

甘南州人工野放银黑狐存活时间及其与生态因子的关系

刘济泽¹ 花立民¹ 杨浩² 李晓鹏² 吴江² 王晓芬¹ 楚彬^{1*}

¹ 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 国家林业和草原局高寒草地鼠害防控工程技术研究中心
兰州 730070; ² 甘肃省草原技术推广总站 兰州 730000

摘要: 引入银黑狐 (*Vulpes vulpes*) 控鼠是利用天敌防控高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 的措施之一, 开展人工野放银黑狐生存状况研究对于评价其控鼠效果具有重要意义。本研究在甘肃省甘南州夏河县、碌曲县和玛曲县的高原鼠兔分布区, 于2019年10月和2022年10月在野外共释放13只佩戴GPS+VHF追踪项圈的银黑狐个体, 基于追踪器的回传位点数据, 获取相应的非生物因子(气候、地形、距水源距离)和生物因子(植被归一化指数、人为干扰因子)数据, 利用相关性分析和多元逐步回归分析人工野放后银黑狐存活时间与生态因子的关系, 明晰影响其存活时间的主要因子。结果表明, (1) 野放的13只个体中, 5只个体(38.46%)存活时间不足1个月, 6只个体(46.15%)存活时间2或3个月, 仅有2只(15.38%)存活时间超过6个月; (2) 银黑狐存活时间与年均温呈显著正相关关系 ($r=0.62$, $P<0.05$), 与海拔 ($r=-0.62$) 和湿度 ($r=-0.70$) 呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与植被归一化指数、距水源距离、距居民点距离及距道路距离呈负相关关系, 但不显著; (3) 多元逐步回归分析表明, 湿度是影响银黑狐存活时间的关键生态因子, 能解释其存活时间变异程度的56.60%。综上所述, 人工野放银黑狐的生存能力相对有限, 冬季(10月)野放后湿度是限制银黑狐存活的主要因素。

关键词: 银黑狐; 野放; 存活时间; 生态因子; 鼠害

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2026) 01-52-10

Survival duration of field-released Silver Foxes and its relationships with ecological factors in Gannan Prefecture, Gansu, China

LIU Ji-Ze¹ HUA Li-Min¹ YANG Hao² LI Xiao-Peng² WU Jiang²
WANG Xiao-Fen¹ CHU Bin^{1*}

¹ Key Laboratory of Grassland Ecosystem of the Ministry of Education, Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control, National Forestry and Grassland Administration, Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; ² Grassland Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

基金项目 甘肃省重点研发计划项目 (No. 21YF5NA035), 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目 (No. GAU-QDFC-2024-02), 甘肃省林业和草原局科技项目 (No. 2022kj072, 2024kj86);

* 通信作者, E-mail: ryan_713@163.com;

第一作者介绍 刘济泽, 男, 硕士研究生; 研究方向: 草地保护; E-mail: LJZ18392212891@163.com。

收稿日期: 2025-03-06, 修回日期: 2025-07-11 DOI: 10.13859/j.cjz.202625049 CSTR: 32109.14.cjz.202625049

Abstract: [Objectives] The introduction of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*) as a natural predator is one of the biological control measures against Plateau Pika (*Ochotona curzoniae*). Investigating the survival status of artificially released Silver Foxes is crucial for assessing their effectiveness in rodent control. **[Methods]** This study was conducted in the Plateau Pika distribution areas of Xiahe, Luqu, and Maqu counties in Gannan Prefecture, China. In October 2019 and October 2022, a total of 13 Silver Foxes equipped with GPS and VHF tracking collars were released in the field. The abiotic factors (climatic factors, terrain factors, and distance from water source) and biotic factors [normalized difference vegetation index (NDVI) and human disturbance factors] were obtained from the location data transmitted by the tracking devices. Correlation and multivariate stepwise regression analyses were performed to analyze the survival duration of Silver Foxes and clarify the relationships between their survival duration and ecological factors. ArcGIS 10.2, SPSS 27, Origin 2022, and Excel 2019 were used for data analysis and chart production. **[Results]** (1) Among the 13 released individuals, five (38.46%), six (46.15%), and two (15.38%) survived less than one month, 2~3 months, and more than six months, respectively (Table 2). (2) The survival duration was positively correlated with mean annual temperature ($r = 0.62, P < 0.05$, Fig. 3a) and negatively correlated with elevation ($r = -0.62, P < 0.05$, Fig. 2a) and humidity ($r = -0.70, P < 0.05$, Fig. 3b). Although survival duration was negatively correlated with NDVI, distance from water source, distance from residential area, and distance from road, these relationships were not statistically significant (Figs. 4, 5). (3) Multivariate stepwise regression analysis further identified humidity as the key ecological factor, which explained 56.60% of the variation in survival duration (Table 3). **[Conclusion]** The survival capacity of artificially released Silver Foxes is relatively limited, and under winter (October) release conditions, ambient humidity is the main factor constraining their survival duration.

Key words: Silver Fox; Wild release; Survival duration; Ecological factors; Rodent damage

青藏高原是我国生态安全屏障和畜牧业生产基地的重要组成部分(姚檀栋等 2017)。近几十年,由于气候变化和人类活动共同影响,青藏高原草地退化加剧,表现为草地鼠害化、毒草化、盐渍化以及黑土滩化等。其中,草地鼠害已成为威胁高寒草地生态安全的重要因素之一(花立民和柴守权 2022)。高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是我国高寒草地鼠害面积最大的害鼠之一,其危害面积达 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占青藏高原天然草地面积的 14.28%(花蕊 2023)。高原鼠兔的采食和挖掘推土活动降低草原产草量,改变了草原植物群落结构,加剧水土流失和碳排放(蔡新成等 2024)。此外,高原鼠兔也是棘球蚴病、甲型和乙型冠状病毒等疫病传播的中间宿主(Xu et al. 2024),严重威胁人民生命健康。因此,高寒草地鼠害防控事关国家粮食安全、生态安全和生物安全。药物

防控以其见效快、成本低且易于大面积使用等优点,是目前高原鼠兔防控的主要措施(花立民和柴守权 2022)。然而,药物高频率、大范围使用对其他生物造成二次毒害,破坏了草地生态系统原有的食物链/网结构和相关物种的制约关系,忽略了高原鼠兔在草地生态系统中的作用,不利于高寒草地生物多样性的维持(Smith et al. 2019)。

天敌防控是基于捕食-被捕食的种间关系调控鼠类数量的一种环境友好型措施,该措施可避免药剂滥用所带来的环境污染和非靶标生物死亡等问题,对于维护生物多样性和促进生态平衡具有重要意义。其中,引狐控鼠是利用鼠类及其天敌狐狸的捕食-被捕食关系,将人工饲养的狐狸,经短期野化训练后引入草原鼠害发生区以控制草原鼠害的一种生物防治新技术(马崇勇等 2017)。目前该技术已在宁夏、内

蒙古和甘肃等地应用。2013年宁夏草原工作站采用高倍望远镜人工监测法开展银黑狐 (*Vulpes vulpes*) 控害研究,发现盐池、海原等地人工野放银黑狐多数存活,并在野放后期可适应当地环境且能进行繁殖(于钊等 2016)。2021年甘肃甘南州碌曲、玛曲、夏河等5地共投放60只野化银黑狐,采用路线与样方结合调查法,发现人工野放银黑狐后,当地高原鼠兔相对种群密度下降,产草量增加(加曼草 2021)。有研究表明,人工繁育个体野外释放可能存在较大生存风险,如野外适应性差、物种间的竞争与冲突(周晓等 2014)以及难以找到适宜栖息地(朱洪民 2019),从而导致人工野放后个体存活率较低的问题。因此,开展人工野放银黑狐的存活状况研究对于后续评价其控鼠效果具有重要意义。然而,目前关于此方面的研究鲜见报道。

基于此,本研究在甘肃省甘南州夏河县、碌曲县和玛曲县的高原鼠兔分布区,野外释放13只佩戴GPS以及无线电追踪装置(超高频, very high frequency, VHF)的银黑狐个体,基于追踪器的回传位点数据,获取相应的非生物因子(气候、地形、距水源距离)和生物因子(植被归一化指数、人为干扰因子)数据,分析人工野放后银黑狐的存活时间,明晰银黑狐存活时间与生态因子的关系,为今后评估和优化该物种野放策略和必要性提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

依据高原鼠兔分布面积大小和不同海拔高度,选择甘肃省甘南藏族自治州夏河县、碌曲县和玛曲县作为银黑狐人工野放地点。该区域气候寒冷潮湿,冷季长,暖季短,年均气温 2.6°C (最高 28.9°C ,最低 -24.6°C),年均降水量 516 mm ,年均无霜期 56 d 。土壤类型有亚高山草甸土、黑钙土、沼泽土等多种,草地类型为高寒草甸,植物种类主要有垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla*

ansrina)、禾叶嵩草 (*Kobresia graminifolia*)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 等。啮齿动物主要有高原鼠兔、高原麝鼠 (*Eospalax baileyi*) 和喜马拉雅旱獭 (*Marmota himalayana*),食肉类动物主要有藏狐 (*Vulpes ferrilata*)、狼 (*Canis lupus*) 和雪豹 (*Panthera uncia*)。

1.2 研究对象

银黑狐属食肉目 (Carnivora) 犬科 (Canidae) 狐属,别名银狐,是赤狐 (*V. vulpes*) 的基因突变种。体形外貌与狗相似。嘴尖,耳长,四肢细长,体长 $60\sim 70\text{ cm}$,体高 $40\sim 50\text{ cm}$,尾长 $40\sim 50\text{ cm}$,体重 $5\sim 6\text{ kg}$,公狐较母狐大些。全身基本毛色是黑色的,底绒青灰色,衬托着银白色。银黑狐的针毛毛尖为黑色,靠近毛尖的一小段为白色,基部一大段为黑灰色,绒毛青灰色,尾端毛白色,形成 $4\sim 10\text{ cm}$ 的白尾尖(王志艳 2017)。

1.3 银黑狐来源及追踪项圈佩戴

2019年10月和2022年10月,在甘南州夏河县的青藏高原鼠害天敌人工野化基地,选取经过三级野化训练的银黑狐个体。野化训练阶段从5月中旬至10月上旬。第一阶段:笼养育成阶段。人工饲养的银黑狐通常在5月中旬至6月上旬分窝,选择发育正常的仔狐进行30d育成饲养。第二阶段:人工散养野化训练阶段。7月上旬至8月中下旬,将育成的仔狐投放到人工散养场地进行初步野化捕食训练,以人工投喂高原鼠兔的方式训练银黑狐适应活体食物,每只银黑狐投放2~3只高原鼠兔。第三阶段:自然散养野化训练阶段。8月下旬到10月上旬,将初步完成野化训练的银黑狐转入三级野化场,该阶段每只银黑狐日食量为2~3只活鼠,共分5次投放,首次投放在银黑狐转入前7d进行,以后每隔7d投放1次。为保证高原鼠兔在野化训练场地分布均匀,尽可能获得躲避天敌的最大空间,选择预埋管道(PVC塑胶管)作为其躲避捕食的洞道(冯今等 2016)。

经过三级野化训练后,选择捕食能力强、

体况良好的 7 月龄银黑狐个体 13 只(5 只雄性, 8 只雌性), 平均体重 (4.56 ± 0.15) kg (表 1), 并对其进行绝育处理, 以防止与本地物种杂交。给每只个体佩戴湖南环球信士科技有限公司生产的兽用 GPS 项圈(型号 HQAN40S), 信号发射形式为 GSM 和卫星信号同时接收, 并且配备 VHF, 用于野外实地精确定位银黑狐位置。项圈表面和内部分别装有太阳能板和锂电池, 保证在无光照条件下也可为项圈供电。项圈及固定带定制标准为: 颈围 8~12 cm, 项圈宽度 22 mm, 项圈重量为 0.17 kg, 符合项圈重量低于物种体重 5% 的标准(王静轩 2020)。项圈在电量充足的情况下每 2 h 进行一次 GPS 定位, 并记录相关信息(经纬度坐标、海拔、温度、运动量等参数)。夏河县投放 4 只(2 雄, 2 雌), 碌曲县投放 3 只(2 雌, 1 雄), 玛曲县投放 6 只(3 雌, 3 雄)(表 1)。

1.4 生物因子数据获取

1.4.1 归一化植被指数 归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI) 可反映地表植被覆盖度、生长状况以及

生物量。数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>), 数据类型为栅格, 栅格单元大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。根据样地经纬度, 在 ArcGIS 中提取相应坐标的 NDVI 值。

1.4.2 距居民点及道路距离 距居民点距离利用奥维地图中的标尺工具获取。道路主要涵盖高速公路、国道、省道、县道和乡道。数据来自全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万全国基础地理数据库(<https://www.webmap.cn>)。在 ArcGIS 10.2 软件中, 通过“邻域分析”工具来处理空间数据, 选择银黑狐活动位点作为输入要素, 计算银黑狐活动位点距道路距离。

1.5 非生物因子数据获取

1.5.1 气候因子 以湿度、年平均温度和年降水量反映研究区气候条件, 数据下载自 WorldClim 全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>), 数据类型为栅格, 栅格单元大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。根据样地经纬度, 在 ArcGIS 10.2 中提取相应样地湿度、年平均温度和年降水量值。

表 1 银黑狐人工野放地点及时间

Table 1 Locations and dates of artificially wild-released Silver Foxes

| 项圈编号 Collar number | 地区 Region | 性别 Gender | 体重 (kg) Body mass | 经纬度 Coordinates | | 人工野放时间 (年-月-日) Release date (Year-month-date) | 海拔 (m) Elevation |
|-----------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------------|-------------|--|---------------------|
| 010 | 碌曲 Luqu | 雌 Female | 5.35 | 102°25'34" E | 34°11'16" N | 2019-10-12 | 3 479 |
| 001 | 夏河 Xiahe | 雄 Male | 4.86 | 102°42'56" E | 34°55'25" N | 2019-10-13 | 3 160 |
| 007 | 碌曲 Luqu | 雌 Female | 4.32 | 102°22'23" E | 34°10'35" N | 2019-10-13 | 3 478 |
| 008 | 玛曲 Maqu | 雄 Male | 4.95 | 102°10'42" E | 33°49'43" N | 2019-10-14 | 3 432 |
| 002 | 玛曲 Maqu | 雌 Female | 4.05 | 102°08'29" E | 33°47'33" N | 2019-10-14 | 3 435 |
| 009 | 玛曲 Maqu | 雄 Male | 4.35 | 102°10'42" E | 33°49'43" N | 2019-10-14 | 3 432 |
| 004 | 夏河 Xiahe | 雌 Female | 4.00 | 102°42'50" E | 34°55'16" N | 2019-10-16 | 3 157 |
| 015 | 玛曲 Maqu | 雌 Female | 3.50 | 102°18'51" E | 34°09'21" N | 2022-10-10 | 3 531 |
| 013 | 夏河 Xiahe | 雌 Female | 4.55 | 102°45'58" E | 34°54'29" N | 2022-10-12 | 3 229 |
| 014 | 夏河 Xiahe | 雄 Male | 5.25 | 102°45'58" E | 34°54'29" N | 2022-10-12 | 3 229 |
| 016 | 碌曲 Luqu | 雄 Male | 5.15 | 102°18'51" E | 34°09'21" N | 2022-10-13 | 3 531 |
| 017 | 玛曲 Maqu | 雄 Male | 4.50 | 102°09'11" E | 33°55'03" N | 2022-10-14 | 3 428 |
| 018 | 玛曲 Maqu | 雌 Female | 4.45 | 102°08'37" E | 33°55'04" N | 2022-10-14 | 3 428 |

1.5.2 地形因子 用海拔和坡度反映地形条件, 从中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 获取数字高程数据 (digital elevation model, DEM), 栅格单元大小为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, 并利用 ArcGIS 10.2 提取相应地海拔、坡度和坡向。

1.5.3 距水源距离 利用 ArcGIS 10.2 软件对遥感影像的研究区水系进行提取, 并使用欧氏距离工具提取距水源距离数据。

1.6 数据分析

利用 Excel 2019 整理银黑狐活动位点数据和相关生态因子数据, 使用 SPSS 27 进行 Pearson 相关分析银黑狐存活时间与生态因子的相关性, 筛选出显著相关的生态因子; 利用多元逐步回归分析, 确定影响银黑狐存活时间的主要生态因子。使用 Origin 2022 绘图。

2 结果

2.1 人工野放银黑狐的存活情况

2019 年 10 月和 2022 年 10 月在野外共释放银黑狐 13 只, 基于追踪器回传位点和野外寻找结果 (图 1), 发现存活时间小于 1 个月的银黑狐有 5 只 (015、017、016、002 和 013), 占人工野放总数的 38.46%, 其中 3 只雌性、2 只

雄性; 存活时间超过 1 个月小于 2 个月的有 3 只 (004、008 和 001), 占人工野放总数的 23.08%, 其中 1 只雌性、2 只雄性; 存活时间超过 2 个月小于 3 个月的有 3 只 (009、007 和 010), 占人工野放总数的 23.08%, 均为雌性; 存活时间大于 6 个月的有 2 只 (018 和 014), 只占人工野放总数的 15.38%, 其中 1 只雄性、1 只雌性 (表 2)。存活时间小于 1 个月的银黑狐获得有效位点 679 个, 存活时间小于 2 个月的银黑狐获得有效位点 1 303 个, 存活时间小于 3 个月的银黑狐获得有效位点 2 755 个, 存活时间大于 6 个月的银黑狐获得有效位点 4 537 个。

2.2 人工野放银黑狐存活时间与生态因子的关系

2.2.1 人工野放银黑狐存活时间与地形的关系

野放后银黑狐活动的海拔范围 $3\ 060.08 \sim 3\ 543.07\text{ m}$, 其存活时间与海拔呈显著负相关关系 ($r = -0.618$, $P < 0.05$, 图 2a), 说明银黑狐的存活时间随海拔的降低而增加; 银黑狐活动的坡度范围 $2.71^\circ \sim 14.53^\circ$, 其存活时间与坡度呈正相关关系, 但不显著 ($r = 0.453$, $P > 0.05$, 图 2b); 不同存活时间的银黑狐个体主要在半阳坡和阳坡活动, 但其存活时间与坡向无显著相关关系 (图 2c)。



图 1 部分死亡银黑狐

Fig. 1 Partial mortality occurred among Silver Foxes (*Vulpes vulpes*)

表 2 银黑狐监测情况

Table 2 Monitoring status of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*)

| 项圈编号 Collar number | 性别 Gender | 监测时间 (年-月-日) Monitoring time (Year-month-date) | 监测天数 Monitoring days (d) |
|-----------------------|--------------|---|-----------------------------|
| 015 | 雌 Female | 2022-10-13 ~ 2022-10-15 | 3 |
| 017 | 雄 Male | 2022-10-14 ~ 2022-10-19 | 6 |
| 016 | 雄 Male | 2022-10-13 ~ 2022-10-24 | 12 |
| 002 | 雌 Female | 2019-10-14 ~ 2019-10-26 | 13 |
| 013 | 雌 Female | 2022-10-12 ~ 2022-10-25 | 14 |
| 004 | 雌 Female | 2019-10-16 ~ 2019-11-20 | 36 |
| 008 | 雄 Male | 2019-10-14 ~ 2019-11-18 | 36 |
| 001 | 雄 Male | 2019-10-15 ~ 2019-12-03 | 50 |
| 009 | 雄 Male | 2019-10-14 ~ 2019-12-17 | 65 |
| 007 | 雌 Female | 2019-10-13 ~ 2019-12-31 | 80 |
| 010 | 雌 Female | 2019-10-12 ~ 2019-12-31 | 81 |
| 018 | 雌 Female | 2022-10-14 ~ 2023-04-09 | 177 |
| 014 | 雄 Male | 2022-10-12 ~ 2023-08-04 | 300 |

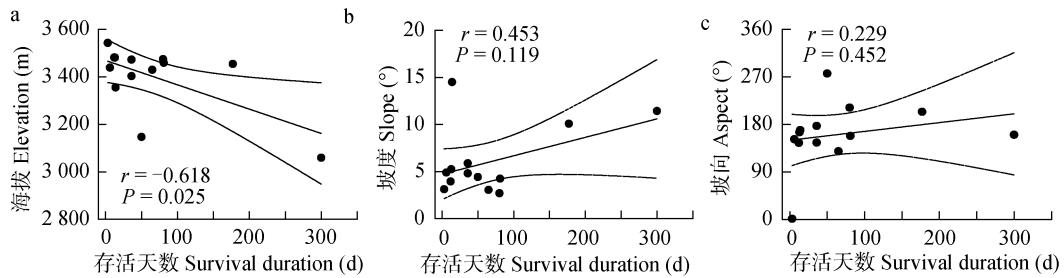


图 2 银黑狐存活时间与地形因子的关系

Fig. 2 Relationships between survival duration of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*) and terrain factors

2.2.2 人工野放银黑狐存活时间与气候因子的关系 银黑狐活动区域的年均温为 $0.57 \sim 2.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其存活时间与年均温呈显著正相关关系 ($r = 0.620$, $P < 0.05$, 图 3a)，说明银黑狐存活时间随年均温的升高而增加；银黑狐活动区域的相对湿度为 $48.70\% \sim 80.00\%$ ，其存活时间与湿度呈显著负相关关系 ($r = -0.705$, $P < 0.05$, 图 3b)，说明银黑狐存活时间随湿度的降低而减少；银黑狐活动区域的年降水量 $574.00 \sim 690.00 \text{ mm}$ ，其存活时间与年降水量无显著相关关系 (图 3c)。

2.2.3 人工野放银黑狐存活时间与 NDVI 和距

水源距离的关系 存活时间较短的银黑狐个体活动区域的 NDVI 指数为 $0.59 \sim 0.87$ ，其存活时间与 NDVI 指数呈负相关，但不显著 (图 4a)；人工野放后银黑狐活动位点距水源距离最近为 12.60 m ，最远为 691.60 m ，其中存活时间大于 6 个月的银黑狐个体活动位点距水源距离均小于 100.00 m ，相关性分析表明银黑狐存活时间与距水源距离呈不显著负相关关系 (图 4b)。

2.2.4 银黑狐存活时间与人类干扰因子的关系 银黑狐个体活动区域距居民点的距离为 $128.23 \sim 2811.11 \text{ m}$ ，距道路距离为 $54.86 \sim 1567.04 \text{ m}$ ，存活时间大于 6 个月的个体距居

民点距离和距道路距离分别为 441.92 m 和 186.83 m, 相关性分析表明, 银黑狐存活时间与距居民点距离和距道路距离均未表现出显著的相关关系 (图 5)。

2.3 影响银黑狐存活时间的关键生态因子

基于上述研究结果, 筛选出与银黑狐存活时间显著相关的生态因子海拔、年均温和湿度,

以银黑狐存活时间为响应变量, 以海拔、湿度和年均温为解释变量进行多元线性逐步回归分析, 结果表明, 湿度是影响银黑狐存活时间的主要影响因子 ($\beta = -0.52, P < 0.05$), 湿度影响银黑狐存活时间变异程度的 56.60% ($F = 6.209, P < 0.05$, 调整后的 R^2 为 0.566) (表 3)。

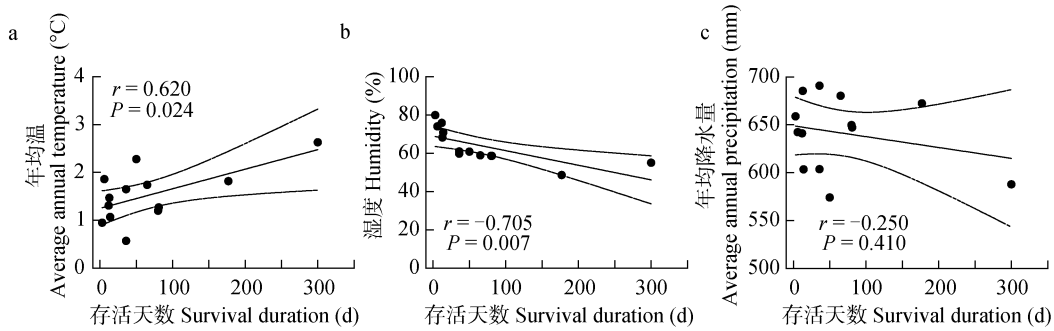


图 3 银黑狐存活时间与气候因子的关系

Fig. 3 Relationships between survival duration of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*) and climatic factors

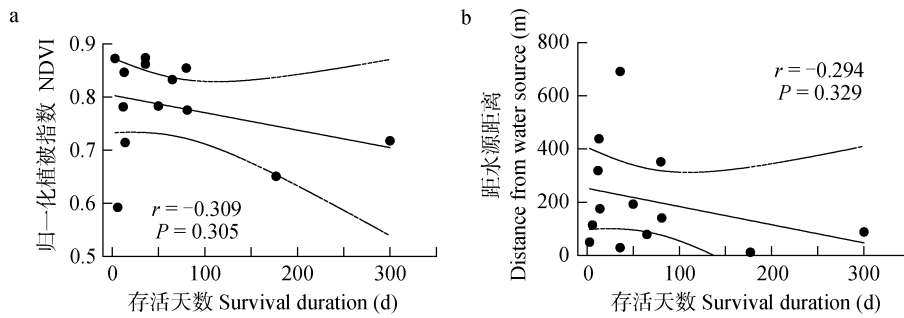


图 4 银黑狐存活时间与归一化植被指数 (NDVI)、距水源距离的关系

Fig. 4 Relationships of survival duration of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*) with normalized differential vegetation index (NDVI) and distance from water source

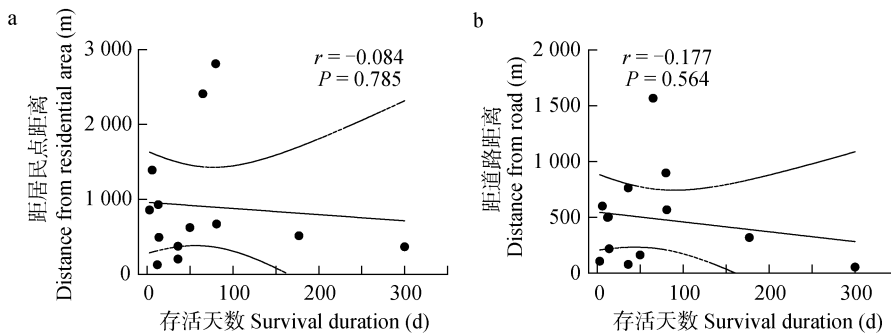


图 5 银黑狐存活时间与人类干扰因子的关系

Fig. 5 Relationships between survival duration of Silver Foxes (*Vulpes vulpes*) and human disturbance factors

表 3 多元逐步回归分析结果

Table 3 Results of stepwise multivariate regression analysis

| 模型 Model | 未标准化系数 Unstandardized coefficient | | 标准化系数 Standardized coefficient | | T 统计量 T statistic | 显著性 Significance | 共线性统计 Collinearity statistics | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|----------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| | 回归系数 Regression coefficient | 标准误 Standard error | 回归系数 β | | | | 容差 Tolerance | 方差膨胀因子 Variance inflation factor |
| 湿度 Humidity | -4.79 | 1.93 | -0.52 | | -2.48 | 0.04 | 0.83 | 1.21 |
| 年均温 Average annual temperature | 33.85 | 41.00 | 0.22 | | 0.83 | 0.43 | 0.50 | 2.02 |
| 海拔 Elevation | -0.17 | 0.16 | -0.28 | | -1.04 | 0.33 | 0.51 | 1.96 |
| 常量 Constant | 889.67 | 589.46 | | | 1.51 | 0.17 | | |

3 讨论

本研究采用 GPS 追踪项圈监测人工野放银黑狐个体的存活状况及其影响因素，发现野放的 13 只个体中，仅有 2 只存活时间超过半年，分别存活 177 d 和 300 d；存活时间 1 个月、2 个月和 3 个月的银黑狐分别为 5 只、3 只和 3 只。相关性分析表明，人工野放银黑狐存活时间与非生物因子（海拔、年均温和湿度）呈显著相关关系，而与生物因子关系不显著。具体而言，银黑狐存活时间随海拔和湿度的增加而降低，但随年均温的增加而增加，其中湿度对银黑狐存活时间的影响较大。

本研究发现，银黑狐存活时间随着海拔的升高而减少，可能与气候条件、氧气含量和野放前人工饲养环境有关。海拔的增加导致气温和氧气含量降低，而本研究野放时间在 10 月份（冷季），高海拔地区的寒冷气候可能增加银黑狐的野外生存压力（马明 2022），而且本研究发现银黑狐存活时间与年均温呈显著正相关关系，说明温度的升高有利于银黑狐的野外存活。其次，高海拔地区，氧气含量减少，导致银黑狐的体能消耗增加，影响其觅食和寻找栖息地的能力（吕天舒 2023）。本研究银黑狐野放前生活在海拔 2 954 m 的环境，野放后在海拔 3 400 m 以上的 9 只银黑狐，仅有 1 只存活时间超过了半年，存活时间最长的个体其活动区域的海拔为 3 000 m 左右。因此，人工野放银黑

狐需考虑人工饲养环境和野外环境的海拔差异。此外，高海拔地区的紫外线辐射较强，过量的紫外辐射会对高原哺乳动物的角质层造成穿透性破坏，进而引起红斑和炎症，缩短其存活时间（章誉兴等 2021）。多元逐步回归分析结果表明，湿度是影响银黑狐存活时间的关键因子。湿度的变化对动物体温调节、免疫系统等均会产生不同影响（张心如等 2006）。寒冷的高海拔区域，较高的湿度导致银黑狐在寒冷环境中更难通过散热机制有效调节体温，湿度过高的环境会增加体表的热量散失，使其需要消耗更多的能量来维持体温（张心如等 2006），从而导致其生存压力增大。此外，高湿度环境为微生物和寄生虫提供了优越的生境条件，对于人工野化的银黑狐而言，可能没有足够的免疫力来应对这些环境压力，导致感染疾病的风险增加。众多研究表明，决定物种生存的首要因素是气候条件，即使食物资源非常丰富，但气候条件较为恶劣，物种仍会面临较大的生存风险（赵卫等 2023）。本研究也发现，银黑狐存活时间与 NDVI 指数、距水源距离、距居民点距离和距道路距离等生物因素均未表现出显著相关关系。

人工引入银黑狐防控高原鼠兔是天敌防控的措施之一。2023 年 2 月，本文作者根据 GPS 及 VHF 项圈追踪定位成功，发现 1 只银黑狐（014）的巢穴，并采集到新鲜粪便（图 6），利用 DNA 宏条形码技术分析了银黑狐粪便的



图 6 佩戴追踪项圈的银黑狐和新鲜粪便

Fig. 6 A Silver Fox *Vulpes vulpes* with tracking collar and its fresh feces

食物组成，发现动物部分食物组成有羊属 (*Ovis*, 3.70%)、猪属 (*Sus*, 2.60%)、犬属 (*Canis*, 1.30%) 以及凸颅鼯鼠属 (*Eospalax*, 0.16%) 和家鼠属 (*Rattus*, 0.23%) 成分，只有极少量鼠兔属 (*Ochotona*, 0.30%) 成分。遗憾的是，由于受到野外银黑狐活动区域地形和存活时间的限制，仅采集到 1 只银黑狐的粪便样本。此外，作者在野外追踪 2 只银黑狐活动位点的过程中，当地牧民介绍银黑狐经常会捕食刚出生的小羊羔和藏香猪。因此，本研究人工野放的银黑狐适应环境能力相对有限，捕食高原鼠兔的比例相对较少。以往研究发现，银黑狐投放后高原鼠兔的有效洞口数量显著降低 (加曼草 2021)。然而，从试验设计角度出发，由于未设置对照样方以及投放前后时间相隔较长 (1 年)，导致无法区分高原鼠兔相对种群密度下降是因为气候 (降水、温度变化) 原因还是投放银黑狐的原因。有研究表明，气候也是影响高原鼠兔种群密度变化的重要因素之一 (杨丽艳等 2024)。

此外，人工野放银黑狐可能会对本地物种产生影响，虽然本研究采用了绝育措施，但从长远来看会限制该种群的自我更新和维持能力，而未进行绝育的银黑狐人工野放后可能会对本地物种 (赤狐、藏狐等) 产生基因污染，削弱本地物种的独特性和遗传多样性，而且银黑狐作为人工繁育的物种可能携带病原体，对

于缺乏抵抗某些外来病原体的本土野生食肉动物来讲，会增加其感染疫病的风险，导致野生动物死亡，从而不利于高寒草地生物多样性的保护和维持。因此，人工野放银黑狐防控青藏高原鼠害需慎之又慎，避免成为潜在生态风险因素。建议可通过恢复本土顶级捕食者的种群数量，构建与高寒生态系统特征相适配的生物调控网络，在维护生态系统完整性的前提下同步实现鼠害控制目标。

参 考 文 献

- Smith A T, Badingqiuying, Wilson M C, et al. 2019. Functional-trait ecology of the plateau pika *Ochotona curzoniae* in the Qinghai-Tibetan Plateau ecosystem. *Integrative Zoology*, 14(1): 87–103.
- Xu L, Song M Q, Tian X Z, et al. 2024. Five-year longitudinal surveillance reveals the continual circulation of both alpha- and beta-coronaviruses in Plateau and Gansu pikas (*Ochotona* spp.) at Qinghai Lake, China. *Emerging Microbes & Infections*, 13(1): 2392693.
- 蔡新成, 魏才卜, 楚彬, 等. 2024. 基于文献计量学和 Meta 分析方法评估高原鼠兔干扰对高寒草甸植物与土壤的影响. *植物保护学报*, 51(5): 1045–1055. [Cai X C, Wei C B, Chu B, et al. 2024. Assessing the effects of plateau pika *Ochotona curzoniae* disturbance on vegetation and soil in Alpine meadow: insights from bibliometric and meta-analytical approaches. *Journal of Plant Protection*, 51(5): 1045–1055.]

- 冯今, 吴江, 程天亮. 2016. 草原鼠害主要防治方法. 甘肃畜牧兽医, 46(21): 9–14. [Feng J, Wu J, Cheng T L. 2016. Main control methods for rodent pests in grasslands. Gansu Animal and Veterinary Sciences, 46(21): 9–14.]
- 花立民, 柴守权. 2022. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. 植物保护学报, 49(1): 415–423. [Hua L M, Chai S Q. 2022. Rodent pest control on grasslands in China: current state, problems and prospects. Journal of Plant Protection, 49(1): 415–423.]
- 花蕊. 2023. 青藏高原高原鼠兔危害监测预警与风险评估关键技术研究. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文. [Hua R. 2023. Research on key technologies of plateau pika damage monitoring and risk assessment in Qinghai-Tibet Plateau. Lanzhou: Gansu Agricultural University, Doctoral dissertation.]
- 加曼草. 2021. 甘南鼠类天敌银黑狐控鼠效果调查报告. 甘肃畜牧兽医, 51(2): 70–72. [Jia M C. 2021. Investigation report on the rodent control effect of the silver fox, a natural enemy of rodents in Gannan. Gansu Animal Husbandry and Veterinary, 51(2): 70–72.]
- 吕天舒. 2023. 青藏高原狐属动物 (*Vulpes*) 的高海拔适应机制研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文. [Lü T S. 2023. The high-altitude adaptation mechanism of *Vulpes* in the Qinghai-Tibet Plateau. Harbin: Northeast Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 马崇勇, 张卓然, 单艳敏, 等. 2017. 内蒙古草原鼠害及其绿色防控技术应用现状. 中国草地学报, 39(5): 108–115. [Ma C Y, Zhang Z R, Shan Y M, et al. 2017. Grassland rodent damage and application situation of green prevention-control techniques in Inner Mongolia. Chinese Journal of Grassland, 39(5): 108–115.]
- 马明. 2022. 基于多组学分析高原林蛙响应高海拔胁迫的分子机制. 兰州: 兰州大学博士学位论文. [Ma M. 2022. Analysis of the molecular mechanism of *Rana kukunoris* response to high altitude stress based on multi-omics. Lanzhou: Lanzhou University, Doctoral dissertation.]
- 王志艳. 2017. 动物世界. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 27–28. [Wang Z Y. 2017. The Animal World. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 27–28.]
- 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 2017. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 32(9): 924–931. [Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. 2017. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(9): 924–931.]
- 杨丽艳, 宋梅玲, 王玉琴, 等. 2024. 青海省果洛州高原鼠兔宜生区分布及其对气候变化的响应. 草地学报, 32(6): 1902–1912. [Yang L Y, Song M L, Wang Y Q, et al. 2024. The distribution of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in Guoluo prefecture, Qinghai Province and its response to climate change. Acta Agrestia Sinica, 32(6): 1902–1912.]
- 于钊, 王蕾, 黄文广, 等. 2016. 银黑狐野化训练放归自然后控制鼠害的研究. 黑龙江畜牧兽医 (11): 236–238. [Yu Z, Wang L, Huang W G, et al. 2016. Research on rodent control after the silver fox is released into the wild following wildness training. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, (11): 236–238.]
- 赵卫, 王昊, 肖颖, 等. 2023. 气候变化对野生生物类自然保护区的影响及其风险. 生态学报, 43(13): 5270–5280. [Zhao W, Wang H, Xiao Y, et al. 2023. Effect and risk of climate change on wildlife nature reserves. Acta Ecologica Sinica, 43(13): 5270–5280.]
- 张心如, 罗宜熟, 杜干英, 等. 2006. 空气湿度与动物的关系. 家畜生态学报, 27(6): 178–182. [Zhang X R, Luo Y S, Du G Y, et al. 2006. Relation between humidity and animal. Acta Ecologica Animalis Domastici, 27(6): 178–182.]
- 章誉兴, 吴宏, 于黎. 2021. 哺乳动物毛色调控机制及其适应性进化研究进展. 遗传, 43(2): 118–133. [Zhang Y X, Wu H, Yu L. 2021. Progress on coat color regulation mechanism and its association with the adaptive evolution in mammals. Hereditas (Beijing), 43(2): 118–133.]
- 朱洪民. 2019. 人工繁育大熊猫放归后对自然环境的响应. 南充: 西华师范大学硕士学位论文. [Zhu H M. 2019. The response of captive-bred giant pandas to the natural environment after release. Nanchong: China West Normal University, Master's dissertation.]
- 周晓, 曾昌霞, 黄炎, 等. 2014. 圈养大熊猫个体特点对放归后生存的影响. 华中师范大学学报: 自然科学版, 48(2): 260–264, 289. [Zhou X, Zeng C X, Huang Y, et al. 2014. Discussion on individual animal traits influencing post-release survival of captive-bred giant pandas. Journal of HuaZhong Normal University: Natural Sciences, 48(2): 260–264, 289.]