

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210306

中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦跨境区 典型物种栖息地变化

赵华龙¹ 刘彤¹ 张玉红² 张霜³ 周志强² 马克明³

(1. 东北林业大学林学院生态研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:【目的】金山-阿尔泰山地区横跨中国、俄罗斯、蒙古和哈萨克斯坦 4 国, 因其独特的地理位置, 孕育了特有的北亚山地动植物物种和高度的生物多样性。中国境内的阿尔泰山地区已被列入世界自然遗产预备名单, 是我国申请世界自然遗产的重点区域。但是, 目前我们对我国与其他 3 国交界区域典型植被类型与典型动物物种栖息地变化状况并不清楚。对这一问题的探讨, 可以明确我国所属区域的现状、问题与优、劣势所在, 为该地区的申遗工作提供支持。【方法】通过选取 1996、2016 年金山-阿尔泰山地区 4 国交界区域一平均半径为 72.95 km 的圆形区域为研究区(以将中国境内主要包括喀纳斯自然保护区完全纳入为依据)的遥感影像解译和聚类分析, 对比中、俄、蒙、哈 4 国所属区域主要植被景观类型和典型物种栖息地格局与变化特征。【结果】(1)20 年间, 我国所属区域西伯利亚红松面积增加 9.32%, 高于其他 3 国, 但西伯利亚落叶松与西伯利亚云冷杉面积均有所下降; (2)我国境内区域, 雪豹、盘羊、北山羊和雪兔、马鹿的适宜生境面积均有所减少(-18.4%~ -9.62%), 但与其他 3 国相比, 这种变化幅度仍属较低水平。我国境内区域蒙古野驴、鹅喉羚的适宜生境面积略有增高(3.08%), 而其他 3 国境内适宜生境面积均有不同程度下降; (3)聚类分析显示, 中蒙植被斑块特征类似, 而雪豹、盘羊、北山羊、雪兔、马鹿的适宜生境斑块特征中俄更为相似。【结论】相对其他 3 国, 我国的优势主要体现在: (1)研究区保存了较大面积的区域代表性植被斑块, 且西伯利亚红松林面积有所增加; (2)雪豹、盘羊、北山羊、蒙古野驴、鹅喉羚等重点保护物种的潜在生境面积较大或有增加趋势。劣势主要体现在: (1)与邻国相比, 我国境内的西伯利亚落叶松林和西伯利亚云冷杉林面积均存在较强的减少趋势; (2)林栖动物的潜在生境面积有所下降。同时我国境内区域, 人工土地利用类型面积增加了 4 倍, 应予关注。

关键词: 跨境; 自然遗产; 景观; 珍稀动物; 栖息地; 雪豹

中图分类号: S791.22; Q958 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2023)01-0109-12

引文格式: 赵华龙, 刘彤, 张玉红, 等. 中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦跨境区典型物种栖息地变化 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 109-120. Zhao Hualong, Liu Tong, Zhang Yuhong, et al. Habitat changes of typical species in the transboundary area between China, Russia, Mongolia and Kazakhstan [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 109-120.

Habitat changes of typical species in the transboundary area between China, Russia, Mongolia and Kazakhstan

Zhao Hualong¹ Liu Tong¹ Zhang Yuhong² Zhang Shuang³ Zhou Zhiqiang² Ma Keming³

(1. Ecological Research Center, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Forest Plant Ecology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

收稿日期: 2021-08-10 修回日期: 2022-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503307)。

第一作者: 赵华龙。主要研究方向: 景观生态学。Email: superchengcc@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学。

责任作者: 周志强, 博士, 教授。主要研究方向: 景观生态学。Email: uwezhou@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Abstract: [Objective] The Golden Mountains of Altai straddle China, Russia, Mongolia and Kazakhstan. Owing to their unique geographical position, these mountains harbor unique species of north Asian mountain flora and fauna. The Altai Mountain in Xinjiang Province of northwestern China has been included in the preliminary list of World Natural Heritage sites and is the key area for China to apply for world natural heritage status. However, the typical landscape patterns and habitat changes for the key species in the border areas between China and the other three countries are unclear. The evaluation of this issue can clarify the advantages and problems of the region in China and provide support for its efforts to apply for world heritage for this region. [Method] Taking a point of the junction of the four countries in the Golden Mountains of Altai in 1996 and 2016, with an average radius of 72.95 km as the study area, the remote sensing image interpretation and cluster analysis were carried out based on the Kanas Nature Reserve in China, compared the main vegetation landscape types and the habitat pattern and change characteristics of typical species in the regions of China, Russia, Mongolia and Kazakhstan. [Result] (1) During the 20-year period, the area of *Pinus sibirica* in China increased by 9.32%, which was higher than that in the other three countries. However, the area of *Larix sibirica*, *Picea obovata* and *Abies sibirica* all decreased. (2) In China, the suitable habitat area of *Panthera uncia*, *Ovis ammon*, *Capra sibirica*, *Lepus timidus* and *Cervus canadensis* decreased from -18.4% to -9.62%, lower than that of the other three countries. The suitable habitat area of *Equus hemionus* and *Gazella subgutturosa* increased slightly in China (3.08%), while it decreased in the other three countries. (3) A cluster analysis showed that for the characteristics of vegetation patches, China and Mongolia were more similar in general. The characteristics of the suitable habitat patches of *P. uncia*, *O. ammon*, *C. sibirica*, *L. timidus* and *C. elaphus* were more similar between China and Russia. [Conclusion] Compared with the other three countries, the area that belongs to China has the following advantages: (1) the study area preserves a large area of regional representative patches of vegetation; (2) the potential habitat area of *P. uncia*, *O. ammon*, *C. sibirica*, *E. hemionus* and *G. subgutturosa* is larger or tends to increase. However, the area that belongs to China has the following problems: (1) the area of forest dominated by *L. sibirica*, *P. obovata*, *A. sibirica*, *L. timidus* and *C. elaphus* tends to decrease; (2) The potential habitat area of forest-dwelling animals decreases. Simultaneously, the area of artificial land in China has increased four-fold, which should not be overlooked by future conservational activities.

Key words: cross-border; natural heritage; landscape; rare animal; habitat; *Panthera uncia*

世界自然遗产代表了全球最具保护价值的景观,对于保护生物多样性、促进人与自然和谐共处具有不可替代的意义,是全人类共同的宝贵财富^[1-2]。世界各国高度重视自然遗产的申报工作(以下简称申遗),申遗的成功不仅利于对自然遗产地实施最为专业的保护,而且可以促进旅游业及其衍生行业的快速发展,拉动区域经济增长。同时自然遗产地也可以作为重要的科研和教育基地^[3]。截至2021年7月,我国拥有世界自然遗产14项。当前世界自然遗产地数量少,申请难度高,对申请地开展必要的前期研究,明确其生态环境和景观格局具有的优势与存在的问题,能够为申遗工作提供必须的基础材料和理论依据,具有重要的现实意义^[4]。

金山-阿尔泰山是西西伯利亚生物区系的重要组成部分,北亚珍稀濒危动植物的重要栖息地,拥有植物两千多种,其中212种为特有种^[5]。这一区域是西伯利亚地理生态区的主要山脉,也是俄罗斯第三

大河鄂毕河和我国唯一注入北冰洋的河流——额尔齐斯河的源头^[6]。其中中国所属地区具有高度多样化的自然景观,人文多样性及丰富的自然资源。这一地区拥有森林草原带、亚高山草甸带、高山草甸带、高山稀疏植被带、高山苔原带和冰雪带等完整的植被带谱。在这一区域仅中国境内部分就拥有濒危植物46种,哺乳动物85种,其中被列入IUCN红色名录的有75种,中国国家一级重点保护野生动物4种,中国国家二级重点保护野生动物14种^[7]。在哺乳动物中,代表性物种有雪豹(*Panthera uncia*)、棕熊(*Ursus arctos*)、蒙古野驴(*Equus hemionus*)、鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)、雪兔(*Lepus timidus*)、兔狲(*Felis manul*)、北山羊(*Capra sibirica*)、盘羊(*Ovis ammon*)、马鹿(*Cervus canadensis*)、驼鹿(*Alces alces*)等^[5]。1998年12月,俄罗斯所属“金山-阿尔泰山”区域被联合国教科文组织批准列入《世界遗产名录》。2010年1月我国所属阿尔泰山地区被

列为世界自然遗产预备名单,但截至目前,阿尔泰山仍未正式进入世界自然遗产名录^[8-9]。

喀纳斯地区处于阿尔泰山南坡,是我国与俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦接壤的重点地区^[10]。这一地区是西伯利亚、泛北极、欧亚等生物区系交汇之地,是欧洲-西伯利亚泰加林分布的最南缘,同时也是阿尔泰山南坡特有及珍稀物种的集中分布区^[5]。喀纳斯片区与乌科克(Ukok)高原片区以及蒙、哈境内的阿尔泰山接壤,是阿尔泰山南坡的生物多样性中心和野生动物南北向流动的重要迁徙通道^[11-12]。喀纳斯地区地理环境特殊且复杂,是沟通我国与邻国生态系统的重要连接点,是这一区域的关键物种重要生态廊道,对于区域生态安全的维持具有不可替代的作用。从自然遗产地完整性的角度来看,我国境内的喀纳斯地区无疑与已经进入世界自然遗产名录的俄罗斯“金山-阿尔泰山”地区一样,具有不可忽视的自然与人文保护价值^[13-15]。但是,由于这一区域物种与地形的复杂多样,加上交通、国界等因素的阻碍,我们对该区域关键物种栖息地的现状和变化趋势的认识并不清楚。目前,不同国家科研人员针对该区域的研究彼此独立,且仅关注个别物种^[16]。但针对这一区域的代表性植被类型和关键物种栖息地格局的系统性跨境对比研究十分缺乏。

本研究运用遥感数据,对中俄蒙哈四国接壤的金山-阿尔泰山区域典型植被景观类型和重要物种栖息地现状与变化进行对比分析,试图明确与邻国相比,我国所属区域的现状和优、劣势所在,为进一步优化阿尔泰山地区珍稀物种栖息地格局,保护关

键物种生存和繁衍,维持区域生态安全提供科学依据。同时,也为我国所属区域申报世界自然遗产地提供基础支撑。

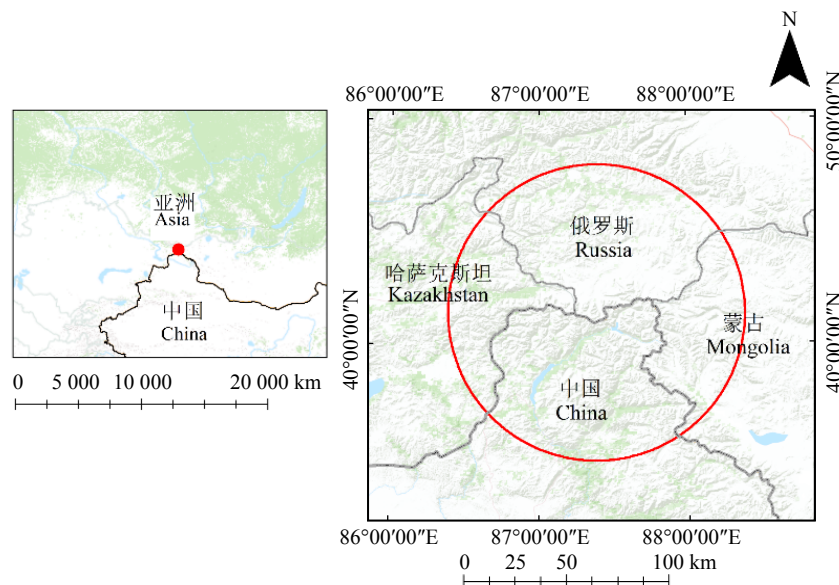
1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区阿勒泰地区布尔津县北部,包括喀纳斯国家级自然保护区及附近边境在内的我国区域和接壤三国交界部分(图 1)。取交界区域一点,平均半径为 72.95 km 的圆形区域为研究区(以将我国境内喀纳斯自然保护区完全纳入为依据),地理坐标范围 86°26'~88°26'E, 48°27'~49°46'N,总面积为 16 719.6 km²,平均海拔 2 650 m。该区域属大陆性气候,春秋温暖,冬季寒冷,山麓地带(海拔约 500 m)年平均气温为 3.2 °C,海拔 1 900 m 处为-3.6 °C,整个区域年平均气温为-0.2 °C。降水量随海拔升高而增加,垂直地带性分布特征明显,低山带为 200~300 mm,中山带 300~600 mm,高山带 600~1 000 mm。该区域分布有裸子植物 12 种,被子植物 1 100 余种,兽类 80 多种,鸟类 270 多种,鱼类约 30 种^[17]。

2 数据处理与研究方法

2.1 数据处理

采用 1996 年、2016 年 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 Oli 遥感数据(数据来源于美国地质勘探局网站,United States Geological Survey),遥感图像分辨率为 30 m。遥感影像选取时,避免极端天气的影响。首先消除传感器本身误差进行辐射校正,遥感影像



底图审图号:GS(2019)1822 Base drawing review No: GS(2019)1822

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

的大气校正、几何校正、分类和影像切割在 ENVI 5.3 和 eCognition Developer 9.3 软件中进行。通过合成特定波段以及目视解译,以面向对象法进行监督分类,结合当地土地覆盖类型和研究地特征及 281 个地面人工遥感解译标志,对数据进行解译,最终使用 ArcGIS 10.6 软件修正分类结果。

参照国家标准《土地利用现状分类》GB/T 21010—2017,在保证遥感影像可解译性的同时,能够充分利用遥感影像提供的信息,把景观类型分为农田、高山苔原、雪地、森林(包括西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)、西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚云冷杉(*Picea obovata* and *Abies sibirica*)、桦树林 4 类)、居民工矿建设用地、水域、裸地、草地。利用混淆矩阵方法评价分类结果,总体分类精度均大于 85%,使用数据满足精度要求。

2.2 选取典型植被类型

研究区域植被类型主要由寒温性树种组成,包括寒温性常绿针叶林和寒温性落叶针叶林两种植被亚型,主要建群种为西伯利亚红松、西伯利亚云杉、西伯利亚冷杉、西伯利亚落叶松等^[18]。由于西伯利亚云杉常与西伯利亚冷杉混交,本研究将西伯利亚云杉和西伯利亚冷杉合并为一类,最终得到 3 类,即西伯利亚红松、西伯利亚云冷杉、西伯利亚落叶松。

2.3 选取典型动物类型

选取研究区整体景观中,占比最多的 3 类(草地 35.95%、裸地 9.49%、森林 26.88%)景观类型,以此为基础,挑选 7 种在这 3 种景观类型中生存,可能以此为生境的珍稀保护动物。这些动物是我国在阿尔泰山地区的重点保护动物,保护价值高,可以为遗产申报提供更好的参考,其次是选取公众较为熟悉

的,研究较多的,为本文栖息地选择方面也提供一定的帮助。根据研究区范围内已有的景观类型确定其可能潜在栖息地,通过海拔及潜在生境需求特征识别潜在栖息地范围(表 1)。珍稀动物的保护等级确定参考国家林业与草原局于 2021 年 2 月 1 日最新颁布的《国家重点保护野生动物名录》^[7]。

2.4 中俄蒙哈 4 国典型物种生境格局聚类分析

利用 FRAGSTATS 4.2.1 软件,计算实验地整体景观指数及中、俄、蒙、哈 4 国典型物种生境斑块的景观指数。基于前人研究成果,在充分考虑各个指数生态学意义的前提下,从景观连接度、破碎化、形状、面积、蔓延度、多样性等几个方面,选取以下景观指数对研究区的景观格局进行聚类分析:斑块密度(patch density, PD)、最大斑块指数(largest patch index, LPI)、周长面积分维数(perimeter-area fractal dimension, PAFRAC)、聚集度指数(aggregation index, AI)、香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)、散布与并列指数(interspersion and juxtaposition index, IJI)、斑块所占景观面积比例(percent of landscape, PLAND)、斑块平均大小(mean patch size, AREA_MN)、斑块结合度(patch cohesion index, COHESION)。采用 k-means 算法中的欧几里得距离(Euclidean distance)指标对 4 国的景观格局进行聚类分析,采用 cluster 和 factoextra 编辑包在 R3.6.0 下完成。

3 结果与分析

3.1 典型植被类型的变化格局

1996—2016 年,研究区西伯利亚红松整体面积降低 27.2%,西伯利亚落叶松面积增加 23.1%,西伯

表 1 研究区选取的珍稀动物

Tab. 1 Rare animals selected in the study area

类型 Type	物种 Species	生境 Habitat	保护等级 Protection class	海拔 Altitude/m	生境需求依据 Basis of habitat demand
裸地生境动物 Species living on the bare ground	雪豹 <i>Panthera uncia</i>	山地、裸岩、乱石悬崖等裸地环境 Mountains, bare rocks, rocky cliffs and other bare ground environment	1	> 1 500	徐峰等 ^[19-20] , 初雯雯等 ^[21] Xu F, et al ^[19-20] Chu W W, et al ^[21]
	盘羊 <i>Ovis ammon</i>		2		初红军等 ^[22] , 张钧泳等 ^[23] Chu H J, et al ^[22] Zhang J Y, et al ^[23]
	北山羊 <i>Capra sibirica</i>		2		朱新胜等 ^[24] Zhu X S, et al ^[24]
林栖动物 Species living in the forest	雪兔 <i>Lepus timidus</i>	海拔 1 000 m 以上的针阔混交林以及森林草原地带 Coniferous and broadleaved mixed forest and forest grassland zone with an altitude of more than 1000 m	2	> 1 000	伊拉木江·托合塔洪等 ^[25] , 罗泽珣等 ^[26] Yilamujiang Tuohetahong, et al ^[25] Luo Z X, et al ^[26]
	马鹿 <i>Cervus canadensis</i>		2		古丽巴努·阿不来提 ^[27] , 吴文等 ^[28] Gulbanu Ablat ^[27] Wu W, et al ^[28]
草栖动物 Species living on the grassland	蒙古野驴 <i>Equus hemionus</i>	荒漠或者半荒漠的草原地带 Desert or semi-desert grassland	1	> 600	张晓晨等 ^[29] , 初雯雯等 ^[30] , 初红军等 ^[31] Zhang X C, et al ^[29] Chu W W, et al ^[30] Chu H J, et al ^[31]
	鹅喉羚 <i>Gazella subgutturosa</i>		2		初红军等 ^[31-32] , 苏比奴尔·艾力等 ^[33] Chu H J, et al ^[31-32] Subinur Eli, et al ^[33]

利亚云冷杉面积则降低 2.36%(表 2, 图 2)。2016 年研究区我国部分典型植被面积总和为 1 607.61 km², 分别为俄、蒙、哈 3 国部分的 1.18、1.47 和 8.44 倍。其中, 西伯利亚红松仅我国研究区内面积有所增加(9.32%), 在其他 3 国部分均出现了面积下降(哈: -57.73%, 俄: -51.31%, 蒙: -77.16%, 西伯利亚红松主要转化为草地和苔原)。我国部分西伯利亚落叶松面积减少 1.98%(主要转化为苔原), 但其他 3 国部分均有增加(哈: 25.45%, 俄: 33.16%, 蒙: 40.32%)。我国部分西伯利亚云冷杉面积减少了 9.65%(主要转化为草地), 仅低于哈萨克斯坦区域(哈: 16.61%,

俄: -11.35%, 蒙: -33.13%)。

3.2 典型动物潜在生境变化

3.2.1 雪豹、北山羊、盘羊的潜在生境变化

总体上, 雪豹、北山羊、盘羊在研究区内的潜在栖息地面积整体减少(-18.92%, 图 3a), 仅蒙古区域内面积增加(表 3)。研究区中、蒙、哈部分的潜在生境斑块密度增加, 仅俄罗斯部分有小幅减少。总体上, 雪豹、北山羊、盘羊栖息地的破碎化程度加剧。

雪豹、盘羊、北山羊的潜在生境中, 62.01% 的区域在 20 年内保持稳定, 未向其他类型转化(图 3a)。中国部分雪豹、盘羊、北山羊的潜在生境主要转化为

表 2 1996—2016 年研究区各景观类型变换矩阵

Tab. 2 Transformation matrix of landscape types in the study area from 1996 to 2016

类型 Type	农田 Farmland	高山 苔原 Alpine tundra	雪地 Snowfield	森林 Forest			水域 Water area	居民工矿 建设用地 Industrial and construction land	草地 Grassland	裸地 Bare land		
				桦树林 Birch forest	西伯利亚 落叶松 <i>Larix sibirica</i>	云冷杉 <i>Picea obovata</i> and <i>Abies sibirica</i>					西伯利 亚红松 <i>Pinus sibirica</i>	
农田 Farmland	1.26	4.21	0.01	2.22	0.71	5.77	0.18	0.00	0.36	21.39	0.46	
高山苔原 Alpine tundra	3.82	1 920.27	138.01	56.93	65.42	21.31	40.97	49.22	14.84	434.60	1 013.65	
雪地 Snowfield	0.05	12.57	412.44	0.09	0.09	0.02	0.16	7.77	0.28	0.25	25.23	
桦树林 Birch forest	2.50	21.14	0.40	41.08	20.89	34.22	5.45	1.35	1.23	81.13	6.27	
西伯利亚落叶松 <i>L. sibirica</i>	2.94	30.08	1.27	65.54	1 241.69	338.08	223.07	2.53	9.76	210.15	15.68	
森林 Forest	云冷杉 <i>Picea obovata</i> and <i>Abies sibirica</i>	5.01	34.96	1.08	67.74	112.43	942.86	22.39	0.55	14.86	603.38	6.38
西伯利亚红松 <i>Pinus sibirica</i>	0.24	1.27	0.01	4.92	176.47	11.60	115.42	0.99	1.02	8.70	0.98	
水域 Water area	0.35	10.20	4.38	7.82	3.21	1.14	2.58	146.22	0.43	3.36	11.42	
居民工矿建设用地 Industrial and construction land	0.37	66.17	6.18	1.62	2.60	2.91	0.83	0.41	4.43	53.62	38.56	
草地 Grassland	8.18	347.60	5.07	142.29	105.55	490.31	22.62	1.18	32.90	4 757.16	105.99	
裸地 Bare land	1.68	442.07	93.65	8.19	11.49	7.72	8.09	27.03	6.23	246.70	732.20	

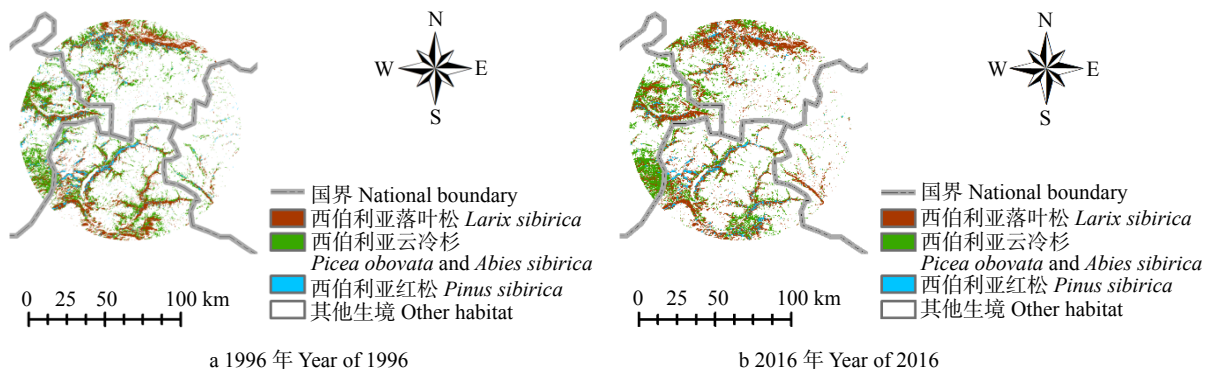


图 2 研究区代表性植被类型 1996—2016 年的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of representative vegetation types in the study area from 1996 to 2016

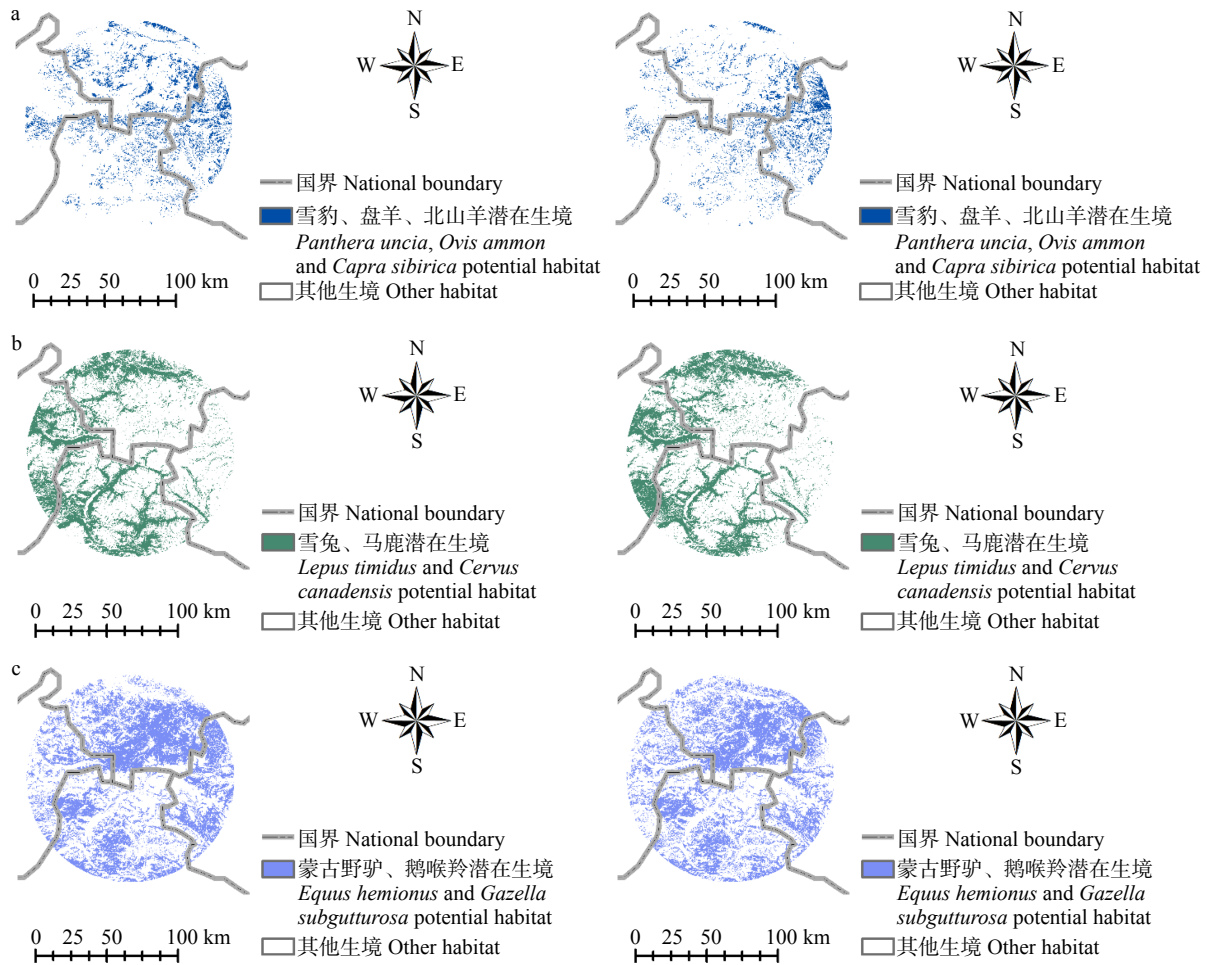


图3 1996年(左)和2016年(右)研究区代表性物种生境分布

Fig. 3 Spatial distribution of representative animal habitat in the study area in 1996 (left) and 2016 (right)

表3 1996年和2016年研究区各国雪豹、北山羊、盘羊动物栖息地景观斑块特征

Tab. 3 Landscape patch level characteristics of *P. uncia*, *C. sibirica* and *O. ammon* in the study area in 1996 and 2016

国家 Country	类型 Type	1996年 Year 1996	2016年 Year 2016	差值 Difference
俄罗斯 Russia	面积 Area/km ²	714.88	459.13	-255.75
	斑块密度 Patch density (PD)	0.25	0.23	-0.02
	最大斑块指数 Maximum patch index (LPI)	0.53	0.14	-0.39
	聚集度指数 Aggregation index (AI)	89.68	87.35	+2.33
哈萨克斯坦 Kazakhstan	面积 Area/km ²	206.93	117.36	-89.57
	PD	0.18	0.21	+0.03
	LPI	0.44	0.05	-0.39
	AI	85.97	81.12	-4.85
蒙古 Mongolia	面积 Area/km ²	560.85	621.64	+60.79
	PD	0.37	0.41	+0.03
	LPI	0.54	2.68	+2.14
	AI	88.18	88.11	-0.09
中国 China	面积 Area/km ²	460.51	377.44	-83.07
	PD	0.38	0.42	+0.04
	LPI	0.16	0.12	-0.04
	AI	84.01	81.41	-2.60
总体 Total	面积 Area/km ²	1 943.19	1 575.58	-367.61

注：“+”表示增加，“-”表示减少。下同。Notes: “+” means increase, “-” means decrease. The same below.

苔原, 占比为 29.67%。其余 3 国部分这一潜在生境同样主要转化为苔原(俄: 34.87%, 哈: 44.83%, 蒙: 15.8%)。

3.2.2 雪兔、马鹿的潜在生境变化

雪兔、马鹿的潜在栖息地面积 20 年间出现小幅度增加(表 4, 图 3b)。其中俄罗斯和哈萨克斯坦部分面积增加高于 10%, 我国和蒙古部分的潜在生境面积有所降低。研究区俄罗斯部分斑块密度增加, 其余 3 国部分斑块密度均降低(表 4)。

表 4 1996 年和 2016 年研究区各国雪兔、马鹿动物栖息地的斑块特征

Tab. 4 Landscape patch level characteristics of *L. timidus* and *C. canadensis* in the study area in 1996 and 2016

国家 Country	类型 Type	1996年 Year 1996	2016年 Year 2016	差值 Difference
俄罗斯 Russia	面积 Area/km ²	1 284.47	1 424.24	+139.77
	PD	0.29	0.33	+0.04
	LPI	8.75	4.84	-3.91
	AI	93.26	92.92	-0.34
哈萨克斯坦 Kazakhstan	面积 Area/km ²	1 007.94	1 129.46	+121.52
	PD	0.19	0.17	-0.02
	LPI	8.11	10.15	+2.04
	AI	95.08	95.85	+0.77
蒙古 Mongolia	面积 Area/km ²	249.64	216.65	-32.99
	PD	0.25	0.17	-0.08
	LPI	1.03	1.09	+0.06
	AI	87.74	87.67	-0.07
中国 China	面积 Area/km ²	1 874.62	1 694.35	-180.27
	PD	0.40	0.38	-0.02
	LPI	17.56	9.21	-8.35
	AI	94.31	93.89	+0.42
总体 Total	面积 Area/km ²	4 416.69	4 464.72	+48.03

20 年间, 雪兔、马鹿的潜在生境中约 62.01% 保持稳定。我国部分的潜在生境面积略有减少, 主要转化为草地(占总体面积 5.38%)。研究区哈萨克斯坦和俄罗斯部分的潜在生境面积增加, 主要是草地转化为雪兔、马鹿的适宜生境(图 3b, 占比分别为 12.22% 和 9.41%)。

3.2.3 蒙古野驴、鹅喉羚的潜在生境变化

蒙古野驴、鹅喉羚的潜在生境面积 20 年下降了 6.31%(图 3c, 表 5), 其中我国部分有小幅增长(3.08%), 其他国家部分的潜在生境面积均下降(哈: -11.06%, 俄: -5.56%, 蒙: -19.49%, 表 5)。4 国斑块密度均升高, 我国部分处于较高水平, 蒙古野驴、鹅喉羚潜在生境的破碎化程度加剧。

表 5 1996 年和 2016 年研究区各国蒙古野驴、鹅喉羚动物栖息地的景观斑块特征

Tab. 5 Landscape patch level characteristics of *E. hemionus* and *G. subgutturosa* in the study area in 1996 and 2016

国家 Country	类型 Type	1996年 Year 1996	2016年 Year 2016	差值 Difference
俄罗斯 Russia	面积 Area/km ²	2 667.39	2 518.98	-148.41
	PD	0.18	0.20	+0.02
	LPI	20.97	12.08	-8.89
	AI	95.57	94.47	-1.1
哈萨克斯坦 Kazakhstan	面积 Area/km ²	702.99	625.27	-77.72
	PD	0.20	0.21	+0.01
	LPI	3.63	1.00	-2.63
	AI	92.05	89.95	-2.1
蒙古 Mongolia	面积 Area/km ²	1 198.49	964.87	-233.62
	PD	0.12	0.17	+0.05
	LPI	8.20	3.87	-4.33
	AI	94.77	93.17	-1.6
中国 China	面积 Area/km ²	1 824.15	1 880.33	+56.18
	PD	0.29	0.33	+0.04
	LPI	5.41	4.99	-0.42
	AI	93.15	92.35	-0.8
总体 Total	面积 Area/km ²	6 393.03	5 989.46	-403.57

蒙古野驴、鹅喉羚潜在生境中 62.01% 的区域保持稳定, 未转化为其他类型。研究区俄罗斯和哈萨克斯坦部分蒙古野驴、鹅喉羚部分潜在生境部分转化为森林(4.52%, 17.5%), 蒙古部分蒙古野驴、鹅喉羚潜在生境转移部分主要为裸地, 占比为 10.4%(图 3c)。

3.3 人工土地利用类型转变

20 年间, 研究区中国部分人工土地利用类型的面积增加最多(419.95%, 哈: -41.69%, 俄: 53.48%, 蒙: 355.38%)。草地、苔原、裸地转化为人工土地斑块的比率较高(图 4)。

3.4 4 国景观斑块特征相似度分析

聚类分析结果表明, 对于西伯利亚红松林斑块来说, 20 年间, 中蒙两国部分、俄哈两国部分一直保持较高的相似度。对于西伯利亚落叶松林斑块来说, 由中俄相似转变为中蒙相似。对于西伯利亚云冷杉林斑块来说, 中俄两国则一直具有较高的相似度(图 5)。

对于雪豹、盘羊、北山羊适宜生境的斑块特征来说, 中国由与哈萨克斯坦更为相似转变为与俄罗斯更相似。对于雪兔、马鹿适宜生境斑块特征来说, 中俄一直具有较高的相似度。对于蒙古野驴、鹅喉羚的适宜生境斑块来说, 中哈境内的斑块特征相对独立, 俄蒙之间则较为接近(图 6)。

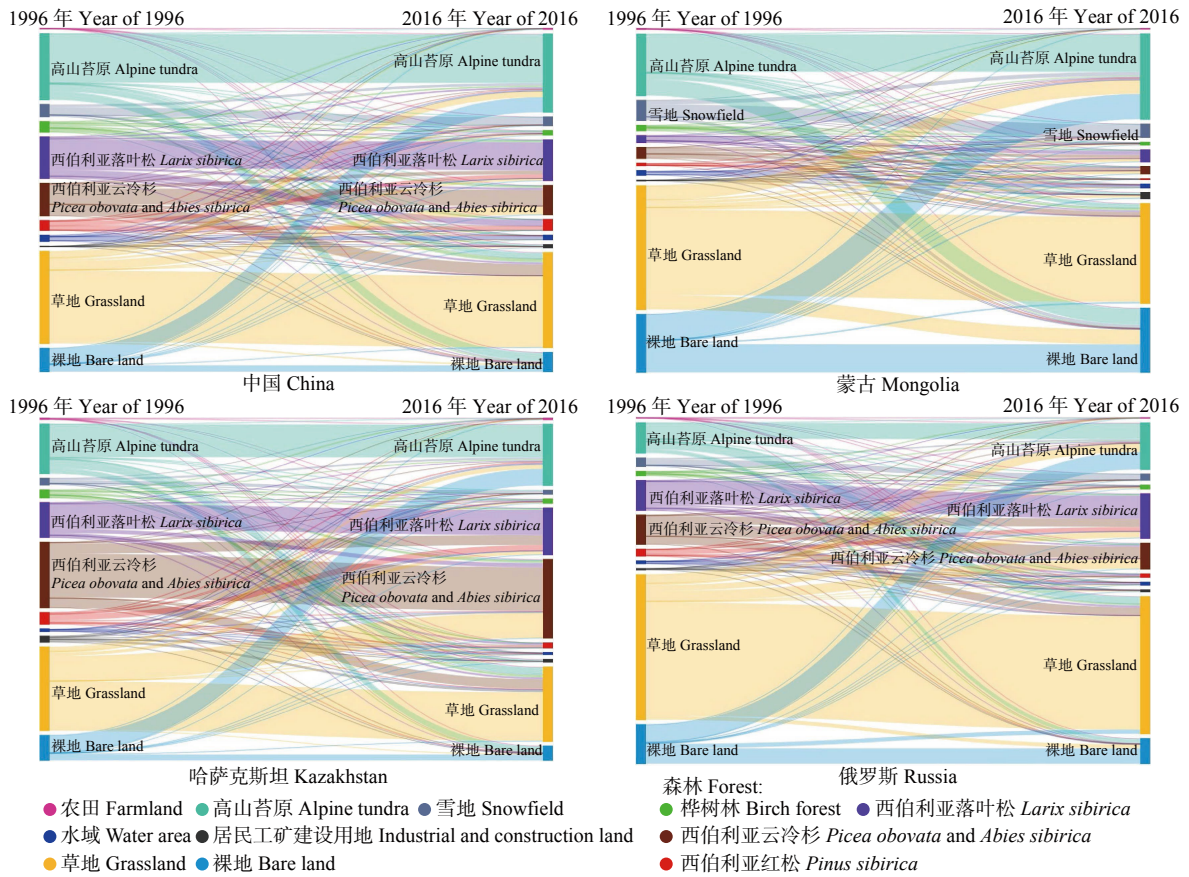


图4 1996—2016年研究区各国典型景观类型变化

Fig. 4 Changes in typical landscape types of countries in the study area from 1996 to 2016

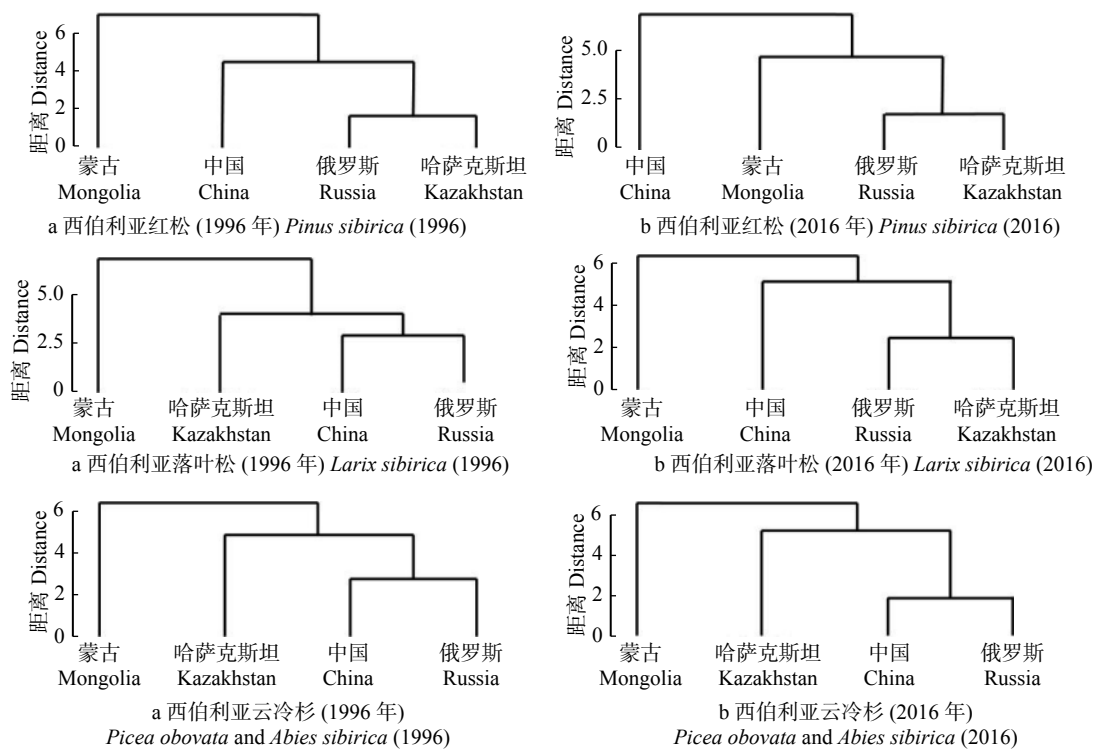


图5 1996年和2016年代表性植被类型聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of representative vegetation types in 1996 and 2016

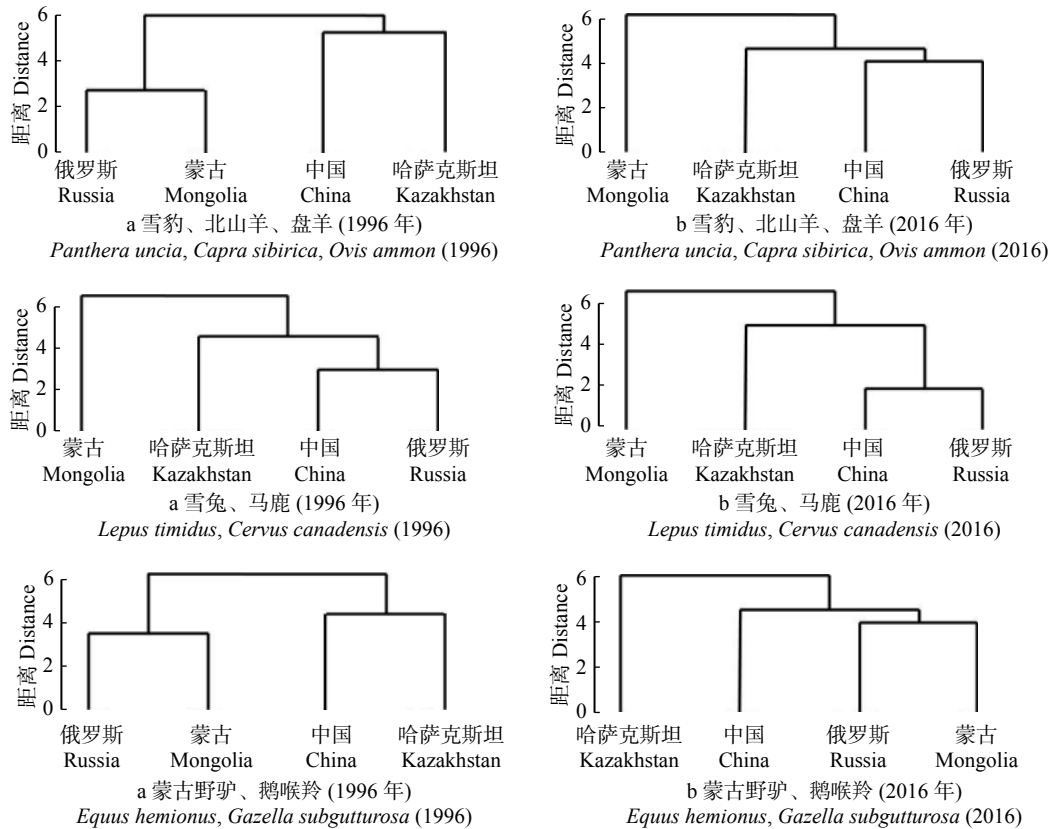


图 6 1996 年和 2016 年关键物种潜在适宜生境聚类分析

Fig. 6 Clustering analysis of potential habitat for key species in 1996 and 2016

4 讨 论

本研究通过对 1996—2016 年金山—阿尔泰山 4 国交界地区关键植被景观类型和关键动物物种潜在栖息地分析,明确了我国研究区内自然遗产提名地与邻国相比的优、劣势所在。这将为我国所属地区的申遗工作提供一定的科学依据,同时,也为更好地保护金山—阿尔泰山地区景观的完整性和协调性提供技术支撑。

我国典型植被类型的优势主要体现在:(1)植被面积整体基数大,高于其他 3 国。研究区保存较大面积的区域代表性植被斑块。面积较大地代表性植被类型,可以为其他生物提供更多的生态空间,利于区域生物多样性的维持和整体景观的完整性和稳定性^[34]。(2)西伯利亚红松林面积有明显增加(其他 3 国均有不同程度下降)。有研究发现,喀纳斯保护区内,西伯利亚落叶松为主要建群种,其他物种受干扰程度也相对较少^[35],这可能是我国境内区域西伯利亚红松林面积增加的重要原因。同时,西伯利亚红松林拥有较好的荫蔽条件,是紫貂(*Martes zibellina*)、猞猁(*Lynx lynx*)等珍稀林栖动物的重要栖息地,也是西伯利亚泰加林重要组成部分^[36]。所以,与其他国家对比分析,尤其是与已经申遗成功的俄罗斯部

分相比,拥有较大的西伯利亚红松林面积,对于维持这一地区的动物多样性具有不可替代的作用,也是这一区域我国未来申遗的一大优势所在。

我国典型动物潜在生境的优势主要体现在:(1)雪豹、盘羊、北山羊的潜在生境面积较大。但值得指出的是阿尔泰山脉、喜马拉雅山脉的气温增高、冰川融化和降水增加导致雪豹等动物的潜在生境逐渐减少,这将更不利于雪豹及其猎物等动物的生存繁衍^[37]。Zhang 等^[38]在研究 1966—2015 年阿尔泰山北部和南部气温和降水数据发现,北部($0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)和南部($0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)的温度显著升高。北部的降水量变化不大($-1.41\text{ mm}/10\text{ a}$),而南部的降水量显著增加($8.89\text{ mm}/10\text{ a}$)。有学者在喜马拉雅山脉针对雪豹栖息地的调查结果显示,喜马拉雅山约 30% 的雪豹栖息地可能会因气温升高带来的林木线的移动和随之而来的高山地带缩小而消失^[39]。气候变化背景下,如何有效保护雪豹等珍稀动物生存安全,已成为迫在眉睫的问题。(2)部分物种(雪兔、马鹿等)的潜在生境面积最大且整体景观完整性保持较好。这与张绘芳等^[40]对阿尔泰山地区森林景观格局的稳定性研究结果一致。森林整体景观格局的稳定性,对于改善雪兔、马鹿等动物的生境质量具有重要意义。但森林整体景观格局稳定的同时,存在部分森

林转化为草地,和人为乱砍乱伐现象,森林景观稳定性存在一定程度威胁。本研究说明对于雪兔、马鹿的生境保护,相对于其他3国,尤其是已经申遗成功的俄罗斯部分,我国目前具有较为优越的本底条件。(3)对于蒙古野驴、鹅喉羚的潜在生境来说,我国境内存在面积增大的趋势,而其余3国均有不同程度降低。有研究发现,1986—2015年阿尔泰生态功能区灌丛草原、草甸植被覆盖指数平稳上升,这与本研究结果一致^[41]。但也有部分森林转化为草地,可能会对雪兔等林栖珍稀动物产生不利影响。从区域生态保护的全局出发,评估植被类型变化对典型物种栖息地的影响,更有利于制定科学的生态保护策略。

同时,我国也存在以下劣势:(1)与邻国相比,我国部分的西伯利亚落叶松林和西伯利亚云冷杉林面积均存在较大的减少;(2)林栖动物的潜在生境面积有所下降;(3)人为活动强度急剧增加(土地利用类型面积增加了4倍)。我国区域部分零散斑块地区仍然存在乱砍滥伐和过度放牧情况,这可能是导致这一问题的主要原因。过量采伐、乱砍滥伐,不合理的放牧、采药等人为活动的破坏,致使天然林资源存在非自然消耗^[42]。随着经济发展,这种情况可能会持续恶化。阿尔泰地区近30年来,过度放牧导致的草地植被退化和土壤环境逐渐恶化,也导致了一定程度的水土流失^[43]。同时,新疆因为矿产资源丰富,矿产资源开发导致的生态环境破坏现状也不乐观^[44]。伴随着经济的高速发展,人工建筑面积的增加、人为干扰的增强,同样会对典型植被和珍稀动物的潜在生境构成威胁。减少过度放牧、旅游业、铁路公路建设等人为干扰,进一步缓解自然和人为干扰对该区的不利影响,提高典型植被类型和珍稀动物栖息地的质量,将是我国自然遗产提名地接下来申遗工作的重心。

需要注意的是,金山阿尔泰山世界自然遗产中的UKok高地区域,正位于俄罗斯阿尔泰共和国和中国、蒙古国边界,是阿尔泰山的自然地理特征的集中反映。研究区内中蒙海拔较低,土壤主成分的一致性有可能是导致中、蒙植被更相似的原因^[45],而中国喀纳斯、俄罗斯金山阿尔泰山世界遗产Ukok片区和Kosh-Agachskiy保护区中存在大量的自然遗产廊道,是阿尔泰山遗产地的重点核心区域之一,当两个地区的生境类型相似时,动物在不断迁徙的过程中逐渐形成了生物廊道^[46],中、俄动物生境相似的研究结果证明了这一结论。所以,提高我国部分与已经申遗成功的俄罗斯部分的生境质量更是区域保护的重心。而研究区中、俄、蒙、哈4国的植被景观特征

和关键动物栖息地斑块特征具有不同的相似格局,这说明在跨境区域的植被恢复和物种保护中,不同国家间的协作要突出措施的针对性,以促进区域植被质量和动物生境质量的整体改善。

5 结 论

本研究通过对中、俄、蒙、哈4国跨境区域的典型植被类型和动物潜在栖息地变化分析,得到如下结论;与其他3国相比,我国植被面积基数大,但西伯利亚落叶松和西伯利亚云冷杉面积都有不同程度降低;雪豹等裸地栖息地面积较大的同时存在下降趋势,此外,我国境内林栖动物的生境面积需要拓展。我国应当采取更为严格的保护措施,以削弱人为活动的急剧增强所造成的不利生态影响,保护关键物种生存和繁衍,维持区域景观生态安全,进一步为我国所属区域申报世界自然遗产地提供基础理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 刘旭玲,杨兆萍,谢婷,等.喀纳斯世界遗产价值分析与保护开发[J].干旱区研究,2007,24(5):723-727.
Liu X L, Yang Z P, Xie T, et al. Analysis on the value of world nature heritage in Kanas and study on its conservation and development[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 723-727.
- [2] 张忍顺,蒋姣芳,张祥国.中国“世界自然遗产”资源现状特征与发展对策[J].资源科学,2006,28(1):186-191.
Zhang R S, Jiang J F, Zhang X G. Current characters and development countermeasures of the World Natural Heritage sites in China[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 186-191.
- [3] Bai X Y, Du P J, Guo S C, et al. Monitoring land cover change and disturbance of the Mount Wutai world cultural landscape heritage protected area, based on remote sensing Time-Series images from 1987 to 2018[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1332.
- [4] Fang G Q. Study on the publicity translation strategies of China's World Cultural Heritage Against the Background of "the Belt and Road Initiative"[R]. Shenyang: Atlantis Press SARL, 2019.
- [5] 袁国映,陈丽,程芸.新疆生物多样性调查与评价研究[J].新疆环境保护,2010,32(1):1-6.
Yuan G Y, Chen L, Cheng Y. Study of investigation and evaluation about biology diversity of Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2010, 32(1): 1-6.
- [6] 解焱,李典谟,John M K.中国生物地理区划研究[J].生态学报,2002,22(10):1599-1615.
Xie Y, Li D M, John M K. Preliminary researches on biogeographical divisions of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1599-1615.
- [7] 国家林业和草原局,农业农村部.《国家重点保护野生动物名录》(2021年2月1日修订)[J].野生动物学报,2021,42(2):605-640.

- National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. The list of national key protected wild animals (revised on February 1, 2021)[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2021, 42(2): 605–640.
- [8] 刘旭玲, 杨兆萍, 陈学刚. 旅游对自然遗产地景观视觉的影响研究——以喀纳斯自然保护区为例[J]. 生态经济(学术版), 2012, 28(2): 80–84.
- Liu X L, Yang Z P, Chen X G. The impact of tourism on landscape vision in nature heritage area: case of Kanas Nature Reserve[J]. Ecological Economy, 2012, 28(2): 80–84.
- [9] Deacon H, Smeets R. Authenticity, value and community involvement in heritage management under the world heritage and intangible heritage conventions[J]. Heritage & Society, 2013, 6(2): 129–143.
- [10] 李偲, 海米提·依米提, 李晓东. 喀纳斯自然保护区森林生态系统服务功能价值评估[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 92–97.
- Li C, Hymit-Yimit, Li X D. Evaluation of the service value of the forest ecosystem in Kanas Natural Reserve[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 92–97.
- [11] 包刚, 覃志豪, 包玉海, 等. 1982—2006 年蒙古高原植被覆盖时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 918–927.
- Bao G, Qin Z H, Bao Y H, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Mongolian Plateau during 1982–2006[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 918–927.
- [12] 张小云, 吴淼, 陈曦, 等. 哈萨克斯坦生物多样性及其与中国新疆的比较[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 183–188.
- Zhang X Y, Wu M, Chen X, et al. Biological diversity in Kazakhstan and Xinjian[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 183–188.
- [13] 李新荣, Павлов В Н. 俄罗斯平原针阔林过渡带森林群落组成结构与物种多样性的研究[J]. 生物多样性, 1999, 7(4): 291–296.
- Li X R, Pabnov B H. A study on composition structure and species diversity in ecotone of coniferous and broad-leaved forest in Russia plain[J]. Chinese Biodiversity, 1999, 7(4): 291–296.
- [14] 李新荣. 俄罗斯平原针阔混交林群落的灌木层植物种间相关研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 55–60.
- Li X R. Interspecific association and correlation of shrub layer in the coniferous-broadleaved mixed geobotanical zone of Russia Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 55–60.
- [15] 赵海鹏, 李文祥, 冯德刚, 等. 俄罗斯联邦的森林资源及其特性[J]. 林业科技, 2004, 29(2): 19–21.
- Zhao H P, Li W X, Feng D G, et al. Forest resource and its characteristics in Russian Federation[J]. Forestry Science & Technology, 2004, 29(2): 19–21.
- [16] Bergen K M, Loboda T, Newell J P, et al. Long-term trends in anthropogenic land use in Siberia and the Russian Far East: a case study synthesis from Landsat[J]. Environmental Research Letters, 2020(15): 105007.
- [17] 崔绍朋, 陈代强, 王金宇, 等. 新疆阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽物种的红外相机监测[J]. 生物多样性, 2020, 28(4): 435–441.
- Cui S P, Chen D Q, Wang J Y, et al. Camera-trapping survey on mammals and birds in the Kanas River Valley of Altai Mountains, Xinjiang, China[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(4): 435–441.
- [18] 曹秋梅. 新疆阿尔泰山植物多样性全球突出普遍价值[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- Cao Q M. The global outstanding universal value of plant diversity in Altai Mountains, Xinjiang[D]. Urumqi: University of Xinjiang Agricultural, 2015.
- [19] 徐峰, 马鸣, 殷守敬, 等. 雪豹栖息地选择研究初报[J]. 干旱区研究, 2006, 23(3): 471–474.
- Xu F, Ma M, Yin S J, et al. Preliminary study on the habitat selection of *Uncia uncia*[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(3): 471–474.
- [20] 徐峰, 马鸣, 殷守敬, 等. 新疆北塔山雪豹对秋季栖息地的选择[J]. 动物学研究, 2006, 27(2): 221–224.
- Xu F, Ma M, Yin S J, et al. Autumn habitat selection by snow leopard (*Uncia uncia*) in Beita Mountain, Xinjiang, China[J]. Zoological Research, 2006, 27(2): 221–224.
- [21] 初雯雯, 蒋志刚, 李凯, 等. 阿尔泰山中蒙边境地区的雪豹及其保护意义[J]. 生物多样性, 2020, 28(4): 442–444.
- Chu W W, Jiang Z G, Li K, et al. The snow leopard in Altai Mountains, near the Sino-Mongolia border, and its conservation significance[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(4): 442–444.
- [22] 初红军, 蒋志刚, 戚英杰, 等. 阿尔泰山南部科克森山和卡拉麦里山盘羊冬季栖息地的选择[J]. 兽类学报, 2009, 29(2): 125–132.
- Chu H J, Jiang Z G, Qi Y J, et al. Winter bed-site selection by argali *Ovis ammon sairensis*, *O. a. darwini* in Mt. Kekesen and Mt. Kalamaili in southern Altai Mountains[J]. Acta Theriologica Sinica, 2009, 29(2): 125–132.
- [23] 张钧泳. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区盘羊生境选择[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- Zhang J Y. Habitat selectivities of *Ovis ammon darwini* in Mountain Kalamaili Ungulate Nature Reserve[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016.
- [24] 朱新胜, 汪沐阳, 杨维康, 等. 北山羊生态生物学研究现状[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3553–3559.
- Zhu X S, Wang M Y, Yang W K, et al. Ecology and biology of *Capra sibirica*: current situation of studies[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3553–3559.
- [25] 伊拉木江·托合塔洪, 阿迪力·艾合麦提, 单文娟, 等. 新疆兔属三物种潜在生境分布及未来气候变化的影响[J]. 野生动物学报, 2020, 41(1): 70–79.
- Yilamujiang Tuohetahong, Adil Ahmat, Shan W J, et al. Potential habitat distribution of three species of *Lepus* in Xinjiang and effects of future climate change[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2020, 41(1): 70–79.
- [26] 罗泽珣, 李振营. 我国雪兔的分类研究[J]. 东北林学院学报, 1982, 26(2): 155–163.
- Luo Z X, Li Z Y. A systematic review of the Chinese varying hare, *Lepus timidus* Linnaeus[J]. Journal of North-Eastern Forestry Institute, 1982, 26(2): 155–163.
- [27] 古丽巴努·阿不来提. 基于 3S 技术的塔里木马鹿栖息地破碎化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.

- Gulbanu Ablat. Research on habitat fragmentation of Tarim red deer (*Cervus elaphus yarkandensis*) based on 3S technology[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [28] 吴文, 李月辉, 胡远满, 等. 小兴安岭南麓马鹿冬季适宜生境评价[J]. *生物多样性*, 2016, 24(1): 20–29.
Wu W, Li Y H, Hu Y M, et al. Suitable winter habitat for *Cervus elaphus* on the southern slope of the Lesser Xing'an Mountains[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(1): 20–29.
- [29] 张晓晨, 邵长亮, 葛炎, 等. 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区夏季蒙古野驴适宜生境与种群数量评估[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 2993–3004.
Zhang X C, Shao C L, Ge Y, et al. Suitable summer habitat of the khulan in the Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve and estimation of its population[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 2993–3004.
- [30] 初雯雯. 新疆卡山自然保护区蒙古野驴和鹅喉羚资源现状和社区牧民保护意识研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Chu W W. Study on resources status of *Equus hemionus* and *Gazella subgutturosa*, and wildlife conservation awareness of herdsmen in the Mt. Kalamaili[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [31] 初红军, 蒋志刚, 兰文旭, 等. 蒙古野驴、鹅喉羚和家畜的食物重叠[J]. *动物学报*, 2008, 54(6): 941–954.
Chu H J, Jiang Z G, Lan W X, et al. Dietary overlap among kulan *Equus hemionus*, goitered gazelle *Gazella subgutturosa* and livestock[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(6): 941–954.
- [32] 初红军, 蒋志刚, 蒋峰, 等. 鹅喉羚夏季和冬季栖息地选择[J]. *动物学研究*, 2009, 30(3): 311–318.
Chu H J, Jiang Z G, Jiang F, et al. Summer and winter bed-site selection by goitred gazelle (*Gazella subgutturosa sairensis*)[J]. *Zoological Research*, 2009, 30(3): 311–318.
- [33] 苏比奴尔·艾力, 热木图拉·阿卜杜克热木, 于苏云江·吗米提敏, 等. 基于 MaxEnt 模型的新疆鹅喉羚生境适宜性评价[J]. *野生动物学报*, 2019, 40(1): 27–32.
Subinur Eli, Rahmutulla Abdikerim, Yusuyunjan Mamtimin, et al. Assessment of habitat suitability for *Gazella subgutturosa* in the Xinjiang based on the MaxEnt Modeling[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2019, 40(1): 27–32.
- [34] Elisabeth M A S, Peter D S, Maria V, et al. A global analysis of complexity-biodiversity relationships on marine artificial structures[J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2021, 30(1): 140–153.
- [35] 程平, 潘存德, 朱跃峰, 等. 新疆喀纳斯旅游区森林群落格局分析及其环境解释[J]. *新疆农业大学学报*, 2011, 34(5): 367–373.
Cheng P, Pan C D, Zhu Y F, et al. Pattern analysis and environment interpretation on forest community in Kanas tourist areas, Xinjiang[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2011, 34(05): 367–373.
- [36] 刘桂丰, 杨传平, 赵光仪. 珍贵树种西伯利亚红松引进的可行性[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1483–1486.
Liu G F, Yang C P, Zhao G Y. Feasibility to introduce rare tree species *Pinus sibirica* into China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1483–1486.
- [37] Li J, Xiao L Y, Lu Z. Challenges of snow leopard conservation in China[J]. *Science China Life Sciences*, 2016, 59(6): 637–639.
- [38] Zhang D L, Yang Y P, Lan B. Climate variability in the northern and southern Altai Mountains during the past 50 years[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3238.
- [39] Jessica L F, Eric W, Rinjan S, et al. Conservation and climate change: assessing the vulnerability of snow leopard habitat to treeline shift in the Himalaya[J]. *Biological Conservation*, 2012, 150(1): 129–135.
- [40] 张绘芳, 地力夏提·包尔汗, 朱雅丽, 等. 阿尔泰山森林景观格局的稳定性[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 189–194, 353.
Zhang H F, Dilixiati Baoerhan, Zhu Y L, et al. Stability of forest landscape pattern in Altay Mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 189–194, 353.
- [41] 叶尔纳尔·胡马尔汗, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 阿尔泰山地森林草原生态功能区植被覆盖对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 307–315.
Yeernaer Humaerhan, Xu X H, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. Response of vegetation coverage to climate change in Altai Mountain forest and grassland ecological function area in Xinjiang, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 307–315.
- [42] 姜泽群, 阿不都拉·阿巴斯, 艾尼瓦尔·吐米尔. 阿尔泰山温泉沟森林公园地衣物种多样性的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3): 121–126.
Jiang Z Q, Abdulla Abbas, Anwar Tumor. Study on the lichens species diversity in Hot Spring Valley Forest Park of Altay Mountain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(3): 121–126.
- [43] 徐俏. 阿尔泰山水土流失现状及成因分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2019.
Xu Q. Analysis on the present situation and causes of soil and water loss in Altai Mountains[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2019.
- [44] 张新华, 谷树忠, 王礼茂. 新疆矿产资源开发利益格局合理性识别[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 1992–2000.
Zhang X H, Gu S Z, Wang L M. Identification of mineral resource exploitation interests pattern rationality in Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 1992–2000.
- [45] He T, Gray J, Gu Y. Dataset of mineral contents of fine-sand and silt-sized soil particles from deserts in China and Mongolia[J]. *Data in Brief*, 2021, 35(5): 106879.
- [46] 刘华先. 跨境自然遗产廊道研究——以阿尔泰山为例[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院大学, 2016.
Liu H X. Transboundary world natural heritage corridor research: a case study of Altai Mountain[D]. Urumqi: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

(责任编辑 范娟 孟瑶
责任编辑 臧润国)