

DOI: 10.5846/stxb202001010006

刘璐, 钱天陆, 席唱白, 迟瑶, 王结臣. 基于累积阻力的野生动物适宜生境斑块探测——以滇金丝猴为例. 生态学报, 2021, 41(14): 5879-5887.

Liu L, Qian T L, Xi C B, Chi Y, Wang J C. Detecting suitable habitat patches for wild animals based on the cumulative resistance: A case study of Yunnan snub-nosed monkey. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5879-5887.

基于累积阻力的野生动物适宜生境斑块探测 ——以滇金丝猴为例

刘 璐¹, 钱天陆¹, 席唱白¹, 迟 瑶¹, 王结臣^{1, 2, *}

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 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: 识别动物的适宜生境对野生动物保护、区域生态保护以及自然保护区的规划等具有指导意义。以滇金丝猴生存区域为例, 选取 7 个影响滇金丝猴生境适宜性的主要因子: 植被类型、海拔、坡度、坡向、距水系距离、距居民点距离、距道路距离, 基于 GIS 技术, 构建阻力面, 确定累积阻力阈值, 计算可达面积并据此划分斑块, 结合现有猴群的栖息地分布、保护区设立对划分结果进行分析讨论。结果表明, 区域内滇金丝猴的适宜生境面积整体占比较低, 猴群移动受到人类活动干扰或水系阻隔的影响, 其生境受到了不同程度的破坏, 且生境适宜度表现出中部最高, 北部次之, 南部最差的规律。划分生境适宜性等级的方法, 考虑到了明显地物对动物移动的较强阻隔作用, 顾及到了空间连续性和斑块完整性, 实验结果可反映出不同区域的生境适宜性差异。

关键词: 滇金丝猴; 阻力面; GIS; 生境适宜性

Detecting suitable habitat patches for wild animals based on the cumulative resistance: A case study of Yunnan snub-nosed monkey

LIU Lu¹, QIAN Tianlu¹, XI Changbai¹, CHI Yao¹, WANG Jiechen^{1, 2, *}

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

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

Abstract: Identification of suitable habitat for animals is of significance for wildlife conservation, regionally ecological protection and the planning of nature reserves. This paper, taking the habitat of Yunnan snub-nosed monkey as an example, selects seven factors affecting the habitat suitability including vegetation types, elevation, slope gradient, slope aspect, distance to water, distance to rural settlements, and distance to roads. Based on GIS technology, this paper constructs the resistance surface. By determining the cumulative resistance threshold, the reachable area is calculated and the patches are divided accordingly. Combining the existing habitat and reserves of monkeys, the comparative analysis showed that the proportion of the suitable habitat in the research area was relatively low. The movement of the monkeys is blocked by human activities or water system, and their habitat is damaged to varying degrees. In addition, the habitat suitability reaches the highest in the middle, followed by that in the north, and the lowest in the south. The method in this paper takes into account the strong blocking effect of obvious surface features on animal movement for the suitable habitat patches, considering the spatial continuity and patch integrity as well. The results can reflect the regional differences of habitat

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871294)

收稿日期: 2020-01-01; 网络出版日期: 2021-05-13

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

suitability in the study area.

Key Words: Yunnan snub-nosed monkeys; resistance surface; GIS; habitat suitability

野生动物是自然环境的组成部分^[1],是实现生态系统服务功能中不可或缺的一环^[2]。工业时代以来,人类很大程度上是以牺牲环境来换取社会经济的发展^[1],这也使得野生动物生境遭受严重破坏,野生动物生存面临严峻挑战^[3-4]。野生动物生存受多方面因素影响,包括食物资源分布^[5]、地形因素^[6]、气候条件变化^[7]、人类活动干扰^[8]等。自然环境的恶化和人类干扰强度的增加明显限制了野生动物在生境中的活动^[9],降低了野生动物栖息地的适宜度。在现有生境中识别适宜斑块可为野生动物保护提供一定的理论支持,有助于促进动物种群发展^[10]。

由于地理信息系统(Geographic Information System,简称GIS)技术在时空数据收集、整理、存储及展示方面有极大优势,且能够支持复杂的空间分析,打破了传统研究手段在人力资源、物力资源或者自然环境等方面的局限性^[11],因此本文基于环境空间数据并结合GIS技术来探测野生动物的适宜斑块。目前,利用GIS来分析野生动物适宜生境的研究方法主要有两种,其一是直接对土地覆盖数据分类,依据动物生存的适宜植被划定适宜生境^[12-13]。但是由于生境适宜性通常比简单的土地覆盖更为复杂,还需要考虑人类活动等其他因素对适宜性产生的影响,一些学者统计分析物种和环境之间的关系,建立栖息地适宜性模型(Habitat Suitability Models,简称HSM),HSM是描述物种对环境要求的统计模型,使用该模型计算整个研究区域的栖息地适宜性指数(Habitat Suitability Index,简称HSI),推测研究物种可能的地理分布,由此产生的HSI地图可用于定义适合生境规划的栖息地斑块,这些斑块通常是优先保护或可重新引导物种迁入的区域^[14-18]。但是现有研究较少考虑到周围环境对动物在某点处活动的影响^[13,16-19],忽视了水系等明显地物对动物扩散活动的阻隔作用,如何科学有效地探测动物的适宜生境斑块仍有待进一步研究。

滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)是中国特有的濒危野生动物之一,现存的自然种群约17个,共3000只左右^[20],自20世纪50年代以来,滇金丝猴的适宜植被类型(暗针叶林、针阔叶混交林等)减少了30%以上^[21-22]。由于适宜植被类型的减少,猴群在种群间进行移动变得尤为困难,种群间的遗传交换受到阻碍,加快了物种的灭绝速度^[23],因此有效地进行生境保护对于促进滇金丝猴的生存繁衍具有重要意义^[24]。目前,围绕滇金丝猴生境的研究主要集中在滇金丝猴的分布调查^[25-26]、生境景观连通性^[13,27]以及潜在栖息地走廊和优先恢复区域的分析^[28]等方面,但对不同生态因子影响下猴群运动的适宜生境还有待进一步讨论。本文以滇金丝猴为例,基于阻力面,结合GIS技术探测多因子影响作用下滇金丝猴的适宜生境斑块,建立一种考虑扩散阻力的生境适宜性评价方法,旨在探究区域内猴群的生境适宜度差异,识别猴群的适宜生境,帮助科学指导确定猴群生境保护的优先级,为保护区的规划或生态恢复提供理论支持,以期实现对滇金丝猴的有效保护。

1 研究区域概况

我国的滇金丝猴基本分布在位于横断山脉的从青藏高原北部向南延伸的一条狭长地带^[29],本文确定的研究区域即为该地带——北纬25°34′至30°21′,东经97°59′至100°33′之间(图1),大约有17个滇金丝猴猴群聚居于此^[20],涉及的行政区域有西藏自治区境内的芒康县、盐井县和云南省境内的德钦县、维西傈僳族自治县、兰坪白族普米族自治县、云龙县、丽江纳西族自治县和剑川县,总占地面积约34424.7 km²,海拔在1200 m到5500 m之间,相对高差达4300 m左右,植被类型主要有针阔叶混交林、针叶林、阔叶林、草甸及灌丛等。

2 研究方法

本文提出一种基于阻力面和确定的累积阻力阈值计算可达面积,以此探测适宜生境斑块的方法,其中,层

次分析法用于阻力面的构建,可考虑到各因素对猴群运动造成的不同程度影响。

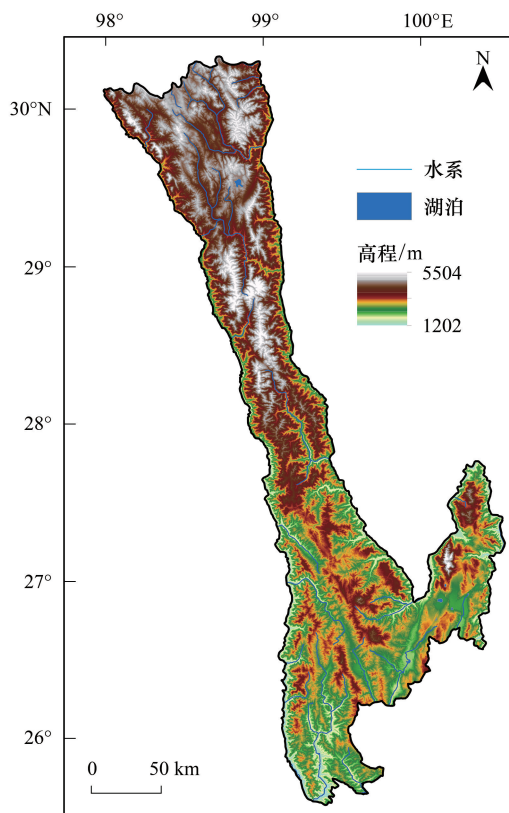


图 1 研究区及其地形

Fig.1 Study area and its topography

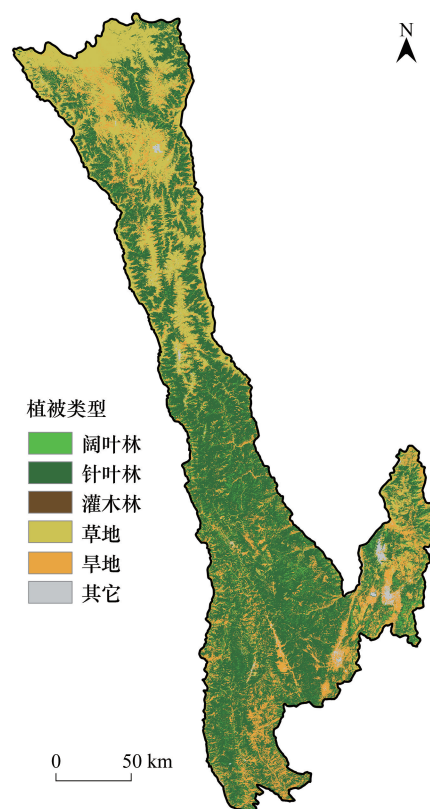


图 2 研究区植被类型分布

Fig.2 The distribution of vegetation types in the study area

2.1 影响滇金丝猴栖息地质量的因子选取

本文通过收集已有文献资料^[30-33],分析滇金丝猴对生境的要求,确定了7个影响滇金丝猴栖息地质量的因子,分别为地形地貌因素,包括海拔、坡度、坡向、水系,水系会对猴群扩散产生隔离作用;生物因素即植被类型,植被既可以作为食物,也可以提供隐蔽环境;干扰因素包括道路以及居民点。

2.2 数据来源及处理

为了消除边缘效应的影响,对研究区域向外做5km的缓冲区,研究区域和缓冲区共同作为数据预处理区域。研究中涉及到的植被分布数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)的2015年全球30m精细地表覆盖产品数据集^[34],数据格式为GEOTIFF(图2);DEM数据来源于NASA在2011年发放的全球Aster G-DEM数据,分辨率为30m;水系、道路、居民点来源于全国导航电子地图,数据格式为SHP矢量数据。

2.3 单因子栖息地质量评价

之前的研究表明^[30-33],滇金丝猴群主要分布在海拔高度为3000—4500m的区域,且猴群的活动能力较强,喜欢在向阳坡区域活动^[31],受坡度影响的作用不明显,主要是受其适宜植被分布的影响。滇金丝猴会表现出明显的避开有高度人类活动区域的行为,水系会对滇金丝猴的运动造成较强阻隔作用,但是王小明的研究^[33]表明猴群更喜欢在靠近水系的地方栖息。参考已有文献资料数据^[28,30-33],建立各影响因子的成本评价准则,进行单因子栖息地质量分析,如表1所示,成本越高,对猴群运动的阻碍越大。其中,道路要素选取国道、省道、县道以及铁路。

表 1 各因子栖息地质量评价准则
Table 1 Evaluation criteria for habitat quality of each factor

植被类型 Vegetation types	成本 Cost	距水系的距离 Distance from rivers	成本 Cost	距道路的距离 Distance from roads	成本 Cost
针叶阔叶混交林、落叶阔叶林、常绿针叶林、常绿阔叶林 Broadleaf and needleleaf mixed forest、Deciduous broadleaved forest、Open evergreen needle-leaved forest、 Evergreen broadleaved forest	1	<500m	1	>1500m	1
灌木林 Shrubland	50	500—1000m	10	1000—1500m	10
落叶针叶林 Deciduous needle-leaved forest	60	1000—1500m	70	500—1000m	70
草地、地衣与苔藓、稀疏植被、湿地、裸地 Grassland、Lichens and mosses、Sparse vegetation、 Wetlands、Bare areas	70	>1500m	100	<500m	100
旱地、水浇地、不透水面、水体、永久性冰雪 Rainfed cropland、Irrigated cropland、Impervious、 Water body、Permanent ice and snow	100	0m	NULL		

坡向 Aspect	成本 Cost	距居民点的距离 Distance from residential areas	成本 Cost	坡度 Slope	成本 Cost
南坡或者无坡向 South or no aspect	1	>5000m	1	15°—25°	1
东南坡或者西南坡 Southeast or southwest	10	3000—5000m	10	25°—35°	10
东坡或西坡 East or west	70	1000—3000m	70	<15°	70
东北坡或西北坡 Northeast or northwest	80	<1000m	100	>35°	100
北坡 North	100				

海拔 Altitude	成本 Cost
3500—4000m	1
3000—3500m 或 4000—4500m	50
>4500m 或 <3000m	100

2.4 确定因子权重

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是用于从成对比较的矩阵中推导出优先级向量, 对影响层次结构的因素进行权重排序的方法。由于它的简单性、易用性以及极大的灵活性, 已被广泛应用到科学研究及实际工作中^[35]。在单因子质量评价的基础上, 本文运用 AHP 方法, 确定 7 个生态因子的影响权重^[36]。从已有文献资料中分析获取各生态因子对滇金丝猴生境质量的影响程度^[30-33], 借鉴 1—9 的标度方法^[37] (表 2), 且层次分析中涉及因素较少, 采用单层次模型结构, 一次性构造判断矩阵^[36] (表 3), 计算得出各因子影响权重赋值如表 4 所示, 对应的随机一致性指标为 0.0529<0.1, 判断矩阵有效。

表 2 判断矩阵中各因子取值标准与含义
Table 2 Criteria and meaning of value of factors in judgment matrix

标准 Criteria	含义 Definition
1	因子 <i>i</i> 与因子 <i>j</i> 同等重要
3	因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 稍微重要
5	因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 明显重要
7	因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 强烈重要
9	因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 极端重要
2, 4, 6, 8	以上判断中间状态对应的标度值
$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{9}$	因子 <i>j</i> 比因子 <i>i</i> 的重要性标度, 若因子 <i>j</i> 与因子 <i>i</i> 比较, 则得到判断值为 $C_{ji} = 1/C_{ij}$

表 3 判断矩阵
Table 3 Judgment matrix

C _{ij}	食物 C ₁ Food	水源 C ₂ Rivers	海拔 C ₃ Altitude	坡度 C ₄ Slope	坡向 C ₅ Aspect	道路 C ₆ Roads	居民点 C ₇ Residential areas
C ₁	1	7	3	7	9	5	5
C ₂	1/7	1	1/5	2	3	1/4	1/4
C ₃	1/3	5	1	7	9	3	3
C ₄	1/7	1/2	1/7	1	3	1/5	1/5
C ₅	1/9	1/3	1/9	1/3	1	1/7	1/7
C ₆	1/5	4	1/3	5	7	1	1
C ₇	1/5	4	1/3	5	7	1	1

表 4 各因子权重系数
Table 4 The weight coefficient of factors

因子 Factors	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
权重 Weight	0.3837	0.0481	0.2593	0.0353	0.0206	0.1265	0.1265

2.5 构建阻力面

一些研究^[27,38] 基于专家经验来分配与土地利用类型相对应的阻力值,这种方法忽视了同一土地类型的内部差异,需要将人类活动等其他因素纳入评估体系。本文对各生态因子的成本值进行加权求和来构建多因子影响下滇金丝猴在生境中移动的阻力面,如式(1)。

$$R = \sum_i^n Val_i \times W_i \tag{1}$$

式中, R 表示滇金丝猴移动时的阻力值, Val_i 表示第 i 个因子的成本值, W_i 为各因子对应的权重。其中,水系有较强的阻隔作用,设为空值。

2.6 确定累积阻力阈值

从已有文献调查中确定 17 个现有滇金丝猴群的地理分布^[20],滇金丝猴的日移动距离在 350m 到 3km 之间^[39],选择最大日移动距离 3km,计算 17 个猴群在此范围内运动的最大累积阻力值,并求得平均值为 99183,取整到 100000,作为本实验的累计阻力阈值。

2.7 计算可达面积

在基于构建的阻力面上,以最大日移动距离 3km^[39] 作为采样间隔,计算成本距离在小于累积阻力阈值 100000 的情况下,每点的可达面积,可达面积大意味着当滇金丝猴向其他区域移动时受到的阻力较弱,因此更适宜猴群生存。

3 结果与分析

3.1 单因子栖息地质量分析及阻力面评价

研究区域内最适宜植被较少,分布稀疏,南北部水系较多,会对猴群运动造成较大的阻隔,南部道路以及农村居民点数量多,密度大,猴群受到的人类干扰较强,北部及中部区域的海拔更适宜猴群生存,南北两端的地形较为平坦,中部地形起伏较大。图 3 为构建的阻力面,整体来看,南部区域阻力高,北部次之,中部最低,反映出滇金丝猴在中部更容易进行移动。

3.2 多因子综合下生境适宜性评价

采用自然间断点分级法将研究区域划分为 4 类(表 5),即最适宜生境斑块、次适宜生境斑块、一般适宜生境斑块以及不适宜生境斑块。

分析生境适宜性评价结果(图4),排除三个面积小于1.5km²的斑块后,滇金丝猴的最适宜生境斑块共有7个,编号为P1—P7(图5),最大斑块面积约384.3km²,最小斑块面积14.0km²左右,总面积约为1009km²,仅占研究区域面积的2.9%。最适宜生境斑块在中部呈现出较强的聚集趋势,且斑块面积较大,南北部的最适宜斑块数目少、面积小。次适宜生境面积共2506km²,占研究区域的7.3%,一般适宜生境面积总和为8120 km²,约研究区域总面积的23.6%,总体来说,不同等级的生境在空间上呈现出层层包围的形态,生境适宜性由最适宜生境斑块开始,向外扩展的过程中逐级降低,不适宜生境面积为22042km²,占研究区域的绝大比例。

3.3 模型结果验证

Zhao 等人的研究^[40]中记录了滇金丝猴在以自然保护区为主的区域内出现的位置,共计75个位点,本文利用该文献中实地收集的滇金丝猴出现位点数据,对模型结果进行验证。分析表明,有12个位点落在最适宜生境内,14个位点落在次适宜生境中,33个位点落在一般适宜生境内,共约79%的位点位于适宜生境,仅有16个位点位于不适宜生境,且不适宜生境内的位点绝大多数都十分接近一般适宜生境区域,其中,有11个位点落在适宜生境的3km缓冲区带内。

3.4 现有猴群所在地及保护区生境适宜性分析

从全球保护区数据(数据生成时间为2015年9月)中获取研究区域内的保护区,17个猴群的编号为Q1—Q17(图5),其所在地中,除Q4、Q5、Q14外,其余基本都在芒康、白马雪山、云岭保护区范围内,其中Q4接近芒康保护区,Q5接近白马雪山保护区,Q11离保护区距离相对较远。Q6、Q7、Q8、Q12、Q14共5个猴群在最适宜生境内;4个在次适宜生境的猴群是Q4、Q9、Q10、Q13;其余8个猴群均在一般适宜生境内,总之,17个猴群所在地全部分布在适宜生境中。

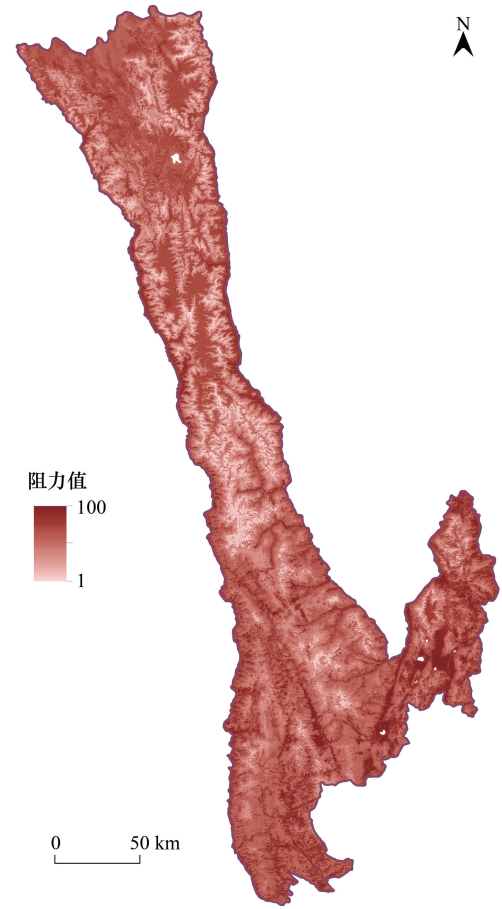


图3 研究区域内滇金丝猴移动阻力面
Fig.3 Resistance surface of monkeys in the study area

表5 滇金丝猴生境适宜性划分
Table 5 Habitat suitability classification of Yunnan snub-nosed monkey

可达面积 Accessible area/km ²	适宜性 Suitability	可达面积 Accessible area/km ²	适宜性 Suitability
160.8—325.8	最适宜	33.3—82.3	一般适宜
82.3—160.8	次适宜	0—33.3	不适宜

最适宜生境斑块P3—P6集中分布在中部区域的白马雪山保护区中,面积相对较小的P1、P2、P7斑块位于保护区范围之外,其中P2、P7斑块内有滇金丝猴出现。研究区域内保护区面积共7329km²,有4409 km²属于适宜生境,约占适宜生境总面积的38%,其中最适宜生境为846 km²,次适宜生境为975 km²,一般适宜生境为2588 km²。

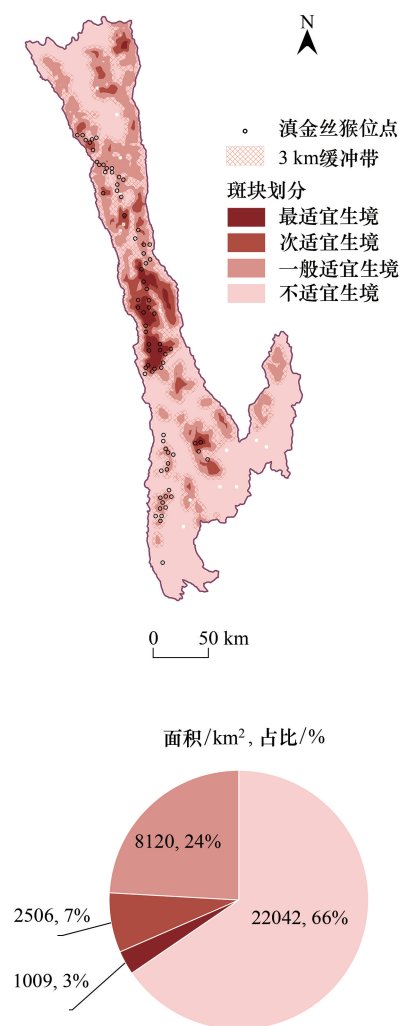


Fig.4 Habitat suitability evaluation results

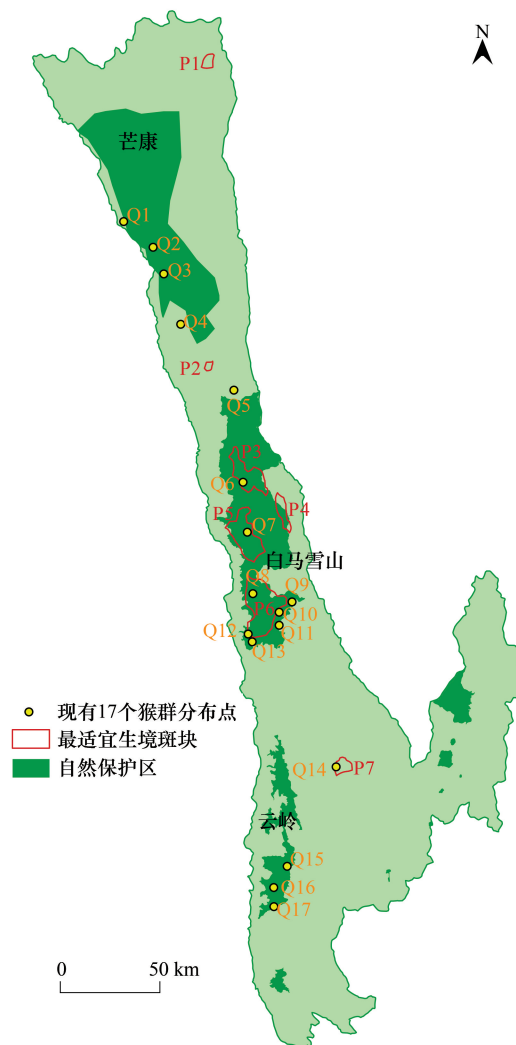


Fig.5 The distribution of monkey habitats and nature reserves

Q1—Q17 表示现有猴群分布点;P1—P7 表示猴群的最适宜生境斑块

4 结论与讨论

本文提出一种基于累积阻力探测滇金丝猴适宜生境斑块的方法,包括六个步骤,依次是影响因子的选取,各因子评价准则的建立,因子权重的确定,阻力面的构建,累积阻力阈值的确定以及生境适宜性评价,评价结果显示研究区域内的生境适宜度呈中部优于北部、北部优于南部的特点,适宜生境共占总面积的 33.8%,整体占比较低,生境受到的破坏较为严重,适宜生境斑块的空间分布主要聚集在中部区域,南部区域受到人类活动的影响较强,居民点、道路等会对滇金丝猴造成较大干扰,且水系、湖泊也会阻止猴群扩散,由此造成南部区域的适宜生境最少,且适宜生境分布分散,相互孤立,连通性差,需要采取保护措施,比如设立保护区、退耕还林等,加强对南部区域的保护。

将生境适宜性评价结果与滇金丝猴现存 17 个孤立种群的分布位置进行比较,发现将近一半的种群其生境质量一般;与设立的保护区进行比较,有些适宜猴群生存的生境斑块并未在保护区内,优先在最适宜和次适宜生境适当建立保护区,作为滇金丝猴的潜在栖息地,可为滇金丝猴的保护带来积极的作用。

本文选定的影响滇金丝猴生存的因素是通过已有文献资料收集得来的,目前,有关降水与气温对滇金丝

猴的直接影响的研究较少,吴建国等人^[41]指出滇金丝猴活动与气温和降水之间的关系可能是非线性的且较为复杂的,因此量化气候要素对滇金丝猴的影响较为困难,且滇金丝猴能够适应低温、低降雨量等恶劣环境条件^[42],随着季节变换,滇金丝猴活动范围的变化主要受食物影响而非气候^[30],因此本文暂不考虑气候要素。

在过去的二十多年间,滇金丝猴的数量增长近 1000,自然保护区的设立有效促进了猴群的生存繁衍^[20],然而水系和道路会阻碍猴群的移动,虽然猴群在数量上明显增加,但是之前的种群却有消失的,其实际的地理分布范围有所缩小,猴群可能无法迁徙到已经恢复的、重新适宜栖息的区域,最终可能导致猴群的局部灭绝^[23]。本文的斑块划分结果顾及了空间连续性、斑块的完整性和多因素影响下猴群移动受到的阻力。本文提出的方法是对 HSM 模型的进一步补充,也从侧面反映出生境的隔离程度,在今后的研究中可以结合相关的遥感数据、动物观测数据等做进一步分析,有助于恢复野生动物生境,为保护区的设立提供一定的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 蒋志刚. 从人类发展史谈野生动物科学保护观. 野生动物, 2013, 34(1): 43-45.
- [2] 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.
- [3] 陈炳浩. 世界生物多样性面临危机及其保护的重要性. 世界林业研究, 1993(4): 1-6.
- [4] Di Febbraro M, Sallustio L, Vizzarri M, De Rosa D, De Lisio L, Loy A, Eichelberger B A, Marchetti M. Expert-based and correlative models to map habitat quality: which gives better support to conservation planning? Global Ecology and Conservation, 2018, 16: e00513.
- [5] Nielsen S E, McDermid G, Stenhouse G B, Boyce M S. Dynamic wildlife habitat models: seasonal foods and mortality risk predict occupancy-abundance and habitat selection in grizzly bears. Biological Conservation, 2010, 143(7): 1623-1634.
- [6] Tian C, Liao P C, Dayananda B, Zhang Y Y, Liu Z X, Li J Q, Yu B, Qing L. Impacts of livestock grazing, topography and vegetation on distribution of wildlife in Wanglang National Nature Reserve, China. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: e00726.
- [7] Roerick T M, Cain III J W, Gedir J V. Forest restoration, wildfire, and habitat selection by female mule deer. Forest Ecology and Management, 2019, 447: 169-179.
- [8] Matseketsa G, Muboko N, Gandiwa E, Kombora D M, Chibememe G. An assessment of human-wildlife conflicts in local communities bordering the western part of Save Valley Conservancy, Zimbabwe. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: e00737.
- [9] Plante S, Dussault C, Richard J H, Côté S D. Human disturbance effects and cumulative habitat loss in endangered migratory caribou. Biological Conservation, 2018, 224: 129-143.
- [10] 高惠, 滕丽微, 汪洋, 王继飞, 刘振生. 阿拉善马鹿(*Cervus alashanicus*)生境适宜性评价. 生态学报, 2017, 37(11): 3926-3931.
- [11] 年波. 基于 RS 和 GIS 的滇金丝猴生境适宜性评价和景观规划研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2004.
- [12] Ersoy E, Jorgensen A, Warren P H. Identifying multispecies connectivity corridors and the spatial pattern of the landscape. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 40: 308-322.
- [13] 张宇, 李丽, 吴巩固, 周跃, 覃顺萍, 王小明. 基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析. 生态学报, 2016, 36(1): 51-58.
- [14] 王维, 张哲, 江源, 刘孝富, 许超. 基于生境适宜度的成都震后大熊猫生境评价. 环境科学研究, 2010, 23(9): 1128-1135.
- [15] 李俊灵. 基于 GIS 技术的越冬鹤类对土地利用变化的响应研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [16] Stricker H K, Gehring T M, Donner D, Petroelje T. Multi-scale habitat selection model assessing potential gray wolf den habitat and dispersal corridors in Michigan, USA. Ecological Modelling, 2019, 397: 84-94.
- [17] Galluzzi M, Armanini M, Ferrari G, Zibordi F, Nocentini S, Mustoni A. Habitat suitability models, for ecological study of the alpine marmot in the central Italian Alps. Ecological Informatics, 2017, 37: 10-17.
- [18] Koreň M, Find'o S, Skuban M, Kajba M. Habitat suitability modelling from non-point data: the case study of brown bear habitat in Slovakia. Ecological Informatics, 2011, 6(5): 296-302.
- [19] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. PLoS One, 2012, 7(12): e52604.
- [20] Zhao X M, Ren B P, Li D Y, Xiang Z F, Garber P A, Li M. Effects of habitat fragmentation and human disturbance on the population dynamics of the Yunnan snub-nosed monkey from 1994 to 2016. PeerJ, 2019, 7(10): e6633.
- [21] Clauzel C, Bannwarth C, Foltete J C. Integrating regional-scale connectivity in habitat restoration: an application for amphibian conservation in eastern France. Journal for Nature Conservation, 2015, 23: 98-107.
- [22] Li W W, Clauzel C, Dai Y C, Wu G S, Giraudeau P, Li L. Improving landscape connectivity for the Yunnan snub-nosed monkey through cropland reforestation using graph theory. Journal for Nature Conservation, 2017, 38: 46-55.

- [23] Xia W C, Zhang C, Zhuang H F, Ren B P, Zhou J, Shen J, Krzton A, Luan X F, Li D Y. The potential distribution and disappearing of Yunnan snub-nosed monkey: influences of habitat fragmentation. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00835.
- [24] 王亚明, 薛亚东, 夏友福. 滇西北滇金丝猴栖息地景观格局分析及其破碎化评价. *林业调查规划*, 2011, 36(2): 34-37.
- [25] Fu R, Li L, Yu Z H, Afonso E, Giraudoux P. Spatial and temporal distribution of Yunnan snub-nosed monkey, *Rhinopithecus bieti*, indices. *Mammalia*, 2019, 83(2): 103-109.
- [26] Su X K, Han W Y, Liu G H. Potential priority areas and protection network for Yunnan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus bieti*) in Southwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(7): 1211-1227.
- [27] 李慧, 李丽, 吴巩胜, 周跃, 李雯雯, 梅泽文. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. *生态学报*, 2018, 38(6): 2221-2228.
- [28] 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.
- [29] Wong M H G, Li R Q, Xu M, Long Y C. An integrative approach to assessing the potential impacts of climate change on the Yunnan snub-nosed monkey. *Biological Conservation*, 2013, 158: 401-409.
- [30] Li D Y, Grueter C C, Ren B P, Long Y C, Li M, Peng Z S, Wei F W. Ranging of *Rhinopithecus bieti* in the Samage Forest, China. II. Use of land cover types and altitudes. *International Journal of Primatology*, 2008, 29(5): 1147-1173.
- [31] Liu Z H, Zhao Q K. Sleeping sites of *Rhinopithecus bieti* at Mt. Fuhe, Yunnan. *Primates*, 2004, 45(4): 241-248.
- [32] 钟泰, 肖林, 霍晟, 向左甫, 肖文, 崔亮伟. 白马雪山黑白仰鼻猴(*Rhinopithecus bieti*)垂直迁移(英文). *动物学研究*, 2008, 29(2): 181-188.
- [33] 王小明. 基于滇金丝猴生境保护的农村居民点整理分区研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2015.
- [34] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Xie S, Gao Y. Fine land-cover mapping in china using landsat datacube and an operational SPECLib-based approach. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1056.
- [35] Ivanco M, Hou G, Michaeli J. Sensitivity analysis method to address user disparities in the analytic hierarchy process. *Expert Systems With Applications*, 2017, 90: 111-126.
- [36] 李军锋, 李天文, 金学林, 刘学军, 汤国安. 基于层次分析法的秦岭地区大熊猫栖息地质量评价. *山地学报*, 2005, 23(6): 694-701.
- [37] 郭豪杰. 黄河下游平原农业景观两栖类生境适宜性评价[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- [38] 李雯雯, 李丽, 吴巩胜, 张宇, 代云川, 周跃. 评估不同尺度下农牧地对滇金丝猴景观连接度的影响. *生态学报*, 2016, 36(24): 8136-8144.
- [39] Clauzel C, Deng X Q, Wu G S, Patrick G, Li L. Assessing the impact of road developments on connectivity across multiple scales: application to Yunnan snub-nosed monkey conservation. *Biological Conservation*, 2015, 192: 207-217.
- [40] Zhao X M, Ren B P, Li D Y, Garber P A, Zhu P F, Xiang Z F, Grueter C C, Liu Z J, Li M. Climate change, grazing, and collecting accelerate habitat contraction in an endangered primate. *Biological Conservation*, 2019, 231: 88-97.
- [41] 吴建国, 吕佳佳. 气候变化对滇金丝猴分布的潜在影响. *气象与环境学报*, 2009, 25(6): 1-10.
- [42] Hanya G, Ménard N, Qarro M, Tattou M I, Fuse M, Vallet D, Yamada A, Go M, Takafumi H, Tsujino R, Agetsuma N, Wada K. Dietary adaptations of temperate primates: comparisons of Japanese and Barbary macaques. *Primates*, 2011, 52(2): 187-198.