

DOI: 10.20103/j.stxb.202304050687

秦淑洁, 钱天陆, 李思青, 吴朝宁, 王结臣. 人类活动胁迫下野生动物生境变迁研究——以中国仰鼻猴为例. 生态学报, 2024, 44(13): 5735-5745.
Qin S J, Qian T L, Li S Q, Wu Z N, Wang J C. Habitat changes of wild animals under human stress: a case study of the snub-nosed monkey in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5735-5745.

人类活动胁迫下野生动物生境变迁研究 ——以中国仰鼻猴为例

秦淑洁¹, 钱天陆^{1,2}, 李思青¹, 吴朝宁¹, 王结臣^{1,3,*}

1 南京大学地理与海洋科学学院, 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室, 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023

2 南京邮电大学物联网学院, 南京 210023

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 人类活动是威胁当今世界生物多样性的主要因素之一, 越来越多的“难民物种”受人类活动干扰被限制在了次优的栖息地。以我国受威胁情况较为严重的珍稀物种仰鼻猴为例, 基于地形变量、人类活动变量、气候变量及古今分布点(历史时期: 20 世纪前; 现今时期: 20 世纪至今)数据, 利用 MaxEnt 模型对其古今生境开展预测, 结果表明: 古今以来, 人类活动导致仰鼻猴丧失了我国东部 921756 km² 的适宜生境, 保留适生区内的生境质量下降, 新增适生区分散且破碎, 仰鼻猴重新适应了历史时期的次适生区甚至不适生区。古今以来, 仰鼻猴对气候变量适应能力的改变远小于对地形变量, 与可以自由选择适宜生境时相比, 现今时期的仰鼻猴生境内的海拔更高、地形起伏度更大, 最冷月最低温以及年度气温变化的适宜范围相比更窄, 仰鼻猴提高了对多种环境因素的适应能力, 但同时对环境变化的敏感度升高, 并面临着种群隔离度增加等风险, 已无法占据最佳生态位。建议关注现有适宜生境附近的人类活动强度, 尽可能减少与仰鼻猴产生空间或资源的竞争, 加强对该物种的保护。

关键词: 仰鼻猴; MaxEnt 模型; 人类活动胁迫; 生境变迁; 环境适应

Habitat changes of wild animals under human stress: a case study of the snub-nosed monkey in China

QIN Shujie¹, QIAN Tianlu^{1,2}, LI Siqing¹, WU Zhaoning¹, WANG Jiechen^{1,3,*}

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210023, China

2 School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Human activities are widely recognized as one of the foremost factors posing a significant threat to biodiversity in the world today. More and more “refugee species” have been restricted to sub-optimal habitats due to the disturbance of human activities. Taking the critically endangered snub-nosed monkey, which faces severe threats in China, as a case study, this research employed the MaxEnt model to predict its historical and current habitats based on the data of topographic variables, human activity variables, climate variables, and distribution data from both past (before the 20th century) and present (from the 20th century to the present day) periods. The findings demonstrate that the human activities have resulted in the loss of 921,756 square kilometers of suitable habitat for the snub-nosed monkey in the eastern part of China since ancient times. Within the retain suitable range, the quality of habitats has declined, while the new suitable

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371430, 41871294)

收稿日期: 2023-04-05; **网络出版日期:** 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjiechen@nju.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

habitats had become fragmented and dispersed. Remarkably, the snub-nosed monkey has re-adapted to the sub-suitable or even unsuitable habitats in the historical period. The study further reveals that the snub-nosed monkey's adaptability to climate variables has undergone relatively minor changes compared to its adaptability to topographic variables. Compared with the time when it was free to choose suitable habitats, the altitude and the relief amplitude of the habitat in the current period are higher, the suitable range of the coldest month's lowest temperature and the temperature annual range is narrower. The snub-nosed monkey has enhanced its adaptability to various environmental variables. At the same time, it has concurrently exhibited heightened sensitivity to environmental changes and encountered escalating risks, including increased population isolation. Consequently, the snub-nosed monkey is no longer able to occupy the optimal ecological niche. To mitigate these challenges, it is recommended to pay attention to the intensity of human activities in the vicinity of existing suitable habitats, to minimize competition with the snub-nosed monkey for space or resources, and to enhance the protection of this species.

Key Words: snub-nosed monkey; MaxEnt model; human activity stress; habitat change; environmental adaptation

野生动物是最珍稀的自然资源,更是生物多样性的重要组成部分^[1]。随着人类改造地球强度的不断增加,当今世界正遭受着前所未有的改变^[2];矿区、耕地过度开发、全球变暖导致海平面升高、过度砍伐导致森林退化等,由于无法承受环境条件改变的速度,许多物种正缓慢走向灭绝^[3],这导致全球生物多样性严重丧失,生态系统发生剧烈退化^[4],地球已然进入第六次物种大灭绝时代^[5]。

人类活动因素导致的生境的丧失和退化往往被认为是导致野生动物灭绝的主要原因^[6-7]。几百年来,人类活动正在以不可预估的速度对野生动物的生境造成破坏,越来越多的自然栖息地被人工基础设施所取代,许多物种的活动范围逐渐缩小,如今只能生活在小而分散的次优生境中^[8-10],一旦生境的质量过低,就会导致物种无法维持种群,加速它们的灭亡^[11]。另一方面,生境的变迁必然带来野生动物环境适应能力的改变,自然状态下的物种往往能够通过改变分布而自由选择适宜生存的栖息环境^[12],但是当生境遭受人类活动的压力而被破坏,为了生存野生动物就只能迁往人类干扰较小、在自然状态下适宜性不高的生境,并不断提高对环境的适应能力,这对它们来说无疑是艰巨的挑战。

仰鼻猴又名金丝猴,隶属灵长目(Primates)、猴科(Cercopithecidae)、疣猴亚科(Colobinae),其中川金丝猴(*Rhinopithecus roxellanae*)、滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)和黔金丝猴(*Rhinopithecus brelichi*)是我国特有的珍稀物种^[13],并与黑金丝猴(*Rhinopithecus strykeri*)同属国家一级重点保护野生动物,曾经广泛分布在亚洲各地^[14]。几百年来随着工业化的发展,受人类活动强度的增加、城市化发展以及森林砍伐导致的栖息地丧失和破碎化的影响^[15],仰鼻猴的生境发生了大幅度的丧失和迁移,原有的独特生态位被破坏,生存状况面临着前所未有的挑战,是现如今生存在次优栖息地中的“难民”物种^[8]。

MaxEnt 模型起源于统计力学,以最大熵思想为核心,是当前使用非常广泛的物种分布模型之一^[16-18],因预测精度高、预测效果好等优势广受学者们的关注^[19-21]。目前,已有许多学者对仰鼻猴种群所受到的人类干扰情况进行研究^[22-23],但是关于干扰前后仰鼻猴生境的空间格局变迁以及仰鼻猴环境适应能力的变化研究仍较少。基于此,本文将在中国有分布的四种仰鼻猴作为研究对象,使用 MaxEnt 模型探究人类活动干扰胁迫下仰鼻猴生境选择的改变情况,并分析古今生境变迁以来该物种对环境适应能力的变化,以期增进对该受威胁物种的了解,为其未来保护及生境规划提供决策意见。

1 研究区概况

本文的研究区是可能有仰鼻猴分布的中国全域,地理位置 3°51'—53°33'N, 73°33'—135°05'E(图 1)。陆地面积约 960 万 km²,地势西高东低,具有山地、高原、盆地、平原和丘陵等多种地形,气候复杂多样。

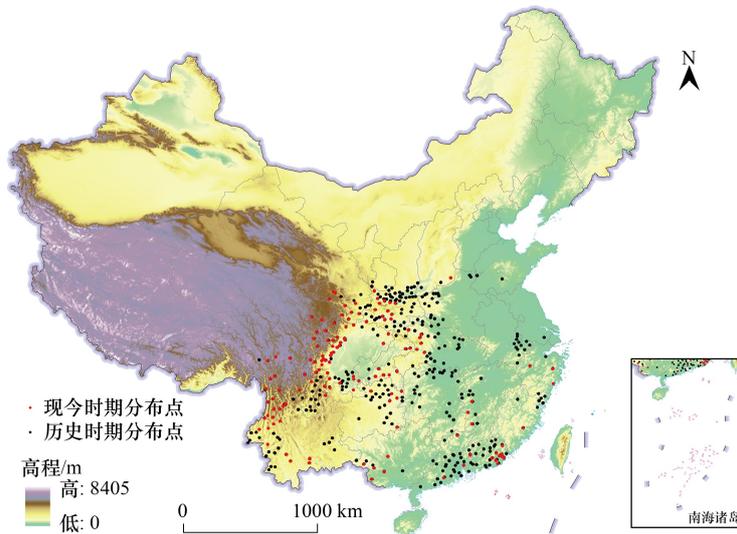


图1 研究区概况及仰鼻猴古今分布点

Fig.1 General situation of the study area and historical and current distribution of snub-nosed monkey

2 数据来源及方法

2.1 数据来源与处理

仰鼻猴分布数据来源于文榕生团队的《中国珍稀野生动物分布变迁地图集》^[24],其中历史分布时间范围定义为20世纪前,该时期资料来源为文献记载,其中主要为清代的方志;现今分布时间范围定义为20世纪至今。通过600dpi的高精度扫描,我们对图集中的分布数据进行数字化并整理,最终得到历史分布数据422条,现今分布数据139条。

环境数据包括地形数据、气候数据及人类活动数据。地形数据包括海拔、坡度及地形起伏度数据,考虑到本文的研究精度,选取中国科学院资源环境与数据中心空间分辨率1km的DEM数据,地形起伏度参考相关文献^[25]由DEM数据基于9×9的窗口计算得到;历史时期的气候数据来源于PaleoClim发布的古气候数据,时间为全新世晚期,距今4.2—0.3千年,分辨率为2.5arcmin;现今时期的气候数据来源于WorldClim发布的19个生物气候数据,分辨率为30arcsec;人类影响指数(Human Influence Index, HII),涵盖了人口压力、人类土地利用和基础设施及人类可达性的影响,范围为0—64,空间分辨率30arcsec,可通过社会经济数据和应用中心(Socioeconomic Data and Applications Center, SEDAC)访问。最终将所有环境变量统一到Albers等积投影,空间分辨率1km×1km。

2.2 模型构建及评价

由于历史时期的人类活动数据获取较为困难,并且现今时期人类活动强度远大于历史时期,因此在对仰鼻猴历史时期生境进行预测时,仅使用地形数据及气候数据参与建模;对现今时期生境进行预测时,使用地形数据、气候数据与人类活动数据共同参与建模^[26]。

在建模过程中,环境数据的选择对仰鼻猴生境的预测具有重要影响。本文依靠MaxEnt模型的初步运算结果,剔除了对模型贡献率小于1%的变量,进一步对剩余环境变量进行相关性检验,保留相关性 $|r| \geq 0.9$ 的两个变量中贡献率较高的变量^[27],最终选取海拔、地形起伏度、平均气温日较差(bio2)、最冷月最低温(bio6)、年度气温变化(bio7)、最湿润月的降水量(bio13)、季节性降水变化(bio15)和最干旱季度的降水量(bio17),并在现今时期的模拟中加入人类活动变量。

将仰鼻猴分布点及环境变量分别导入MaxEnt中,为了保证实验结果的准确性和可靠性,将重复运行次数

设为 10,使用刀切法(Jackknife)检测环境变量的重要性,保持软件其他参数为默认值,结果以 logistic 格式输出,使用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic,ROC)下的面积(Area Under Curve,AUC)值进行准确性验证,AUC 值越大,模型的预测精度越高^[28],最终选取精度最高的模型进行结果分析。

参考仰鼻猴的实际分布情况,使用手动分类法将适生区划分为以下三个等级^[29]:高适生区($P \geq 0.6$)、次适生区($0.6 > P \geq 0.2$)和不适生区($P < 0.2$)。

2.3 仰鼻猴适生区空间格局迁移分析

假设仰鼻猴在古今气候变化及人类干扰的影响下,空间格局存在继续生存、就地消失及向其他环境适宜区迁移这三种情况^[30],并依据迁移可能性将生境划分为 4 种迁移格局:不适生区、丧失适生区、新增适生区及保留适生区:不适生区指古今时期均无仰鼻猴分布,丧失适生区指历史时期有仰鼻猴分布但现今时期无仰鼻猴分布,新增适生区指历史时期无仰鼻猴分布但现今时期有仰鼻猴分布,保留适生区指古今时期均有仰鼻猴分布。其中,高适生区及次适生区均属于有仰鼻猴分布的情况。

3 结果

3.1 模型准确度评价

历史时期的仰鼻猴生境预测模型的训练集 AUC 值为 0.907,测试集 AUC 值为 0.930,现今时期的仰鼻猴生境预测模型的训练集 AUC 值为 0.951,测试集 AUC 值为 0.937,因此 MaxEnt 模型可以较好地实现对仰鼻猴古今生境的预测。

3.2 MaxEnt 模型预测结果

3.2.1 主要环境变量影响分析

历史时期与现今时期预测模型的刀切法结果见下图:

结合图 2、图 3 及环境变量百分贡献率及排列重要性(表 1)可以看出:在仰鼻猴历史时期生境的预测中,最冷月最低温、年度气温变化和最干旱季度的降水量占据了主导作用,其中前两个变量的累计贡献率为 77.2%,累计排列重要性为 61.9%;在现今时期生境的预测中,年度气温变化和最冷月最低温占据了主导作用,二者的累计贡献率为 66.2%,累计排列重要性为 56.1%。

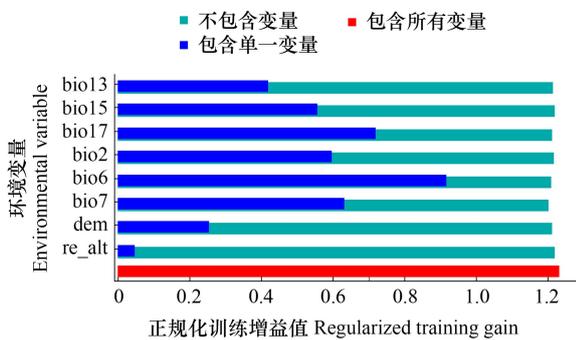


图 2 历史时期环境变量刀切法检测结果

Fig.2 Jackknife test for environmental variables of the historical period

bio2:平均气温日较差;bio6:最冷月最低温;bio7:年度气温变化;bio13:最湿润月的降水量;bio15:季节性降水变化;bio17:最干旱季度的降水量;hii:人类影响指数;dem:海拔;re_alt:地形起伏度

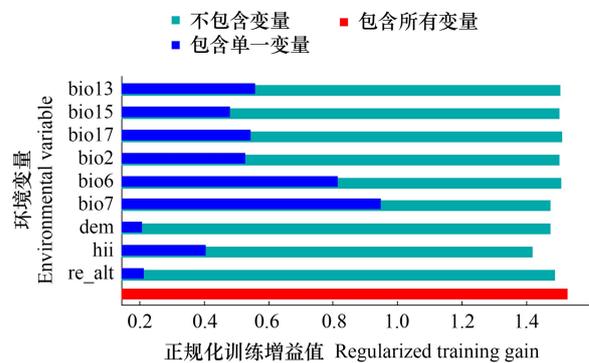


图 3 现今时期环境变量刀切法检测结果

Fig.3 Jackknife test for environmental variables of the current period

3.2.2 仰鼻猴古今生境适宜性变化情况分析

分类后的仰鼻猴古今生境见图 4 和图 5,可以看出:历史时期仰鼻猴广泛分布于我国中部及南部地区,其

中高适生区面积约为 337771km²,次适生区面积约为 2344160km²;而现今时期的适生区发生了大面积的丧失及适生等级的下降,其中高适生区主要分布在祁连山脉南部、横断山脉、秦岭、云贵高原周围等地,涉及到云南省、贵州省、重庆市、陕西省南部、甘肃省南部、四川省东部、湖北省西部及广西壮族自治区、广东省和福建省的部分地区,共约 271654km²,相比历史时期缩减了 19.57%,丧失情况较为严重;除上述地区外,西藏自治区、浙江省、河南省、山西省和山东省等地也有次适生区的分布,共约 1679892km²,相比历史时期缩减 28.34%。

表 1 环境变量百分贡献率及排列重要性

Table 1 Percentage contribution rate and ranking importance of environmental variables

| 变量代码 Variable code | 变量名称 Variable name | 百分贡献率/% Percent contribution | | 排列重要性/% Permutation importance | |
|-----------------------|--|---------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | | 历史时期 Historical period | 现今时期 Current period | 历史时期 Historical period | 现今时期 Current period |
| bio2 | 平均气温日较差 Mean diurnal range | 2.6 | 0.8 | 2.6 | 4.8 |
| bio6 | 最冷月最低温 Min temperature of coldest month | 58.3 | 13.5 | 30.7 | 3.5 |
| bio7 | 年度气温变化 Temperature annual range | 18.9 | 52.7 | 31.2 | 52.6 |
| bio13 | 最湿润月的降水量 Precipitation of wettest month | 5.4 | 5.5 | 6.3 | 5.6 |
| bio15 | 季节性降水变化 Precipitation seasonality | 1.4 | 4.6 | 9.1 | 1.8 |
| bio17 | 最干旱季度的降水量 Precipitation of driest quarter | 8.8 | 3 | 8.9 | 4.9 |
| hii | 人类影响指数 Human influence index | — | 9.9 | — | 8.2 |
| dem | 海拔 Altitude | 2.1 | 5.6 | 8.9 | 15.5 |
| re_alt | 地形起伏度 Relief amplitude | 2.4 | 4.3 | 2.4 | 3 |

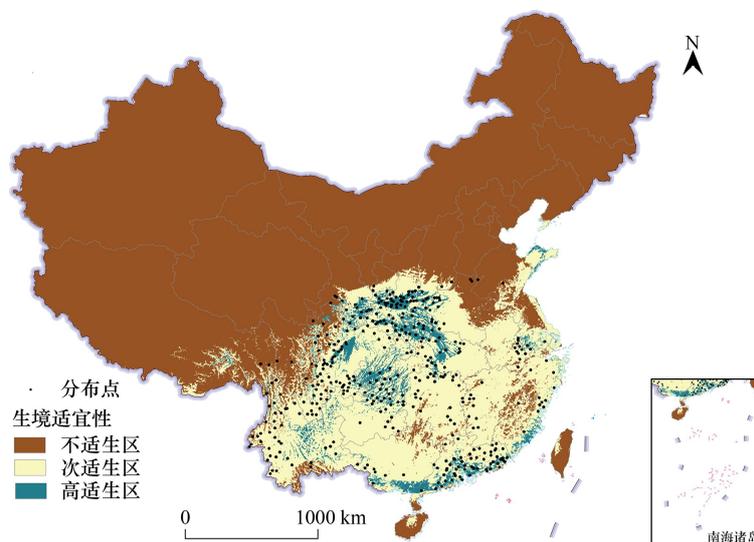


图 4 仰鼻猴历史时期生境模拟结果

Fig.4 Simulation result of snub-nosed monkey in historical period

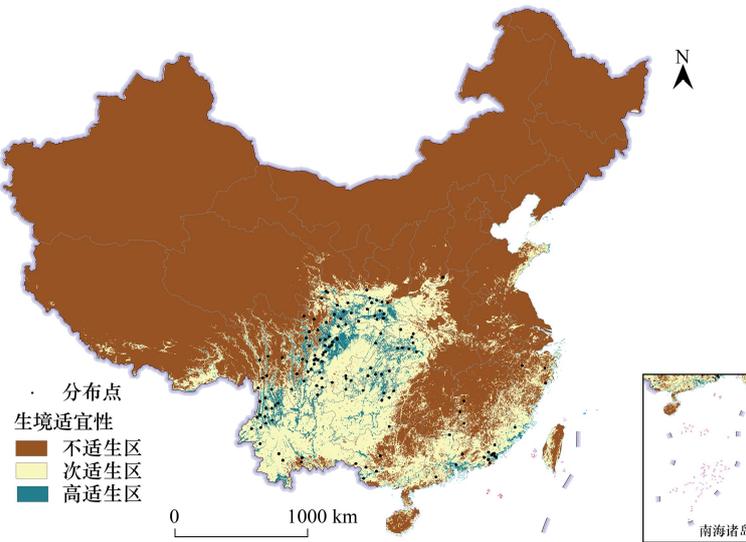


图5 仰鼻猴现今时期生境模拟结果

Fig.5 Simulation result of snub-nosed monkey in current period

3.2.3 仰鼻猴古今环境适应能力变化情况

结合 MaxEnt 模型运行结果中的单因子响应曲线,选取参与模型建构中贡献率较高的两个气候变量——最冷月最低温和年度气温变化,以及两个地形变量——地形起伏度和海拔,参考仰鼻猴的实际分布情况,对其环境适应能力变化情况进行分析,并认为当概率值 ≥ 0.5 时^[31],对应的环境变量的变化范围适宜仰鼻猴的分布(图6)。

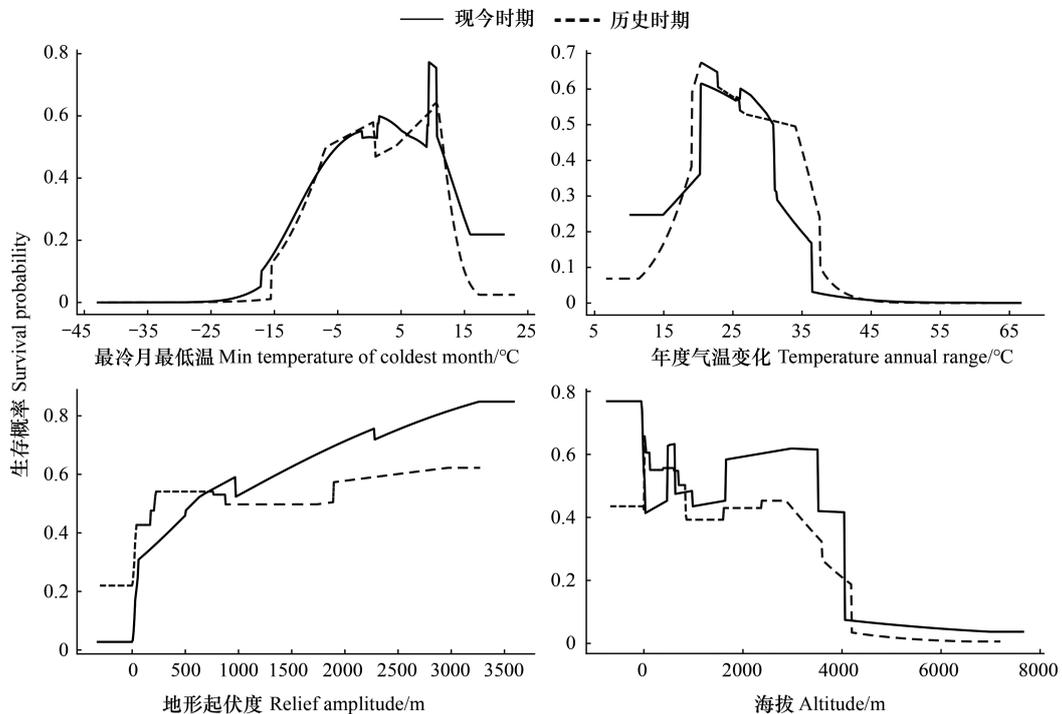


图6 主要环境变量的古今单因子响应曲线

Fig.6 Historical and current single factor response curves of major environmental variables

历史时期,适宜仰鼻猴生存的最冷月最低温范围大致为 $-7-1^{\circ}\text{C}$ 以及 $4-12^{\circ}\text{C}$;年度气温变化范围大致为 $19-34^{\circ}\text{C}$;地形起伏度范围大致为 $240-830\text{m}$ 以及大于 1750m ,曲线总体较为平缓;海拔范围大致为小于 830m 处。现今时期,适宜仰鼻猴生存的最冷月最低温范围大致为 $-5-11^{\circ}\text{C}$;年度气温变化范围大致为 $20-31^{\circ}\text{C}$;地形起伏度范围为大于 580m ,并且概率随着地形起伏度的增加而不断升高;海拔范围大致为 $500-600\text{m}$ 以及 $1600-3500\text{m}$ 。

4 讨论

4.1 仰鼻猴古今适生区空间格局迁移分析

物种对环境的适应能力决定了它们的分布位置,分布的变迁也会反过来改变物种对环境的适应能力,因此我国广阔的陆域面积以及复杂多样的地理环境造就了仰鼻猴古今生境选择的可能性和变迁的复杂性。仰鼻猴古今适生区空间格局变化情况见图 7,结果显示:保留适生区集中于我国中部及西南部地区,且分布较为连续,共约 1753495km^2 ,适生等级下降及维持了次适生区的生境占据了 85.12% ,适生等级上升及维持了高适生区的生境占据了 14.88% ;丧失适生区主要分布在我国中、东部城市化水平较高的地方,特别是江苏省、安徽省、上海市、湖南省、江西省、湖北省东部等地,共约 921756km^2 ;新增适生区的分布较为分散且破碎,主要集中在西部丧失适生区与保留适生区的交界处,总面积约 198051km^2 。总体上,仰鼻猴的生境有着向西和向北迁移的趋势。

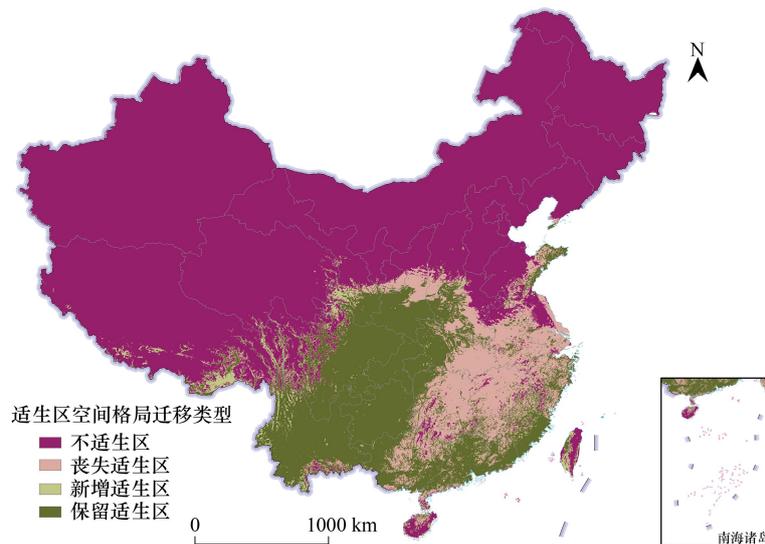


图 7 仰鼻猴古今生境适生区空间格局迁移情况

Fig.7 Migration of spatial patterns of historical and current habitats for snub-nosed monkey

当今时期,人类社会的发展导致与野生动物在空间资源上的竞争越来越强烈,在以人类为主导的全球化景观中,农业、伐木、畜牧业和牧场引发的栖息地丧失已经成为灵长类物种面临的主要威胁^[32]。因此本文进一步统计了不同适生区空间格局迁移情况下的人类影响指数及仰鼻猴古今生存概率均值(表 2)。分析表明:古今均无仰鼻猴分布的不适宜区内的人类干扰强度最低,其次是新增适生区,再次是丧失适生区,保留适生区内的干扰强度最高,达到了 20.08 ,表征了对于仰鼻猴而言较大的人类干扰^[8]。尽管本文在历史时期的模拟中并没有加入人类活动数据,但是在受人类干扰导致仰鼻猴完全消失的丧失适生区内,仰鼻猴的历史时期生存概率均值为 0.3735 ,远超现今时期的生存概率均值 0.1063 ,同样的趋势在保留适生区中也有所体现,这无疑表明仰鼻猴的生境格局受到了人类活动的巨大影响——经过长期的发展,在历经狩猎、森林砍伐、人口迅速增长导致的住宅及商业用途开发活动增多之后,曾经适宜生境的质量大幅度下降,仰鼻猴可能会面临降低生存

需求、迁移生境等挑战,在这种趋势下,种群的生存难度会越来越大。

表 2 不同适生区下的人类活动强度及仰鼻猴古今生存概率

Table 2 The intensity of human activities and the survival probability of snub-nosed monkey in different habitats

| 适生区变迁类型 The type of change in the suitable habitat | 人类影响指数 Human influence index | 历史时期生存概率 Survival probability of historical period | 现今时期生存概率 Survival probability of current period |
|---|---------------------------------|--|---|
| 不适生区 Unsuitable habitat | 11.31 | 0.0114 | 0.0123 |
| 丧失适生区 Lost suitable habitat | 19.80 | 0.3735 | 0.1063 |
| 新增适生区 New suitable habitat | 16.84 | 0.1049 | 0.3431 |
| 保留适生区 Retain suitable habitat | 20.08 | 0.4642 | 0.4244 |

4.2 仰鼻猴古今环境适应能力变化

由于历史时期的人类活动强度较低,仰鼻猴对生境的选择较为自由,此时的环境变量适宜区间能够作为最理想的情况。因此根据每个变量的响应曲线(图 6),本文进一步统计了古今适宜区间内仰鼻猴的生存概率均值(表 3),以及 422 个现今分布点和 139 个历史分布点处的环境变量均值(表 4):

表 3 环境变量适宜区间内的古今仰鼻猴生存概率均值

Table 3 The average survival probability of snub-nosed monkey in historical and current period in the suitable range of environmental variables

| 环境变量 Environmental variable | 历史时期适宜区间 Appropriate range for historical period | | 现今时期适宜区间 Appropriate range for current period |
|---|--|---|---|
| | 历史生存概率 Historical survival probability | 现今生存概率 Current survival probability | 现今生存概率 Current survival probability |
| 最冷月最低温 Min temperature of coldest month | 0.4089 | 0.2902 | 0.2981 |
| 年度气温变化 Temperature annual range | 0.2985 | 0.2547 | 0.3337 |
| 地形起伏度 Relief amplitude | 0.1666 | 0.1341 | 0.1800 |
| 海拔 Altitude | 0.2195 | 0.1317 | 0.1744 |

表 4 仰鼻猴古今分布点的环境变量均值

Table 4 The mean value of environmental variables at historical and current distribution sites of snub-nosed monkey

| 环境变量 Environmental variable | 历史分布点 Historical distribution point | 现今分布点 Current distribution point |
|--|--|-------------------------------------|
| 最冷月最低温 Min temperature of coldest month/°C | -0.90 | -0.61 |
| 年度气温变化 Temperature annual range/°C | 29.66 | 27.46 |
| 地形起伏度 Relief amplitude/m | 553.00 | 860.40 |
| 海拔 Altitude/m | 826.03 | 1304.76 |

气候对于仰鼻猴的生存具有重要影响。最冷月最低温的适宜区间范围变得单一且小幅度缩窄;历史时期的生存概率在 10°C 左右处取峰值,约为 0.64;现今时期的生存概率在 9°C 左右处取峰值,约为 0.77。在历史时期的适宜范围内,仰鼻猴的生存概率由过去的 0.4089 降为了现今的 0.2902,然而在现今时期的适宜范围内,概率值为 0.2981;现今时期分布点处的最冷月最低温均值为 -0.61°C,尽管没有高度适宜仰鼻猴生存但落在适宜区间范围内。总体上,古今曲线的变化程度不大,最冷月最低温变化对生存概率的影响并不剧烈,仰鼻猴能够较好地克服这一因子改变所带来的生存压力,只是曲线“峰体”的减小表明对环境变化的敏感度可能会升高。

年度气温变化是表征气候变化明显程度的变量之一,对生境的预测也有较明显的贡献。响应曲线表明仰鼻猴古今生存概率随其升高呈现先增大后减小的趋势,适宜范围由 19—34°C 缩窄为 20—31°C,历史时期仰鼻

猴适宜生境内的气候更为多变,现今时期的仰鼻猴限制在了更小的气候变化范围之内;25—30℃内的现今生存概率达到了峰值并超过了历史时期,表明仰鼻猴对环境的适应能力在该范围内达到了最高。古今生存概率值的变化趋势与最冷月最低温一致,但是值得注意的是现今时期仰鼻猴分布点处的年度气温变化均值为27.46℃,落在最适宜范围内,这表明现今生境内的年度气温变化达到了最优条件,能够较好满足仰鼻猴的生存。

除上述两个气候变量之外,地形变量对仰鼻猴的生境选择也有一定影响。我国疆域辽阔,地形复杂多样,地形起伏度范围为0—3949m,高差变化较大。当地形起伏度小于750m时,历史时期的生存概率始终高于现今时期,而超过750m特别是到达1000m之后,现今时期的生存概率超过历史时期并继续上升,分布点处的地形起伏度均值从553m升高到860.4m,表明在可以自由选择生境时,仰鼻猴往往不会在海拔高差过大的地区生存,然而这些地区由于地形条件复杂而难以被人类利用,才可能会成为现今时期的生境。从生存概率值的变化情况来看,仰鼻猴已逐渐适应了较大的地形起伏,并且在当前生境被破坏后,有着继续迁往地形更加复杂的地区的趋势。不过,生境的不断缩减和破碎化可能会最终阻止种群之间的遗传交换,加快种群的灭绝^[33],这并不利于仰鼻猴种群的长远发展。

海拔的适宜范围从小于830m变化为500—600m以及1600—3500m,分布点处的海拔均值从826.03m升高到1304.76m。Li等人^[34]关注了仰鼻猴近400年的分布变化,发现这期间它们不断从平原、山区等低海拔区域消失,如今只存在于孤立山区。这表明曾经低海拔区域的确是适合仰鼻猴生存的,但是由于人类对这些地区开发利用的程度加大,它们才需要向高海拔地区迁移^[35],并且近年来已有学者揭示了与仰鼻猴适应高海拔栖息地相关的基因和生物学过程^[36]。但是值得注意的是,尽管仰鼻猴的生存概率在3000—3500m范围内达到了峰值,这并不表明这样的高海拔环境是有利于种群生存的,例如在历史时期,1600—3500m并不是适宜仰鼻猴生存的海拔范围,李欣蕊等人^[12]也认为平均海拔的升高会增加亚种之间的隔离程度,降低遗传多样性,然而面对当前全球变暖的趋势,仰鼻猴可能会向更高海拔处迁移,这对于它们的生存是十分不利的^[23, 37]。

可以看出,经历了生境的迁移之后,仰鼻猴面临着人类干扰及环境变化带来的双重压力,部分最优生境丧失。不过从结果来看,仰鼻猴对气候变量适应能力的改变远小于对地形变量,适宜区间内生存概率峰值的升高以及另外适宜区间的出现均表明该物种更好地适应了环境,但从长远来看却不可避免地会为种群带来负面影响。

仰鼻猴属下有川金丝猴、滇金丝猴、黔金丝猴、越南金丝猴及缅甸金丝猴五种,由于本文的历史分布数据没有将仰鼻猴进行分类细化,故全部采取合并分析,这种处理方法在前人研究中也有体现^[8, 38],不过考虑到不同物种生活习性的不同,它们对生态位的需求也会有差异,本文的合并分析可能会导致细节内容的丢失,后续如果有更精细的物种分布数据,可考虑针对单个物种开展古今分析,进行更有针对性的研究。

在本文中,仰鼻猴的现今分布数据的时间范围为20世纪至今,然而实际上,随着人类活动强度的扩张,现存的仰鼻猴数量已非常少,并且分布范围十分有限,例如黔金丝猴仅可见于贵州梵净山保护区^[39],在IUCN中已经被列为“极危”物种,它们现存的生境远远小于所模拟出的分布范围。后续工作中,可使用现势性更高的数据对仰鼻猴的现有生境开展模拟,以更全面地了解仰鼻猴种群的生存现状。

人类与野生动物如何相处一直是学术界热议的话题^[40—42],在今后保护工作的开展过程中,建议降低现有适宜生境附近的人类活动强度,在适生等级上升的区域建立保护区,减少与仰鼻猴在空间与资源方面的竞争,同时增强新增适生区之间的连通性,方便猴群移动扩散,实现人类与仰鼻猴的共存。

参考文献 (References):

- [1] 蒋志刚. 野生动物的价值与生态服务功能. 生态学报, 2001, 21(11): 1909-1917.
- [2] Su X K, Shen Y, Zhou W, Liu Y Q, Cheng H, Yang M R, Zhou S, Zhao J Y, Wan L F, Liu G H. Land-use changes conservation network of an endangered primate (*Rhinopithecus bieti*) in the past 30 years in China. Diversity and Distributions, 2022, 28(12): 2898-2911.
- [3] Hoffmann A A, Sgrò C M. Climate change and evolutionary adaptation. Nature, 2011, 470: 479-485.

- [4] Hautier Y, Tilman D, Isbell F, Seabloom E W, Borer E T, Reich P B. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. *Science*, 2015, 348(6232): 336-340.
- [5] Cowie R H, Bouchet P, Fontaine B. The Sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation? *Biological Reviews*, 2022, 97(2): 640-663.
- [6] Crooks K R, Burdett C L, Theobald D M, King S R B, Di Marco M, Rondinini C, Boitani L. Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(29): 7635-7640.
- [7] Gonçalves-Souza D, Verburg P H, Dobrovolski R. Habitat loss, extinction predictability and conservation efforts in the terrestrial ecoregions. *Biological Conservation*, 2020, 246: 108579.
- [8] Nüchel J, Bøcher P K, Xiao W, Zhu A X, Svenning J C. Snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus*): potential distribution and its implication for conservation. *Biodiversity and Conservation*, 2018, 27(6): 1517-1538.
- [9] Lowry H, Lill A, Wong B B M. Behavioural responses of wildlife to urban environments. *Biological Reviews*, 2013, 88(3): 537-549.
- [10] Sales L P, Galetti M, Carnaval A, Monsarrat S, Svenning J C, Pires M M. The effect of past defaunation on ranges, niches, and future biodiversity forecasts. *Global Change Biology*, 2022, 28(11): 3683-3693.
- [11] Kerley G I H, Kowalczyk R, Cromsigt J P G M. Conservation implications of the refugee species concept and the European bison: king of the forest or refugee in a marginal habitat? *Ecography*, 2012, 35(6): 519-529.
- [12] 李欣蕊, 赵序茅, 李明. 气候变化和人为干扰对中国三种金丝猴地理分布的未来影响. *兽类学报*, 2021, 41(3): 310-320.
- [13] 李宏群, 廉振民. 中国的金丝猴资源现状及其保护. *延安大学学报: 自然科学版*, 2007, 26(1): 65-68, 71.
- [14] Zhou X M, Meng X H, Liu Z J, Chang J, Wang B S, Li M Z, Wengel P O T, Tian S L, Wen C L, Wang Z M, Garber P A, Pan H J, Ye X P, Xiang Z F, Bruford M W, Edwards S V, Cao Y C, Yu S C, Gao L J, Cao Z S, Liu G J, Ren B P, Shi F L, Peterfi Z, Li D Y, Li B G, Jiang Z, Li J S, Gladyshev V N, Li R Q, Li M. Population genomics reveals low genetic diversity and adaptation to hypoxia in snub-nosed monkeys. *Molecular Biology and Evolution*, 2016, 33(10): 2670-2681.
- [15] 成功, 任宏涛, 陈嘉玥, 杨森, 龙凤, 管林森. 陕西秦岭地区珍稀野生动物保护研究现状及保护对策. *陕西林业科技*, 2020, 48(6): 74-79.
- [16] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [17] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [18] Tang X G, Yuan Y D, Li X M, Zhang J C. Maximum entropy modeling to predict the impact of climate change on pine wilt disease in China. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 652500.
- [19] 王志威. 药用植物云南土沉香潜在适生区及其关键气候影响因子. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 1991-1997.
- [20] Khan A M, Li Q T, Saqib Z, Khan N, Habib T, Khalid N, Majeed M, Tariq A. MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important chilgoza pine (*Pinus gerardiana* wall.) in South Asia. *Forests*, 2022, 13(5): 715.
- [21] Dos Santos L A, Mendes M F, Krüger A P, Blauth M L, Gottschalk M S, Garcia F R M. Global potential distribution of *Drosophila suzukii* (Diptera, Drosophilidae). *PLoS One*, 2017, 12(3): e0174318.
- [22] 钱天陆, 秦淑洁, 吴朝宁, 席唱白, 王结臣. 基于 MaxEnt 模型的人类干扰对滇金丝猴潜在分布的影响. *兽类学报*, 2022, 42(4): 349-361.
- [23] Zhao X M, Ren B P, Garber P A, Li X H, Li M. Impacts of human activity and climate change on the distribution of snub-nosed monkeys in China during the past 2000 years. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(1): 92-102.
- [24] 文榕生. 中国珍稀野生动物分布变迁地图集. 济南: 山东科学技术出版社, 2019.
- [25] 贺丹. 不同分辨率 DEM 提取地形因子的适宜分析窗口研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [26] 王发浩. 融合多源数据的历史时期人口空间分布建模与应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.
- [27] 孙元超, 刘凯, 姚晓燕, 寸得娇, 田娜, 张仪, 王飞, 李兰花. 基于 MaxEnt 模型对我国纹沼螺潜在分布区的预估研究. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2022, 33(4): 555-561.
- [28] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [29] 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 王崇云, 彭明春, 李云, 王旭红, 马云飞. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化. *生态学报*, 2023, 43(16): 6590-6604.
- [30] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 韩雷, 李美玲, 徐文轩, 杨维康. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3127-3135.
- [31] 高浩翔, 申立泉, 刘瑞, 王功, 张爱萍, 陈蕾, 张毅祯, 张学炎, 祁军, 王春玲, 耿硕, 周鑫, 吕青昕, 吴佳忆, 孟秀祥. 基于最大熵模型

- 的野生马麝夏季生境适宜性研究. 生态学报, 2023, 43(1): 441-448.
- [32] Estrada A, Garber P A, Rylands A B, Roos C, Fernandez-Duque E, Di Fiore A, Nekaris K A I, Nijman V, Heymann E W, Lambert J E, Rovero F, Barelli C, Setchell J M, Gillespie T R, Mittermeier R A, Arregoitia L V, de Guinea M, Gouveia S, Dobrovolski R, Shanee S, Shanee N, Boyle S A, Fuentes A, MacKinnon K C, Amato K R, Meyer A L S, Wich S, Sussman R W, Pan R L, Kone I, Li B G. Impending extinction crisis of the world's Primates: why Primates matter. *Science Advances*, 2017, 3(1): e1600946.
- [33] Li L, Xue Y D, Wu G S, Li D Q, Giraudoux P. Potential habitat corridors and restoration areas for the black-and-white snub-nosed monkey *Rhinopithecus bieti* in Yunnan, China. *Oryx*, 2015, 49(4): 719-726.
- [34] Li B G, Pan R L, Oxnard C E. Extinction of snub-nosed monkeys in China during the past 400 years. *International Journal of Primatology*, 2002, 23(6): 1227-1244.
- [35] Dong X, Chu Y M R, Gu X D, Huang Q Y, Zhang J D, Bai W K. Suitable habitat prediction of Sichuan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus roxellana*) and its implications for conservation in Baihe Nature Reserve, Sichuan, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(31): 32374-32384.
- [36] Yu L, Wang G D, Ruan J, Chen Y B, Yang C P, Cao X, Wu H, Liu Y H, Du Z L, Wang X P, Yang J, Cheng S C, Zhong L, Wang L, Wang X, Hu J Y, Fang L, Bai B, Wang K L, Yuan N, Wu S F, Li B G, Zhang J G, Yang Y Q, Zhang C L, Long Y C, Li H S, Yang J Y, Irwin D M, Ryder O A, Li Y, Wu C I, Zhang Y P. Genomic analysis of snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus*) identifies genes and processes related to high-altitude adaptation. *Nature Genetics*, 2016, 48: 947-952.
- [37] Yu Y, He G, Li D Y, Zhao X M, Chang J, Liu X C, Xiang Z F, Li B G, Li M. Climate change challenge, extinction risk, and successful conservation experiences for a threatened primate species in China: golden snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*). *Zoological Research*, 2022, 43(6): 940-944.
- [38] Qian T L, Chi Y, Xi C B, Li Z Q, Wang J C. Changes in the historical and current habitat ranges of rare wild mammals in China: a case study of six taxa of small- to large-sized mammals. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2744.
- [39] 杨杰, 冉景丞, 黄小龙, 任晓冬, 李晟之, 卢凤琼. 以社区为主体的黔金丝猴生态廊道建设机制与路径分析. *贵州林业科技*, 2023, 51(4): 67-72.
- [40] Bhatia S, Redpath S M, Suryawanshi K, Mishra C. Beyond conflict: exploring the spectrum of human-wildlife interactions and their underlying mechanisms. *Oryx*, 2020, 54(5): 621-628.
- [41] Linnell J D C, Cretois B, Nilsen E B, Rolandsen C M, Solberg E J, Veiberg V, Kaczensky P, Van Moorter B, Panzacchi M, Rauset G R, Kaltenborn B. The challenges and opportunities of coexisting with wild ungulates in the human-dominated landscapes of Europe's Anthropocene. *Biological Conservation*, 2020, 244: 108500.
- [42] Ren G P, Yang Y, He X D, Li G S, Gao Y, Huang Z P, Ma C, Wang W, Xiao W. Habitat evaluation and conservation framework of the newly discovered and critically endangered black snub-nosed monkey. *Biological Conservation*, 2017, 209: 273-279.