



•研究报告•

三江源地区雪豹保护优先区规划

肖凌云^{1#} 程琛^{1,2#} 万华伟³ 张德海⁴ 王永财³ 才旦⁵
侯鹏³ 李娟⁶ 杨欣⁷ 吕植^{1*} 刘玉平^{3*}

1 (北京大学生命科学院自然保护与社会发展研究中心, 北京 100871)

2 (山水自然保护中心, 北京 100871)

3 (生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

4 (三江源国家公园管理局, 西宁 810001)

5 (青海省玉树藏族自治州林业局, 青海玉树 815000)

6 (University of California, Berkeley, CA 94720-3114, USA)

7 (四川省绿色江河环境保护促进会, 成都 610041)

摘要: 为了将有限资源合理投放到关键区域, 实现物种保护成效的最大化, 找出质量最好的栖息地及它们之间的迁徙通道是制定保护规划的第一步。本研究以三江源的雪豹(*Panthera uncia*)栖息地为对象, 基于野外调查数据和高分辨率卫星遥感数据, 利用物种分布模型、保护规划模型和连通度分析工具, 找出了三江源地区雪豹的核心栖息地分布和潜在迁徙通道位置, 分析了目前保护中的潜在威胁, 并提出了针对三江源西、中、东三块区域的不同保护对策。结果表明: (1)三江源西部核心栖息地比较小而破碎, 但迁徙通道较多且没有明显窄点, 未来应关注青藏线的潜在阻碍作用, 同时应防范道路沿线的野生动物盗猎; (2)中部区域横跨玉树-杂多-囊谦的雪豹栖息地是三江源最大的核心雪豹栖息地, 在连通其他种群中也处于中心地位, 应通过种群监测确定其健康稳定, 对开发、偷猎等威胁防微杜渐, 保持其源种群的作用; (3)东部区域人口密度高, 受人类活动的影响最大, 需保证阿尼玛卿、年保玉则两块核心栖息地的质量, 并重点监测甘德县境内的省道处雪豹的迁徙通道是否畅通。三江源地区雪豹栖息地总体质量较好, 建议将维持核心源种群的稳定性, 保持种群间迁徙通道的畅通作为三江源的雪豹景观保护工作的整体目标。未来应充分利用天地一体化监测手段, 开展重要保护物种栖息地状况的评估和预警, 尤其是非保护地区域物种核心栖息地的开发建设活动。

关键词: 雪豹; 栖息地; 高分辨率卫星; 保护优先区; 迁徙通道

Defining conservation priority areas of snow leopard habitat in the Sanjiangyuan Region

Lingyun Xiao^{1#}, Chen Cheng^{1,2#}, Huawei Wan³, Dehai Zhang⁴, Yongcai Wang³, Tsedan⁵, Peng Hou³, Juan Li⁶, Xin Yang⁷, Zhi Lü^{1*}, Yuping Liu^{3*}

1 Center for Nature and Society, College of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 Shan Shui Conservation Center, Beijing 100871

3 Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094

4 Management Bureau of the Three-River-Source National Park, Xining 810001

5 Forestry Bureau of Yushu Prefecture, Yushu, Qinghai 815000

6 Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA 94720-3114, USA

7 Sichuan Green River Environmental Protection Promotion Association, Chengdu 610041

Abstract: To maximize species conservation outcomes and effectively allocate limited resources, the first step in conservation planning is to define conservation priority areas and migration pathways between them. Based on field survey and high-resolution satellite data, we used species distribution models, conservation

收稿日期: 2019-01-18; 接受日期: 2019-05-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0507200)、高分重大科技专项(05-Y30B02-9001-13/15)和国家青年科学基金(41801366)

共同第一作者 Co-first authors

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: luzhi@pku.edu.cn; lyping3349@sina.com

planning tools and connectivity analysis tools to define the core habitat area and potential corridors for snow leopards (*Panthera uncia*) in the Sanjiangyuan Region. With potential threats identified, we proposed differentiated conservation strategies for different parts of the Sanjiangyuan Region: (1) In the western region, snow leopard core habitats are mostly small and fragmented but with widespread migration pathways and no obvious bottlenecks. However, the Qinghai-Tibet Railway is a potential barrier for snow leopard populations in the western region and needs further investigation. (2) The central region contains the largest core habitat which also has highest centrality in the connectivity analysis. To maintain the function of these source populations, we recommend long-term monitoring, anti-poaching patrol and supervision on development projects for this region. (3) For the eastern region, which has the highest human density, it is important to safeguard two core habitats (Anemaqen and Nanpo Yutze) and maintain the narrow corridors in between them. The provincial highway in Gande County may be a potential barrier for snow leopard migration and deserves further monitoring. As the epicenter for snow leopard conservation in China, the habitat quality in the Sanjiangyuan Region remains good overall. The goal of snow leopard landscape conservation in Sanjiangyuan should be to maintain core source populations while keeping migration routes unblocked. Integrated space-ground monitoring approaches should be implemented in the future for assessments and early warning signs of habitat degradation for these important protected species, especially in non-protected areas in core habitat at risk for development.

Key words: snow leopard; habitat; high-resolution satellite data; conservation priority; dispersal corridor

在物种保护工作中,为了将有限的资源合理投放到不同区域并产生最大化的保护成果,首先需要对栖息地质量和其所面临的威胁进行评估,找出核心栖息地及其之间的迁徙通道,并在未来的保护规划中维持核心栖息地的质量并保证通道畅通。大型食肉动物能量需求高,家域面积大,对栖息地的需求高,繁殖相对缓慢,种群密度低,与人类的冲突激烈,导致它们在各类威胁面前极为脆弱(Carbone et al, 1999; Cardillo et al, 2004, 2005)。全球现存的31种大型食肉动物中,19种被IUCN列为受胁(包括易危、濒危和极危)物种,面临全球性或区域性灭绝的风险;24种的种群数量持续下降;能查出历史分布范围的17种中,当前的分布面积平均仅是历史分布面积的47% (Ripple et al, 2014)。

雪豹(*Panthera uncia*)起源于青藏高原腹地,随后扩散到中亚各大山系(Davis et al, 2010; Deng et al, 2011),其栖息地与畜牧业分布区、藏传佛教分布区、亚洲重要水源地高度重叠,是亚洲山地生态系统的旗舰种与伞护种。雪豹被IUCN红色名录评为“易危”,全球种群数量7,463–7,980只(McCarthy et al, 2017)。《Snow Leopard Survival Strategy》一书中全面评估了雪豹面临的主要威胁(McCarthy & Chapron, 2003): (1)家畜的竞争、栖息地退化和猎物短缺; (2)人类的报复性猎杀; (3)非法贸易。除此之外,还包括气候变化、开矿、基础设施建设(道路围栏等)形成的阻碍(Jackson et al, 2013)。IUCN最新评级中

认为雪豹种群在过去22.62年(3个世代)内下降了10%,也是基于有些地区不断增长的家畜、不断加强的开矿和道路修建等压力来评估的(McCarthy et al, 2017)。

三江源地处青藏高原东部,人类干扰较小,猎物种群丰富,栖息地质量高,是中国乃至世界雪豹保护最有希望的地区之一。弄清三江源雪豹栖息地的分布格局,以及核心栖息地和迁徙通道的位置,是制定细致的雪豹保护规划的首要需求。除了环境变量如地形、气候等以外,人类活动的分布对雪豹栖息地的分布也存在不可忽略的影响。然而对于雪豹栖息地的分析预测,长期以来受限于缺乏高精度的人类活动分布数据。

本文采用高分辨率卫星数据解译的人类活动斑块数据,利用最大熵模型(maximum entropy modelling, Phillips et al, 2006)和Zonation保护规划模型(Lehtomäki & Moilanen, 2013)评估三江源雪豹栖息地分布,并对栖息地质量进行排序,应用基于电路理论设计的ArcGIS插件Linkage mapper (V1.10)计算核心栖息地斑块间的雪豹栖息地连通度,并分析人类活动斑块对连通度的可能影响,以期三江源地区的雪豹保护规划制定提供基础数据。

1 研究方法

1.1 研究区域

三江源地区位于我国青海省南部,行政区域上

包括海南、黄南、玉树、果洛4个州的16个县以及格尔木市的唐古拉山镇,总面积为36.3万km²。该地区以山地地貌为主,山脉主要包括东昆仑山、阿尼玛卿山、巴颜喀拉山和唐古拉山等,海拔3,335–6,564 m。三江源还是长江、黄河、澜沧江的源头汇水区,为全世界1/3的人口提供水源(三江源自然保护区生态环境编辑委员会,2002)。该地区属典型的高原大陆性气候,干湿季分明,年温差小(全年平均气温为-5.6至3.8℃),日温差大,日照时间长,辐射强烈,无四季区分。除了少量的森林和湿地,草地是三江源地区分布最广泛的生态系统类型。其中,高寒草甸分布面积最大,占三江源草地面积的76%,其次是高寒草原(23%)(三江源自然保护区生态环境编辑委员会,2002)。三江源地区生活的大型食肉动物包括狼(*Canis lupus*)、棕熊(*Ursus arctos*)、雪豹、金钱豹(*Panthera pardus*)等。

1.2 雪豹分布点收集与人类活动斑块解译

(1)雪豹位点收集。作者于2008–2017年在三江源全区域内,通过粪便收集与红外相机陷阱两种方式获得560个雪豹分布位点。在栖息地预测中,为了避免取样偏差和位点的空间自相关,我们用1 km网格稀疏化了这些位点,即存在于同一个1 km网格内的雪豹分布位点随机保留1个,其他删除,该步骤用R代码spatialthin来处理,最终确定220个位点进

入模型(图1)。

(2)人类活动信息提取。以2016年6–9月的Planet高分辨率卫星遥感影像为底图(空间分辨率为5 m),通过目视解译的方法对区域内人类活动斑块进行提取。人类活动包括农业用地、居民点、工矿用地、采石场、能源设施、交通设施、养殖场、其他人工设施及道路等9种类型。共得到人类活动斑块16,811处,各级线状道路11,254处(图2)。对人类活动分布数据进行精度评价,总体精度为81%, Kappa系数为0.51,能满足数据分析需求。

1.3 雪豹栖息地适宜度计算

选择29个环境变量用于拟合雪豹的栖息地适宜度:(1)与地形相关的变量4个,即海拔、坡度、坡向、崎岖度。其中海拔来自30 m Aster GDEM图层,坡度、坡向与崎岖度使用海拔图层,应用ArcGIS 10.2中的空间分析工具和VRM插件计算而来;(2)增强型植被指数(the enhanced vegetation index),来源于美国宇航局土地卫星装载的中分辨率成像光谱仪MODIS;(3)土地覆盖类型,来自中国1:25万土地覆盖遥感调查与监测数据库;(4)19个生物气候变量(bioclimatic variables, Fick & Hijmans, 2017);(5)4个人为影响变量,即道路距离、距人类活动斑块距离、道路密度和人类活动斑块密度,由此次高分辨率卫星解译结果生成。由于19个生物气候变量的

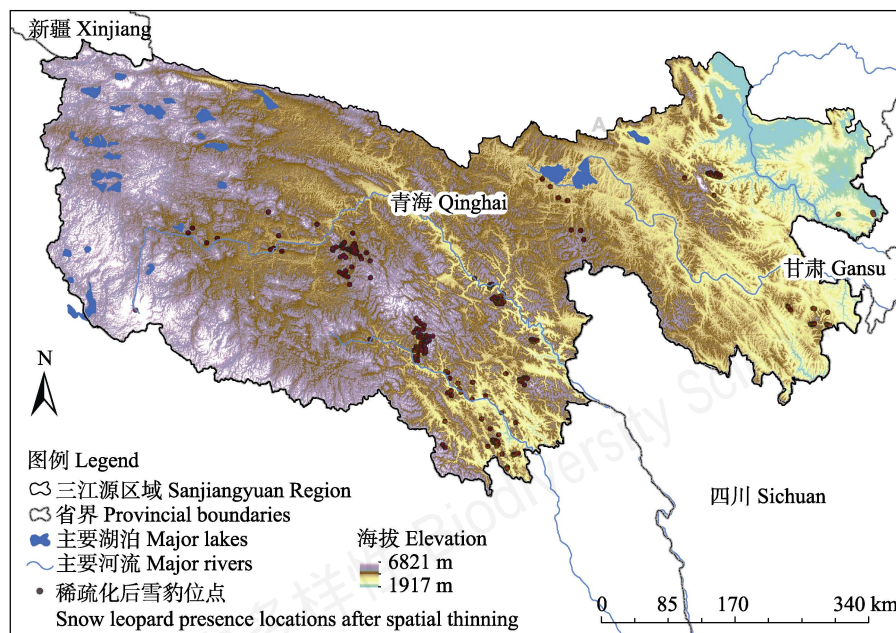


图1 三江源区域稀疏化后的220个雪豹出现位点

Fig. 1 The 220 presence locations of snow leopards after spatial thinning in Sanjiangyuan Region

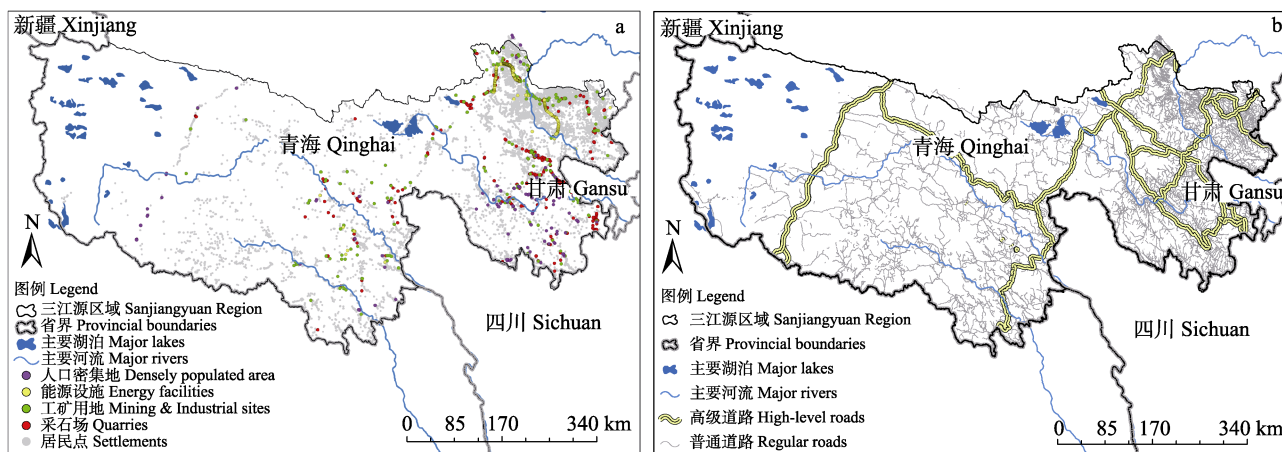


图2 三江源区域各类型人类活动斑块(a)和道路(b)的分布。此次分析中主要关注人口密集地、能源设施、工矿用地、采石场和农村居民点这几种类型,其中人口密集地包括城镇、机场和学校。道路被分为普通道路和高级道路两种大类,其中高级道路包括高速公路、国道、省道和铁路。

Fig. 2 The distribution of human activity patches (a) and roads (b) in Sanjiangyuan Region. This study mainly concerned on densely populated areas (cities and towns, airports and schools), energy facilities, mining and industry land, quarry and scattered rural settlements. Roads were classified as ordinary roads and busy roads (expressways, national highways, provincial highways and railways).

分辨率最高为30 s (约874 m),我们将所有变量都用重采样的方法降到了同样的分辨率。

利用MaxEnt模型模拟三江源雪豹栖息地的分布。在分析中,使用75%的数据作为训练数据,25%的数据作为检验数据,5次重复拟合并取平均值,用ROC曲线检验最终的模型拟合优度(Phillips et al, 2006)。我们选取了模型特异度与敏感度之和最大时的值为阈值(Manel et al, 2001),用ArcMap中的重分类功能将此阈值以上的区域定义为雪豹适宜栖息地。

1.4 雪豹栖息地质量排序

利用Zonation V4保护规划模型软件(Lehtomäki & Moilanen, 2013)逐步将对整体保护价值贡献最低的栖息地栅格移除,按照被移除的顺序给栖息地排序(Moilanen et al, 2009),划分出保护的优先等级。采用核心区域法(Core Area Zonation)作为移除标准,即优先保留适宜度更高的栅格。由于雪豹迁徙能力较强,在分区时,通过设置30 km (雪豹最长日迁徙距离, McCarthy et al, 2005)的平滑值来减少斑块的破碎化,并勾选Edge removal选项,使其优先从边缘开始移除,来减少保护的边缘效应。

1.5 雪豹栖息地连通度

利用考虑了人类活动影响的雪豹核心栖息地图层和影响雪豹迁徙的环境阻力图层,应用基于电路理论设计的ArcGIS插件Linkage Mapper (V1.10),

计算核心栖息地斑块间雪豹栖息地的连通性,以及核心栖息地的中心地位排序(与此斑块连接的斑块越多中心地位越高)。其中环境阻力图层主要考虑以下两个方面:

(1)自然迁徙阻力。计算公式为:自然迁徙阻力 = 1 - 自然栖息地适宜度

(2)人为迁徙阻力,即人类活动带来的阻力。通过以下方法计算,其中4种影响变量的权重根据本团队长期调查工作所积累的三江源地区各类人为活动干扰强度的认识和经验设定:

人为迁徙阻力 = 普通道路密度 + 4 × 高级道路(包括国道、省道、高速、铁路)密度 + 农村居住点密度 + 2 × 采石场密度 + 4 × 工矿用地密度 + 4 × 人口密集地(包括城镇、学校、机场)密度

总阻力 = 1 + 40 × 自然迁徙阻力 × 人为迁徙阻力,将两种阻力相结合,乘以40是为了得到数值在1-100之间的环境阻力图层,输入模型进行连通度的计算。

2 结果与分析

2.1 雪豹栖息地适宜度计算与潜在栖息地分布

ROC曲线表明,雪豹栖息地预测模型的训练数据和检验数据的AUC值分别为0.9244和0.8925,有较高的模型拟合优度。Jackknife检验结果显示,对模型综合贡献最大的因子为道路密度(17.2%)和坡

度(16.5%)。其中坡度在单独使用时的独立贡献最大,可见其带有重要的预测信息;而道路密度在不使用时导致的模型损失最大,说明其带有其他变量不具备的独立信息。从这两个主要变量的响应曲线来看,雪豹主要生活在坡度较大、道路密度较低的区域。根据模型特异度与敏感度之和最大所决定的阈值重分类后,三江源地区潜在雪豹栖息地面积为116,570 km²,占整个三江源面积的31.8% (图3)。加入人类影响变量后模型预测的雪豹栖息地面积较不加人类影响时减少了2.8万km²,占雪豹潜在栖息地面积的19%。

2.2 雪豹核心栖息地

根据Zonation栖息地质量排序,雪豹核心栖息地由西向东主要分布在(图4中雪豹栖息地优先度排序在80%–100%区间的色块): 唐古拉山乡的两块区域、澜沧江源头杂多县与治多县交界处的一块、治多县索加乡、玉树-杂多-囊谦的大片连续核心栖息地、阿尼玛卿神山区(兴海-玛沁)、年保玉则神山区(久治-班玛),这个结果与我们长期在三江源野外调查的经验基本相符。加入人类影响后东部人口密集区雪豹的核心栖息地面积缩减,西部人口稀疏区核心栖息地面积增加(图5)。

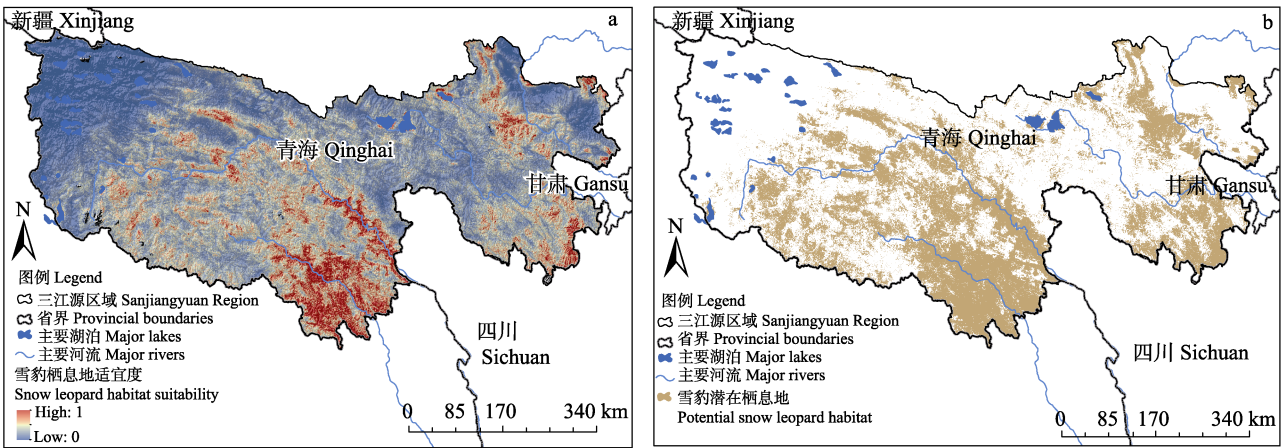


图3 三江源区域雪豹栖息地适宜度(a)和潜在栖息地分布(b)
Fig. 3 Snow leopard habitat suitability (a) and potential habitat (b) in Sanjiangyuan Region

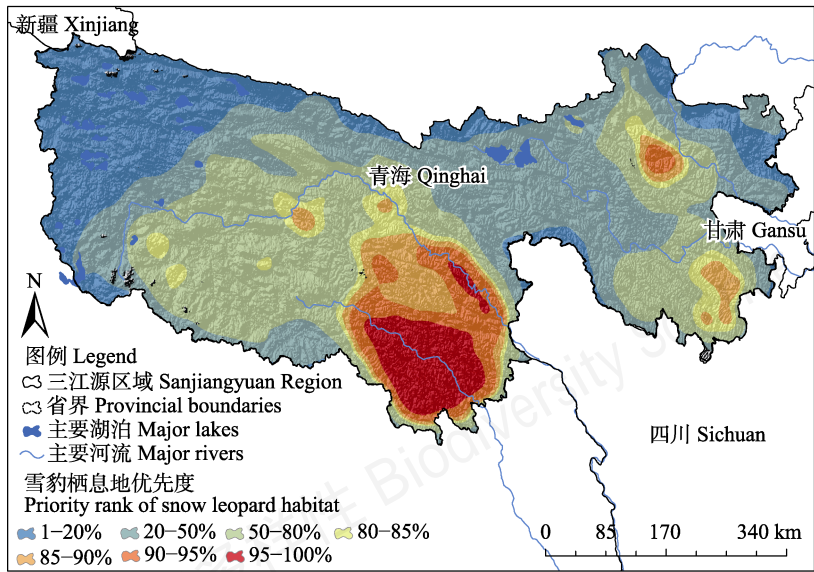


图4 三江源的雪豹栖息地质量优先度排序
Fig. 4 Priority ranking of snow leopard habitat in Sanjiangyuan Region

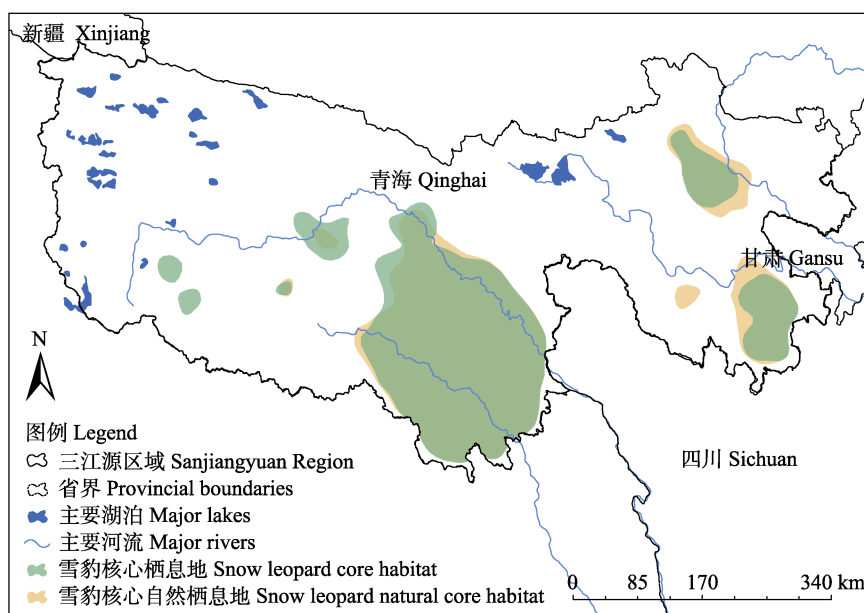


图5 加入人类影响前(黄色)后(绿色)雪豹核心栖息地的变化

Fig. 5 The change of snow leopard core habitat before (yellow) and after (green) adding anthropogenic variables

2.3 雪豹核心栖息地之间的连通度与人类活动威胁评估

经过连通度分析和各核心栖息地的连通中心地位排序,发现玉树-杂多-囊谦这片核心栖息地不但面积最大,且连接周边区域的中心地位也最高。西部地区的雪豹廊道没有特别明显的窄点(pin-

point),且迁徙廊道数量较多。其中青藏公路/铁路可能会是唐古拉山乡的两小片核心栖息地与中心斑块连接的潜在阻碍。东部的廊道则窄点较多,与东部人类活动强度较高有关,尤其是阿尼玛卿和年保玉则种群之间的廊道有个明显的窄点,在甘德县的一条省道处被拦腰截断(图6)。

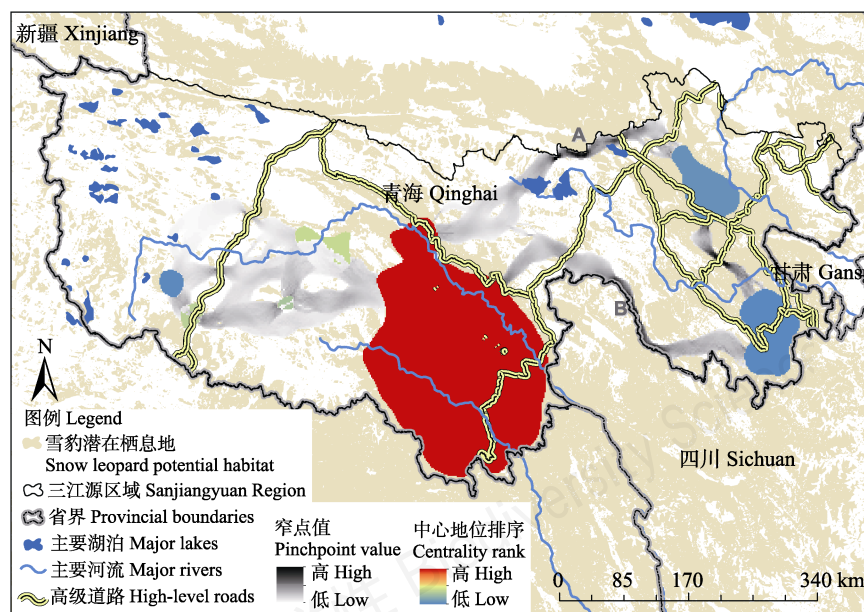


图6 雪豹核心栖息地的中心地位排序、连通度窄点(pinchpoint)和可能阻碍(高级道路)。A、B: 连接东部两个核心栖息地与中部核心栖息地的两条可能廊道。

Fig. 6 The centrality of snow leopard core habitat, connectivity pinchpoints and busy roads as potential barriers. A, B: Two candidate corridors linking two eastern core habitats and the central core habitat.

叠加保护区和国家公园图层与人类活动中大型建设开发(主要包括能源设施、工矿用地和采石场)的斑块后,发现三江源国家级自然保护区以及新成立的三江源国家公园均未能有效覆盖所有雪豹核心栖息地。叠加解译出的开发活动斑块(主要包括能源设施、工矿用地和采石场)基本都处于国家公园和保护区之外(图7),因此处于法定保护地外的雪豹核心栖息地是未来需要重点监控的区域。

3 不足之处与保护建议

受到解译范围的限制,本次分析也存在一些局限性。最主要体现在连接东部两个核心栖息地与中部栖息地的两条廊道A、B(图6)上。如果仅仅基于三江源内部数据,这是迁徙阻力最小的两条路径。然而如果叠加全国栖息地,可以看到年保玉则种群与玉树-杂多-囊谦种群实际上是通过西藏-四川的大片栖息地连接的,而阿尼玛卿种群与玉树-杂多-囊谦种群,则更有可能是通过北部的昆仑山脉连接(图6)。结果的局限性更说明了将此项目扩展到全国雪豹栖息地的必要性。可以预见的是,在新疆、甘肃、四川等人类干扰强度更大的省份,雪豹的栖息

地分布和迁徙路径受到人类活动的影响将更为显著,对威胁分析和保护实践的指导意义也会更大。

核心栖息地之间的连通度分析结果显示,大型道路可能是现存阻碍雪豹迁徙最大的因素。青藏公路/铁路可能是唐古拉山乡的两小片核心栖息地与中心斑块连接的潜在阻碍;阿尼玛卿和年保玉则种群之间的廊道有一个明显的窄点,在甘德县的一条省道处被拦腰截断。目前尚未有针对公路/铁路对雪豹迁徙影响的研究,未来需要设计开展青藏公路等大型道路两侧种群基因交流及其受道路影响的针对性研究。同时也需要开展一些针对性的保护干涉,例如甘德县的省道周边如要加设围栏,需要考虑给雪豹预留迁徙通道。

基于以上分析,提出针对三江源不同区域的保护建议:(1)三江源西部核心栖息地比较小而破碎,但迁徙通道较多且没有明显窄点,未来应关注青藏铁路的潜在阻碍作用,同时要防范道路沿线的野生动物盗猎。(2)中部区域横跨玉树-杂多-囊谦的雪豹栖息地是三江源最大的核心雪豹栖息地,在与其他种群连通中也处于中心地位,应通过种群监测确定其健康稳定,对开发、偷猎等威胁防微杜渐,保持

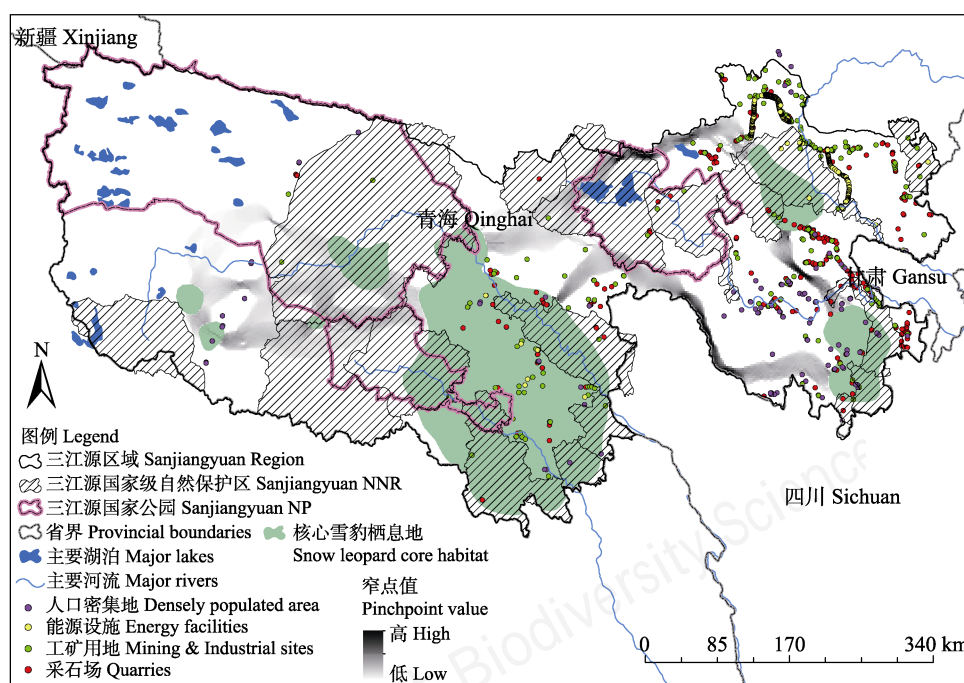


图7 国家级自然保护区与国家公园对雪豹核心栖息地的覆盖。开发项目基本存在于保护区与国家公园之外,是未来需要重点监控开发风险的区域。

Fig. 7 The coverage of national nature reserves (NNR) and national park (NP) in snow leopard core habitat. Development projects are mostly outside nature reserves and national park, which should be intensively monitored with high-resolution satellite in the future.

其源种群的作用。(3)东部区域人口密度高,受人类活动的影响最大,应保持阿尼玛卿、年保玉则两块核心栖息地的质量,并重点监测甘德县境内的省道处雪豹的迁徙通道是否畅通。

另外本次解译获得的三江源地区人类活动结果还显示,在雪豹的核心栖息地范围内有大量的大型开发建设活动,且位于法定保护地之外,未受到法律的保护。因此在三江源区域,未来需重点监管目前自然保护区与国家公园均未覆盖的物种重要栖息地,建议充分利用天地一体化监测手段,开展重要保护物种栖息地状况的评估和预警,加强对非保护区域内开发建设活动的监测,预警其对物种保护带来的风险。

参考文献

- Carbone C, Mace GM, Roberts SC, MacDonald DW (1999) Energetic constraints on the diet of terrestrial carnivores. *Nature*, 402, 286–288.
- Cardillo M, Purvis A, Sechrest W, Gittleman JL, Bielby J, Mace GM (2004) Human population density and extinction risk in the world's carnivores. *PLoS Biology*, 2, e197.
- Cardillo M, Mace GM, Jones KE, Bielby J, Bininda-Emonds ORP, Sechrest W, Orme CDL, Purvis A (2005) Multiple causes of high extinction risk in large mammal species. *Science*, 309, 1239–1241.
- Davis BW, Li G, Murphy WJ (2010) Supermatrix and species tree methods resolve phylogenetic relationships within the big cats, *Panthera* (Carnivora: Felidae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 56, 64–76.
- Deng T, Wang XM, Fortelius M, Li Q, Wang Y, Tseng ZJ, Takeuchi GT, Saylor JE, Sällä LK, Xie GP (2011) Out of Tibet: Pliocene woolly rhino suggests high-plateau origin of Ice Age megaherbivores. *Science*, 333, 1285–1288.
- Editorial Committee of Ecological Environment of Sanjiangyuan Nature Reserve (2002) *Ecological Environment of*

Sanjiangyuan Nature Reserve. Qinghai People's Publishing House, Xining. (in Chinese) [《三江源自然保护区生态环境》编辑委员会 (2002) 三江源自然保护区生态环境. 青海人民出版社, 西宁.]

- Fick SE, Hijmans RJ (2017) WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315.
- Jackson RM, Mallon D, Sharma RK, Suryawanshi KS, Mishra C (2013) *Snow Leopard Survival Strategy, Version 2013.1*. Snow Leopard Network, Seattle, USA.
- Lehtomäki J, Moilanen A (2013) Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, 47, 128–137.
- Manel S, Williams HC, Ormerod SJ (2001) Evaluating presence-absence models in ecology: The need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38, 921–931.
- McCarthy TM, Chapron G (2003) *Snow Leopard Survival Strategy*. International Snow Leopard Trust and Snow Leopard Network, Seattle, USA.
- McCarthy TM, Fuller TK, Munkhtsog B (2005) Movements and activities of snow leopards in southwestern Mongolia. *Biological Conservation*, 124, 527–537.
- McCarthy T, Mallon D, Jackson R, Zahler P, McCarthy K (2017) *Panthera uncia*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017.
- Moilanen A, Kujala H, Leathwick JR (2009) The Zonation framework and software for conservation prioritization. *Spatial Conservation Prioritization*, 135, 196–210.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Ripple WJ, Estes JA, Beschta RL, Wilmers CC, Ritchie EG, Hebblewhite M, Berger J, Elmhagen B, Letnic M, Nelson MP, Schmitz OJ, Smith DW, Wallach AD, Wirsing AJ (2014) Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343, 1241484.

(责任编辑: 蒋志刚 责任编辑: 闫文杰)