

古尔班通古特沙漠输水明渠野生动物通道监测研究

夏霖¹, 许玉², 程继龙¹, 温知新¹, 杨奇森^{1*}

(1. 中国科学院动物研究所, 北京 100101; 2. 新疆博衍水利水电环境科技有限公司, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 2018年8月—2023年8月, 利用红外相机触发陷阱技术对古尔班通古特沙漠输水明渠 166 km 范围内的 13 座跨渠野生动物通道进行了 5 年的持续监测。15 台红外相机总有效拍摄工作日为 19 946 d, 获得独立有效照片 57 333 张, 鉴别出兽类 5 目 8 科 12 种, 包括国家一级重点保护动物 1 种、二级 6 种。在水源极度匮乏的沙漠腹地, 渠道输水对周边动物具有吸引和聚集作用, 渠道上记录到的兽类物种数(不包括啮齿目 Rodentia)占渠道两侧分布兽类物种数的 85. 71%。赤狐 *Vulpes vulpes* 的相对多度指数(RAI)最高, 达到 80. 90%, 其次为鹅喉羚 *Gazella subgutturosa* (15. 50%) 和蒙古兔 *Lepus tolai* (4. 37%); 渠道输水期间, 除蒙古兔、兔狲 *Otocolobus manul*、蒙古野驴 *Equus hemionus* 和偶见种野猪 *Sus scrofa* 外, 其他 8 种兽类的 RAI 均高于停水期, 且月相对多度指数高峰亦出现于输水的 4—9 月。通道的相对利用率分析显示, 鹅喉羚和蒙古野驴对 S7、S9 和 S12 的利用率最高。本研究首次对水利工程中野生动物通道有效性进行了监测和评价, 为未来水利工程相关野生动物保护措施的设置提供了重要的科学依据。

关键词: 古尔班通古特沙漠; 明渠; 野生动物通道; 红外相机; 监测

中图分类号: Q959. 8 文献标志码: A 文章编号: 1000 – 7083(2024)06 – 0696 – 08

Monitoring of Wildlife Crossings Over An Open Canal in Gurbantunggut Desert

XIA Lin¹, XU Yu², CHENG Jilong¹, WEN Zhixin¹, YANG Qisen^{1*}

(1. Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Xinjiang Boyan Water Resources and Hydropower Environmental Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: During August, 2018 and August, 2023, 15 infrared cameras were set up on 13 crossing structures over a 166 km section of open canal in Gurbantunggut Desert, and a total of 57 333 independent and effective photos were obtained during 19 946 camera working days. Finally, 12 mammal species belonging to 5 orders and 8 families, including 1 class I and 6 class II nationally key protected wild animals were identified. Among the species, 85. 71% (12/14) of them might be attracted by the crossings in the study area, and the red fox (*Vulpes vulpes*) had the highest relative abundance index (80. 90%), followed by goitred gazelle (*Gazella subgutturosa*, 15. 50%) and tolai hare (*Lepus tolai*, 4. 37%). Except for *L. tolai*, wild boar (*Sus scrofa*), Mongolian wild ass (*Equus hemionus*) and Pallas' cat (*Otocolobus manul*), the highest monthly relative abundance index of mammal species in the study area was detected during late April to mid September when the canal contains water. For the 13 crossings, S7, S9 and S12 were frequently used by *E. hemionus* and *G. subgutturosa*. In conclusion, this study evaluates the effectiveness of wildlife crossings over canals in China, and provides an important scientific basis for the setting of wildlife protection measures related to water conservancy proj-

收稿日期: 2024-03-12 接受日期: 2024-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC-新疆联合基金项目(U2003203); 重大水利工程对额尔齐斯河流域陆栖脊椎动物及栖息地的影响监测研究项目

作者简介: 夏霖(1973—), 女, 博士, 高级工程师, 从事交通、水利等工程野生动物环境影响评价和监测工作, E-mail: xial@ioz. ac. cn

*通信作者 Corresponding author, E-mail: yangqs@ioz. ac. cn

ects in the future.

Keywords: Gurbantunggut Desert; open canal; wildlife crossing; infrared camera; monitoring

输水明渠属于线性工程,其线性切割动物栖息地,成为动物活动路径上难以跨越的鸿沟,可导致种群基因交流减少或中断、种群隔离加剧、繁殖率下降,以及溺水死亡,加剧了动物栖息地片段化(Curatolo & Murphy, 1986; Gregory *et al.*, 2021)。为缓解线性工程对野生动物的不利影响,野生动物通道被广泛应用于公路和铁路等线性工程,已有超过半个世纪的研究和实践历史(Clevenger & Waltho, 2000; Jackson & Griffin, 2000; Clevenger & Huijser, 2011)。在水渠上同样可以使用桥梁、涵洞、管道等形式的连通结构建立连接生境以缓解其线性阻隔作用,但相关的研究却十分匮乏,实践中多借鉴公路野生动物通道设置的经验,且对通道利用率进行监测和验证的更是寥寥无几(Curatolo & Murphy, 1986; Peris & Morales, 2004; Baechli *et al.*, 2021)。

位于古尔班通古特沙漠的输水明渠全长166 km,纵穿准噶尔盆地沙漠腹地气候最严酷的区域,成为了一条人造的“季节性河流”。但是,不同于自然的季节性河流,人造的输水渠道因其相对陡峭的边坡、两侧围网等防护措施可对动物栖息地造成更加显著的阻隔效应,即使是在冬季也可成为一些动物难以跨越的鸿沟,特别是那些体型大、攀爬能力较弱的大、中型哺乳动物。为了缓解长距离输水工程对动物种群交流的阻隔,水渠上方设置了野生动物通道。2018年8月—2023年8月,利用红外相机触发陷阱技术对古尔班通古特沙漠输水明渠中的13座跨渠野生动物通道进行了5年的持续监测,对通道有效性进行了评价,为未来水利工程相关野生动物保护措施的设置提供了重要的科学依据。

1 研究区域概况

研究区域位于新疆维吾尔自治区福海县吉拉

沟以南,阜康县五个沙疙瘩以北的古尔班通古特沙漠,海拔470~635 m。渠道所在区域属于典型的内陆干旱气候,夏季平均气温24~27℃,最高气温可达45℃以上,冬季平均气温-23~-28.5℃,极端气温-45℃;区内干旱多风,年降水量70~120 mm,且集中于每年的5—8月和10—12月,蒸发量可达2 800~3 000 mm。渠道两侧地形起伏,由高低不等的南北向沙垄、梁窝状沙垄和北西向沙垄及固定和半固定沙丘组成,一般高差10~20 m,个别可达40~60 m(邓铭江等, 2017)。沙漠明渠两侧2 km范围内无固定水源,也无季节性河流、泉眼,少数低洼处有积水痕,但无大面积季节性积水区域。

沙漠明渠长166 km,宽约24 m,水深3.5 m以上,每年春季(4月下旬至5月上旬)开始供水,秋季(9月中下旬)停止供水。渠道两侧设置了防沙带,通过人工种植白梭梭*Haloxylon persicum*等本土植物形成了乔-灌-草结构的混交植被群落(邓铭江等, 2017),为动物提供了丰富的食物资源和庇护场所。根据对该区域2015年至今的野外现场调查和相关的历史调查资料,确认工程沿线分布有蒙古野驴*Equus hemionus*、猎隼*Falco cherrug*、黑鹳*Ciconia nigra*等国家一级重点保护动物和鹅喉羚*Gazella subgutturosa*、盘羊*Ovis ammon*、猞猁*Lynx lynx*、兔狲*Otocolobus manul*、狼*Canis lupus*、赤狐*Vulpes vulpes*、雕鸮*Bubo bubo*、红隼*Falco tinunculus*等国家二级重点保护动物(陈惠等, 2021)。渠道、围网及其伴行道路也对上述野生动物栖息地形成了长距离的线性切割,阻断两侧动物种群的遗传交流,特别对于长距离迁移的物种来说,可能会阻断其迁移通道,对其生存繁衍生存造成不利的影响。为缓解工程对动物的阻隔效应,在2015年渠道升级改造时对既有的跨渠钢架桥进行了增设和改造,

在宽 4.2 m 的钢架桥面铺设了厚度 5 cm 的木板,并在其上覆盖 10 cm 厚的沙土,减少动物通过时的震动和声音干扰,尽量保持通道表面基质与周边环境相似。此外,在历史上鹅喉羚活动密集的区域还设置了 2 座 50 m 宽的跨渠动物专用通道。渠道两侧全线除通道和桥梁位置全部设置了围网,高度大于 2 m。

2 研究方法

2.1 红外相机布设

2018 年 9 月—2023 年 8 月,在输水渠道 166 km 渠段 13 处上跨式桥梁通道布设 15 台红外相机(型号:东方红鹰 E3H)。考虑到相机触发有效距离,在 50 m 宽的野生动物通道两侧围栏各设置 1 台红外相机、4.2 m 宽的桥梁设置 1 台红外相机。相机固定于桥梁通道单侧的围栏上,距桥面的高度为 30~50 cm(表 1)。拍摄模式统一设置为拍照+视频模式,时间间隔为 1 s,连拍 3 张,录像时长 10 s;灵敏度设置为中等。相机布设时设置日期、时间,记录经纬度、海拔等信息(肖治术等,2014;陈立军等,2019)。每 4 个月更换 1 次电池及存储卡,如有相机

丢失或损坏,在原处替换 1 台新相机继续拍摄。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 物种识别 照片进行人工识别后分拣录入 Excel。物种鉴定参考《中国兽类图鉴(第二版)》(刘少英等,2020)、《中国兽类名录(2021 版)》(魏辅文等,2021);保护等级参考《国家重点保护野生动物名录》(国家林业和草原局,农业农村部,2021),受胁程度参考世界自然保护联盟(IUCN)濒危物种红色名录(IUCN,2023)。对于无法准确鉴别到物种的鼠类不纳入计算。

2.2.2 数据处理与分析 对获得的照片数据,首先去除未拍摄到动物的无效照片和无法识别的照片,将同一监测位点上 30 min 以内拍摄到的同一物种的照片(或视频)作为 1 张独立有效照片(O'Brien *et al.*,2003)。根据某种动物的独立有效照片数计算物种相对多度指数(relative abundance index,RAI)(李勤等,2013),数值越大则说明某物种在通道上单位时间内出现的频次越高。

由于鸟类具有飞行能力,其并不需要利用通道跨越渠道,本研究仅针对不具有飞行能力的兽类。本文计算了兽类不同物种的月相对多度指数

表 1 古尔班通古特沙漠输水明渠野生动物通道位置与类型
Table 1 Wildlife corridor type and location over an open canal in Gurbantunggut Desert

编号 ID	类型 Type	东经 Eastern longitude/(°)	北纬 Northern latitude/(°)	海拔 Elevation/m	长 Length/m	宽 Width/m
S1	钢架桥	88. 21	44. 57	522	24. 00	4. 20
S2	钢架桥	88. 11	44. 62	529	24. 00	4. 20
S3	钢架桥	88. 02	44. 67	526	24. 00	4. 20
S4	钢架桥	87. 95	44. 73	524	24. 00	4. 20
S5	钢架桥	87. 88	44. 81	528	24. 00	4. 20
S6	钢架桥	87. 77	44. 96	533	24. 00	4. 20
S7	钢筋混凝土桥	87. 75	44. 97	522	24. 00	50. 00
S9	钢架桥	87. 69	45. 01	538	24. 00	4. 20
S10	钢架桥	87. 63	45. 09	533	24. 00	4. 20
S11	钢架桥	87. 61	45. 17	540	24. 00	4. 20
S12	钢筋混凝土桥	87. 62	45. 31	541	24. 00	50. 00
S14	钢架桥	87. 62	45. 40	542	24. 00	4. 20
S15	钢架桥	87. 68	45. 48	548	24. 00	4. 20

(monthly relative abundance index, MRAI) (张相锋等, 2019) 以了解通道全年动物对通道利用的动态变化情况; 为比较动物对不同通道利用率的差异, 还计算了兽类对通道的相对利用率指数 (corridor relative effectiveness index, CREI) (张相锋等, 2019)。计算公式如下: $RAI = A_i / N \times 100$, 式中, A_i 代表第 i 类动物的独立照片数, N 代表总有效拍摄天数; $MRAI = M_{ij} / N_i \times 100$, 式中, M_{ij} 代表第 j 月动物 i 出现的独立照片数, N_i 代表动物 i 在研究期间的独立照片总数; $CREI = C_{ij} / N_i \times 100$, 式中, C_{ij} 代表 j 通道动物 i 出现的独立照片数。

3 研究结果

3.1 监测结果与物种相对多度

共布设 15 台红外相机, 有效拍摄工作日为 19 946 d, 拍摄照片总计 438 757 张, 提取出独立有效照片 57 333 张, 其中兽类照片 20 741 张, 占 36.18%。经鉴定, 野生动物通道上记录到兽类 5 目 8 科 12 种, 其中国家一级重点保护野生动物有蒙古野驴 1 种; 国家二级重点保护野生动物有盘羊、鹅喉羚、兔狲、猓狍、狼、赤狐 6 种; 新疆维吾尔自治区一级保护动物有虎鼬 *Vormela peregusna* 1 种 (附录 I, 附录 II; <http://doi.org/10.11984/j.issn.1000-7083.20240072>)。RAI 前 3 的为赤狐 (80.90%)、鹅喉羚 (15.50%) 和蒙古兔 *Lepus tolai* (4.37%)。

3.2 不同输水阶段的物种相对多度

2018—2023 年, 渠道输水期间 13 处野生动物通道红外相机总有效拍摄天数为 7 683 d, 获得兽类有效照片 12 710 张, 隶属于 5 目 8 科 12 种; 渠道停水期间红外相机有效工作时间 12 263 d, 获得兽类有效照片 8 031 张, 隶属于 5 目 8 科 11 种。渠道输水期间 RAI 最高的为赤狐 (128.00%)、鹅喉羚 (30.50%) 和狼 (2.73%); 停水期最高的为赤狐 (51.39%)、鹅喉羚 (6.10%) 和蒙古兔 (6.00%)。

3.3 利用通道迁移的兽类月活动规律

各物种不同月份的 RAI 显示: 蒙古野驴对通道的利用集中于 12 月至次年 5 月; 而鹅喉羚的年活

动规律呈单峰型, 通道的月相对利用率指数最高发生在夏季 7 月 (32.96%)。食肉类中狼和赤狐的年活动规律近似, 呈单峰形, 赤狐在 9 月活动最频繁 (18.10%), 狼对通道的月相对利用率指数最高在 8 月 (26.71%); 兔狲的为 11 月 (22.58%); 猓狍的为 5 月 (20.00%) 和 8 月 (20.00%), 虎鼬的为 7 月 (26.03%), 狗獾 *Meles meles* 的为 4 月 (36.00%) (图 1)。小型兽类中, 蒙古兔和大耳猬 *Hemiechinus auritus* 在通道上的月活动规律具有明显的差异, 大耳猬具有冬眠习性, 其在通道上的活动集中在 4—9 月; 蒙古兔对通道利用的高峰发生在冬季 (11 月至次年 1 月) (图 1)。此外, 还在通道上记录到 1 只大耳猬于 2 月夜间活动, 当时气温为 -13°C , 为偶然事件。5 年监测记录到野猪、盘羊的有效照片不足 5 张, 属于偶见种, 不纳入分析。

3.4 通道相对利用率

13 处野生动物通道记录到 12 种兽类 (图 2)。结果显示, 鹅喉羚对 S7 (12.84%)、S9 (11.16%)、S12 (10.61%) 和 S1 (10.00%) 的利用率较高, 其中, S7 和 S12 为专为鹅喉羚设置的宽度 50 m 的野生动物通道, S1 和 S9 为经过桥面改造的宽度 4.2 m 的钢架桥; 蒙古野驴对 S7 (42.86%) 和 S9 (28.57%) 的利用率最高, 其次为 S12 (14.29%), 3 处通道的利用率共占 85.72%; 盘羊为偶见种, 仅于 2019 年在 S3 记录到 1 次。食肉类中, 除 S9 和 S10 外, 均记录到狼活动, 其中, S14 (30.9%)、S4 (25.57%) 和 S3 (12.62%) 的利用率最高, 均为钢架桥型通道。13 处通道均记录到赤狐活动, 利用频繁的为 S9 (12.14%)、S6 (11.05%) 和 S5 (10.66%); 共有 10 处通道记录到兔狲, 其对 S11 的利用率 (33.87%) 明显高于其他通道, 其次为 S9 (16.13%) 和 S15 (11.29%); 5 年仅记录到 20 张猓狍的独立有效照片, 出现于 8 座钢架桥通道, 利用率最高的为 S15 (35.00%); 除了 S6、S7 和 S12, 其他 10 处通道均记录到虎鼬活动, 其利用率最高的为 S2 (42.47%), 其次为 S1 (15.07%) 和 S4 (10.96%); 8 处通道记录到狗獾活动, 除 S2 (32.00%)、S3 (28.00%)、S1 (16.00%) 外均仅记录

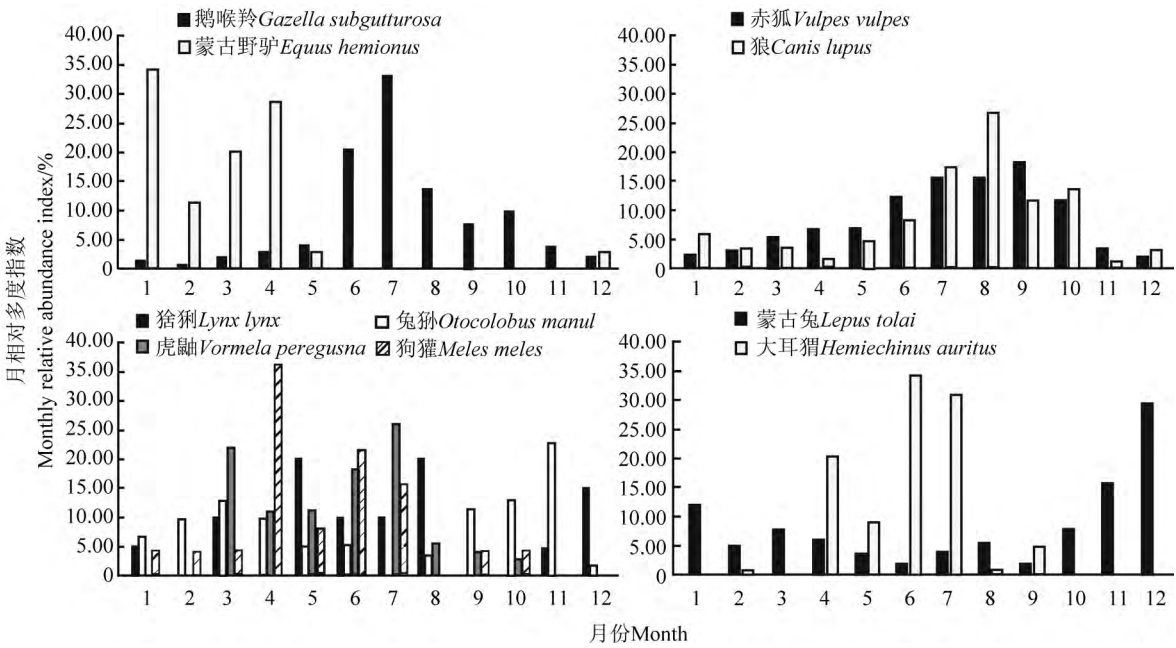


图1 古尔班通古特沙漠输水明渠野生动物通道记录到的兽类月相对多度指数
Fig. 1 Monthly relative abundance index of mammals recorded on the wild life passages over an open canal in Gurbantunggut Desert

到 1 张有效照片。大耳猬在 9 个通道被记录到，S15(25.00%)、S14(23.21%)和 S9(14.29%)的利用率较高；蒙古兔在 13 处通道被记录到，其对 S1 的利用率(60.09%)明显高于其他通道。野猪为偶见种，5 年仅记录到 4 次。

4 讨论

4.1 渠道的阻隔效应

渠道对动物的阻隔来自渠道自身物理结构、水流和围网三方面。由于本研究中的渠道两侧均设置了水泥挡墙和围网，除少数体型较小的动物，如鼠类、爬行类、蒙古兔、虎鼬和少数狐个体可以从围网与桥梁间隙进入渠道，其他动物无法跨越围网屏障。渠道无水时，冬季雪被覆盖期可在渠道内部记录到大量蒙古兔、沙鼠足迹链，其可以直接从渠道底部直接跨越渠道；体型较大的鹅喉羚、蒙古野驴、狼等兽类，因围网和挡墙阻拦无法进入渠道，渠道对其形成连续完全的阻隔，冬季在渠道两侧围网边缘可见大量与围网平行的鹅喉羚足迹链，但渠道中则无其活动痕迹。在渠道输水期间，

几乎对所有非飞行脊椎动物形成完全的阻隔，只能利用通道结构跨越渠道。因此，渠道对于鹅喉羚等大型兽类的阻隔效应明显高于体型较小的物种，而渠道输水期间的阻隔效应更高。渠道沿线还分布有各种跳鼠和大耳猬等冬眠物种，其冬眠期基本与渠道无水的阶段相符，这些动物只能在渠道输水季节利用桥梁实现个体交流，渠道对其阻隔是完全的。围网和挡墙的存在加强了渠道自身的物理阻隔，但其对动物活动具有引导作用，被围网阻隔的动物沿着围网活动，当其移动到围网的末端则会失去“引导”，立刻尝试跨越阻隔，被称为“围网末端逃离”现象，在围网末端设置动物通道，可以利用“围网末端逃离”效应提高动物对通道的利用率(Tull & Krausman, 2001; Clevenger & Huijser, 2009; Gagnon *et al.*, 2010)。本研究中 166 km 长的渠道两侧均设置有围网，可有效阻止各种兽类误入水渠并导致溺亡的问题。

4.2 渠道的吸引效应

水对于大多数沙漠动物具有吸引和富集作用，渠道输水开始于每年 4 月下旬至 5 月上旬，持

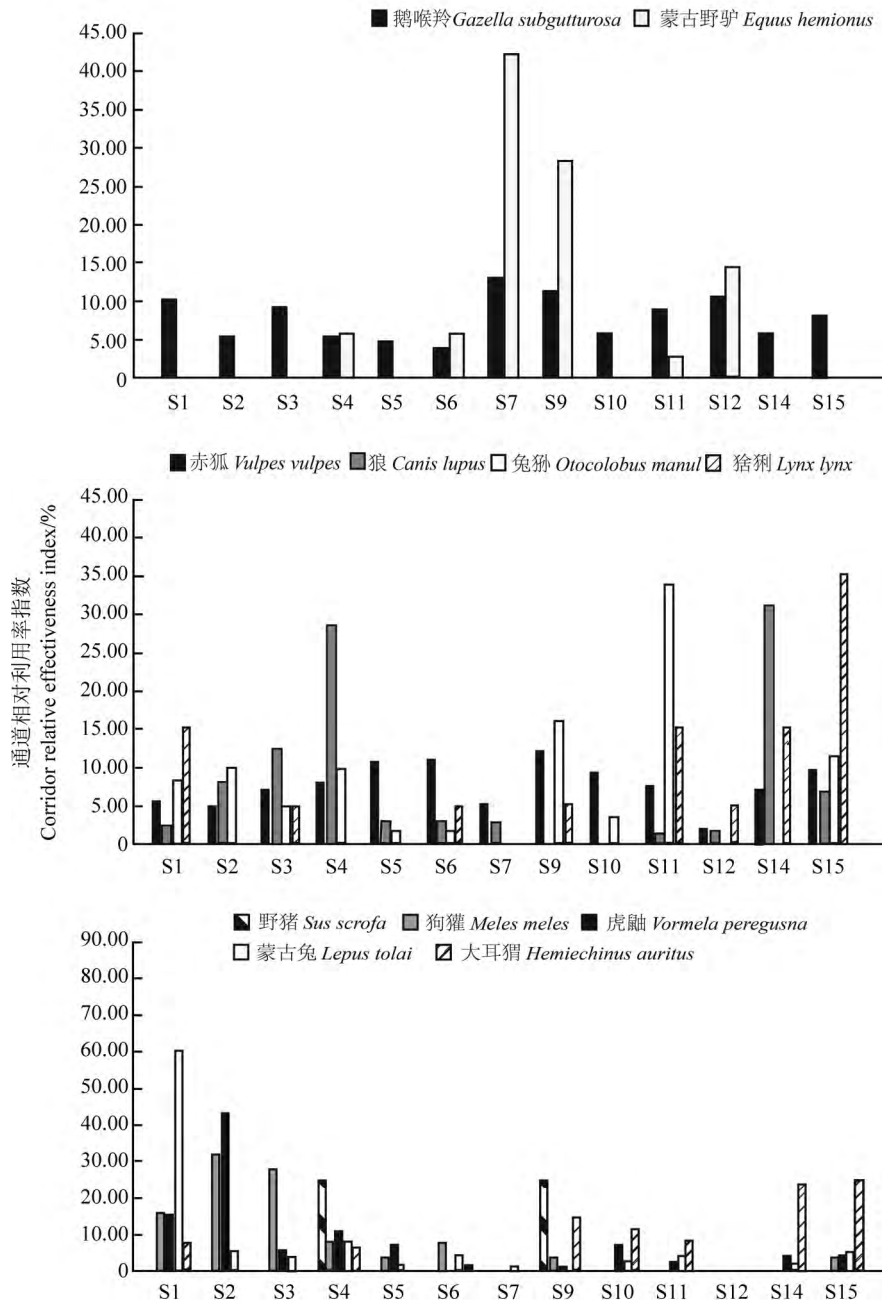


图2 古尔班通古特沙漠输水明渠兽类野生动物通道相对利用率指数

Fig. 2 Corridor relative effectiveness index of mammals over an open canal in Gurbantunggut Desert

续到9月中下旬,这一阶段主要为春、夏和初秋季。研究区域所在位置无其他固定水源,渠道中的水会吸引动物至渠道两侧活动,也增加了通道的利用率。除蒙古兔、兔孙、蒙古野驴和偶见种野猪外,其他兽类在渠道输水期间的RAI均高于停水期,且MRAI高峰亦出现于渠道输水的4—9月。研

究区域位于新疆卡拉麦里山国家级自然保护区以西,无明显的地理界限和阻隔,保护区内鹅喉羚、蒙古野驴等均可因输水渠道被吸引至周边区域活动。红外相机在通道上记录到兽类(不包括影像无法识别的啮齿目鼠类)12种,根据《新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区综合科学考察》(陈惠等,

2021),保护区内记录有除啮齿目以外的非飞行哺乳动物 14 种,仅沙狐 *Vulpes corsac* 和保护区野放的普氏野马 *Equus przewalskii* 未被记录到。渠道输水及周边植被对动物具有吸引作用,而渠道的阻隔使动物活动路径改变,通道成为其日常活动和迁移路径上的瓶颈,且因为通道空间有限,动物的活动方向和范围受到限制,因此也更容易被红外相机记录到。

4.3 不同兽类物种动物通道的月活动规律差异

动物在通道上的月活动规律与其自身生态学特性密切相关。对于具有冬眠习性的物种,如大耳猬,其每年 9—10 月进入冬眠期,于翌年 4—5 月出蛰,而其在通道上的活动时间亦为 4—9 月。输水季节渠道两侧自然植被和人工防护梭梭林带为鹅喉羚、蒙古兔、各种鼠类等草食性动物提供了丰富的食物资源,而这些动物亦吸引了狼、赤狐、猓猯、兔狲等食肉类动物至周边觅食。输水季节曾在通道上记录到 1 只短尾赤狐一晚往返 3 次携带各种鼠类 10 余只,亦记录到狼携鹅喉羚残骸通过桥梁。通道上记录到的赤狐、狼、鹅喉羚的活动高峰期为 6—9 月,为繁殖育幼期,红外相机记录到大量携带幼仔在通道上活动的动物影像,哺育幼仔需要获取更多的食物,扩大觅食范围,增加了通道的使用可能性。

4.4 不同物种对不同类型通道利用率差异

4.4.1 有蹄类动物对通道的利用 在线性工程中野生动物通道最早被用于公路、铁路等,大体可分为上方通道-动物由桥梁上方通过和下方通道-动物由桥下通过。上方通道因道路、车辆等工程隐藏于桥下,通道与周围景观一致性较高(Jackson & Griffin, 2000; Evink, 2002);且对动物而言,由于可以清晰地看到公路对方的栖息地,没有视觉障碍,动物可自然地通过(Clevenger *et al.*, 2002)。有蹄类偏好对侧环境清晰可见、视野开阔型的通道(Servheen *et al.*, 2003; Clevenger & Waltho, 2005),且对于集群迁移的野生动物,通道要足够宽以容

纳成群的动物休息和通过,要能提供足够的食物资源,具备相对更好的植被条件(Jodi *et al.*, 2006)。沙漠输水明渠野生动物通道属于上方通道,通道与周边处于同一平面,视野开阔,无视觉上的“物理阻隔”,与公路桥梁不同,跨渠桥梁下方没有噪声、震动、灯光等干扰。渠道输水期为每年 5—9 月,是古尔班通古特沙漠最为炎热干旱的季节,渠道周边缺乏其他水源,渠道中的水可提高通道的利用率。集群活动的鹅喉羚和蒙古野驴对 50 m 宽的通道有较高的利用率,但其他宽 4.2 m 的钢架桥同样具有较高甚至更高的利用率。动物由桥梁上方通过,视野不会受到桥梁宽度的影响,加之桥面铺设的泥土使通道与周边环境近似,动物更容易适应,对宽度的要求不如下方通道苛刻。

4.4.2 食肉动物对通道的利用 13 处通道记录到赤狐、狼、猓猯、狼、兔狲、狗獾、虎鼬等 7 种食肉类动物通过, S7 仅记录到赤狐和狼活动,而 S12 记录到赤狐、狼和猓猯通过, 2 座通道记录到的物种数和通道的相对利用率指数在 13 处通道中均位于或接近末位。对于捕食性动物,因通道限制了猎物逃避的空间和轨迹,更有利于提高其捕获成功率,使通道成为“捕食陷阱”(Clevenger & Waltho, 2005)。但这一论点多基于捕食性动物对不同类型通道的选择,而缺乏直接的证据(Stuart *et al.*, 2002),而近期越来越多的研究通过分析通道内的捕食者和被捕食者的关系,均不支持通道作为“捕食陷阱”的假说(April *et al.*, 2020)。本研究未在通道上记录到捕食事件, S7 和 S12 较少被食肉动物利用的原因尚无法解释。

本研究通过连续 5 年对古尔班通古特沙漠输水明渠 13 处野生动物通道的红外相机监测结果,分析了不同兽类物种在不同季节、不同输水阶段对不同类型野生动物通道的利用率,为国内首个水利工程野生动物通道研究案例,为未来线性输水工程野生动物保护措施设计提供了重要的科学依据。

参考文献:

- 陈惠, 马吉平, 王思源. 2021. 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区综合科学考察[M]. 北京: 中国林业出版社.
- 陈立军, 肖文宏, 肖治术. 2019. 物种相对多度指数在红外相机数据分析中的应用及局限[J]. 生物多样性, 27(3): 243-248.
- 邓铭江, 王远超, 李江, 等. 2017. 沙漠地区大型供水工程建设的关键技术与方法[J]. 岩石力学与工程学报, 36(12): 3086-3093.
- 国家林业和草原局, 农业农村部. 2021. 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, 42(2): 605-640.
- 李勤, 邬建国, 寇晓军, 等. 2013. 相机陷阱在野生动物种群生态学中的应用[J]. 应用生态学报, 24(4): 947-955.
- 刘少英, 吴毅, 李晟. 2020. 中国兽类图鉴[M]. 福州: 海峡书局.
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 2021. 中国兽类名录(2021版)[J]. 兽类学报, 41(5): 487-501.
- 肖治术, 李欣海, 姜广顺. 2014. 红外相机技术在我国野生动物监测研究中的应用[J]. 生物多样性, 22(6): 683-684.
- 张相锋, 郭锋, 彭阿辉, 等. 2019. 京新高速公路哈腾套海保护区段野生动物通道监测研究[J]. 野生动物学报, 40(4): 848-854.
- April RM, Mahnoor R, Colleen CSC. 2020. Temporal clustering of prey in wildlife passages provides no evidence of a prey-trap[J/OL]. Scientific Reports, 10: 11489[2024-01-20]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67340-8>.
- Baechli J, Albanesi S, Bellis L. 2021. Effectiveness of crossings as wildlife passages for mammals in the Yungas of Argentina[J]. Journal for Nature Conservation, 59: 125944[2024-01-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125944>.
- Clevenger AP, Chruszcz B, Gunson K, et al. 2002. Roads and wildlife in the Canadian Rocky Mountain Parks—movements, mortality and mitigation[R]. Banff, Alberta, Canada: Final Report to Parks Canada.
- Clevenger AP, Huijser MP. 2009. Handbook for design and evaluation of wildlife crossing structures[R]. Washington, DC: Western Transportation Institute.
- Clevenger AP, Huijser MP. 2011. Wildlife crossing structure handbook design and evaluation in North America[R]. United States: Western Transportation Institute.
- Clevenger AP, Waltho N. 2000. Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada[J]. Conservation Biology, 14(1): 47-56.
- Clevenger AP, Waltho N. 2005. Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large animals[J]. Biological Conservation, 121: 453-464.
- Curatolo JA, Murphy SM. 1986. The effects of pipelines, roads and traffic on the movements of caribou, *Rangifer tarandus*[J]. The Canadian Field Naturalist, 100: 218-224.
- Evink G. 2002. Interaction between roadways and wildlife ecology, National Cooperative mitigation[J]. Intermountain Journal of Wildlife Management, 42: 646-650.
- Gagnon JW, Dodd NL, Sprague SC, et al. 2010. Preacher canyon wildlife fence and crosswalk enhancement project evaluation. State Route 260. Final Report-Project JPA 04-088[R]. Phoenix, AZ, USA: Arizona Game and Fish Department.
- Gregory A, Spence E, Beier P, et al. 2021. Toward best management practices for ecological corridor[J]. Land, 10(2): 140.
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2023. The IUCN red list of threatened species [DB/OL]. [2023-12-15]. <https://www.iucnredlist.org/>.
- Jackson SD, Griffin CR. 2000. A strategy for mitigating highway impacts on wildlife[M]// Messmer TA, West B. Wildlife and highways: seeking solutions to an ecological and socio-economic dilemma. Bethesda, Maryland: The Wildlife Society.
- Jodi AH, William ZL, Adina MM. 2006. Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation[M]. Washington, DC: Island Press.

(下转第716页)

- gers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape [J]. *Animal Conservation*, 6 (2) : 131-139.
- Obersoler V, Groff C, Iemma A, *et al.* 2017. The influence of human disturbance on occupancy and activity patterns of mammals in the Italian Alps from systematic camera trapping[J]. *Mammalian Biology*, 87(1) : 50-61.
- Pu GH, Feng B, Huang YH, *et al.* 2024. Synergistic effects of anthropogenic disturbances on giant pandas[J/OL]. *Journal of Wildlife Management*, 88 (3) : e22555 [2024-01-20]. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22555>.
- Reed SE, Merenlender AM. 2008. Quiet, nonconsumptive recreation reduces protected area effectiveness[J]. *Conservation Letters*, 1(3) : 146-154.
- Ridout MS. 2009. Estimating overlap of daily activity patterns from camera trap data[J]. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 14(3) : 322-337.
- Rowcliffe JM. 2023. Activity: animal activity atistics [EB/OL]. [2024-01-20]. <https://CRAN.R-project.org/package=activity>.
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 27(4) : 623-656.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, *et al.* 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options[M]. Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- Wang TM, Feng LM, Mou P, *et al.* 2016. Amur tigers and leopards returning to China: direct evidence and a landscape conservation plan[J]. *Landscape Ecology*, 31(3) : 491-503.
- Wang X, Huang JY, Connor TA, *et al.* 2019. Impact of livestock grazing on biodiversity and giant panda habitat [J]. *Journal of Wildlife Management*, 83(7) : 1592-1597.
- Wei W, Swaiagood RR, Pilfold NW, *et al.* 2020. Assessing the effectiveness of China's panda protection system[J]. *Current Biology*, 30(7) : 1280-1286.
- Yan RR, Xin XP, Yan YC, *et al.* 2015. Impacts of differing grazing rates on canopy structure and species composition in Hulunber Meadow Steppe[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 68(1) : 54-64.
- Yen SC, Ju YT, Shaner PJJ, *et al.* 2019. Spatial and temporal relationship between native mammals and free-roaming dogs in a protected area surrounded by a metropolis[J/OL]. *Scientific Reports*, 9(1) : 8161 [2024-01-20]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44474-y>.
- Zhang ZJ, Sheppard JK, Swaiagood RR, *et al.* 2014. Ecological scale and seasonal heterogeneity in the spatial behaviors of giant pandas[J]. *Integrative Zoology*, 9(1) : 46-60.

(上接第 703 页)

- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT. 2003. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape [J]. *Animal Conservation*, 6(2) : 131-139.
- Peris S, Morales J. 2004. Use of passages across a canal by wild mammals and related mortality [J]. *European Journal of Wildlife Research*, 50 : 67-72.
- Servheen C, Shoemaker R, Lawrence L. 2003. Wildlife use in relation to structure variables for a sampling of bridges and culverts under I-90 between Alberton and St. Regis, Montana[R]. Helena, Montana: Interim report to Montana Department of Transportation.
- Stuart JL, Robert GH, Clevenger AP. 2002. Do wildlife passages act as prey-traps?[J]. *Biological Conservation*, 107(2) : 135-145.
- Tull JC, Krausman PR. 2001. Use of a wildlife corridor by desert mule deer[J]. *The Southwestern Naturalist*, 46(1) : 81-86.