

大小兴安岭地温及其与东北虎 生境适宜性的关系

郭媛^{1#} 常旭东^{1#} 刘应竹¹ 张士芳¹ Anna Yachmennikova²
Ivan Kotlov² Viatcheslav Rozhnov² 魏丹¹ 李海军¹
付晓宇¹ 朱世兵^{1*}

1 黑龙江省科学院自然与生态研究所 哈尔滨 150040; 2 俄罗斯科学院生态与进化研究所 莫斯科 119071

摘要: 为探究东北虎 (*Panthera tigris altaica*) 历史分布区大、小兴安岭的地温情况与东北虎生境适宜性的关系, 验证“地温通过影响植被分布与生长, 影响草食类动物空间分布, 从而影响东北虎生境适宜性”的理论假设, 本文利用 2022 年大、小兴安岭地区的地温反演数据, 采用逐像素分析法, 系统研究东北虎历史分布区地温分布的空间格局, 并探究其与东北虎生境适宜性的内在联系。研究表明, 研究区域内的低温区域主要集中在大兴安岭北部和西部及小兴安岭中部海拔较高区域, 且大兴安岭的低温区域比小兴安岭温度低、范围广; 小兴安岭地区, 东北虎生境适宜性与地温呈正相关关系, 具体表现为年均地温和生长季均温较低区域, 东北虎不适宜生境面积占比最多, 同时随着地温的升高, 东北虎次适宜生境和适宜生境所占面积有增大趋势, 即东北虎次适宜和适宜生境同地温较高的区域相关度较大, 较高的地温是更适宜东北虎的生存条件之一。此结果可以为东北虎历史分布区栖息地恢复、种群恢复及生态廊道建设提供理论依据和基础数据, 对我国东北虎历史分布区野生东北虎种群恢复和保护具有实际参考价值。

关键词: 东北虎; 大兴安岭; 小兴安岭; 地温; 生境适宜性

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 04-496-11

Land surface temperature and its relationship with Amur Tiger habitat suitability in the Greater and Lesser Khingan Mountains, China

GUO Yuan^{1#} CHANG Xu-Dong^{1#} LIU Ying-Zhu¹ ZHANG Shi-Fang¹ Anna Yachmennikova²
Ivan Kotlov² Viatcheslav Rozhnov² WEI Dan¹ LI Hai-Jun¹ FU Xiao-Yu¹ ZHU Shi-Bing^{1*}

1 Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China;

2 Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow 119071, Russia

基金项目 黑龙江省科学院青年创新基金项目 (No. CXMS2022ZR03), 黑龙江省科学院科技成果转化专项 (No. CGZH2025ZR08);

* 通信作者, E-mail: cpu3200@126.com;

共同第一作者 郭媛, 女, 助理研究员; 研究方向: 动物生态学; E-mail: guoyuan010189@126.com;

常旭东, 男, 实习研究员; 研究方向: 动植物地理信息; E-mail: 2506186860@qq.com。

收稿日期: 2024-07-09, 修回日期: 2025-09-15 DOI: 10.13859/j.cjz.202624161 CSTR: 32109.14.cjz.202624161

Abstract: [Objectives] This study aims to explore the relationship between the land surface temperature of the historical distribution area of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*) and the habitat suitability in the Greater and the Lesser Khingan Mountains. In addition, it aims to test the theoretical hypothesis that land surface temperature influences the spatial distribution of herbivores through its impact on the distribution and growth of vegetation, thereby affecting the habitat suitability of Amur Tigers. **[Methods]** We used the land surface temperature inversion data of the Greater and the Lesser Khingan Mountains in 2022 to systematically study the land surface temperature distribution pattern in historical distribution area of Amur Tigers and explored the internal relationship between land surface temperature distribution and habitat suitability with the pixel-by-pixel analysis method. **[Results]** The low temperature area in the study area was mainly concentrated in the north and west of the Greater Khingan Mountains and the high-altitude area in the middle of the Lesser Khingan Mountains. Moreover, the low temperature area in the Greater Khingan Mountains had lower temperature and wider distribution than that in the Lesser Khingan Mountains (Figs. 2 and 3). There was a correlation between habitat suitability of Amur Tigers and land surface temperature in the Lesser Khingan Mountains. Specifically, the unsuitable habitats for Amur Tigers were mainly in the area with low average land surface temperature and lower average temperature during the growing season. As the land surface temperature increased, the areas of sub-suitable habitats and suitable habitats increased. The sub-suitable habitats and the suitable habitats of Amur Tigers had a greater correlation with the region with higher land surface temperature, and higher land surface temperature was one of the more suitable living conditions for Amur Tigers. **[Conclusion]** The results can provide a theoretical basis and basic data for habitat restoration, population restoration, and ecological corridor construction in the historical distribution area of Amur Tigers, and have practical reference value for the population restoration and protection of wild Amur Tigers in the historical distribution area of China.

Key words: Amur Tiger; Greater Khingan Mountains; Lesser Khingan Mountains; Land surface temperature; Habitat suitability

东北虎 (*Panthera tigris altaica*), 是现存虎亚种中体型最大、生存地理位置最北的猫科动物 (马逸清 1983), 被列入国家一级重点保护野生动物名录, 主要分布于俄罗斯远东地区、中国东北和朝鲜半岛 (Wang et al. 2015)。在 20 世纪中期之前, 东北虎在我国大兴安岭、小兴安岭、完达山地区、老爷岭、张广才岭和长白山等地均有分布 (马逸清 1983)。而现今东北虎主要在完达山东部、老爷岭及张广才岭南部分布。

由于东北地区的经济发展 (Goodrich et al. 2010, 王希亮 2017)、道路建设和过度捕杀 (于立忠等 2017) 等人为干扰活动, 无法避免地损害植被、扰动地表层, 破坏东北地区的生态环

境, 东北虎的猎物种群数量大幅下降 (达尔曼 2006, 李冰 2010), 致使东北虎的栖息地质量降低、面积缩减, 从而导致东北虎种群数量急剧下降 (高中信等 1996, 于孝臣等 2000, 王凤昆等 2022)。因此, 探究与东北虎生境适宜性相关的生态因子, 揭示其影响机制和内在机理, 为恢复东北虎历史分布区提供理论依据, 具有一定的紧迫性和实际意义。

野生大型肉食动物的分布与其主要捕食对象的空间分布相关, 东北虎的生境适宜性与有蹄类动物马鹿 (*Cervus elaphus*)、狍 (*Capreolus pygargus*) 及野猪 (*Sus scrofa*) 等的种群数量和分布关系密切。而根据食物链、食物网关系, 东北地区野生食草动物的种群数量、空间分布

和环境容纳量与森林植物群落的生产力及空间结构息息相关。温度作为影响植被生长的重要因素，是影响植物的存活（Klanderud and Totland 2005, Hatfield and Prueger 2015）、生长（Drake et al. 2015, Fu et al. 2015, 威德康等 2017）、形态特征（Moe and Heins 1990, Reynolds et al. 2016）、生理特征（Walker et al. 2013, Fu et al. 2015, Huang et al. 2016）及分布情况（Andrews et al. 2001）的关键因子之一。研究表明，温度的变化对有蹄类动物的栖息地分布和适宜生境的变化都有一定的影响（吕佳佳 2009, 陈刘阳 2022），季节温度、年温差和植被类型是影响有蹄类动物分布的重要环境因子（冯彬 2023）。土壤温度与地表温度关系密切，且地表温度对土壤温度影响显著（Zhang et al. 2021），故而笔者提出“地温通过影响植被类型、分布及生产力，直接影响草食动物的空间分布格局，从而间接影响东北虎等大型食肉动物栖息地质量”的理论假设。为验证该假设，本研究以东北虎历史分布区——大兴安岭和小兴安岭为研究范围，通过对该区域内 2022 年地表温度进行反演计算，分析研究区域地温状况，并集合朱世兵等（2023）的前置研究，即对小兴安岭地区东北虎生境适宜性的评价，探究地温与东北虎生境适宜性的关系，为东北虎历史分布区种群恢复、生境修复及生态廊道建设提供理论依据和基础数据。

1 研究区域概况

本研究以东北虎历史分布区——大兴安岭和小兴安岭为研究区域，为方便分析，将其作为一个整体进行地温反演（图 1）。

大、小兴安岭地处我国东北地区最北部（46°00′~52°58′N），南北长 900 km，东西跨越 1 400 km，沿东北和西北方向纵贯全区的东部和西部，嫩江河谷插入中间，形成东、西高，中间略低的地势。大兴安岭中段（阿尔山、伊尔施至卓尔河源）海拔 1 000~1 500 m，往北逐渐下降到海拔 500~600 m（满归至古莲段）。

大兴安岭为不对称山地，西缓东陡。西坡为平缓的山地丘陵；东坡陡峭，河谷深切，大量物质被带入嫩江河谷平原。小兴安岭地形和缓，水系多呈树枝状，与大兴安岭地貌明显不同，海拔约 500~600 m，高于海拔 800 m 的山峰很少（金会军等 2006）。大兴安岭主要以寒温带植物区系成分为主，森林类型比较单一，主要以针叶林、针阔混交林和阔叶林为主，如樟子松（*Pinus sylvestris*）、白桦（*Betula platyphylla*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、兴安杜鹃（*Rhododendron dauricum*）、笃斯越橘（*Vaccinium uliginosum*）等，该区分布有兽类 56 种，鸟类 205 种，包括貂熊（*Gulo gulo*）、棕熊（*Ursus arctos*）、驼鹿（*Alces alces*）、马鹿、狍、黑嘴松鸡（*Tetrao parvirostris*）、雪兔（*Lepus timidus*）等（张明海等 1998）；小兴安岭主要以北温带植物区系成分为主，代表性物种如红松（*Pinus koraiensis*）、水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）、胡桃楸（*Juglans*

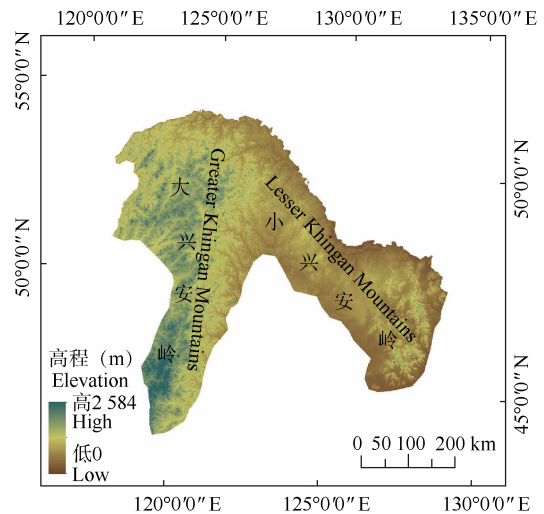


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Diagram of the study area

基于 MODIS 遥感数据，人工截取大兴安岭和小兴安岭范围。下载地址为地理空间数据云（<https://www.gscloud.cn/home>）。

Extents of the Greater Khingan Mountains and Lesser Khingan Mountains manually delineated based on remote sensing data MODIS, from Geospatial Data Cloud (<https://www.gscloud.cn/home>).

mandshurica)、紫椴 (*Tilia amurensis*) 等, 该区分布有兽类 64 种, 鸟类 166 种, 两栖动物 9 种, 爬行动物 11 种, 代表物种包括黑熊 (*Ursus thibetanus*)、猞猁 (*Lynx lynx*)、紫貂 (*Martes zibellina*)、马鹿、豹、野猪、花尾榛鸡 (*Bonasa bonasia*)、东北林蛙 (*Rana dybowskii*) 等。

2 研究方法

2.1 地温数据获取

本研究的地表温度数据 (land surface temperature, LST) 来源于中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) MOD11A2 (<https://www.earthdata.nasa.gov>)。

MOD11A2 版本提供平均 8 d 的每像素陆地表面温度 (land surface temperature, LST) 和发射率 (emissivity, E), 在 1 200 km × 1 200 km 网格中具有 1 km 的空间分辨率。MOD11A2 中的每个像素值都是在 8 d 内收集到的所有对应的 LST 像素的算数平均值。之所以选择 8 d 的合成周期, 是因为该周期是 Terra 卫星观测数据和 Aqua 卫星观测数据平台地面轨道重复周期的两倍。除白天和夜间地表温度波段外, 还提供了相关的质量控制评估、观测时间、观测天顶角和晴空覆盖以及 31 和 32 波段的土地覆盖类型的发射率。本研究选取 MOD11A2 日

间观测数据及质量控制图层 (LST_Day_1 km、QC_day) 与夜间观测数据及质量控制图层 (LST_Night_1 km、QC_Night) 进行合成。

2.2 东北虎生境适宜性

由于课题组前期对小兴安岭地区进行了详细的生境考察, 为了解地温同东北虎生境适宜性的关系, 故选择小兴安岭地区分析两者之间的联系, 且延用朱世兵等 (2023) 对东北虎生境适宜性的划分标准及结果数据, 即不适宜、次适宜和适宜三种生境类型。该研究以我国小兴安岭及俄罗斯联邦阿穆尔州和犹太自治州为整体研究区域, 利用该区域内东北虎出现点数据, 采用 MaxEnt 模型, 以植被、气候、地形和积雪 4 类环境数据为基础, 分析自然环境条件下小兴安岭东北虎潜在生境的适宜性及空间分布 (朱世兵等 2020)。本研究延用其对于东北虎生境适宜性的划分, 并选取我国小兴安岭部分的研究为东北虎生境适宜性的结果。

2.3 数据处理

本文数据处理利用 NASA 网站 (<https://www.earthdata.nasa.gov>)提供的 MODIS 投影转换工具 (MODIS Reprojection Tool, MRT) 对所用 MOD11A2 进行数据格式转换、数据投影以及数据镶嵌。参考已有研究 (Guo et al. 2021), 利用 MODIS 质量控制层 (quality control, QC) 对地表温度进行筛选 (表 1)。

表 1 MODIS 地表温度质量控制标志及含义
Table 1 MODIS land surface temperature quality control flags and their meanings

位数 The number	名称 Name	含义 Meaning
1 & 0	强制性 QA 标志 Mandatory QA flags	00—LST (地表温度) 生产质量好, 无需进一步质量检查
		00—LST produced, good quality, no further quality assessment required
		01—LST 生产质量一般, 建议进行更详细的质量检查
		01—LST produced, nominal quality; further detailed quality assessment is recommended
		10—由于云的影响, 未生成 LST
		10—LST not produced due to cloud contamination
		11—未生成 LST, 主要原因不是云
3 & 2	数据质量标志 Data quality flag	11—LST not produced for reasons other than cloud contamination
		00—数据质量好 00—Good data quality
		01—其他质量问题 01—Other quality issues
		10—待定 (暂无判定结果) 10—To be determined (no decision available)
		11—待定 (暂无判定结果) 11—To be determined (no decision available)

续表 1

位数 The number	名称 Name	含义 Meaning	
5 & 4	辐射误差标志 Data quality flag	00—平均辐射误差小于或等于 0.01	00—Average emissivity error ≤ 0.01
		01—平均辐射误差小于或等于 0.02	01—Average emissivity error ≤ 0.02
		10—平均辐射误差小于或等于 0.04	10—Average emissivity error ≤ 0.04
		11—平均辐射误差大于 0.04	11—Average emissivity error > 0.04
7 & 6	LST 误差标志 Data quality flag	00—LST 误差不超过 1K (开尔文)	00—LST error ≤ 1 K (Kelvin)
		01—平均 LST 误差不超过 2K	01—Average LST error ≤ 2 K
		10—平均 LST 误差 不超过 3K	10—Average LST error ≤ 3 K
		11—平均 LST 误差 大于 3K	11—Average LST error > 3 K

2.3.1 强制性质量保证 (quality assurance, QA) 标志 (第 1 位和第 0 位) 需为质量良好或质量一般, 即 LST 生产质量优良 (无需进一步质量检查) 或存在其他质量问题但仍可使用; 要排除由于云覆盖或其他原因未生成 LST 的像元。

2.3.2 数据质量标志 (第 3 位和第 2 位) 需为质量良好的数据, 即影像数据本身不存在明显质量问题。

2.3.3 辐射误差标志 (第 5 位和第 4 位) 需为平均辐射误差不超过 0.02, 即仅保留平均辐射误差小于或等于 0.01, 或介于 0.01 ~ 0.02 之间的像元。

2.3.4 LST 误差标志 (第 7 位和第 6 位) 需为地表温度误差不超过 2 K (开尔文), 即仅保留误差在 1 K 以内或介于 1 ~ 2 K 之间的像元。

将提取的 MODIS LST 有效像元单位用开尔文转换为摄氏度, 转换公式为 $C = 0.002T \times 0.02 - 273.15$, 式中: C 是摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$), T 代表绝对温度 (以开尔文为单位), 0.02 是将科学数据集值转换为以开尔文为单位的实际 LST 值的比例系数。

采用 ArcGis 10.2 软件解读大小兴安岭地温的空间分布情况, 并使用面积制表工具 (Tabulate Area) 探究东北虎生境适宜性与地温的关系, 图表制作在 Excal 2016 和 Sigmaplot 14.0 内完成。

3 结果

3.1 东北虎历史分布区地温空间分布格局和年际变化

大兴安岭和小兴安岭地区 2022 年年均地

温均较低, 均存在部分年均地温低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的区域。且与小兴安岭相比, 大兴安岭地区地温较低区域范围更大, 温度更低, 年均地温低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的区域主要集中在大兴安岭北部和西部及小兴安岭中部区域, 其中最低年均地温为 -6.73 $^{\circ}\text{C}$, 出现在大兴安岭西北部区域; 而年均地温高于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的区域则集中在大兴安岭的东南部和小兴安岭南部, 及东部低海拔区域, 其中最高年均地温为 7.25 $^{\circ}\text{C}$, 出现在大兴安岭西南部 (图 2)。

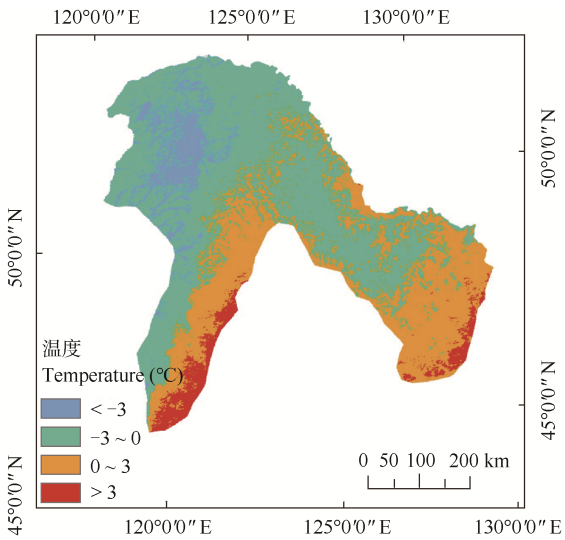


图 2 东北虎历史分布区 2022 年度年均地温 ($^{\circ}\text{C}$)
Fig. 2 Annual average land surface temperature in the historical distribution area of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*) in 2022

基于 MODIS 遥感数据, 人工截取大兴安岭和小兴安岭范围。下载地址为地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/home>)。Extents of the Greater Khingan Mountains and Lesser Khingan Mountains manually delineated based on remote sensing data MODIS, from Geospatial Data Cloud (<https://www.gscloud.cn/home>).

综合而言, 与小兴安岭地区相比, 大兴安岭地区年均地温低温范围更大, 温度更低, 且不同区域的年均地温的差值更大。

由每月地温统计可知, 最低地温出现在 1 月份, 大、小兴安岭地区最低为 -35.97°C , 最高温出现在 7 月, 为 36.43°C ; 从 3 月起大兴安岭东南部和小兴安岭南部零星区域地温上升到 0°C 以上, 4 月时除大兴安岭北部和西部高海拔区域地温仍低于 0°C 外, 大、小兴安岭的大部分区域地温均高于冰点; 5~9 月, 大、小兴安岭地温均高于 0°C ; 10 月大、小兴安岭北部地区及南部零星高海拔地区地温降至 0°C 以下。大、小兴安岭全年地温温差最高为 56.76°C , 最低为 32.61°C (图 3)。

3.2 东北虎生境适宜性与地温的关系

小兴安岭区域年均地温、生长季地温及东北虎生境适宜性见图 4。该区域总面积 $7\,296.921\text{ km}^2$, 年均温为 $-2\sim 4^{\circ}\text{C}$, 其中年均温 0°C 的区域面积最大, 占总面积的 46.63% , 其次为 1°C 区域和 2°C 区域, 分别占总面积的 25.08% 和 16.26% ; 年均温在 0°C 以上的区域占 46.93% , 而 0°C 以下区域仅占 6.45% , 即研究区域有 93.56% 的区域年均地温在 0°C 以上, 低温主要集中在东北部、北部和西北部的部分区域 (图 4)。

东北虎生境适宜性在相同的年均地温区域分布比例不同, 东北虎不适宜分布区在 -2°C 区域所占比例最大, 高达 99.35% , 次适宜和适宜分布区所占比例之和不足 1% , 但随着年均地温的增加, 次适宜和适宜分布区面积占比均有递增趋势, 且在 4°C 区域达到最高, 其中东北虎次适宜分布区面积占比高达 52.99% , 适宜分布区面积占比达 17.04% (图 5)。随着年均地温的变化, 东北虎不同生境适宜性区域的面积占比变化趋势也存在差异, 不适宜生境和次适宜生境面积占比均在年均地温为 0°C 区域内达到峰值, 而适宜生境面积占比在年均地温为 2°C 时到达峰值 (图 6)。

小兴安岭地区生长季为 5~9 月份, 平均地

温范围为 $12\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。东北虎生境适宜性在相同生长季平均地温 (以下称生长季均温) 区域的分布比例不同, 其中生长季均温 12°C 区域内, 东北虎不适宜生境面积占比最高, 达 99.39% , 次适宜和适宜生境占比之和不足 1% , 但随生长季均温的增长, 次适宜和适宜生境的面积占比均呈增加趋势, 其中次适宜生境所占比例在生长季均温 16°C 区域达到最高, 为 33.51% , 适宜生境所占比例在生长季平均温 17°C 区域达到最高, 为 16.42% , 且两类适宜性分布区面积占比在达到峰值后随温度增加均出现小幅度下降 (图 7)。在不同的生长季均温内, 东北虎生境适宜性的面积占比也存在差异 (图 8), 在 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$ 区间, 不适宜生境占比最高, 其次是次适宜生境, 而适宜生境面积占比最低, 不适宜生境面积占比峰值出现在 14°C 区域; 随着生长季均温的升高, 在 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ 区间, 适宜生境面积的占比最高, 其次是次适宜生境, 不适宜生境面积占比最低, 适宜生境面积占比峰值出现在 15°C 区域。

4 讨论

4.1 东北虎历史分布区地温空间分布格局和年内变化

气温和地温是山地气候的重要因子, 其分布和变化受多种地理因素影响, 包括地理条件 (经度、纬度等)、海拔高度、地形 (坡度、坡向、破位和凹凸度等) 和植被覆盖类型等。相比气温变化, 地温变化存在一定延后性。研究表明, 土壤温度与气温、海拔、纬度均呈极显著正相关关系 (冯学民和蔡德利 2004)。其中, 海拔是影响地温最重要的因子 (翁笃鸣 1990), Beniston 等 (1997) 和 Beniston (2003) 研究阿尔卑斯山脉气温变化时发现, 温度的变化趋势和异常与研究地点的海拔高度密切相关, 一般来说, 海拔上升 1 km , 气温约降低 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$, 同时气温每升高 1°C , 山区雪线约上升 150 m 。本研究发现, 大、小兴安岭年均地温的低温区域大多出现在纬度偏北区域, 但有部分低纬度

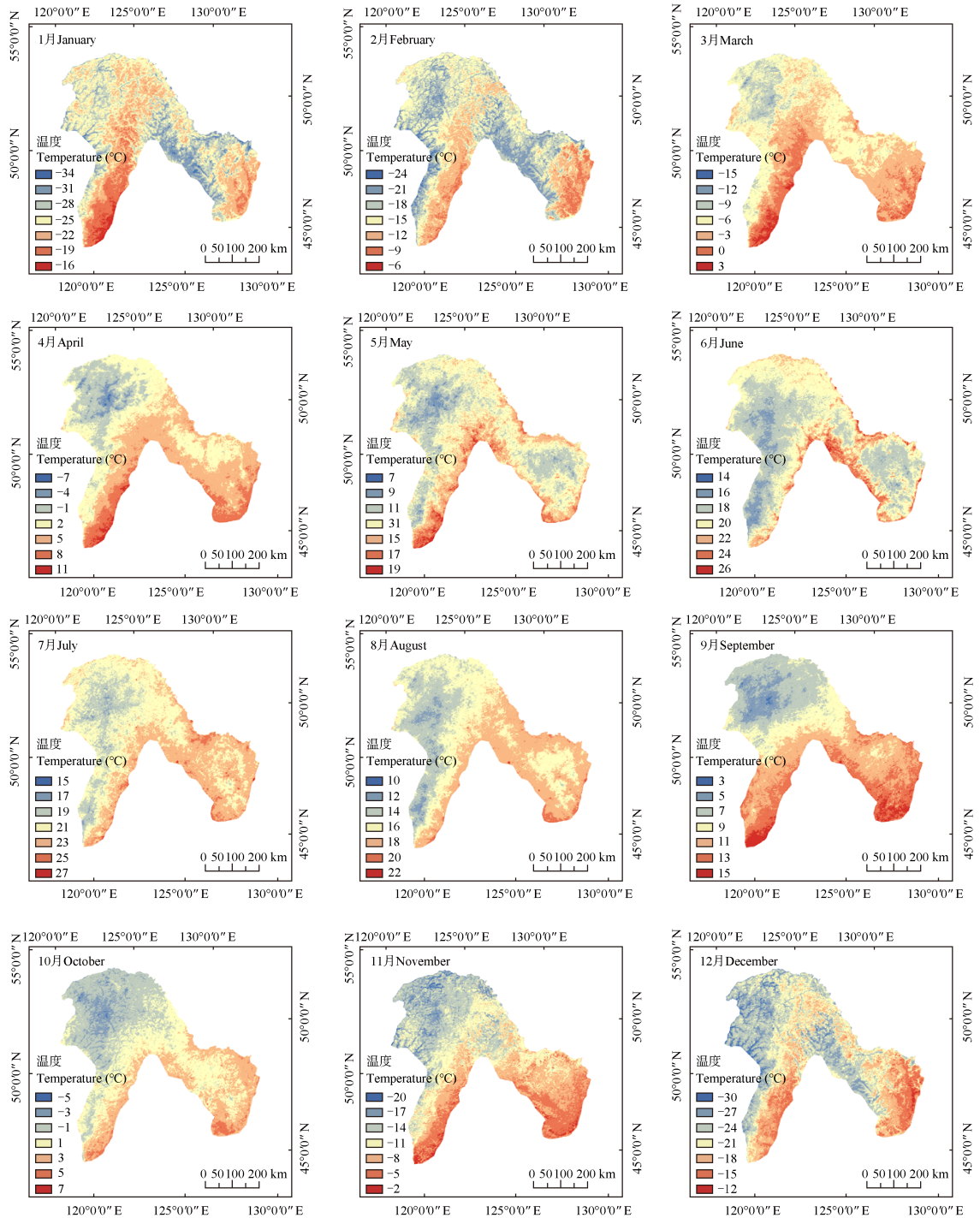


图3 东北虎历史分布区 2022 年 1~12 月冻土地表温度 (°C)

Fig. 3 Land surface temperature of permafrost from January to December 2022 in the historical distribution area of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*)

基于 MODIS 遥感数据, 人工截取大兴安岭和小兴安岭范围。下载地址为地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/home>)。

Extents of the Greater Khingan Mountains and Lesser Khingan Mountains manually delineated based on remote sensing data MODIS, from Geospatial Data Cloud (<https://www.gscloud.cn/home>).

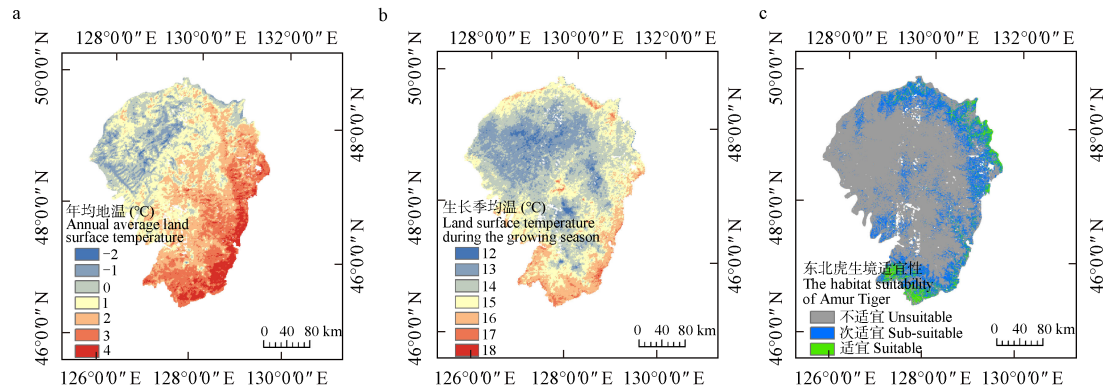


图 4 小兴安岭区域年均地温、地温及东北虎生境适宜性

Fig. 4 Annual average land surface temperature, land surface temperature during the growing season, and habitat suitability of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*) in the Lesser Khingan Mountains

a. 研究区域年均地温情况; b. 研究区域生长季均温情况; c. 研究区域东北虎生境适宜性情况。基于 MODIS 遥感数据, 人工截取大兴安岭和小兴安岭范围。下载地址为地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/home>)。

a. Annual Average Ground Temperature in the Study Area; b. Average Temperature During the Growing Season in the Study Area; c. Habitat Suitability for Amur Tigers in the Study Area. Extents of the Greater Khingan Mountains and Lesser Khingan Mountains manually delineated based on remote sensing data MODIS, from Geospatial Data Cloud (<https://www.gscloud.cn/home>).

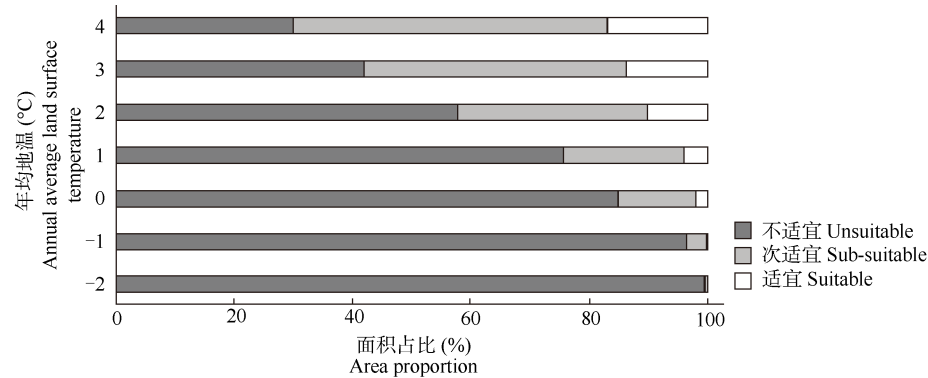


图 5 东北虎不同适宜性生境在相同年均温下的区域面积比

Fig. 5 Proportions of habitats at different suitability levels of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*) in the areas with the same annual average land surface temperatures

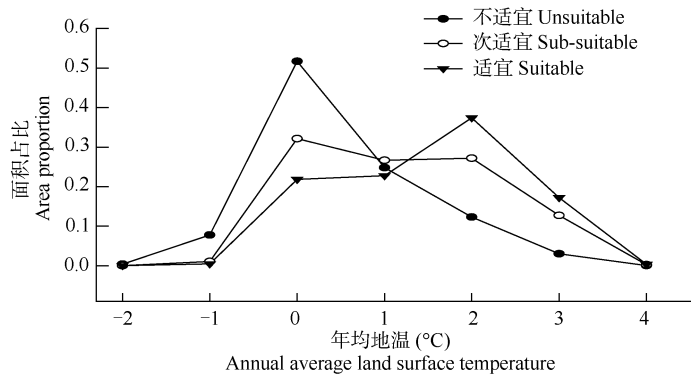


图 6 东北虎不同适宜性生境在不同年均温下的面积比

Fig. 6 Area proportions of habitats with different suitability levels of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*) under the different annual average land surface temperature

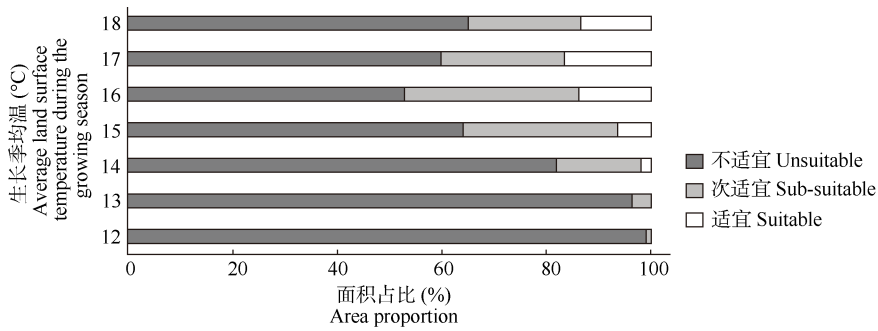


图 7 东北虎不同适宜性生境在相同生长季均温下的区域面积比

Fig. 7 Area proportions of habitats with different suitability levels in the areas with the same average land surface temperatures during the growing seasons of Amur Tigers (*Panthera tigris altaica*)

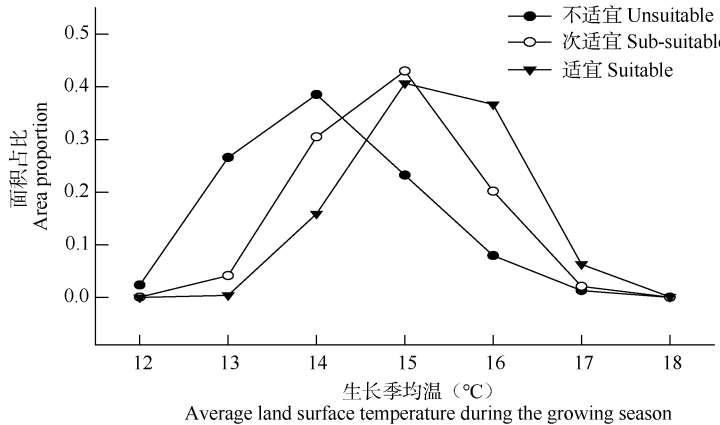


图 8 东北虎不同适宜性生境在不同生长季均温下的面积比

Fig. 8 Area proportions of habitats with different suitability levels of Amur Tiger (*Panthera tigris altaica*) under the different average land surface temperature during the growing season

区域的年均温低于高纬度区域, 出现这种现象的原因可能是低纬度低温区域的高程远高于部分高纬度区域, 且研究发现低温区域的海拔普遍偏高。此现象说明, 在大、小兴安岭地区, 海拔是影响地温空间格局分布的重要因子。同时, 由于大、小兴安岭纬度跨度较大, 地温的空间格局变化也受纬度变化影响, 具体表现为纬度偏高的区域低温区域分布较广。此外, 研究区域地温的年温差和升温速率等也存在差异, 出现该现象的原因可能是不同区域的植被覆盖类型和土地利用类型存在差异。

4.2 东北虎生境适宜性与地温的关系

地温是影响植被类型及其空间格局和生产力的主要因素之一(郭金停等 2017), 而植被

类型与生产力是影响马鹿、狍和野猪等有蹄类食草动物的分布和环境容纳量的重要因素。有蹄类动物作为东北虎的主要捕食对象, 其空间分布和环境容纳量直接影响东北虎食物资源的空间分析, 进而与东北虎生境适宜性息息相关。故依据营养级关系, 地温通过影响植被生长发育, 影响植被生产力和生物量, 从而对有蹄类动物的空间分布格局产生影响, 进而影响东北虎的生境适宜性。有研究表明, 地温是影响植被垂直分布的关键因子(丛毓等 2016), 较低的土壤温度通过影响植被碳水化合物的合成和分配, 影响植被的存活和生长(Körner et al. 1998, Körner and Paulsen 2004), 而地温变化直接影响土壤温度。本研究发现, 地温与东北

虎生境适宜性存在一定的内在联系, 具体表现为随着地温年均温升高, 东北虎适宜生境和次适宜生境所占比例增大, 与此同时东北虎不适宜生境比例有减小趋势。故本研究初步验证了“地温可以通过影响植被生长, 影响草食类动物空间分布, 影响东北虎生境适宜性”的猜想。

为进一步验证此猜想, 本研究引入地温生长季平均温度, 并分析生长季均温与东北虎生境适宜性的关系, 结果显示, 随生长季均温的增长, 次适宜和适宜分布区的面积占比均有增加趋势, 此研究结果与平均地温与东北虎生境适宜性的关系一致。但适宜和较适宜分布区面积占比在达到峰值后随温度增加均呈现小幅度下降趋势, 且不同适宜性生境面积的峰值出现的温度存在差异。东北虎生境适宜性随生长季地温变化趋势与年均温基本相同, 但在 16 ~ 18 °C 的温度范围内表现出下降趋势, 推测出现该现象的原因是植被覆盖类型不同, 生长季高温区域部分可能包括了更多的农田和城镇, 而这类区域由于人为干扰因素无法成为东北虎的适宜生境。

参 考 文 献

- Andrews M, Raven J A, Sprent J I. 2001. Environmental effects on dry matter partitioning between shoot and root of crop plants: relations with growth and shoot protein concentration. *Annals of Applied Biology*, 138(1): 57–68.
- Beniston M. 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59(1): 5–31.
- Beniston M, Diaz H F, Bradley R S. 1997. Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change*, 36(3): 233–251.
- Drake J E, Aspinwall M J, Pfautsch S, et al. 2015. The capacity to cope with climate warming declines from temperate to tropical latitudes in two widely distributed *Eucalyptus* species. *Global Change Biology*, 21(1): 459–472.
- Fu G, Shen Z X, Sun W, et al. 2015. A meta-analysis of the effects of experimental warming on plant physiology and growth on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(1): 57–65.
- Goodrich J M, Miquelle D G, Smirnov E N, et al. 2010. Spatial structure of Amur (Siberian) tigers (*Panthera tigris altaica*) on Sikhote-Alin Biosphere Zapovednik, Russia. *Journal of Mammalogy*, 91(3): 737–748.
- Guo D F, Wang C Z, Zang S Y, et al. 2021. Gap-filling of 8-day Terra MODIS daytime land surface temperature in high-latitude cold region with generalized additive models (GAM). *Remote Sensing*, 13(18): 3667.
- Hatfield J L, Prueger J H. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10: 4–10.
- Huang W, Hu H, Zhang S B. 2016. Photosynthesis and photosynthetic electron flow in the Alpine evergreen species *Quercus guyavifolia* in winter. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1511.
- Klanderud K, Totland Ø. 2005. Simulated climate change altered dominance hierarchies and diversity of an Alpine biodiversity hotspot. *Ecology*, 86(8): 2047–2054.
- Körner C. 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115(4): 445–459.
- Körner C, Paulsen J. 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31(5): 713–732.
- Moe R, Heins R. 1990. Control of plant morphogenesis and flowering by light quality and temperature. *Acta Horticulturae*, 272: 81–90.
- Reynolds L K, DuBois K, Abbott J M, et al. 2016. Response of a habitat-forming marine plant to a simulated warming event is delayed, genotype specific, and varies with phenology. *PLoS One*, 11(6): e0154532.
- Walker B, Ariza L S, Kaines S, et al. 2013. Temperature response of *in vivo* Rubisco kinetics and mesophyll conductance in *Arabidopsis thaliana*: comparisons to *Nicotiana tabacum*. *Plant, Cell & Environment*, 36(12): 2108–2119.
- Wang T M, Feng L M, Mou P, et al. 2015. Long-distance dispersal of an Amur tiger indicates potential to restore the North-east China/Russian Tiger Landscape. *Oryx*, 49(4): 578–579.
- Zhang H X, Yuan N M, Ma Z G, et al. 2021. Understanding the soil temperature variability at different depths: effects of surface air temperature, snow cover, and the soil memory. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(3): 493–503.
- 陈刘阳. 2022. 气候变化下祁连山典型有蹄类动物生态网络识别与评估. 兰州: 兰州大学硕士学位论文. [Chen L Y. 2022. Identification and assessment of ecological networks of typical ungulates in Qilian mountains under climate change. Lanzhou: Lanzhou University, Master's dissertation.]

- 丛毓, 贺红士, 谷晓楠, 等. 2016. 高山林线形成机理研究进展. 应用生态学报, 27(9): 3035–3041. [Cong Y, He H S, Gu X N, et al. 2016. Progresses of Alpine treeline formation mechanism. Chinese Journal of Applied Ecology, 27(9): 3035–3041.]
- 冯彬. 2023. 气候变化背景下森林有蹄类栖息地评价与变化预测. 南充: 西华师范大学硕士学位论文. [Feng B. 2023. Habitat evaluation and change prediction of forest ungulates under climate change. Nanchong: China West Normal University, Master's dissertation.]
- 冯学民, 蔡德利. 2004. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究. 土壤学报, 41(3): 489–491. [Feng X M, Cai D L. 2004. Soil temperature in relation to air temperature, altitude and latitude. Acta Pedologica Sinica, 41(3): 489–491.]
- 高中信, 马建章. 1996. 世界虎的现状与保护. 野生动物, 17(1): 3–7. [Gao Z X, Ma J Z. 1996. Status and protection of tigers in the world. Chinese Journal of Wildlife, 17(1): 3–7.]
- 郭金停, 胡远满, 熊在平, 等. 2017. 中国东北多年冻土区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 28(8): 2413–2422. [Guo J T, Hu Y M, Xiong Z P, et al. 2017. Spatiotemporal variations of growing-season NDVI and response to climate change in permafrost zone of Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(8): 2413–2422.]
- 金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 2006. 大小兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估. 冰川冻土, 28(4): 467–476. [Jin H J, Yu S P, Lü L Z, et al. 2006. Degradation of permafrost in the da and Xiao Hinggan Mountains, Northeast China, and preliminary assessment of its trend. Journal of Glaciology and Geocryology, 28(4): 467–476.]
- 吕佳佳. 2009. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究. 北京: 中国环境科学研究院硕士学位论文. [Lü J J. 2009. Study on the influence of climate change on the distribution of major rare and endangered species in China and its adaptive countermeasures. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Master's dissertation.]
- 马逸清. 1983. 东北虎分布区的历史变迁. 自然资源研究, 4: 44–48. [Ma Y Q. 1983. The history changes in the distribution range of the Amur Tiger. Territory & Natural Resources Study, 4: 44–48.]
- 戚德康, 南颖, 孙博杨, 等. 2017. 2000年以来朝鲜植被覆盖变化及其与气候因子的相关性研究. 干旱区地理, 40(4): 839–849. [Qi D K, Nan Y, Sun B Y, et al. 2017. Changes of vegetation coverage and its relationship with climate factors in North Korea since 2000. Arid Land Geography, 40(4): 839–849.]
- 王凤昆, 李艳, 姜广顺. 2022. 东北虎栖息地历史分布、种群数量动态及其野化放归进展. 野生动物学报, 43(4): 1119–1130. [Wang F K, Li Y, Jiang G S. 2022. Historical distribution, population dynamics and reintroduction progress of the *Panthera tigris altaica*. Chinese Journal of Wildlife, 43(4): 1119–1130.]
- 王希亮. 2017. 近代中国东北森林的殖民开发与生态空间变迁. 历史研究 (1): 85–103, 192. [Wang X L. 2017. The modern colonial development of the forests in Northeast China and changes in their ecological space. Historical Research, (1): 85–103, 192.]
- 翁笃鸣. 1990. 山区地形气候. 北京: 气象出版社. [Weng D M. 1990. Mountain Topography and Climate. Beijing: China Meteorological Press.]
- 于立忠, 刘利芳, 王绪高, 等. 2017. 东北次生林生态系统保护与恢复技术探讨. 生态学杂志, 36(11): 3243–3248. [Yu L Z, Liu L F, Wang X G, et al. 2017. Discussion on the protection and restoration technology of secondary forest ecosystems in Northeast China. Chinese Journal of Ecology, 36(11): 3243–3248.]
- 于孝臣, 孙宝刚, 孙海义, 等. 2000. 黑龙江省东北虎的分布和种群数量. 野生动物, 21(2): 14–16. [Yu X C, Sun B G, Sun H Y, et al. 2000. Distribution and population size of Amur tiger in Heilongjiang Province. Chinese Wildlife, 21(2): 14–16.]
- 张明海, 王金海, 刘淼, 等. 1998. 大兴安岭寒温带野生动物物种多样性现状与保护对策. 国土与自然资源研究 (3): 61–65. [Zhang M H, Wang J H, Liu M, et al. 1998. Present situation and protection countermeasures of wildlife species diversity in cold temperate zone of Daxinganling. Territory & Natural Resources Study, (3): 61–65.]
- 朱世兵, 靳勇超, Yachmennikova A, 等. 2023. 张广才岭南部东北虎猎物种群冬季营养容纳量研究. 生态学报, 43(13): 5432–5441. [Zhu S B, Jin Y C, Anna Y, et al. 2023. Winter nutrient capacity of Amur tiger's prey population in the south of Zhangguangcai Mountain, Jilin Province. Acta Ecologica Sinica, 43(13): 5432–5441.]
- 朱世兵, 曲艺, Yachmennikova A, 等. 2020. 基于 MaxEnt 模型的小兴安岭东北虎潜在生境适宜性评价. 兽类学报, 40(4): 317–328. [Zhu S B, Qu Y, Anna Y, et al. 2020. Potential habitat suitability assessment of Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) in Lesser Khingan Mountains based on MaxEnt model. Acta Theriologica Sinica, 40(4): 317–328.]