



• 研究报告 •

重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化

张晨^{1,2,3,4}, 马伟⁵, 陈晨^{1,2,3,4}, 汪沐阳^{1,2,3}, 徐文轩^{1,2,3}, 杨维康^{1,2,3*}

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所标本馆, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所木垒野生动物生态监测实验站, 新疆木垒 831900; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理中心, 新疆昌吉 831100

摘要: 生境评价对物种保护具有重要意义。鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)是新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区的代表性物种, 开展其生境适宜性评价可以为该物种的保护和管理提供科学依据。作者基于2005–2019年采用样线法在保护区开展野外调查所获鹅喉羚的分布点数据, 利用最大熵(MaxEnt)模型筛选环境变量, 评估鹅喉羚在矿业开发前(2005年)、矿业开发顶峰时(2011年)和矿区生态修复后(2019年) 3个时期的生境质量; 采用质心转移和景观格局指数分析近15年鹅喉羚的生境空间格局变化特征。结果表明模型预测结果准确性较高, 3个时期鹅喉羚的潜在适宜生境面积波动较大, Jackknife检验结果表明在任一时期水源点对鹅喉羚生境选择的影响均最大。矿业开发前鹅喉羚适宜生境分布于保护区中部, 主要特征为面积大、生境斑块集中、破碎化程度低; 矿业开发顶峰时鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发前减少2.39%, 尤其是保护区南部大面积适宜生境丧失, 质心转移和景观格局指数分析结果显示适宜生境向保护区北部转移, 生境斑块离散破碎程度高; 实施矿区生态修复后鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发顶峰时增加了3.50%, 因矿业开发丧失的生境重新成为鹅喉羚的适宜生境。与2005年以前相比, 2019年鹅喉羚生境斑块仍离散化严重, 部分适宜生境因新修建的高速公路和铁路而重新丧失。基于以上研究结果, 我们从保护水源、控制交通建设、修复矿区和加强野生动物通道监测等4个方面对鹅喉羚种群保护管理提出了建议。

关键词: 鹅喉羚; 矿业开发; 道路建设; MaxEnt模型; 生境适宜性

张晨, 马伟, 陈晨, 汪沐阳, 徐文轩, 杨维康 (2022) 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化. 生物多样性, 30, 21176. doi: 10.17520/biods.2021176.

Zhang C, Ma W, Chen C, Wang MY, Xu WX, Yang WK (2022) Changes of habitat pattern for goitered gazelle in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve under the influence of major projects. Biodiversity Science, 30, 21176. doi: 10.17520/biods.2021176.

Changes of habitat pattern for goitered gazelle in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve under the influence of major projects

Chen Zhang^{1,2,3,4}, Wei Ma⁵, Chen Chen^{1,2,3,4}, MUYANG Wang^{1,2,3}, Wenxuan Xu^{1,2,3}, Weikang Yang^{1,2,3*}

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

2 The Specimen Museum of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

3 Mori Wildlife Monitoring and Experimentation Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Mori, Xinjiang 831900

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Management Center of Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve, Changji, Xinjiang 831100

ABSTRACT

Aims: Habitat assessment is vital in the conservation of wildlife. The goitered gazelle (*Gazella subgutturosa*) is an important species in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve (thereafter KNR). However, their habitat is under threat because of human development and mining. The evaluation of remaining suitable habitat for the

收稿日期: 2021-05-07; 接受日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(U2003203; 31872254)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yangwk@ms.xjb.ac.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

goitered gazelle can provide a scientific basis for decision-making in species conservation and management of the reserve.

Methods: Based on the distribution of goitered gazelle demonstrated through field surveys from 2005 to 2019 in the KNR, we used a maximum entropy (MaxEnt) model to test important habitat variables for habitat selection. Suitable habitat for goitered gazelle was evaluated during three distinct time-periods: (1) before mining development (2005), (2) at the peak of mining development (2011), and (3) after ecological restoration but with a highway constructed through the reserve (2019). The spatial habitat quality and distribution of goitered gazelle over the last 15 years was further analyzed using centroid transfer and a landscape pattern index.

Results: The accuracy of MaxEnt model was high and jackknife tests demonstrated the distribution and distance to water sources had the highest impact on goitered gazelle habitat selection in all three time periods. The area of potential suitable habitat fluctuated widely over the three time-periods. Prior to the mining development in 2005, suitable habitat for goitered gazelle was mainly concentrated in the middle of the reserve with large habitat patches and a low degree of habitat fragmentation. At the peak of mine development (2011), the area of highly suitable habitat had decreased by 2.39% compared to habitat in 2005. A large area of suitable habitat in the south of the reserve was lost due to mining development, and the centroid indicated that the remaining suitable habitat was restricted to the north, with smaller, fragmented habitat patches. By 2019, 3.50% of the previously suitable goitered gazelle habitat that was lost due to mining development was recovered through ecological restoration. However, compared to 2005, the recovered habitat patches were more severely dispersed in 2019. Additionally, previously highly suitable habitats were lost due to highway and railway constructions in the KNR.

Conclusion: To improve the protection of goitered gazelle within the KNP, we suggest, (1) strengthening the protection of all water sources, (2) establishing and monitoring wildlife passages, (3) limiting further traffic construction, and (4) supporting mine reclamation efforts.

Key words: *Gazella subgutturosa*; mining development; road construction; MaxEnt model; habitat suitability

生境为野生动物提供赖以生存的食物、水源和隐蔽地等资源(Morrison et al, 2007), 其质量的变化对野生动物的生存具有深远影响, 能够直接改变一个物种的生存现状(Martín-López et al, 2011)。因此生境丧失和破碎化成为导致物种灭绝和生物多样性下降的关键因素(Fahrig, 2003)。近年来, 日益增多的矿业开发和交通建设等重大工程对自然景观和生态系统造成了难以估量的破坏, 不仅直接导致野生动物伤亡(Forman & Deblinger, 2000), 亦通过改变地貌、植被、径流、食物质量、隐蔽条件等生境特征, 制约野生动物的迁移、扩散与繁殖, 导致其生境廊道被阻隔, 生境连通性降低, 严重威胁野生动物的生存(Lesbarrères et al, 2004)。以有蹄类动物为代表的大中型兽类受矿业开发和道路工程影响更大(Cristescu et al, 2016; Poole et al, 2016), 例如矿业开发导致的生境破碎化阻断了北美驯鹿(*Rangifer tarandus*)和黑尾鹿(*Odocoileus hemionus*)等有蹄类动物的迁移廊道、阻碍其季节迁徙和扩散, 改变了它们的生境选择规律(Merrill et al, 1994; Weir et al, 2007)。封闭式的高速公路和铁路降低了大角羊(*Ovis canadensis*)种群间的基因流动(Epps et al, 2005)。为消除或缓解矿业开发和道路修建等重

大工程对野生动物的负面影响, 可以采取取缔非法矿企和修复被侵占水源以及植被, 在道路沿线修建野生动物通道等手段恢复野生动物生境(Clevenger & Waltho, 2005)。

鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)隶属于偶蹄目牛科瞪羚属, 又名长尾黄羊, 是分布于欧亚大陆荒漠-半荒漠地区典型的有蹄类野生动物, 中国国家二级重点保护野生动物, 世界自然保护联盟(IUCN)将其列为易危(VU)物种(IUCN, 2017)。鹅喉羚在国内主要分布于内蒙古中西部、宁夏荒漠区、甘肃西部、青海柴达木盆地和新疆等地, 其中在新疆的分布范围较广, 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区(以下简称卡山保护区)是其集中分布区(高行宣等, 1996; 初红军等, 2009), 种群数量最多时曾达6,638–19,677只(初红军等, 2009)。然而, 近15年来卡山保护区先后经历了高强度的矿业开发、公路铁路建设和矿区生态修复等人类活动。2005年以前保护区内的人类活动主要包括放牧和216国道交通运输。2008年保护区内出现矿业开发活动, 2011年矿业开发达到顶峰, 导致保护区内形成多个矿区斑块, 栖居其内的野生动物生境面临丧失和破碎化的风险。在有关政府部门的决策下, 保护区于2015年开

始实施矿企关停和矿区生态修复工程,至2018年矿区生态修复工程全面完成。与此同时,2017年在保护区内开始动工建设阿富准铁路和S11高速公路,2019年全面建成通车。目前S11高速公路、216国道与阿富准铁路3线并行穿越保护区,成为保护区内野生动物面临的新干扰源,势必加大鹅喉羚等有蹄类动物季节性迁徙扩散的难度,威胁其生存。

在上述背景下,本研究拟开展卡山保护区鹅喉羚生境质量评估,分析和对比近15年保护区内鹅喉羚的生境格局动态。根据卡山保护区不同时期开展的重大工程活动背景,本研究设定矿业开发前(2005年)、矿业开发顶峰时(2011年)和矿区生态修复后(2019年)3个时期,采用最大熵(MaxEnt)模型对这3个时期鹅喉羚的适宜生境动态进行分析,评估矿区开发和公路铁路建设等重大工程对鹅喉羚生境质量的影响。试图回答以下科学问题:(1)影响卡山保护区鹅喉羚生境质量的关键环境因子有哪些;(2)近15年矿业开发和交通建设等人类活动如何改变鹅喉羚的生境空间格局;(3)矿区生态修复是否促进了鹅喉羚生境质量恢复,以期能揭示重大工程对鹅喉羚生境质量的影响机制,为卡山保护区鹅喉羚及其生境的有效保护和长期监测提供科学依据。

1 研究区概况

卡山保护区(88°30′–90°03′ E, 44°36′–46°00′ N)位于准噶尔盆地东缘,地跨昌吉回族自治州和阿勒泰地区,以保护珍稀濒危有蹄类动物及其生境为主(图1)(高行宜和姚军, 2006)。保护区内地貌类型多样,有戈壁、沙漠、平原、山地和丘陵;海拔高度600–1,464 m,地势东高西低。该区域属中温带大陆性气候,年均温仅1.99℃;年均降水量和蒸发量分别为186.8 mm和2,090 mm(夏参军等, 2011)。保护区内无地表水分布,仅有十几处裂隙水溢出的盐泉、低洼地降雨和融雪积水,以及少量人工广口井,成为旱季野生动物的天然饮水点。水资源短缺是制约该地区野生动物生存的重要因素(葛炎等, 2003)。

卡山保护区内植被组成简单、分布稀疏,主要由超旱生、旱生灌木、小半灌木及旱生一年生灌木、多年生草本和短命植物等组成。建群植物以豆科、藜科、菊科、蓼科、莎草科、柽柳科、禾本科、麻黄科植物为主,能够形成大片群落的优势种有梭梭

(*Haloxylon ammodendron*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、假木贼(*Anabasis* spp.)、蒿(*Artemisia* spp.)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、琵琶柴(*Reaumuria songarica*)、碱韭(*Allium polyrhizum*)、木蓼(*Atraphaxis* spp.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等(徐文轩等, 2016)。卡山保护区内野生动物种类繁多,国家重点保护野生有蹄类动物有普氏野马(*Equus ferus*)、蒙古野驴(*E. hemionus*)、盘羊(*Ovis darwini*)和鹅喉羚等(葛炎等, 2003)。

保护区内常住居民较少,主要是以游牧为主的哈萨克族。当地政府于2005年将保护区南部总面积3,569.04 km²的野生有蹄类动物越冬地调出保护区,2006年开始在该区域建设准东国家级经济技术开发区,进行煤炭和稀有金属矿产开发;2010年底工业园区基础设施包括水库等基本建成并投入使用,煤电煤化工产业初具规模(彭向前, 2012)。之后在卡山保护区中部和北部也陆续实施了矿业开发,至2011年达到顶峰(陈晨等, 2021)。2013年,保护区中部西南地区乔木希拜管护站开始大量野放普氏野马(王渊, 2014)(图1)。2015–2019年,当地政府开始关停保护区范围内所有矿企,并着力开展矿区的生态修复,目前保护区内已无任何矿业开发活动(张晓晨等, 2020)。1991年建设完成的开放式216国道将保护区分隔为东西两个部分。2019年,与216国道紧邻的阿富准铁路和S11高速公路同时建成通车,形成3条交通线从南至北并行穿越保护区的局面(陈晨等, 2021)(图1)。虽然高速公路和铁路均设计了野生动物通道,但仍可能阻碍鹅喉羚迁移,影响道路两侧鹅喉羚生境的连通性。

2 研究方法

2.1 鹅喉羚分布点数据

鹅喉羚分布位点数据来自我们2005–2019年在卡山保护区开展的实地野外考察。本研究采用样线法调查鹅喉羚的分布点(盛和林和徐宏发, 1992; 刘辉等, 2015)。在开展野外调查之前,咨询当地牧民和保护区工作人员,初步确定鹅喉羚分布区域。针对鹅喉羚种群分布状况,参照保护区的地形地势和前人考察路线,共布设了27条样线,每条样线长40–200 km不等,总长度为3,181.9 km(图2),采用可变距离样线法在每年固定时期进行重复调查。调

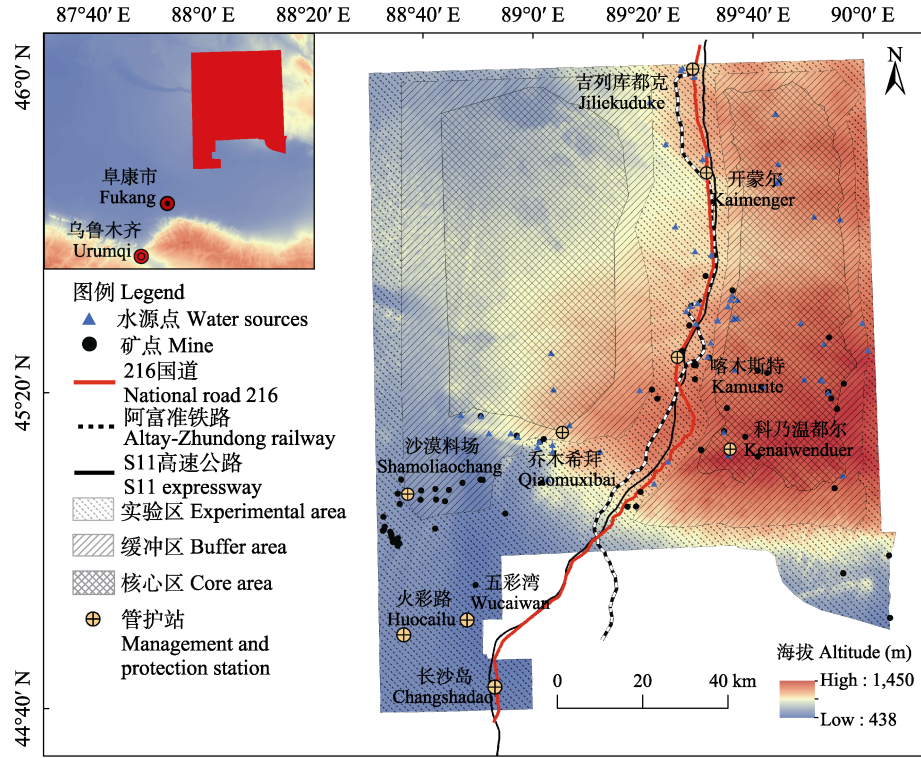


图1 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区水源点、矿点和道路概况图
Fig. 1 Overview of water sources, mines and roads in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve

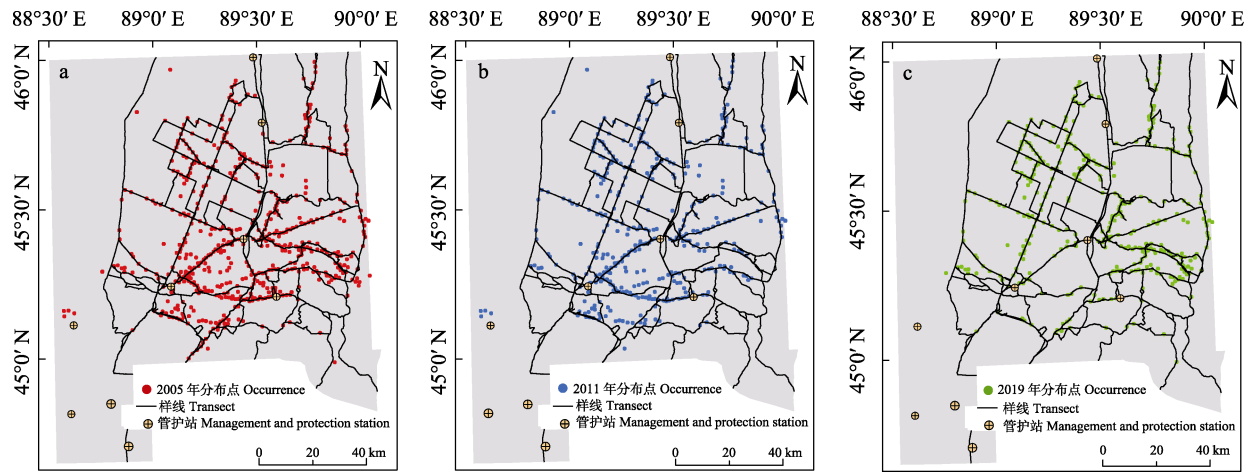


图2 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区调查样线及鹅喉羚2005年(a)、2011年(b)和2019年(c)分布位点图
Fig. 2 Transect and occurrence of goitered gazelle in 2005(a), 2011(b), and 2019(c) in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve

查时使用双筒和单筒望远镜扫视样线两侧, 当发现鹅喉羚时记录观察者所在位置的经纬度, 使用激光测距仪(蔡司T*RF10*54)和指南针分别测量观察者与鹅喉羚之间的距离和夹角, 以此计算鹅喉羚所在位置的精确GPS位点(苕春荣等, 2017)。因分布点过拟合可能影响模型预测的准确性, 为此我们使用缓冲区分析法筛选鹅喉羚的分布点。数据分辨率约

1 km, 因此设定缓冲半径为0.5 km, 在每个栅格中只保留其中一个分布点(李美玲等, 2019)。处理之后共获得鹅喉羚分布点数据如下: 2005年549个(图2a)、2011年381个(图2b)、2019年342个(图2c)。

2.2 环境数据

本研究将潜在影响鹅喉羚生境适宜性的环境变量分为以下4种: 气候、地形、人类干扰、植被(类

型)和水源(附录1), 基本覆盖了影响该物种分布的所有因子。其中气候数据来自世界气候数据库(WorldClim v 2.1, <http://www.worldclim.org/>)中的19个气候因子, 分辨率为30" (约1 km); 地形因子选取海拔、坡度和坡向, 数据来源于中国科学院科学数据库地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的GDEMDEM 30 m分辨率的数字高程数据, 通过ArcGIS空间分析获得; 人类干扰因子包括距216国道距离、距S11高速公路距离、距阿富准铁路距离和距矿点距离。利用遥感影像、实地考察结合1/10万地形图, 提取保护区内水源、道路以及矿点等分布数据, 使用ArcGIS的spatial analyst tools (空间分析模块)计算各变量的欧式距离栅格图层。

植被类型能够反映鹅喉羚的食物分布状况, 是影响其生境选择的重要因子。利用Landsat TM遥感影像, 在野外实地验证的基础上, 采用监督分类和非监督分类相结合的方法, 参考《1:100万中华人民共和国植被图》(中国科学院中国植被图编译委员会, 2007), 辅以目视解译, 生成不同时期保护区植被类型图(林杰等, 2012)。

卡山保护区边界范围由保护区管理中心提供。以ArcGIS 10.6为平台, 将上述全部环境因子数据按研究区域边界范围进行掩膜提取、统一坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_45N, 所有矢量图层重采样为1 km × 1 km的栅格图层, 建立不同时期环境变量文件夹: 2005年(19个气候因子、矿区开发前植被类型、地形因子、距水源点距离和距216国道距离)、2011年(19个气候因子、矿区开发顶峰植被类型、地形因子、距水源点距离、距216国道距离和距矿点距离)、2019年(19个气候因子、矿区生态修复后植被类型、地形因子、距水源点距离、距216国道距离、距S11高速公路距离、距阿富准铁路距离和距矿点距离), 并转化为ASCII格式用于MaxEnt模型运算(附录1)。

2.3 MaxEnt模型的构建和验证

MaxEnt模型是最具有代表性的物种分布模型之一, 具有“只需要物种出现点就可以进行预测”“即使出现点数据较少时预测精度也很高”等特征, 被认为是目前预测物种潜在分布较好的模型(Phillips et al, 2006; 罗翀等, 2011)。

(1)模型构建。将不同情景下鹅喉羚的分布点数

据以及对应的环境变量导入MaxEnt中, 分别随机选取75%和25%的分布点用于模型建立和验证, 其余参数设为模型的默认值, 构建鹅喉羚分布模型进行模拟, 同时选择刀切法(Jackknife)分析环境变量的重要性, 将迭代运算10次模拟结果的平均值作为最终结果(Behdarvand et al, 2014)并以Logistic格式输出, 得到鹅喉羚的概率分布图。

(2)模型验证。采用受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)评价模型预测的准确性, 评价标准为: 0.5–0.6为不及格, 0.6–0.7较差, 0.7–0.8一般, 0.8–0.9良好, 0.9–1.0优秀(Araújo & Peterson, 2012)。

(3)生境等级划分。将模型输出的ASCII文件导入ArcGIS 10.6中转换为浮点型栅格数据, 依据MaxEnt模型采用最大化训练敏感性和特异性(maximum training sensitivity and specificity, MTSS)阈值法对模型输出结果进行转换, 判定大于该阈值为鹅喉羚的适宜生境, 小于该阈值为不适宜生境(Jiménez-Valverde & Lobo, 2007; 孔维尧等, 2019)。

2.4 生境空间变化特征

利用ArcGIS进行叠加分析, 具体方法如下:

$$X = \text{SHP} \times 10 + \text{SHL}, X \in (0, 1, 10, 11) \quad (1)$$

式中, SHP和SHL分别表示前后不同时期鹅喉羚的适宜生境分布图层, 取值为0 (不适宜生境)和1 (适宜生境)。X = 0表示两个时期都是不适宜生境; X = 1代表前一时期为不适宜生境, 后一时期为适宜生境的区域, 即新增适宜生境区; X = 10代表前一时期为适宜生境, 后一时期为不适宜生境的区域, 即丧失适宜生境区; X = 11代表两个时期都是适宜生境, 即保留适宜生境区(冉巧等, 2019)。

2.5 适宜生境质心转移

质心是描述物种空间分布的重要指标之一, 也可以用来表征物种的空间分布变化(雷璇等, 2012)。将不同时期鹅喉羚的适宜生境作为一个整体, 用质心位置的转移反映鹅喉羚适宜生境的空间变化。首先将鹅喉羚不同时期的潜在适宜生境分布栅格图矢量化; 再利用ArcGIS分类统计工具Zonal计算各时期适宜生境的质心位置, 并比较不同时期质心位置的变化和转移距离(张殷波等, 2019)。

2.6 景观格局指数选取与计算

生境破碎化造成物种栖息环境破坏、生境质量下降、生境结构改变(吴昌广等, 2009; 傅伯杰等,

2011)。本文选取类别(class)尺度上的8个景观指标定量分析3个时期鹅喉羚的生境空间格局(附录2),以期了解保护区内鹅喉羚生境的破碎化程度。各景观格局指数的计算公式和描述详见邬建国(2001)。主要利用景观格局分析软件Fragstats 4.2中的移动窗口空间分析法分别探讨不同时期生境适宜度类型(适宜和不适宜)景观格局特征,揭示生境破碎化程度。

3 结果

3.1 鹅喉羚生境适宜性评价结果

2005、2011及2019年3个时期MaxEnt模型的AUC分别为0.817、0.812和0.816,表明所建模型的预测效果均较好,预测的鹅喉羚适宜生境分布具有很强的可靠性。

MaxEnt模型可自动输出各个环境因子的综合贡献率,Jackknife检验结果表明:在3个时期对鹅喉羚空间分布贡献率最大的因子均是距水源点距离,分别为32.9%、22.5%和23.2%(表1)。其次最暖季平均温在2011年和2019年贡献率均较高。在2005年距216国道距离是贡献率最大的人类干扰因子(7.3%);2011年距矿点距离为对模型贡献率最大的人类干

扰因子(11.6%),其次为距216国道距离(6.4%);在2019年距阿富准铁路距离则成为对模型贡献率最大的人类干扰因子(12.3%)(表1)。

3.2 不同时期鹅喉羚适宜生境面积变化

模型模拟结果表明,3个时期鹅喉羚的适宜度较低区域在研究区内面积最大,主要集中在保护区外围和道路沿线,适宜度较高的区域主要集中在保护区中部(图3)。3个时期存在栅格图层的阈值分别为0.351(2005年)、0.405(2011年)和0.370(2019年),据此将其生境分为适宜生境和不适宜生境。

模型模拟结果表明鹅喉羚的各类型生境面积在不同时期变化较大(表2)。从2005年到2019年,适宜生境面积呈先减少后增加的趋势。2005年至2011年适宜生境面积减少了353 km²,变化率为-8.27%;2011年至2019年适宜生境面积增加了520 km²,变化率为13.28%。与此对应的是,不适宜生境面积在2011年最大,呈先上升后减少的趋势(表2)。

3.3 不同时期鹅喉羚适宜生境空间变化和质心转移

将每两个时期的适宜生境叠加得到了3个时间段(2005-2011年、2011-2019年和2005-2019年)鹅喉羚的适宜生境空间格局变化(图4)。结果表明,2005-2011年,保护区东南部鹅喉羚的大量适宜生

表1 2005、2011和2019年主要环境变量的贡献率

Table 1 Major environmental variables and their contributions in 2005, 2011, and 2019

序号 No.	2005		2011	2019	
	变量 Variable	贡献率 Contribution		变量 Variable	贡献率 Contribution
1	距水源点距离 Distance to water source	32.9%	距水源点距离 Distance to water source	距水源点距离 Distance to water source	23.2%
2	海拔 Altitude	13.3%	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (Bio 10)	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (Bio 10)	18.9%
3	距216国道距离 Distance to national road 216	7.3%	距矿点距离 Distance to mining	距阿富准铁路距离 Distance to Altay-Zhundong railway	12.3%
4	年降水量 Annual precipitation (Bio 12)	6.8%	年均温 Annual mean temperature (Bio 1)	距矿点距离 Distance to mining	11.8%
5	月均温范围 Mean diurnal range (Bio 2)	4.9%	距216国道距离 Distance to national road 216	年均温 Annual mean temperature (Bio 1)	4.9%
6	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter (Bio 16)	4.7%	最暖月最高温 Max. temperature of warmest month (Bio 5)	最干季平均温 Mean temperature of driest quarter (Bio 9)	4.0%

表2 2005、2011和2019年鹅喉羚适宜生境面积及变化

Table 2 Suitable habitat area and changes of goitered gazelle in 2005, 2011, and 2019

年 Year	适宜生境 Suitable habitat				不适宜生境 Unsuitable habitat			
	面积 Area (km ²)	占比 Percentage (%)	变化率 Variation (%)		面积 Area (km ²)	占比 Percentage (%)	变化率 Variation (%)	
2005	4,267	28.78	-		10,557	71.22	-	
2011	3,914	26.39	-8.27		10,917	73.61	3.41	
2019	4,434	29.89	13.28		10,397	70.10	-4.76	

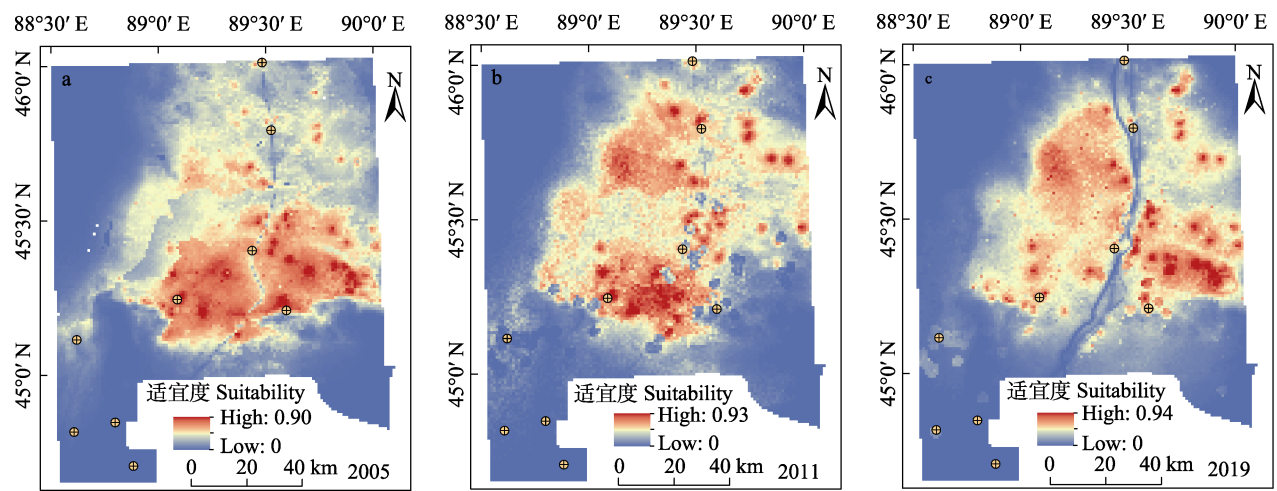


图3 2005年(a)、2011年(b)和2019年(c)鹅喉羚适宜生境分布图。蓝色表示适宜度较低区域, 红色表示适宜度最高区域。
Fig. 3 Distribution of suitable habitat of goitered gazelle in 2005 (a), 2011 (b), and 2019 (c). Unsuitable habitat is shown in blue, and red areas represent suitable habitat.

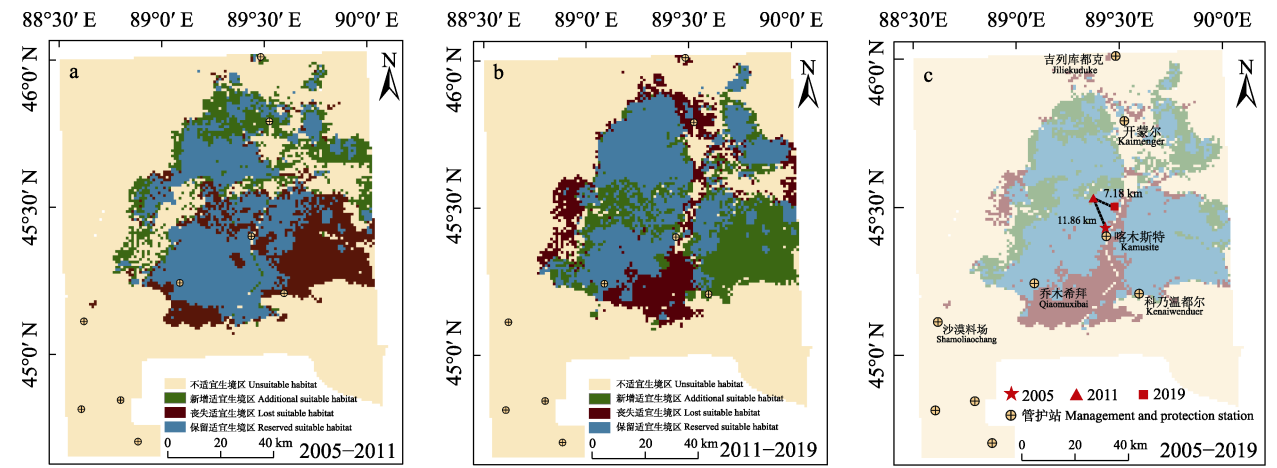


图4 不同时期鹅喉羚适宜生境空间格局变化及质心转移
Fig. 4 The spatial pattern changes and centroid transfer of the suitable habitat of goitered gazelle under different periods

表3 2005年、2011年和2019年鹅喉羚景观格局指数
Table 3 Landscape index of goitered gazelle in 2005, 2011, and 2019

年 Year	生境类型 Habitat type	斑块面积 Patch area (km ²)	斑块数量 Number of patches (n)	斑块密度 Patch density (n/km ²)	最大斑块指 数 Largest patch index (%)	景观形状指 数 Landscape shape index	相似临近比 度 Proportion of like adjacencies	聚集度指数 Aggregation index (%)	斑块类型占总面 积的比例 Percentage of Landscape (%)
2005	不适宜 Unsuitable	10,557	33	0.0033	70.57	5.97	94.17	95.10	71.20
	适宜 Suitable	4,267	49	0.0022	26.26	7.09	89.10	90.49	28.79
2011	不适宜 Unsuitable	10917	51	0.0034	72.03	7.71	92.62	93.51	73.61
	适宜 Suitable	3914	48	0.0032	24.63	10.56	82.99	84.35	26.39
2019	不适宜 Unsuitable	10,397	39	0.0026	65.57	5.30	94.79	95.73	70.10
	适宜 Suitable	4,434	29	0.0020	16.50	5.90	91.08	92.47	28.89

境丧失, 主要集中于矿区及其周围, 新增适宜生境零星分布在保护区北部的保留适宜生境区的外缘, 且面积较小较为分散(图4a)。2011-2019年新增适宜面积较广但分散, 主要集中于前一时段(2005-2011

年)丧失的适宜生境区(图4b)。保护区中部道路沿线和西南方向部分保留适宜生境丧失,主要集中在乔木希拜地区(图4b)。2005–2019年,道路两侧丧失部分鹅喉羚适宜生境面积(图4c)。

以质心定义分布区域中心点来表征鹅喉羚适宜生境位置的迁移,对不同时时期鹅喉羚适宜生境的迁移变化分析表明,不同时期质心转移的方向和距离各不相同(图4c)。2005年鹅喉羚适宜生境质心在喀木斯特管护站北部附近;2005–2011年,鹅喉羚适宜生境质心向西北转移11.86 km;2011–2019年,鹅喉羚适宜生境质心在2011年基础上向东南转移7.18 km(图4c)。

3.4 鹅喉羚生境格局变化特征

不适宜生境的斑块面积及其占总面积的比例在3个时期中均较大,表明该类型生境斑块丰富度极高,一直是保护区内鹅喉羚的主要生境类型(表3);该类型生境的最大斑块指数和相似临近比度较大,景观形状指数较小,说明卡山保护区内一直存在大面积的、形状较为规则的不适宜生境斑块,且斑块间离散程度过高。适宜生境的景观形状指数在3个时期均较大,聚集度指数较小,说明保护区内该类型生境多由小型斑块组成,破碎化程度高,生境斑块形状复杂(表3)。2011年适宜生境类型的相似临近比度和聚集度指数相比2005年和2019年较小(表3),表明矿业开发顶峰时期适宜生境斑块团聚程度低,生境破碎化严重。

4 讨论

卡山保护区自2005年起10余年间先后经历了矿业开发和道路修建等一系列人类活动干扰,其中鹅喉羚的生境状况也经历了从良好到恶化再到有所缓解并开始逐渐恢复的阶段。

4.1 影响鹅喉羚潜在适宜生境的环境因子

本研究通过对比不同时期卡山保护区内鹅喉羚生境格局动态变化特征,重点分析了矿业开发和道路修建等重大工程对卡山保护区鹅喉羚生境的影响。总体而言,水源和温度是影响鹅喉羚生境质量最重要的自然环境因素(表1)。首先,水源在3个时期对卡山保护区鹅喉羚生境选择的贡献率均最高,表明水源是影响其生存最重要的环境因子。在同一区域开展的蒙古野驴的研究中也发现了相似

的结果(陈晨等, 2021)。其次,最暖季平均温在评估模型中贡献也较大,说明温度对鹅喉羚的分布也有重要作用(表1)。鹅喉羚善于奔跑,以此来逃避天敌的捕食,因此其栖息环境需要坡度相对较小、地形平坦的区域;卡山保护区大部分区域地势较为平缓,坡度相对较小,比较适合鹅喉羚生存,因此在本研究中坡度等地形因子对鹅喉羚的分布影响较小。

4.2 2005年鹅喉羚生境格局特征

在人类干扰因子中,距矿点和道路距离在不同时期都对模型有一定的贡献率(表1)。在矿业开发前(2005年),鹅喉羚主要分布于保护区的中部和南部,其适宜生境较为集中,破碎化程度低(图3a)。因为保护区中部、南部坡度较为平缓,植被条件好,生长着驼绒藜、沙生针茅和梭梭等鹅喉羚喜食植物(徐文轩等, 2016)。同时梭梭和驼绒藜灌丛为鹅喉羚提供了隐蔽和遮阴避风场所(杨维康等, 2005; 李莹等, 2010),加之此处水源点较为集中(图1),使得此区域成为鹅喉羚最主要的适宜生境区(李莹等, 2010)。该时期内在不考虑冬季放牧的情况下,保护区内唯一的人类干扰因素为216国道。虽然216国道的南北纵贯将保护区隔离成2个相对独立的生境单元,在一定程度上阻碍了鹅喉羚种群东西向的迁移和交流,不利于种群的生存和发展(陈晨等, 2021),但此时新疆北部的社会经济发展相对滞后,216国道车流量相对较低,而且为开放式路面,鹅喉羚可以直接穿越道路。有学者观测到鹅喉羚时常穿过路面饮水或在216国道两侧低洼处采食和休憩(李莹等, 2010),由此可知,216国道在这一时期对鹅喉羚的阻隔效应十分有限,并未对其生存构成严重威胁。

4.3 2011年鹅喉羚生境格局特征

2011年卡山保护区矿业开发活动达到顶峰,此时鹅喉羚的适宜生境面积相比2005年减少了353 km²(表2)。保护区东南部原大面积适宜生境因矿业开发而丧失,适宜生境质心显示鹅喉羚开始向保护区北部转移(图4c)。此时整体适宜生境斑块面积小,离散和破碎化程度较高(表3)。

与同区域和同时期的蒙古野驴相比(陈晨等, 2021),鹅喉羚的适宜生境丧失面积较少,主要原因有两个:一是矿业开发导致的原适宜生境丧失较少。相对于蒙古野驴等大型有蹄类动物,鹅喉羚的家域面积较小,仅需要较小的适宜生境斑块面积即

可保障其生存,使得鹅喉羚能够在夹缝中继续生存。然而这种情况下,其可持续生存可能面临巨大挑战。研究发现矿业开发等人类活动能够改变野生动物的行为习性,使其由昼行性改为夜行性(Gaynor et al, 2018)。因此即使鹅喉羚能够在破碎化的生境中生存,它们也将被迫调节行为以适应更加强的人类干扰,例如增加警戒行为,降低采食行为的投入(汪沐阳等, 2020)。这种行为的被动调节将不可避免地降低鹅喉羚个体的适合度,降低其对极端环境的适应能力。因此确保鹅喉羚拥有大面积的生境斑块对其生存依然具有重要意义。二是鹅喉羚适宜生境在保护区北部和西部增加较多(图4a)。已有研究表明水源是限制荒漠野生动物空间分布的关键因子,能够重塑有蹄类动物的分布范围(林杰等, 2012; 陈晨等, 2021)。卡山保护区北部水源点相对缺乏,尤其是西北部几乎无可供蒙古野驴和鹅喉羚饮用的地表水(图1),因此该区域成为鹅喉羚和蒙古野驴的不适宜生境(陈晨等, 2021)。但是当保护区中部和南部的水源被矿企占用后,鹅喉羚被迫向西、向北迁移。鹅喉羚获取水分的方式比蒙古野驴更加多样化,既能够饮用地表水,也能够无地表水时,从采食的植物中获取水分(Kingswood & Blank, 1996),这就保证它们可以在保护区西部和北部勉强生存。另外,保护区西部松软的沙地不利于体型较大的蒙古野驴正常活动(张晓晨等, 2020),因此这一时期鹅喉羚在保护区西部和北部的适宜生境较蒙古野驴增加很多。上述两个因素导致此时鹅喉羚的适宜生境面积总体降低较少,适宜生境质心向西北转移(图4c)。

保护区北部地势较低,会在春季融雪和夏季降雨后形成临时性水源点,且由于矿化度相对较低,水质好,也能够为鹅喉羚提供短暂的饮水资源,因此成为鹅喉羚新的适宜生境区(图3b)。但北部新增的适宜生境面积较小,斑块较为分散,而且该区域生长着假木贼-琵琶柴群和假木贼-针茅群落,这些植物很少被鹅喉羚采食(李莹等, 2009),因此新增的适宜生境远远不能满足鹅喉羚的食物和水源需求。夏秋季经常有鹅喉羚至216国道两旁低洼地短暂积水地饮水,导致部分适宜生境零星分布在216国道两侧。由于此时保护区内已开始大量开发矿产资源,来往的车辆数量逐渐增加,216国道较2005年

对鹅喉羚的干扰显著加强,由此造成的后果是车撞导致鹅喉羚死亡的事故有所增加(夏参军等, 2011)。

4.4 2019年鹅喉羚生境格局特征

有关部门在2015–2019年对卡山保护区实施了生态修复。本研究发现矿区生态修复完成后(2019年),鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发顶峰时期(2011年)增加了520 km²,适宜生境质心向东南转移(图4c),原东部丧失的受干扰区域和矿业园区重新成为鹅喉羚的适宜生境(图4b)。因此关闭矿业并实施生态修复是保护鹅喉羚及其生境的有效措施。矿区生态恢复的关键是对植被和土壤的恢复(赵新风等, 2018),矿业活动导致矿区土壤贫瘠,重金属污染严重,虽采取了平整地形和回填矿坑等措施,但地表仍无植被覆盖,恢复后的核心区和示范区内的植被覆盖度仅为开发前的70%–80%,且植物种类组成变化很大,多为盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola arbuscula*)与叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)等鹅喉羚不喜食的植物。此时鹅喉羚的生境分布格局与矿业开发前相比仍有差距,原先保护区西南部的乔木西拜地区和靠近216国道的适宜生境丧失,导致生境连通性降低,而216国道沿线适宜生境面积的丧失在于新修建的S11高速公路和铁路对216国道沿线区域构成强烈干扰。因此我们认为对卡山保护区实施生态修复后,鹅喉羚生境的恶化状况有所缓解,生境质量呈现逐渐恢复的趋势。

食物丰富度和适口性对野生动物的生境选择起着重要作用(King et al, 2002)。保护区西南部乔木希拜水源点较为丰富,2013年保护区管理部门开始在此处连续野放人工繁育的普氏野马,目前乔木希拜野马数量已增至260余匹(王渊等, 2016)。有研究表明鹅喉羚与普氏野马均喜食禾本科针茅属(*Stipa*)植物,二者营养生态位重叠度高达0.980,食物竞争非常强烈(黄艳等, 2011)。因此普氏野马与同域分布的鹅喉羚在空间生态位和营养生态位上都具有强烈的竞争。此外,野放初期普氏野马野性较弱,活动区域较小,主要集中于乔木希拜,导致该区域的草场被过度采食,鹅喉羚适宜生境大面积丧失(图4b)。当2015年矿区开始实施生态修复后,保护区东南部重新成为鹅喉羚的适宜生境区(图4b),该区域相对于乔木希拜而言食物资源更为丰富,并且距离乔木希拜较近,鹅喉羚很容易即可迁移至该区域,

因此成为鹅喉羚新的适宜生境区。

新建道路将显著增加野生动物在生境斑块间迁移的阻力(陈强强等, 2019), 不同等级的道路(国道、高速公路以及铁路)对野生动物迁移的影响程度亦不同(李帅等, 2018)。2019年在保护区内全面通车的S11高速公路和阿富准铁路为全封闭围栏设计。虽然沿公路和铁路均设计修建了野生动物通道, 但鹅喉羚仍需要一定时间才有可能适应道路干扰, 穿越通道进行迁移。尽管如此, 鹅喉羚同时穿越3条道路依然非常困难, 因此三线并行的交通工程可能对鹅喉羚的迁移和扩散构成屏障。作者野外调查发现2020年道路两侧鹅喉羚的数量较之前有所减少, 说明当前鹅喉羚对3条道路仍有一定程度的回避。未来应加强道路沿线两侧鹅喉羚的分布调查, 尤其是加强鹅喉羚等野生动物对通道的利用监测, 根据监测结果及时采取诱导措施促进其穿越通道。

4.5 保护建议


卡山保护区是国内鹅喉羚种群分布最集中的地区。近年来该保护区内鹅喉羚的种群数量波动较大, 除自然因素外, 人类活动如矿业开发和道路修建等对其影响亦较为显著。综合以上研究结果, 根据鹅喉羚面临的生存问题提出以下建议:


(1)在不适宜生境区域增设人工饮水点。水是荒漠地区野生动物生存所必需的因素之一。可以看出, 尽管鹅喉羚能够在不饮水的情形下勉强生存, 但无可利用水源依旧是导致卡山保护区鹅喉羚不适宜生境面积较大的主要原因。因此可以在这些区域增设人工饮水点, 促进鹅喉羚向新区域扩散。这样一方面能够降低原适宜生境内的水源和食物竞争, 另一方面能够增加其适宜生境面积。同时建议在所增设的水源点加设贮水装置, 以延长水源的储存时间, 增加水源被利用强度(张永军等, 2014)。(2)鉴于216国道为开放式路面, 随着来往车辆的逐渐增多, 为降低车撞事故导致鹅喉羚伤亡, 建议在216国道穿越保护区路段沿线鹅喉羚活动频繁区域设立明显的限速标志, 在路面起伏较大和急转弯等驾驶员视线受影响区域设立简易围栏。(3)因地制宜, 针对不同矿区利用微地形改造实现地质土壤修复, 例如对矿区渣坡做推平放坡处理, 减缓地形起伏, 利用集水技术实现局部水分富集。在此基础上利用土壤种子库针对不同类型矿区实现植被改造(张涛等,


2017), 根据精准的水、肥、土、种配比提高受损区植被修复率, 加快矿区植被演替恢复速率, 争取将受损区域尽快恢复到矿业开发前的植被水平。(4)保护区内道路阻隔造成鹅喉羚生境破碎化, 可能阻碍其种群基因交流, 导致遗传多样性的丧失。建议开展鹅喉羚迁移廊道识别和通道利用监测等相关研究, 在破碎化的生境斑块间建立迁移廊道, 保障该物种在破碎生境中正常的季节性迁移。

致谢: 感谢新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理局在野外调查中给予的支持和帮助。感谢加拿大卡尔加里大学的Kathleen Ruckstuhl教授和中国科学院新疆生态与地理研究所毛洁菲副研究员帮助写作。感谢中国科学院新疆生态与地理研究所王光宇硕士生在图像技术方向的指导。

ORCID

张晨  <https://orcid.org/0000-0002-8424-7355>

汪沐阳  <http://orcid.org/0000-0002-5593-632X>

徐文轩  <http://orcid.org/0000-0001-8701-893X>

参考文献

- Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.
- Behdarvand N, Kaboli M, Ahmadi M, Nourani E, Salman Mahini A, Asadi Aghbolaghi M (2014) Spatial risk model and mitigation implications for wolf-human conflict in a highly modified agroecosystem in Western Iran. *Biological Conservation*, 177, 156–164.
- Chen C, Shao CL, Ge Y, Wang MY, Zhang XC, Xu WX, Yang WK (2021) Habitat pattern dynamics and cause analysis of *Equus hemionus* in Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 2056–2066. (in Chinese with English abstract) [陈晨, 邵长亮, 葛炎, 汪沐阳, 张晓晨, 徐文轩, 杨维康 (2021) 卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区蒙古野驴生境格局动态及其成因分析. *生态学报*, 41, 2056–2066.]
- Chen QQ, Li ML, Wang X, Qamer FM, Wang P, Yang JW, Wang MY, Yang WK (2019) Identification of potential ecological corridors for Marco Polo sheep in Taxkorgan Wildlife Nature Reserve, Xinjiang, China. *Biodiversity Science*, 27, 186–199. (in Chinese with English abstract) [陈强强, 李美玲, 王旭, Qamer FM, 王鹏, 杨建伟, 汪沐阳, 杨维康 (2019) 新疆塔什库尔干野生动物自然保护区马可波罗盘羊潜在生态廊道识别. *生物多样性*, 27, 186–199.]
- Chu HJ, Jiang ZG, Ge Y, Jiang F, Tao YS, Wang C (2009)

- Population densities and number of khulan and goitred gazelle in Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 17, 414–422. (in Chinese with English abstract) [初红军, 蒋志刚, 葛炎, 蒋峰, 陶永善, 王臣 (2009) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴和鹅喉羚种群密度和数量. *生物多样性*, 17, 414–422.]
- Clevenger AP, Waltho N (2005) Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biological Conservation*, 121, 453–464.
- Cristescu B, Stenhouse GB, Symbaluk M, Nielsen SE, Boyce MS (2016) Wildlife habitat selection on landscapes with industrial disturbance. *Environmental Conservation*, 43, 327–336.
- Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (2007) *Vegetation Map of the People's Republic of China (1 : 1000000)*. Geological Publishing House, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2007) 中华人民共和国植被图(1 : 1000000). 地质出版社, 北京.]
- Epps CW, Palsbøll PJ, Wehausen JD, Roderick GK, Ramey RR II, McCullough DR (2005) Highways block gene flow and cause a rapid decline in genetic diversity of desert Bighorn sheep. *Ecology Letters*, 8, 1029–1038.
- Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515.
- Forman RTT, Deblinger RD (2000) The ecological road-effect zone of a Massachusetts (U.S.A.) suburban highway. *Conservation Biology*, 14, 36–46.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM (2011) *Principle and Application of Landscape Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅伯杰, 陈利顶, 马克明 (2011) 景观生态学原理及应用. 科学出版社, 北京.]
- Gao XY, Xu KF, Yao J, Jia ZX (1996) The population structure of goitred gazelle in Xinjiang. *Acta Theriologica Sinica*, 16, 14–18. (in Chinese with English abstract) [高行宜, 许可芬, 姚军, 贾泽信 (1996) 新疆鹅喉羚的种群结构. *兽类学报*, 16, 14–18.]
- Gao XY, Yao J (2006) Study on the geography distribution and population of *Gazella subgutturosa* in the Hami Basin, Xinjiang in early winter. *Arid Land Geography*, 29, 213–218. (in Chinese with English abstract) [高行宜, 姚军 (2006) 新疆哈密盆地初冬鹅喉羚的地理分布与种群数量. *干旱区地理*, 29, 213–218.]
- Gaynor KM, Hohnowski CE, Carter NH, Brashares JS (2018) The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science*, 360, 1232–1235.
- Ge Y, Liu CG, Chu HJ, Tao YS (2003) Present situation of the *Equus hemionus* resources in the Karamori Mountain Nature Reserve, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 20, 32–34, 66. (in Chinese with English abstract) [葛炎, 刘楚光, 初红军, 陶永善 (2003) 新疆卡拉麦里山自然保护区蒙古野驴的资源现状. *干旱区研究*, 20, 32–34, 66.]
- Huang Y, Chu HJ, Lan WX, Shi K, Tao YS, Shao CL (2011) Trophic niche width and overlap of *Equus przewalskii*, *E. hemionus* and *Gazella subgutturosa* in autumn. *Arid Zone Research*, 28, 1045–1050. (in Chinese with English abstract) [黄艳, 初红军, 兰文旭, 时坤, 陶永善, 邵长亮 (2011) 重引入普氏野马、蒙古野驴和鹅喉羚的秋季营养生态位. *干旱区研究*, 28, 1045–1050.]
- IUCN (2017) IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/species/8976/50187422/>. (accessed on 2021-06-26)
- Jiménez-Valverde A, Lobo JM (2007) Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31, 361–369.
- King SRB (2002) Home range and habitat use of free-ranging Przewalski horses at Hustai National Park, Mongolia. *Applied Animal Behaviour Science*, 78, 103–113.
- Kingswood SC, Blank DA (1996) *Gazella subgutturosa*. *Mammalian Species*, 518, 1–10
- Kong WY, Li XH, Zou HF (2019) Optimizing MaxEnt model in the prediction of species distribution. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 2116–2128. (in Chinese with English abstract) [孔维尧, 李欣海, 邹红菲 (2019) 最大熵模型在物种分布预测中的优化. *应用生态学报*, 30, 2116–2128.]
- Lei X, Yang B, Jiang WG, Yang YP, Kuenzer C, Chen Q (2012) Vegetation pattern changes and their influencing factors in the East Dongting Lake wetland. *Geographical Research*, 31, 461–470. (in Chinese with English abstract) [雷璇, 杨波, 蒋卫国, 杨一鹏, Claudia Kuenzer, 陈强 (2012) 东洞庭湿地植被格局变化及其影响因素. *地理研究*, 31, 461–470.]
- Lesbarrères D, Lodé T, Merilä J (2004) What type of amphibian tunnel could reduce road kills? *Oryx*, 38, 220–223.
- Li ML, Chen QQ, Wang MY, Yang WK, Zhang C, Luo GP, Ding JL, Lin YC (2019) Assessment of habitat suitability of *Ovis ammon polii* based on MaxEnt modeling in Taxkorgan Wildlife Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 594–603. (in Chinese with English abstract) [李美玲, 陈强强, 汪沐阳, 杨维康, 张弛, 罗格平, 丁建丽, 林昱辰 (2019) 基于MaxEnt模型的马可波罗盘羊生境适宜性评价. *生态学杂志*, 38, 594–603.]
- Li S, Zhang XF, Shi JB, Dong SK, Gao XX (2018) Effects of highway from Inner Mongolia to Xinjiang on habitat suitability of ungulates in Alashan desert. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 103–110. (in Chinese with English abstract) [李帅, 张相锋, 石建斌, 董世魁, 高晓霞 (2018) 蒙新高速公路对阿拉善荒漠区有蹄类野生动物生境适宜性的影响. *生态学杂志*, 37, 103–110.]
- Li Y, Xu WX, Qiao JF, Yang WK (2009) Spatio-temporal distribution and habitat selection of *Gazella subgutturosa* in Kalamaili Mountain Nature Reserve in four seasons. *Arid Land Geography*, 32, 261–267. (in Chinese with English

- abstract) [李莹, 徐文轩, 乔建芳, 杨维康 (2009) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚的时空分布与生境选择. 干旱区地理, 32, 261–267.]
- Li Y, Xu WX, Yang WK, Qiao JF, Liu W, Xia CJ (2010) Habitat suitability assessment of *Gazella subgutturosa* in Kalamaili Mountain Nature Reserve. *Acta Theriologica Sinica*, 30, 11–20. (in Chinese with English abstract) [李莹, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟, 夏参军 (2010) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚生境适宜性评价. 兽类学报, 30, 11–20.]
- Lin J, Xu WX, Yang WK, Xia CJ, Liu W (2012) Habitat suitability assessment of *Equus hemionus hemionus* in Kalamaili Mountain Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 20, 411–419. (in Chinese with English abstract) [林杰, 徐文轩, 杨维康, 夏参军, 刘伟 (2012) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴生境适宜性评价. 生物多样性, 20, 411–419.]
- Liu H, Jiang GS, Li H (2015) A comparative study on four survey methods used in ungulate population size estimation in winter in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3076–3086. (in Chinese with English abstract) [刘辉, 姜广顺, 李惠 (2015) 北方冬季有蹄类动物4种数量调查方法的比较. 生态学报, 35, 3076–3086.]
- Luo C, Xu WH, Zhou ZX, Ouyang ZY, Zhang L (2011) Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1221–1229. (in Chinese with English abstract) [罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路 (2011) 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 31, 1221–1229.]
- Martín-López B, García-Llorente M, Palomo I, Montes C (2011) The conservation against development paradigm in protected areas: Valuation of ecosystem services in the Doñana social-ecological system (Southwestern Spain). *Ecological Economics*, 70, 1481–1491.
- Merrill EH, Hemker TP, Woodruff KP, Kuck L (1994) Impacts of mining facilities on fall migration of mule deer. *Wildlife Society Bulletin*, 22, 68–73.
- Mi CR, Guo YM, Falk H, Han XS (2017) Species distribution model sampling contributes to the identification of target species: Take Black-necked Crane and Hooded Crane as two cases the model-based sampling approach could help to reduce areas to be investigated and it can find target species more effectively re. cost and effort. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 4476–4482. (in Chinese with English abstract) [宓春荣, 郭玉民, Huettmann Falk, 韩雪松 (2017) 基于物种分布模型的精确采样提高目标物种发现率——以黑颈鹤 (*Grus nigricollis*)、白头鹤 (*Grus monacha*) 为例. 生态学报, 37, 4476–4482.]
- Morrison ML, Marcot BG, Mannan RW (2007) Wildlife habitat relationships: Concepts and applications. *The Condor*, 109, 980–981.
- Peng XQ (2012) Effect of the East Junggar coal-electricity and coal-chemical industry development on *Equus hemionus* in Kalamaili Mountain. *Environmental Protection of Xinjiang*, 34(4), 37–41. (in Chinese with English abstract) [彭向前 (2012) 准东煤电煤化工产业开发对卡拉麦里山蒙古野驴的影响. 新疆环境保护, 34(4), 37–41.]
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Poole KG, Serrouya R, Teske IE, Podrasky K (2016) Rocky Mountain Bighorn sheep (*Ovis canadensis canadensis*) winter habitat selection and seasonal movements in an area of active coal mining. *Canadian Journal of Zoology*, 94, 733–745.
- Ran Q, Wei HY, Zhao ZF, Zhang QZ, Liu J, Gu W (2019) Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 2481–2493. (in Chinese with English abstract) [冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 张权中, 刘静, 顾蔚 (2019) 气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响. 生态学报, 39, 2481–2493.]
- Sheng HL, Xu HF (1992) *Mammalian Field Research Methods*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [盛和林, 徐宏发 (1992) 哺乳动物野外研究方法. 中国林业出版社, 北京.]
- Wang MY, Ji SN, Chen C, Xu WX, Han L, Yang WK (2020) Effects of road on diurnal group pattern and vigilance behavior in goitered gazelle. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 937–943. (in Chinese with English abstract) [汪沐阳, 吉晟男, 陈晨, 徐文轩, 韩雷, 杨维康 (2020) 道路交通对鹅喉羚昼间集群特征和警戒行为的影响. 生态学报, 39, 937–943.]
- Wang Y, Chu HJ, Han LL, Tao YS, Bu L, Liu Z, Jiang ZG (2016) Factors affecting the home range of reintroduced *Equus przewalskii* in the Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 545–553. (in Chinese with English abstract) [王渊, 初红军, 韩丽丽, 陶永善, 布兰, 刘钊, 蒋志刚 (2016) 野放普氏野马 (*Equus przewalskii*) 家域面积及其影响因素. 生态学报, 36, 545–553.]
- Weir JN, Mahoney SP, McLaren B, Ferguson SH (2007) Effects of mine development on woodland caribou *Rangifer tarandus* distribution. *Wildlife Biology*, 13, 66–74.
- Wu CG, Zhou ZX, Wang PC, Xiao WF, Teng MJ, Peng L (2009) Evaluation of landscape connectivity based on least-cost model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 2042–2048. (in Chinese with English abstract) [吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君, 彭丽 (2009) 基于最小费用模型的景观连接度评价. 应用生态学报, 20, 2042–2048.]
- Wu JG (2001) *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [邬建国 (2001) 景观生态学——格局、过程、尺度与等

- 级. 高等教育出版社, 北京.]
- Xia CJ, Xu WX, Yang WK, Qiao JF, Liu W (2011) Diurnal activity rhythm of goitred gazelle (*Gazella subgutturosa*) in different seasons. *Arid Zone Research*, 28, 548–554. (in Chinese with English abstract) [夏参军, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟 (2011) 不同季节鹅喉羚昼间活动节律特征. 干旱区研究, 28, 548–554.]
- Xu WX, Yang WK, Zhang C, Wang MY (2016) Main plant communities and characteristics of Kalamaili Ungulate Nature Reserve in east Junggar Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 502–507. (in Chinese with English abstract) [徐文轩, 杨维康, 张弛, 汪沐阳 (2016) 准噶尔盆地东部卡拉麦里山有蹄类自然保护区主要植物群落及其特征. 植物生态学报, 40, 502–507.]
- Yang WK, Qiao JF, Yao J, Gao XY (2005) Characteristics of foraging habitat of goitred gazelles (*Gazella subgutturosa sairensis*) in eastern Junggar Basin, Xinjiang. *Acta Theriologica Sinica*, 25, 355–360. (in Chinese with English abstract) [杨维康, 乔建芳, 姚军, 高行宜 (2005) 新疆准噶尔盆地东部鹅喉羚采食地的特征. 兽类学报, 25, 355–360.]
- Zhang T, Chen ZP, Che KJ, Hu TG, Cheng BR, He MZ (2017) Characteristics of soil seed banks of different site types in arid mining area. *Arid Zone Research*, 34, 51–58. (in Chinese with English abstract) [张涛, 陈智平, 车克钧, 胡天光, 程斌让, 何明珠 (2017) 干旱区矿区不同立地类型土壤种子库特征. 干旱区研究, 34, 51–58.]
- Zhang XC, Shao CL, Ge Y, Chen C, Xu WX, Yang WK (2020) Suitable summer habitat of the khulan in the Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve and estimation of its population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 2993–3004. (in Chinese with English abstract) [张晓晨, 邵长亮, 葛炎, 陈晨, 徐文轩, 杨维康 (2020) 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. 应用生态学报, 31, 2993–3004.]
- Zhang YB, Liu YL, Qin H, Meng QX (2019) Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 496–502. (in Chinese with English abstract) [张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣 (2019) 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测. 应用生态学报, 30, 496–502.]
- Zhang YJ, Zhang F, Cao Q, Hu DF, Chu HJ (2014) Status and quality of water sources in the Kalamari Ungulate Nature Reserve—A case study in the released area of *Equus przewalskii*. *Arid Zone Research*, 31, 665–671. (in Chinese with English abstract) [张永军, 张峰, 曹青, 胡德夫, 初红军 (2014) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区水源现状及水质分析——以普氏野马放归区为例. 干旱区研究, 31, 665–671.]
- Zhao XF, Xu HL, Wang XY, Xu Q, Yuan KY, Yang YQ, Zhang P (2018) Effects of artificial measures on surface recovery of gold mining area in Altai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 1628–1635. (in Chinese with English abstract) [赵新风, 徐海量, 王希义, 徐俏, 苑塏焯, 杨永强, 张鹏 (2018) 人工措施对阿尔泰山采金矿区地表的恢复作用. 生态学杂志, 37, 1628–1635.]
- (责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 MaxEnt模型使用的环境变量

Appendix 1 The environmental variables used in the MaxEnt model
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021176-1.pdf>

附录2 景观格局指数及其生态学意义

Appendix 2 Landscape pattern index and ecological significance
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021176-2.pdf>

附录1 MaxEnt模型使用的环境变量

Appendix 1 The environmental variables used in the MaxEnt model

编码 Code	环境因子 Environmental factor
气候因子 Climatic factors	
Bio 1	年均温 Annual mean temperature (°C)
Bio 2	月均温范围 Mean diurnal range (°C)
Bio 3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7)
Bio 4	温度季节性 Temperature seasonality
Bio 5	最暖月最高温 Max. temperature of warmest month (°C)
Bio 6	最冷月最低温 Min. temperature of coldest month (°C)
Bio 7	气温年范围 Temperature annual range (Bio5 – Bio6) (°C)
Bio 8	最湿季平均温 Mean temperature of wettest quarter (°C)
Bio 9	最干季平均温 Mean temperature of driest quarter (°C)
Bio 10	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (°C)
Bio 11	最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter (°C)
Bio 12	年降水量 Annual precipitation (mm)
Bio 13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month (mm)
Bio 14	最干月降水量 Precipitation of driest month (mm)
Bio 15	降水季节性 Precipitation seasonality
Bio 16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)
Bio 17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter (mm)
Bio 18	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter (mm)
地形因子 Terrain factors	
Alt	海拔 Altitude (m)
Asp	坡度 Aspect (°)
Slope	坡向 Slope
人类干扰因子 Anthropogenic influence factors	
Dis-min	距矿点距离 Distance to mining (m)
Dis-G216	距216国道距离 Distance to national road 216 (m)
Dis-expr	距S11高速公路距离 Distance to S11 expressway (m)
Dis-rail	距阿富准铁路距离 Distance to Altay-Zhundong railway (m)
植被(类型)和水源 Vegetation type and water source	
Dis-water	距水源点距离 Distance to water source (m)
Veg	植被类型 Vegetation type

张晨, 马伟, 陈晨, 汪沐阳, 徐文轩, 杨维康 (2022) 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的
境格局变化. 生物多样性, 30, 21176. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021176>

附录2 景观格局指数及其生态学意义

Appendix 2 Landscape pattern index and ecological significance

评价指标 Evaluation index	生态学意义 Ecological significance
斑块面积 Patch area (AREA)	景观组分的基本特征, 也是度量其他指标的重要基础。 The basic characteristics of landscape composition and is also an important basis for measuring other indicators.
斑块数量 Number of patches (NP)	表示每种类型斑块数目, 与景观的破碎化呈正相关关系, NP值越大, 破碎的程度就越高。 The number of patches per type, which is positively correlated with the fragmentation of the landscape, and the greater the NP value, the higher the degree of fragmentation.
斑块密度 Patch density (PD)	反映景观整体斑块分化程度, 值越高, 破碎化程度越高。 The degree of differentiation of patches in the landscape as a whole, and the higher the value, the higher the degree of fragmentation.
最大斑块指数 Largest patch index (LPI)	表示景观中最大斑块占景观总面积百分比。 The largest patch in the landscape as a percentage of the total landscape area.
相似临近比度 Proportion of like adjacencies (PLADJ)	度量斑块间的离散程度。 The degree of dispersion between patches.
景观形状指数 Landscape shape index (LSI)	其值越大, 斑块形状越不规则, 越复杂。 The greater the value of the LSI, the more irregular and complex the patch shape.
聚集度指数 Aggregation index (AI)	描述不同类型景观斑块的团聚程度, 值高说明景观主要由少数大型斑块组成, 反之由多个小型斑块组成。 Describing the degree of reunion of different types of landscape patches, the high value indicates that the landscape is mainly composed of a small number of large patches, and vice versa by several small patches.
斑块占总面积的比例 Percentage of landscape (PLAND)	是某一类型的面积与景观总面积的比值, 其大小代表该类型斑块在整个景观中的丰富度值。 The ratio of the area of a type to the total area of the landscape, and its size represents the richness of that type of patches throughout the landscape.