

[14] Ripple WJ, Whalen DN, Wolf C, et al. Trophic cascades and climate change[J]. *Food Webs*, 2024, 41.

[15] Scholze M, Knorr W, Arnell NW, et al. A climate-changerisk analysis for world ecosystems[J]. *PNAS*, 2006, 103(35): 13116–13120.

[16] Singh S, Thornton D, Welfelt L. Temperature driven density gradient of two congeneric felids reveals contrasting responses to climate change at a range margin[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1).

[17] Tambling CJ, Avenant NL, Drouilly M, et al. The Role of Mesopredators in Ecosystems: Potential Effects of Managing Their Population on Ecosystem Processes and Biodiversity[C]//G. I. H. KERLEY, S. L. WILSON, D. BALFOUR. Livestock predation and its management in South Africa: a scientific assessment. Centre for African Conservation Ecology, Nelson Mandela University, 2018: 205–227.

[18] Vermeiren P, Reichert P, Schuwirth N. Integrating uncertainty in prior knowledge regarding ecological preferences into multi-species distribution models: Effects of model complexity on predictive performance[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 420.

[19] Wei L, Li J, Zhou Y. Holocene biome reconstruction on the Chinese loess plateau based on pollen[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 334.

[20] Yue Y, Wang Y, Ye Z, et al. Ecological and Public Advantages of a Dual Flagship Strategy: Giant Panda and Snow Leopard[J]. *Diversity*, 2024, 16(2).

作者简介:

黄洁明(2000—),女,汉族,湖南株洲人,研究生,硕士,研究方向:景观生态。

*通讯作者:

白杨(1982—),男,汉族,四川省南充人,博士,研究员,研究方向:景观生态。