

三江源国家公园迁徙藏羚对野生动物通道的利用 ——以青藏铁路五北大桥为例

赛青高娃^{1,3#} 李宏奇^{2#} 王东^{1,3} 王子涵^{1,3} 连新明^{1,4*}

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001) (2 青海省环境工程技术评估中心, 西宁 810007) (3 中国科学院大学, 北京 100049) (4 青海省动物生态基因组学重点实验室, 西宁 810001)

关键词: 青藏铁路; 藏羚; 野生动物通道; 集群规模; 迁徙

中图分类号: Q958.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2022) 05-0601-08

The utilization of wildlife passages by migratory Tibetan antelope in Sanjiangyuan National Park: a case study of Wubei Bridge of Qinghai-Tibet Railway

Saiqinggaowa^{1,3#}, LI Hongqi^{2#}, WANG Dong^{1,3}, WANG Zihan^{1,3}, LIAN Xinming^{1,4*}

(1 Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

(2 Environmental Engineering Assessment Center of Qinghai Province, Xining 810007, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Qinghai Provincial Key Laboratory of Animal Ecological Genomics, Xining 810001, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Railway (QTR) crosses the migration routes of the Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) in the Sanjiangyuan National Park (SNP) and the female antelopes have to cross the QTR by wildlife passages to continue their migrations. In this study, a remote monitoring camera was set up near the Wubei Bridge to record the utilization of the bridge by migratory antelopes. Based on the monitoring data of the returning migration period from July to September 2019 and the calving migration period from April to June 2020, the results showed that: Tibetan antelopes crossed the Wubei Bridge mainly in the daytime and mostly in the morning. The peaks during the calving migration and the returning migration were in 09:00–12:59 and 11:00–11:59 respectively. Compared with the returning migration period, female antelopes gathered into smaller groups during the calving migration period, which was related to the sequence of roads to be crossed and the lower predation risk of calves in larger groups. We found individuals in larger groups spent less time crossing the Wubei Bridge. Larger groups could accelerate crossing speed and then reduce the average crossing time of individuals. However, there was no significant difference in the average crossing time of individuals between the two migratory periods, indicating that the presence of calves had little effect on the speed and time of antelope groups. In conclusion, there was a significant difference in the group size of Tibetan antelope between the returning and calving migration periods and the group size affected the average crossing time of individuals. We also detected a temporal pattern in the use of wildlife passage by Tibetan antelope.

Key words: The Qinghai-Tibet Railway; Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*); Wildlife passages; Group size; Migration

基金项目: 青海省应用基础研究计划项目 (2017-ZJ-724); 青海省重大专项“三江源区代表性动物基因资源保护和利用”项目; 中国科学院“西部之光”青年学者A类项目资助

作者简介: 赛青高娃 (1998-), 女, 硕士, 主要从事保护生物学研究;

李宏奇 (1962-), 男, 本科, 主要从事生态环境评估和保护工作. # 共同第一作者

收稿日期: 2022-03-25; **接受日期:** 2022-08-23

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: lianxinming@nwipb.cas.cn

道路在促进区域经济发展的同时,也影响着沿线野生动物的生存状况,如造成动物栖息地隔离或破碎化(李俊生等,2009;黄青东智等,2022)、车辆碰撞导致动物死亡(Abra *et al.*, 2018; Wadey *et al.*, 2018; Delgado *et al.*, 2019; Pagany, 2020)、阻隔两侧动物基因交流(Keller and Largiadere, 2003; 蔡志洲, 2020)等。目前,通常采用设立野生动物通道(孔亚平等, 2011)、围栏封闭道路(Clevenger *et al.*, 2001)、树立警示牌等措施来缓解道路对野生动物的负面影响。我国设立的第一个野生动物专用走廊为穿越河南董寨国家级鸟类自然保护区的高速公路南段,该路段为白冠长尾雉(*Syrnaticus reevesii*)、大灵猫(*Viverra zibetha*)、水獭(*Lutra lutra*)等国家级保护野生动物设立了专用通道(王成玉和陈飞, 2007; 李斌等, 2011),之后云南思小公路(Pan *et al.*, 2009)、青藏铁路(杨奇森等, 2005; 殷宝法等, 2006)、韶赣高速公路(李斌, 2012)等也分别针对亚洲象(*Elephas maximus*)、藏羚(*Pantholops hodgsonii*)、黑眶蟾蜍(*Bufo melanostictus schneider*)等野生动物规划并建设了生物走廊。

藏羚是青藏高原特有物种,除羌塘南部种群外,羌塘西部、中部和东部以及青海三江源等种群的雌性个体均具有长距离迁徙习性(Schaller, 1998)。由于青藏铁路横穿藏羚青海三江源种群的迁徙路线,为了确保藏羚的顺利迁徙以及道路两侧野生动物的种群交流,青藏铁路建设初期就规划并建设了23处桥梁下方通道、3处隧道上方通道和7处缓坡通道,共33处野生动物通道(杨奇森等, 2005)。在青藏铁路建成运营后,为杜绝缓坡通道导致的野生动物与列车的相撞隐患,所有缓坡通道被封闭,仅保留了其余26处野生动物通道。除了专设的野生动物通道,青藏铁路沿线还建设了诸多中小型桥梁和涵洞以利自然排水和动物迁徙。针对青藏铁路沿线野生动物对通道类型的利用与否以及种间差异的研究结果表明,狼(*Canis lupus*)、藏狐(*Vulpes ferrilata*)等中小型犬科食肉动物偏好利用小桥和涵洞,而藏野驴(*Equus kiang*)、藏羚等大中型食草动物则偏好利用大中型桥梁(杨奇森等, 2006; 孔飞, 2009)。

目前,藏羚基本适应了青藏铁路野生动物通道,并能够利用大中型桥梁通道满足日常休憩、

纳凉和穿越道路等行为需求(Wu *et al.*, 2021)。每年有超过97%的迁徙藏羚仅利用五北大桥这一通道穿越青藏铁路进而完成在越冬地和产仔地之间的往返迁徙(Xia *et al.*, 2007; 连新明等, 2012; Xu *et al.*, 2019)。受限于人工观察时段、技术手段以及天气状况等因素,以往研究均无法获取藏羚穿越五北大桥的完整数据(李耀增等, 2008; 付鹏等, 2011; 张洪峰等, 2009, 2016),从而导致结果分析不够深入。通过在青藏铁路五北大桥附近架设的远程监控摄像头,我们获得了藏羚上迁期和回迁期的完整记录,通过分析藏羚利用五北大桥的集群规模和时间节律,以及两个迁徙期个体通过五北大桥的时间差异,以探讨藏羚对动物通道的行为适应策略,也为今后在铁路、公路、输油管道等基础设施建设中做好野生动物保护工作提供科学借鉴。

1 研究方法

1.1 研究地区概况

本研究监测点位于青藏铁路五北大桥(北纬35°15'2.71", 东经93°09'45.12", 海拔4 680 m)。该桥位于青藏铁路可可西里和五道梁两个会让车站之间,距离五道梁车站约10 km,对应青藏公路K3002~3003里程碑。位于青藏铁路西侧的勒池草原是藏羚青海三江源种群的主要越冬地。每年4—6月上迁期,散布在勒池草原的雌性藏羚陆续前往青藏铁路沿线,汇集成或大或小的临时群利用动物通道穿越青藏铁路,随后跨越青藏公路前往可可西里腹地卓乃湖沿岸(连新明等, 2012)。7—9月回迁期,待怀孕母羚产仔后,携带幼羚的母仔群又先后经过青藏公路和青藏铁路返回越冬地(图1)。五北大桥是迁徙藏羚穿越青藏铁路的最主要通道(Xia *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2019)。

根据距五北大桥约10 km的五道梁气象站监测数据,该地区全年平均气温为-4.2℃,年降水量273.0~480.0 mm,年平均风速为4.1 m/s(巩俐等, 2020);五北大桥附近植被类型为高寒草原,植被低矮稀疏,优势种为紫花针茅(*Stipa purpurea*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*),植物生长期较短(马松江, 2007)。除藏羚外,该地区还分布有藏原羚(*Procapra picticaudata*)、藏野驴、狼等野生动物(靳铁治等, 2008)。

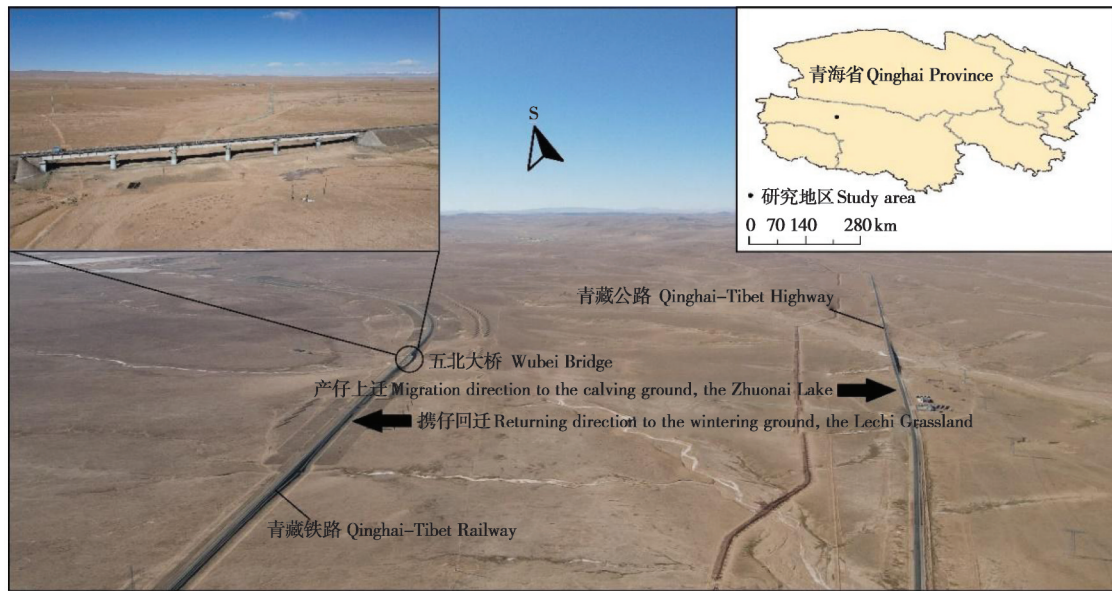


图1 青藏铁路五北大桥位置及藏羚迁徙方向

Fig. 1 Location of the Wubei bridge of the Qinghai-Tibet Railway and migration routes of female Tibetan antelopes

1.2 数据收集

利用青海省生态环境厅在五北大桥处架设的“青海生态之窗”远程监控摄像系统，对五北大桥实现全天 24 h 不间断监控并存储录像资料。每年 4—9 月藏羚迁徙期间，每天不定时通过控制平台查看摄像头是否朝向五北大桥，防止因各种因素造成的摄像头偏移，同时检查五北大桥附近是否有藏羚聚集，一旦发现集群藏羚，即刻确认视频录制系统正常运行。此外，有专人每周汇集视频文件进行人工筛查，确保不遗漏晨昏和夜晚以及无人值守期间通过五北大桥的藏羚。最后，将藏羚通过五北大桥的所有视频单独保存以用于后续分析。

藏羚迁徙起止日期的判断依据为连续 3 天有(无)藏羚集群穿越五北大桥记作藏羚迁徙开始(结束)日期。同时，从三江源越冬地至可可西里产仔地的迁徙记作上迁期，产仔后返回越冬地的在途时间记作回迁期。

1.3 数据分析

由于五北大桥所在地海拔高，气候恶劣，监控设备和远程传输系统经常发生故障，因此，自 2016 年监控摄像系统架设以来仅获得 2019 年 7—9 月回迁期和 2020 年 4—6 月上迁期的完整视频资料，通过自动识别和人工计数相结合的方法记录了藏羚穿越五北大桥的日期、起止时间和集群规

模。随后，根据每个集群的通行总时长和集群大小，得到个体通过五北大桥的平均时间。以 1 h 为单位划分时段，统计每日不同时间段的迁徙个体数和迁徙群次。利用 Kolmogorov-Smirnov test 正态分布检验，结果显示藏羚上迁期与回迁期穿越五北大桥的集群大小和个体平均通过时间均符合正态分布，故采用独立样本 t 检验分析藏羚上迁和回迁两个时期个体平均通过时长的差异性。藏羚同一迁徙期内不同时间段以及不同月份间的集群大小差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行分析。采用 Pearson 相关性分析迁徙期间藏羚集群大小和该集群个体平均通过时间之间的关系。所有的统计分析均通过 IBM SPSS statistics 22.0 进行， $P < 0.05$ 为差异显著。数据以平均值 $\pm$ 标准误 (mean $\pm$ SE) 表示。

2 结果

2.1 迁徙藏羚利用五北大桥的集群规模

2019 年藏羚回迁期间共有 94 群 6 321 只藏羚个体通过五北大桥返回勒池草原越冬地，该时期跨越了 7、8、9 月：7 月 22—31 日 (11 群，457 只)、8 月 2—31 日 (76 群，5 843 只)、9 月 1—3 日 (7 群，21 只)。藏羚回迁期平均集群规模为 (67.24 ± 13.73) 只。其中，1~20 只的集群 50 群 (53.19%)，21~50 只

的集群 14 群 (14.89%), 51 ~ 100 只的集群 11 群 (11.70%), 100 只以上的集群 19 群 (20.21%)。2020 年上迁期共记录到 116 群 3 432 只藏羚穿越五北大桥前往可可西里, 该时期跨越了 4、5、6 月: 4 月 18—30 日 (27 群, 750 只)、5 月 1—31 日 (50 群, 1 734 只)、6 月 1—21 日 (39 群, 948 只)。藏羚上迁期平均集群规模为 (29.59 ± 2.95) 只, 明显小于回迁期 ($P < 0.01$)。其中, 1 ~ 20 只的集群 63 群 (54.31%), 21 ~ 50 只的集群 31 群 (26.72%), 51 ~ 100 只的集群 16 群 (13.79%), 100 只以上的集群

6 群 (5.17%)。同一迁徙期内不同月份间的集群大小差异均不显著 (回迁期: $F_{2,91} = 1.211$, $P = 0.303$; 上迁期: $F_{2,113} = 1.218$, $P = 0.300$)。

2.2 迁徙藏羚穿越五北大桥的日规律

迁徙藏羚利用五北大桥的时段为 07:00—22:00, 集中于昼间 (图 2, 3)。藏羚回迁期通过五北大桥的时段相对集中, 而上迁期通过五北大桥的时段相对分散。迁徙期间各时间段集群大小差异均不显著 (回迁期: $F_{14,80} = 1.216$, $P = 0.281$, 图 2; 上迁期: $F_{14,102} = 1.630$, $P = 0.083$, 图 3)。在回迁期,

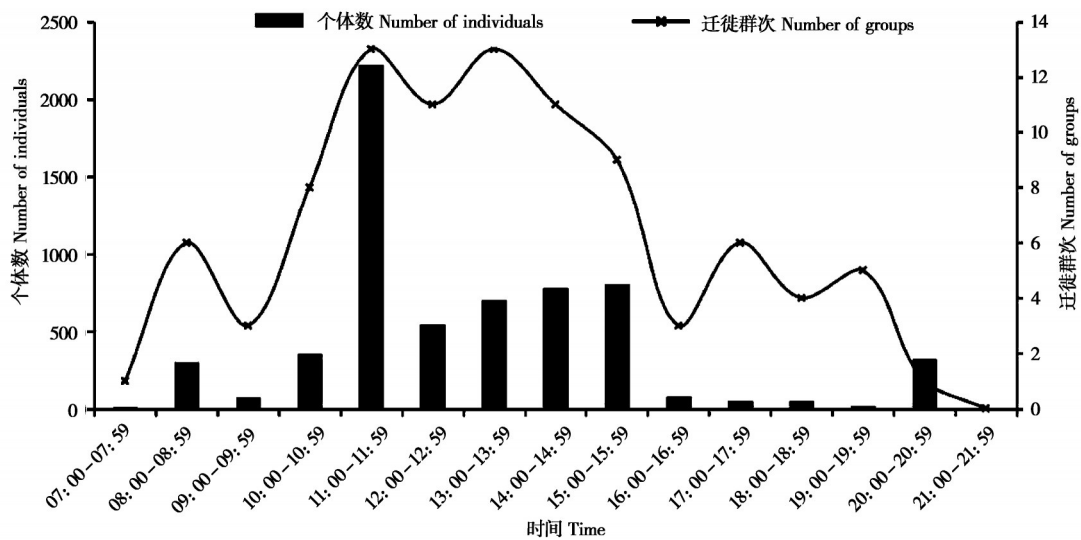


图2 2019年藏羚回迁期通过五北大桥的日规律变化

Fig. 2 Diurnal rhythm of Tibetan antelope crossing the Wubei Bridge during the returning migration period in 2019

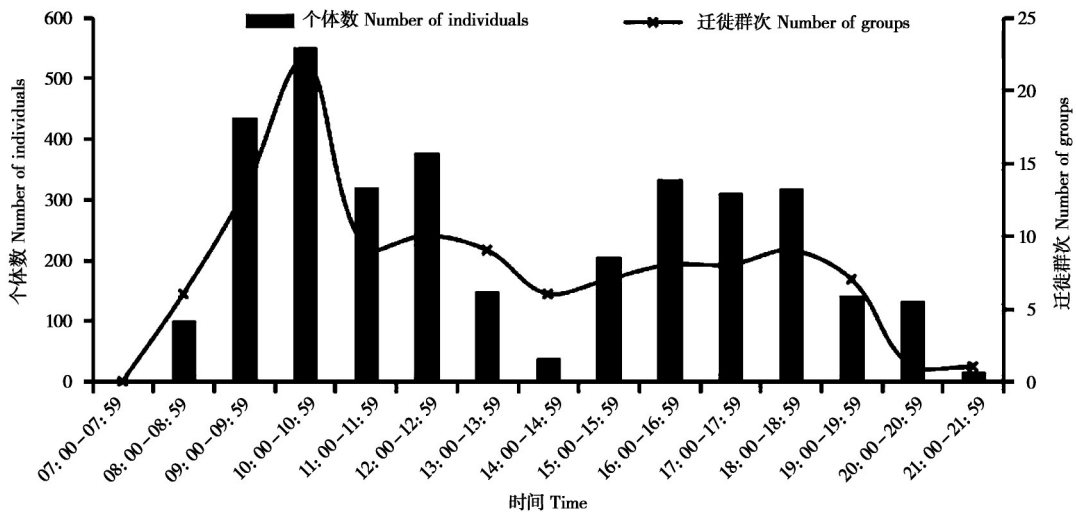


图3 2020年藏羚上迁期通过五北大桥的日规律变化

Fig. 3 Diurnal rhythm of Tibetan antelope crossing the Wubei Bridge during the calving migration period in 2020

藏羚通过五北大桥的高峰期为 11:00—11:59, 该时段共有 13 群 2 224 只藏羚个体通过, 占回迁期藏羚个体总数的 35.18%, 藏羚平均集群规模为 (171.08 ± 78.18) 只; 13:00—13:59 也为迁徙高峰, 该时段共有 13 群 698 只藏羚个体通过五北大桥, 平均集群规模为 (53.69 ± 14.01) 只。

与藏羚回迁期相比, 上迁期通过五北大桥的时段相对分散, 主要于 09:00—12:59 穿越通道, 该时段藏羚迁徙个体数为 1 682 只, 占上迁期藏羚个体总数的 49.01%。迁徙群和迁徙个体高峰均在 10:00—10:59, 此时段共有 22 群 551 只个体通过五北大桥, 占迁徙个体总数的 16.05%, 该时段平均集群规模为 (25.05 ± 6.90) 只。

2.3 藏羚个体通过五北大桥的时间差异

回迁期与上迁期藏羚个体通过五北大桥的平均时长分别为 (5.61 ± 0.64) s 和 (5.37 ± 0.94) s, 检验结果表明无显著差异 ($P = 0.857$)。另外, 藏羚集群规模与集群中个体平均通过时长呈极显著负相关 ($r = -0.231$, $P < 0.01$), 说明随着藏羚集群规模的增大, 集群中个体的平均通过时间减少。

3 讨论

青藏铁路横穿藏羚青海三江源种群的迁徙路线, 而 97% 以上的迁徙藏羚利用五北大桥穿越青藏铁路 (Xia *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2019), 这一现象与五北大桥所处地形、桥体开阔率以及位置靠近藏羚跨越青藏公路的主要路段有关 (连新明等, 2012), 为深入研究藏羚对动物通道的利用状况提供了便利。针对藏羚迁徙原因, 相继出现躲避捕食者、蚊虫叮咬和人类干扰 (Schaller *et al.*, 2006), 躲避丰富的固态降水 (武永华, 2007), 以及集体记忆 (苏建平等, 2017) 等猜想, 但上述猜想均无法解释为何只有雌性藏羚迁徙这一问题, 导致无法令人完全信服。

3.1 藏羚上迁期与回迁期的数量差异

本研究中 2019 年回迁个体数量远大于 2020 年上迁个体数量, 两者之间的差异可能来自以下三方面的原因: (1) 迁徙藏羚的组成在不同迁徙期存在差异。上迁期的迁徙藏羚主要为待产雌羚、1 岁雌性幼羚, 以及其他参与迁徙的成年雌性个体; 而回迁期除了当年上迁期的个体外, 还包括当年出生的幼羚, 以及可能包含来自新疆和西藏至卓

乃湖附近的迁徙个体; (2) 上迁期不包含前一年出生的雄性幼羚, 而回迁期包含当年出生的所有个体。雄性幼羚在出生当年冬季交配期结束后即进入雄性藏羚集群, 与雌性藏羚分开活动直至次年冬季交配季来临, 届时雌雄个体才会混群形成交配群。因此, 次年 4—6 月上迁期的集群中鲜见雄性个体, 从而导致上迁期数量较少。 (3) 并非所有的雌性藏羚均参与迁徙。2007 年共记录到 4 274 只 (上迁 1 884 只, 回迁 2 390 只) 藏羚通过五北大桥 (李耀增等, 2008), 而在本研究中共记录到 9 753 只藏羚 (上迁 3 432 只, 回迁 6 321 只) 穿越五北大桥。尽管这两个数值均存在上迁期和回迁期同一个体的重复计数, 但不可否认, 随着迁徙藏羚对五北大桥适应能力增强, 该地区藏羚种群的数量得以增加 (Wu *et al.*, 2021)。

青藏铁路通车 (2006 年 7 月 1 日) 之前, 藏羚上迁期出现在青藏公路与青藏铁路沿线的最早时间为 5 月中下旬至 6 月, 回迁期到达道路沿线的时间为 8 月初 (李耀增等, 2008)。而近年来的监测结果表明, 藏羚上迁日期提前至 5 月初, 而回迁藏羚到达青藏公路沿线最早为 8 月初 (数据来自与三江源国家公园可可西里管理处工作人员交流)。本研究中, 藏羚在上迁期和回迁期开始利用五北大桥的最早时间分别为 4 月 18 日和 7 月 22 日。迁徙启动日期之间的差异与监测方法密切相关。本研究中的远程监控系统可以实现 24 h 不间断监测, 能够记录穿越五北大桥的所有藏羚个体和事件, 但是以往文献和交流中的数据均来自于人工观察, 受限于人工观察的启动日期、观察时段以及天气状况等诸多原因, 从而造成较大的监测与计数误差。排除记录方法的误差, 藏羚对道路适应能力的增强也会成为该物种提前到达青藏铁路和公路沿线的原因之一。随着藏羚对道路的适应, 道路附近有可能成为藏羚日常活动的栖息地, 并能够自由穿越动物通道 (Wu *et al.*, 2021)。

3.2 迁徙藏羚利用五北大桥的日规律与集群规模

本研究中, 迁徙藏羚穿越通道的时段主要在昼间, 且主要集中于 10:00—11:59, 这与藏羚为昼行性动物以及中午较为活跃的行为活动节律密切相关 (连新明等, 2007)。

藏羚回迁期和上迁期通过五北大桥的时段存在差异, 回迁期时段相对集中而上迁期时段相对

分散,这可能与藏羚在不同迁徙期穿越青藏铁路和青藏公路的先后顺序有关。藏羚从产仔地返回越冬地的回迁期,需要先穿越青藏公路后再穿越青藏铁路。青藏公路车流量较大,存在明显的节律变化(连新明等,2012)。藏羚往往选择08:00—10:00车流量较少的时段通过青藏公路,随后向五北大桥附近集聚,导致11:00—11:59达到利用五北大桥的高峰期。张洪峰等(2016)沿青藏公路统计了2006—2007年藏羚上迁期和回迁期的平均集群规模分别为 (26.3 ± 2.8) 只和 (12.5 ± 0.9) 只,而本研究藏羚通过五北大桥的平均集群规模为 (64.89 ± 12.96) 只,高于青藏公路沿线的统计数据。这说明藏羚在回迁期穿越五北大桥时存在小集群汇集成大集群后再穿越动物通道的现象,这也可能与回迁期藏羚集群中出现幼羚有关。集群中幼羚的存在导致该集群面临的捕食风险要高于无幼羚的上迁期雌性群,因此回迁期集群规模的增加可以降低个体被捕食的风险,从而增大幼羚的成活率(Lian *et al.*, 2007; 连新明等, 2007; Michelena *et al.*, 2012)。

藏羚上迁期穿越通道的时间较分散,没有明显偏好性,这与藏羚迁徙通过青藏铁路和青藏公路的先后顺序有关。上迁期间,藏羚从越冬地先到达青藏铁路。由于青藏铁路运行班次和维修带来的人为活动全年时段相对固定,且除通道外铁路全线围栏封闭,对藏羚的影响较小,捕食风险较低(苗紫燕等, 2020; Wu *et al.*, 2021),藏羚可以迅速通过五北大桥,从而也降低了小集群汇集成大集群的概率。这一现象恰好与本文中两个迁徙期间集群规模存在较大差异相印证。

3.3 藏羚个体利用五北大桥的平均通过时长差异

本研究结果表明,迁徙藏羚个体通过五北大桥的平均时长与集群规模呈极显著负相关,也就是集群规模越大,集群穿越动物通道的时长越短。但在个体水平,回迁期和上迁期个体平均通过五北大桥的时长并未表现出显著差异,这说明回迁中幼羚对藏羚穿越通道的速度和时长影响较小。回迁期迁徙藏羚到达五北大桥时,幼羚已接近一月龄(Buho *et al.*, 2011),此时幼羚的短时运动速度和成年藏羚相差无几,能够适应集群的快速移动。

综上所述,远程监控摄像机可以高效记录野生动物对道路动物通道的利用情况,有效弥补人

工监测伴随的诸多弊端,为探讨动物利用野生动物通道的行为策略提供数据支持,进而为国家基础设施建设过程中可能遇到的野生动物保护问题提供科学的解决思路。

参考文献:

- Abra F D, Huijser M P, Pereira C S, Ferraz K M P M B. 2018. How reliable are your data? Verifying species identification of road-killed mammals recorded by road maintenance personnel in São Paulo State, Brazil. *Biological Conservation*, **225**: 42–52.
- Buho H, Jiang Z, Liu C, Yoshida T, Mahamut H, Kaneko M, Asakawa M, Motokawa M, Kaji K, Wu X, Otaishi N, Ganzorig S, Masuda R. 2011. Preliminary study on migration pattern of the Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) based on satellite tracking. *Advances in Space Research*, **48** (1): 43–48.
- Cai Z Z. 2020. Case study on the design of expressway wildlife bridge. *Environmental Impact Assessment*, **42** (3): 15–18, 23. (in Chinese)
- Clevenger A P, Chruszcz B, Gunson K E. 2001. Highway mitigation fencing reduces wildlife–vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin*, **29** (2): 646–653.
- Delgado J D, Durán Humia J, Rodríguez Pereiras A, Rosal A, Del Valle Palenzuela M, Morelli F, Arroyo Hernández N L, Rodríguez Sánchez J. 2019. The spatial distribution of animal casualties within a road corridor: Implications for roadkill monitoring in the southern Iberian rangelands. *Transportation Research Part D*, **67**: 119–130.
- Fu P, Zhang Y, Wu X M, Wang G L. 2011. Validity analysis on animal passages along Qinghai–Tibet Railway. *Environmental Science and Management*, **36** (2): 98–101, 106. (in Chinese).
- Gong L, Wang F K, Li J F, Ye Y J, Li L H, Deng S Y. 2020. Characteristics of soil wind erosion and analysis of meteorological influencing factors in Wudaoliang area. *Qinghai Prataculture*, **29** (3): 59–63. (in Chinese)
- Huang Q D Z, Chen L Y, Li S P, Sun Z Y, Yang M X, Zhang D X, Li C X, Mao R R, Li Z Y, Zhang L X. 2022. Effects of roads on the abundance and habitat of Tibetan wild ass and Tibetan gazelle in the Yellow River Source Zone of Sanjiangyuan National Park. *Acta Theriologica Sinica*, **42** (1): 34–48. (in Chinese)
- Jin T Z, Wu X M, Su L N, Zhang H F, Shen J L. 2008. Distribution survey of main wildlife around wildlife passage across the Qinghai–Tibet Railway. *Chinese Journal of Wildlife*, **29** (5): 251–253. (in Chinese)
- Keller I, Largiadèr C R. 2003. Recent habitat fragmentation caused by major roads leads to reduction of gene flow and loss of genetic variability in ground beetles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **270** (1513): 417–423.
- Kong F. 2009. Adaptation of Tibetan antelope to the wildlife passage of Qinghai–Tibet Railway and behavioral studies during crossing

- the passage. Master thesis. Xi'an: Northwestern University. (in Chinese)
- Kong Y P, Wang Y, Zhang F. 2011. Review on road-effect zone of wildlife. *Sichuan Journal of Zoology*, **30** (6): 986–991, 1021. (in Chinese)
- Lian X M, Li X X, Xu T. 2012. Avoidance distances of four ungulates from roads in Kekexili and related protection suggestions. *Chinese Journal of Ecology*, **31** (1): 81–86. (in Chinese)
- Lian X M, Zhang T Z, Cao Y F, Cai Z Y, Su J P. 2007. Diurnal behavioral time budgets and activity rhythm of the female Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) in summer. *Acta Theriologica Sinica*, **27** (1): 53–57. (in Chinese)
- Lian X M, Zhang T Z, Cao Y F, Su J P, Thirgood S. 2007. Group size effects on foraging and vigilance in migratory Tibetan antelope. *Behavioural Processes*, **76**: 192–197.
- Li B. 2012. Study on effectiveness of two types animal passage for amphibians conservation and improvement factors in Shaogan expressway (Guangdong Province). Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- Li B, Luan X F, Ma W C. 2011. Study on influences of expressway on wild animals and their protective measures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **39** (18): 11131–11134, 11222. (in Chinese)
- Li J S, Zhang X L, Wu X P, Quan Z J, Fan J T. 2009. Ecological impacts from road traffic: a review. *Ecology and Environmental Sciences*, **18** (3): 1169–1175. (in Chinese)
- Li Y Z, Zhou T J, Jiang H B. 2008. Utilization effect of wildlife passages in Golmud–Lhasa section of Qinghai–Tibet Railway. *China Railway Science*, **29** (4): 127–131. (in Chinese)
- Ma S J. 2007. Current situation investigation of grassland resource in Tanggula Mountain and Kekexili in Qinghai–Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, **24** (9): 15–19. (in Chinese)
- Miao Z Y, Wu T, Chen J P, Wang D, Li H Q, Lian X M. 2020. Effect of the Qinghai–Tibet Railway on diurnal behavioural time budgets in male Tibetan antelopes. *Acta Theriologica Sinica*, **40** (2): 135–142. (in Chinese)
- Michelena P, Pillot M H, Henrion C, Toulet S, Boissy A, Bon R. 2012. Group size elicits specific physiological response in herbivores. *Biology Letters*, **8** (4): 537–539.
- Pagany R. 2020. Wildlife–vehicle collisions–Influencing factors, data collection and research methods. *Biological Conservation*, **251**: 108758.
- Pan W J, Liu L, Luo A D, Zhang L. 2009. Corridor use by Asian elephants. *Integrative Zoology*, **4** (2): 220–231.
- Schaller G B. 1998. *Wildlife of the Tibetan Steppe*. Chicago: University of Chicago Press.
- Schaller G B, Kang A L, Cai X B, Liu Y L. 2006. Migratory and calving behavior of Tibetan antelope population. *Acta Theriologica Sinica*, **26** (2): 105–113.
- Su J P, Chen J R, Lian X M, Zhang T Z. 2017. A hypothesis on the cause of seasonal migration of Tibetan antelope. *World Heritages*, **8** (4): 80–85. (in Chinese)
- Wadey J, Beyer H L, Saaban S, Othman N, Leimgruber P, Campos-Arceiz A. 2018. Why did the elephant cross the road? The complex response of wild elephants to a major road in Peninsular Malaysia. *Biological Conservation*, **218**: 91–98.
- Wang C Y, Chen F. 2007. Exploring the impact of rural highways on wildlife and protection measures. *Highway*, (12): 97–102. (in Chinese)
- Wang Y, Zhou H P, Wang Y D, Guan L, Kong Y P. 2017. Methods of designing amphibian corridors crossing highway. *Transport Research*, **3** (4): 16–21. (in Chinese)
- Wei J F. 2010. Study of wildlife passage setting in railroad construction. *Railway Energy Saving and Environmental*, **37** (1): 5–7. (in Chinese)
- Wu T, Lian X M, Li H Q, Wang D, Chen J P, Miao Z Y, Zhang T Z. 2021. Adaptation of migratory Tibetan antelope to infrastructure development. *Ecosystem Health and Sustainability*, **7** (1): 287–292.
- Wu Y H. 2007. Adaptation of migration of female Tibetan antelope for precipitation distribution on the Qinghai–Tibet Plateau. *Acta Theriologica Sinica*, **27** (3): 298–307. (in Chinese)
- Xu W J, Huang Q Y, Stabach J, Buho H, Leimgruber P. 2019. Railway underpass location affects migration distance in Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*). *PLoS ONE*, **14** (2): e0211798.
- Xia L, Yang Q S, Li Z C, Wu Y H, Feng Z J. 2007. The effect of the Qinghai–Tibet Railway on the migration of Tibetan antelope *Pantholops hodgsonii* in Hoh-xil National Nature Reserve, China. *Oryx*, **41** (3): 352–357.
- Yang Q S, Xia L, Wu X M. 2005. Wildlife passage and Tibetan antelope conservation on the Qinghai–Tibet Railway line. *Bulletin of Biology*, **40** (5): 15–17. (in Chinese)
- Yang Q S, Xia L, Wu Y H, Zhu L, Huang W, He J B, Zhang Q, Bu Q, Ge L. 2006. Adaptation of wild animals to the wildlife passage of Qinghai–Tibet Railway. Shanghai: The Third National Symposium on Wildlife Ecology and Resource Conservation, 14. (in Chinese)
- Yin B F, Huai H Y, Zhang Y L, Zhou L, Wei W H. 2006. Influence of Qinghai–Tibet Railway and highway on wild animal's activity. *Acta Ecologica Sinica*, **26** (12): 3917–3923. (in Chinese)
- Zhang H F, Che L F, Feng T, Su L N, Hu H, Li D F, Wu X M. 2016. Analysis of group characteristics of Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) in migration season along the Qinghai–Tibet Railway. *Genomics and Applied Biology*, **35** (2): 329–333. (in Chinese)
- Zhang H F, Feng T, Ji M Z, Kong F, Wu X M. 2009. Monitoring study on the utilization of Qinghai–Tibet Railway corridor by Tibetan antelope and other plateau wildlife. *Bulletin of Biology*, **44** (10): 8–10. (in Chinese)
- 马松江. 2007. 青藏高原唐古拉山及可可西里草地资源现状调查研究. *草业科学*, **24** (9): 15–19.
- 孔飞. 2009. 藏羚羊对青藏铁路野生动物通道的适应性及穿越通道时的行为学研究. 西安: 西北大学硕士学位论文.
- 孔亚平, 王云, 张峰. 2011. 道路建设对野生动物的影响域研究进

- 展. 四川动物, **30** (6): 986-991, 1021.
- 王成玉, 陈飞. 2007. 山区高速公路对野生动物的影响及保护措施探讨. 公路, (12): 97-102.
- 付鹏, 张宇, 吴晓民, 王光磊. 2011. 青藏铁路野生动物通道有效性分析. 环境科学与管理, **36** (2): 98-101, 106.
- 巩俐, 王发科, 李积芳, 冶云娟, 李路华, 邓生寅. 2020. 五道梁地区土壤风蚀变化特征及气象影响因子分析. 青海草业, **29** (3): 59-63.
- 杨奇森, 夏霖, 吴晓民. 2005. 青藏铁路线上的野生动物通道与藏羚羊保护. 生物学通报, **40** (5): 15-17.
- 杨奇森, 夏霖, 武永华, 朱磊, 黄薇, 何静波, 张乾, 布琼, 格莱. 2006. 野生动物对青藏铁路野生动物通道的适应. 上海: 野生动物生态与资源保护第三届全国学术研讨会论文摘要集, 14.
- 苏建平, 陈家瑞, 连新明, 张同作. 2017. 藏羚羊季节性迁徙成因猜想. 世界遗产, **8** (4): 80-85.
- 张洪峰, 封托, 姬明周, 孔飞, 吴晓民. 2009. 青藏铁路小桥被藏羚羊等高原野生动物利用的监测研究. 生物学通报, **44** (10): 8-10.
- 张洪峰, 车利锋, 封托, 苏丽娜, 胡罕, 李涤非, 吴晓民. 2016. 青藏铁路沿线藏羚羊迁徙期集群特征分析. 基因组学与应用生物学, **35** (2): 329-333.
- 李俊生, 张晓岚, 吴晓蕾, 全占军, 范俊韬. 2009. 道路交通的生态影响研究综述. 生态环境学报, **18** (3): 1169-1175.
- 李斌. 2012. 韶赣高速公路野生动物通道两栖动物保护效果及改进措施研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 李斌, 栾晓峰, 马武昌. 2011. 高速公路对野生动物的影响及其保护措施研究. 安徽农业科学, **39** (18): 11131-11134, 11222.
- 李耀增, 周铁军, 姜海波. 2008. 青藏铁路格拉段野生动物通道利用效果. 中国铁道科学, **29** (4): 127-131.
- 连新明, 张同作, 曹伊凡, 蔡振媛, 苏建平. 2007. 夏季雌性藏羚羊昼间行为时间分配及活动节律. 兽类学报, **27** (1): 53-57.
- 连新明, 李晓晓, 徐图. 2012. 可可西里四种有蹄类动物对道路的回避距离及保护建议. 生态学杂志, **31** (1): 81-86.
- 武永华. 2007. 雌性藏羚羊迁徙对青藏高原降水时空分布的适应性分析. 兽类学报, **27** (3): 298-307.
- 苗紫燕, 吴彤, 陈佳萍, 王东, 李宏奇, 连新明. 2020. 青藏铁路对雄性藏羚羊行为时间分配的影响. 兽类学报, **40** (2): 135-142.
- 殷宝法, 淮虎银, 张镔锂, 周乐, 魏万红. 2006. 青藏铁路、公路对野生动物活动的影响. 生态学报, **26** (12): 3917-3923.
- 黄青东智, 陈刘阳, 李尚鹏, 孙章运, 杨明新, 张德喜, 李成先, 毛锐锐, 李泽宇, 张立勋. 2022. 道路对三江源国家公园黄河源园区藏野驴和藏原羚种群数量及其栖息地的影响. 兽类学报, **42** (1): 34-48.
- 靳铁治, 吴晓民, 苏丽娜, 张洪峰, 沈均梁. 2008. 青藏铁路野生动物通道周边主要野生动物分布调查. 野生动物, **29** (5): 251-253.
- 蔡志洲. 2020. 高速公路野生动物桥设计实例研析. 环境影响评价, **42** (3): 15-18, 23.