



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目： 青藏公路和铁路对青藏高原四种典型有蹄类动物的叠加阻隔和回避影响
作者： 王云，关磊，杜丽侠，曲家鹏，王明月，韩用顺，杨艳刚，周红萍，孔亚平
DOI： 10.13292/j.1000-4890.202104.015
收稿日期： 2020-08-11
网络首发日期： 2021-02-02
引用格式： 王云，关磊，杜丽侠，曲家鹏，王明月，韩用顺，杨艳刚，周红萍，孔亚平. 青藏公路和铁路对青藏高原四种典型有蹄类动物的叠加阻隔和回避影响. 生态学杂志. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202104.015>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13292/j.1000-4890.202104.015

青藏公路和铁路对青藏高原四种典型有蹄类动物的叠加阻隔和回避影响

王云¹ 关磊¹ 杜丽侠² 曲家鹏³ 王明月^{1,4} 韩用顺⁴

杨艳刚¹ 周红萍¹ 孔亚平^{1*}

(¹交通运输部科学研究院, 北京 100029; ²世界自然基金会(瑞士)北京代表处, 北京 100012; ³中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 100012; ⁴湖南科技大学, 湖南湘潭 411201)

摘要 青藏公路或铁路对藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)等青藏高原特有种造成了阻隔影响, 然而两条线路的叠加阻隔影响至今未见报道。通过2014—2019年连续的现场调查结合前人自2006年的现场研究数据积累, 发现青藏公路和铁路仅对藏羚羊产生显著的叠加阻隔影响, 且随着两条线路间距的增大, 影响有减小的趋势, 两条线路叠加对藏野驴(*Equus kiang*)、藏原羚(*Procapra picticaudata*)和野牦牛(*Bos mutus*)3种有蹄类动物无显著叠加影响; 藏羚羊对青藏公路交通干扰的适应周期约为4年, 而藏野驴和藏原羚的适应周期仅为2年; 交通量与4种有蹄类动物的回避距离关系不大。未来青藏高速公路很可能与现有青藏公路和铁路平行建设, 根据现有经验, 在藏羚羊迁徙通道处, 高速公路线位与现有两条线路间距至少在1.5 km以上为佳。由于藏羚羊对交通干扰适应能力较差, 应配合营造起伏地形、遮光降噪的工程措施等减少交通干扰对藏羚羊迁徙的影响, 帮助其尽快适应高速公路动物通道。目前4种有蹄类动物基本适应了青藏公路的交通干扰, 但人为干扰仍需减少; 有必要针对青藏高速公路开展建设前、中、后不同阶段的野生动物干扰的持续观测。

关键词 阻隔影响; 道路影响域; 回避距离; 叠加影响; 道路生态学

Overlapping barrier and avoidance effects of the Qinghai-Tibet highway and railway on four typical ungulates on the Tibetan plateau. WANG Yun¹, GUAN Lei¹, DU Li-xia², QU Jia-peng³, WANG Ming-yue^{1,4}, HAN Yong-shun⁴, YANG Yan-gang¹, ZHOU Hong-ping¹, KONG Ya-ping¹(¹China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; ²World Wide Fund for Nature Beijing Office, Beijing 100012, China; ³Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 100012, China; ⁴Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China).

Abstract: Previous studies indicated that the Qinghai-Tibet highway and railway had barrier effects (wildlife crossing roads/railways are severely affected by traffic, resulting in significant differences in the distribution and frequency of wildlife on both sides of the road/railway) on the migration of the Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) and other endemic species on the Tibetan plateau. However, no study had focused on the overlapping barrier effect of the two transportation routes. Here we combined and compared data of the avoidance distance (the distance at which wildlife movements were affected by the presence of the road) caused by road traffic disturbance of four typical ungulates from 2006 to 2010 with field monitoring data from 2014 to 2019. Of the four species, we found there was an overlapping barrier effect only on the Tibetan antelope, and the effect lessened with increased distance between the two transportation

中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20190610, 20200609)和深圳市一个地球自然基金会项目(1.1.03.01, 1.3c.01.02)资助。

收稿日期: 2020-08-11 接受日期: 2021-01-06

*通讯作者 E-mail: ypkong@163.com

routes. The adaptation period (i.e., the amount of time it takes wildlife avoidance of the highway to reach a stable level) of Tibetan antelope along the highway was about 4 years, while the adaptation periods for Tibetan gazelle (*Procapra picticaudata*) and kiang (*Equus kiang*) were both about 2 years. Traffic volume did not have a significant impact on the avoidance distance of these four ungulates. In the future, a new expressway is likely to be built parallel to the existing highway and railway. Based on existing knowledge, the distance between the expressway and the existing highway and railway should be at least 1.5 km to accommodate the migration of Tibetan antelopes. Although the four ungulate species had the ability to adapt to the presence of the highway, reducing human disturbance would still be beneficial. For example, creating undulating terrain and designing measures that will screen vehicle lights and block traffic noise would help mitigate impacts to the Tibetan antelope migration. We recommend that continuing to monitor wildlife activity prior to, during, and after the expressway's construction.

Key words: barrier effect; road effect-zone; avoidance distance; overlapping effect; road ecology

全球交通建设和运营已经对野生动物造成多种复杂而深刻的负面影响,包括公路交通致死野生动物、阻隔野生动物移动、野生动物回避交通干扰形成“道路影响域”、交通线路成网后造成栖息地破碎化等,甚至带来部分野生动物种群的濒危和灭绝(Van der Ree *et al.*, 2015; Collinson *et al.*, 2019; Pinto *et al.*, 2020)。我国交通建设对野生动物的阻隔和回避影响研究已经在青藏公路和铁路(裘丽等, 2004; Buho *et al.*, 2011; 连新明等, 2012; 王云等, 2017)、共玉高速公路(王云等, 2020)、长白山区公路(王云等, 2016)、若尔盖湿地公路(戴强等, 2006)、思小高速公路(Pan *et al.*, 2009)等公路沿线开展。在青藏高原,青藏公路和铁路已经对藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)等有蹄类动物造成了回避、阻隔等影响,青藏公路和铁路交错并行,野生动物在靠近和穿越两条交通线路之时面对的是双重叠加影响,已有研究仅仅考虑的是单条线路的影响,在青藏公路和铁路对野生动物叠加影响方面研究考虑很少(王云等, 2014)。

青藏高速公路是国家“71118”高速公路网中京藏高速公路尚未建设的最后一段,是重要战略基础设施。工程建设面临“高寒缺氧、多年冻土和生态脆弱”三大难题,环境保护是本路建设的重要制约因素之一(陈济丁等, 2014)。工程布线将与青藏公路和铁路平行,野生动物及栖息地将面对线形工程的三重干扰。目前公路和铁路的双重叠加影响将为未来高速公路建设的野生动物保护提供理论依据和技术支持。

在青藏公路对野生动物回避影响方面,目前的文献基本为 10 年前的研究(连新明等, 2012),野生动物对交通干扰有适应的趋势,目前野生动物对公路交通适应程度如何值得进一步跟踪监测。本研究提出 4 种典型物种对交通干扰的适应周期,有助于深入理解交通干扰对高原典型物种的影响机制。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

选择青藏公路昆仑山口至五道梁(公路里程桩号: K2900—K3009)路段开展调查研究,路段西北侧为可可西里国家级自然保护区,东南侧为三江源国家级自然保护区。该区段地形平坦,视野良好,而且是青藏路沿线为数不多的没有放牧活动的地区,可以将外界环境对野生有蹄类动物数量统计的影响降到最低,故而选择该区域进行研究。本路段也是前人研究最为集中的路段(裘丽等, 2004; 连新明等, 2012; 王云等, 2017)。该路段公路与铁路基本平行分布,间距从 0 到约 3 km 不等。

1.2 研究物种

鉴于藏羚羊、藏野驴(*Equus kiang*)、野牦牛(*Bos mutus*)和藏原羚(*Procapra picticaudata*)等4种有蹄类动物,保护级别高、路侧常见,且藏羚羊为季节性迁徙物种(每年迁徙穿越青藏公路和铁路各2次),选择这4种有蹄类动物为典型物种,开展研究。

1.3 调查方法

沿着昆仑山口-五道梁段,结合现场调查和遥感影像,选择了2个研究路段进行对比分析:K2920—K2940约20 km路段,两条线路间距最大值约2.4 km,现场调查发现较大间距有利于野生动物自由活动,似乎不受公路和铁路的干扰(图1);青藏公路K2940—K2982约42 km路段,两条线路间距最大值约0.5 km,现场调查发现较小间距形成的狭窄走廊带受公路和铁路交通干扰较大,似乎不利于野生动物活动。我们于2014—2019年的每年5—6月藏羚羊上迁、7—8月回迁、11—12月冬季交配期,每月开展1次调查(2~3天)。观察者每日09:00开始驾车慢速行驶(40~60 km h⁻¹),沿青藏公路K2900—K3009进行调查,借助10~70倍双筒望远镜观察公路两侧视野范围内所有正常活动的有蹄类动物集群,记录物种名以及发现每个集群的时间、地点、集群大小、动物与公路垂直距离等,动物与公路之间的垂直距离利用Onick6000CI激光测距仪(最大测程6000 m,测距精度±0.5 m)测得。路线调查仅做单程记录,避免重复。物种出现的地点以公路里程桩号表示,并用GPS进行定位。实际观察范围约为公路两侧2.5 km。



图1 K2920-K2940 两条线路分布图(线路之间最远距离2.4 km)

Fig.1 Sketch map of two transportation routes between K2920-K2940

1.4 数据处理

根据野生动物趋利避害的本性,藏羚羊通常会选择远离人为干扰的区域栖息。若青藏公路和青藏铁路之间区域(简称“之间”)的藏羚羊分布数量和活动频次与公路单侧(简称“单侧”)无显著差异,说明两条线路对藏羚羊活动无显著影响;若“之间”的藏羚羊分布数量或出现频次显著小于“单侧”,认为两条线路叠加对藏羚羊产生了显著的叠加阻隔影响。在K2920-K2940路段,由于“之间”最大约为2.4 km,在公路“单侧”同样划分出等距离样带,以利于对比分析,在K2940—K2982路段的“之间”最大间距约为500 m,也进行同样操作。若数据呈正态分布则采用独立样本T检验,若数据非正态分布则采用Mann-Whitney U检验,对比分析“单侧”与“之间”的频次和数量是否存在显著性差异。将藏羚羊记录数量与两路间距做相关分析,以判断藏羚羊活动受两路间距的影响趋势。

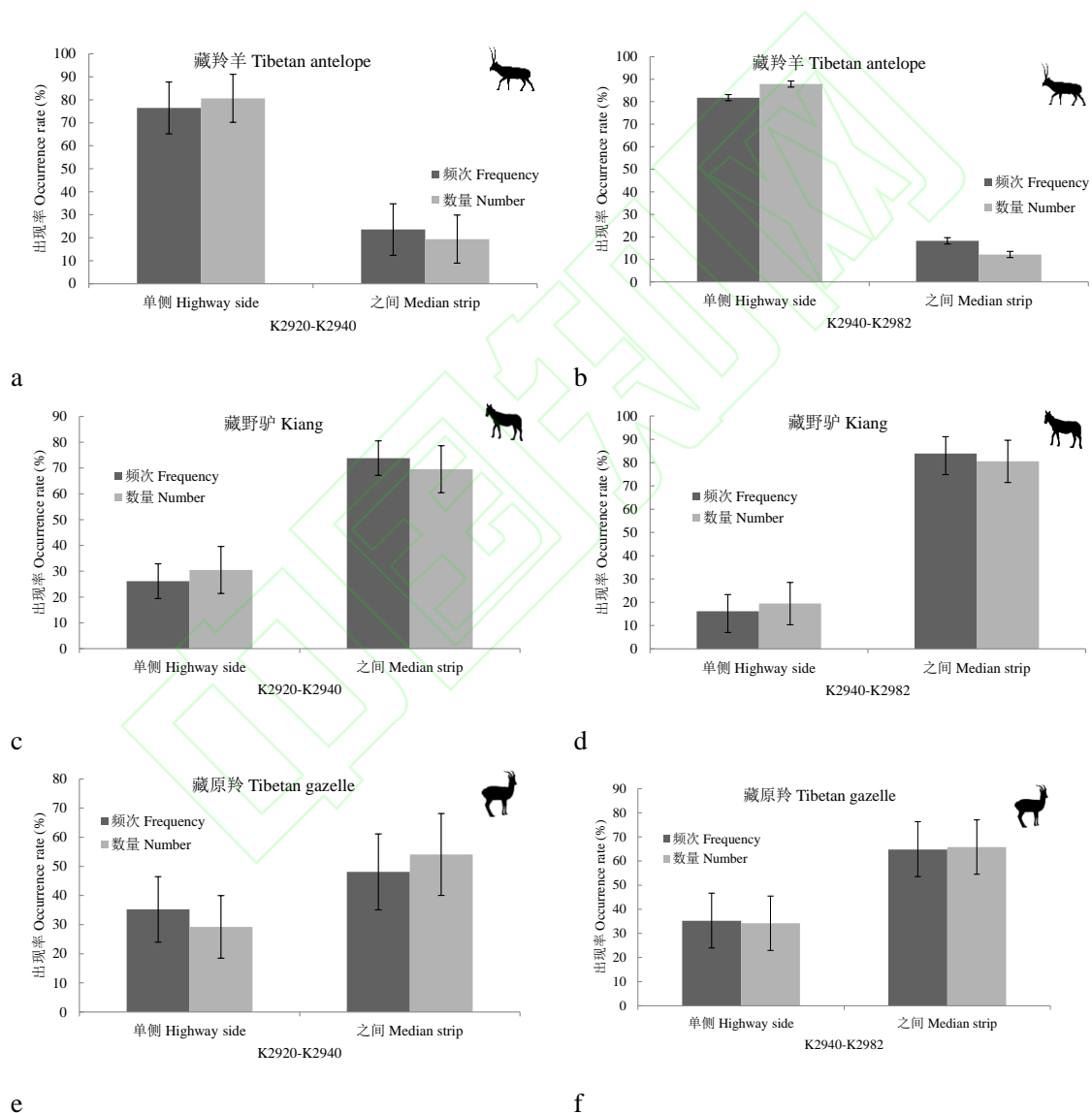
收集到2006—2008年和2010年道路影响域数据(交通运输部规划研究院,2009;连新明等,2012),由于调查方法类似,数据可以与我们的调查数据进行对比分析。采用Possion指数对比道路影响域年度实际分布值与随机分布值,若实际分布值低于随机分布值则认为该

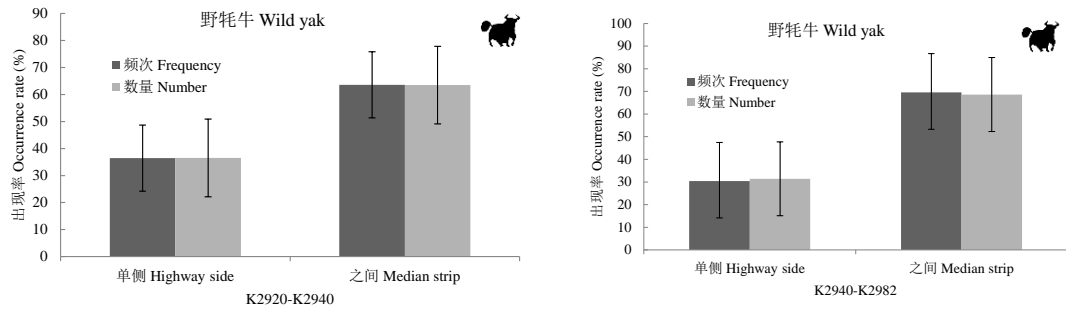
物种基本适应交通干扰；采用 Pearson 相关系数分析年度交通量变化与道路影响域年度变化的关系，以判断各物种道路影响域是否受到交通量年度变化的影响。所有分析在 SPSS 20.0 和 Excel 中进行。

2 结果与分析

2.1 青藏公路和铁路对 4 种有蹄类动物的叠加阻隔影响

无论是 K2920—K2940 还是 K2940—K2982，藏羚羊在“单侧”的出现频率和记录数量都显著大于“之间” ($P < 0.05$)，而藏野驴相反，在“单侧”的出现频率和记录数量都显著小于“之间” ($P < 0.05$)，对于其他两种动物，这些指标均无显著性差异 ($P > 0.05$) (图 2)。两路间距与藏羚羊记录数量呈正相关关系，即两路间距越大，藏羚羊记录数量有增多趋势 (Spearman's correlations, $r = 0.233$, $P = 0.005$) (图 3)。





g

h

图2 藏羚羊、藏野驴、藏原羚和野牦牛在“单侧”与“之间”的出现频次与记录数量

Fig. 2 Frequency and number of Tibetan antelope, Kiang, Tibetan gazelle and wild yak along highway side and median strip

注：a,c,e,g 为青藏公路和铁路间距较大路段 K2920—K2940；b,d,f,h 为青藏公路和铁路间距较小路段 K2940—K2982。

Note: a, c, e, g: K2920-K2940; b, d, f, h: K2940-K2982.

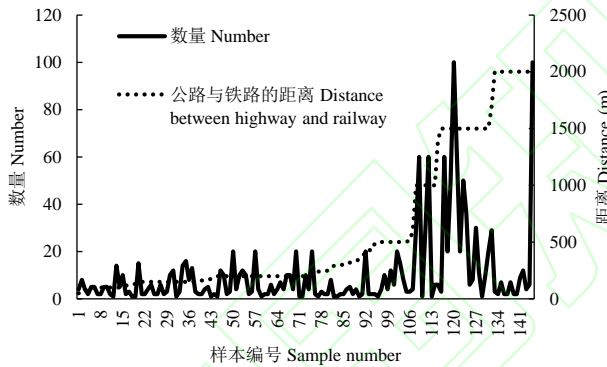


图3 藏羚羊记录数量与两路间距的关系

Fig 3 Relationship between number of Tibetan antelope and the distance between two transportation routes

2.2 青藏公路对4种有蹄类动物的道路影响域

藏羚羊影响域10年来波动较大,自(208.54±38.3) m到(881.63±59.36) m之间变化,平均为(399.29±70.82) m,自2006年以来逐渐下降,到2010年达到平稳状态,约为300 m,因此存在约4年的适应周期;藏野驴影响域10年来波动也较大,从(243.33±69.84) m到(903.61±53.32) m之间变化,平均为(579.12±62.02) m,自2006年以来逐渐下降,到2008年达到平稳状态,因此存在约2年的适应周期;藏原羚影响域10年来波动相对较小,自(150±50) m到(395.61±33.67) m之间变化,平均为(215.33±25.97) m,自2006年以来呈下降趋势,到2008年基本稳定在200 m左右,因此适应能力很强,仅2年;野牦牛影响域10年来波动较大,从(627.78±83.8) m到(1208.5±168.49) m之间变化,平均为(947.66±102.54) m(图4)。

自2014年以来,年度日均交通量在(1825±196)~(2546±283)辆d⁻¹,月度日均交通量在1234~4833辆d⁻¹,除了藏羚羊道路影响域与月度日均交通量有负相关关系之外,藏野驴、藏原羚和野牦牛的道路影响域与年度日均交通量、月度日均交通量均无显著相关关系(Pearson correlation, P>0.05)。

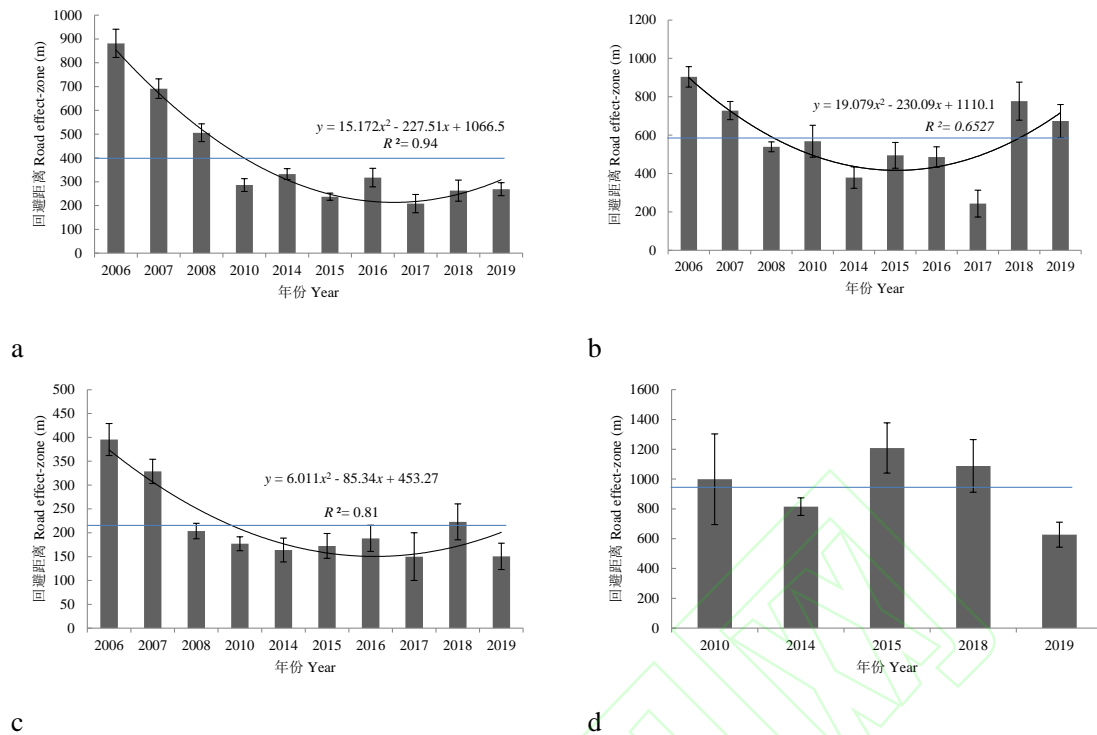


图 4 四种有蹄类动物的影响域 13 年来变化趋势

Fig 4 Road effect-zone of four ungulates in recent 13 years

注: a 藏羚羊; b 藏野驴; c 藏原羚; d 野牦牛。

Note: a-Tibetan antelope; b-Kiang; c-Tibetan gazelle; d-Wild yak.

3 讨论

本研究显示, 当走廊带内两个线路间距小于 2.4 km 时, 对藏羚羊产生了显著的影响, 而对其他 3 种有蹄类动物影响不显著。前人通过卫星跟踪项圈, 也发现两条线路对藏羚羊迁徙来回产羔地有明显阻隔影响 (Buho *et al.*, 2011)。从 10 多年来道路影响域分析来看, 藏羚羊对道路的适应周期约为 4 年, 而藏野驴和藏原羚周期为 2 年, 可见藏羚羊受到交通干扰要大于其他两种动物。研究发现, 藏羚羊穿越公路平均用时为 156 s, 远高于藏原羚 (28 s) 和藏野驴 (18 s) (殷宝法等, 2006)。藏羚羊是中国唯一可自由大规模迁徙的有蹄类动物, 受到国内外广泛关注 (裘丽等, 2004; Xia *et al.*, 2007)。根据对不同间距路段藏羚羊记录数量的观测结果, 随着道路间间距增大, 藏羚羊记录数量也在增多, 表明其受到交通干扰越小, 活动越自由。可见, 尽管藏羚羊受到道路阻隔影响, 但迁徙行为并未受到显著影响, 藏羚羊种群近年来在稳步提升 (国务院新闻办公室, 2018)。根据本研究结果, 目前藏羚羊迁徙路段的两路间距约为 1.5 km, 该处地形崎岖, 可阻挡交通干扰, 藏羚羊可在此停歇休息 (连新明等, 2012; 王云等, 2017), 建议未来规划的青藏高速公路与现有公路与铁路的间距至少应保持 1.5 km 以上, 以保护藏羚羊迁徙 (Wang *et al.*, 2017)。

藏羚羊在“单侧”的出现频率和记录数量都显著大于“之间”, 说明藏羚羊对两路之间狭长的走廊带产生了回避作用。野生动物往往视基础设施附近为高捕食风险区域, 从而产生回避及反捕食行为 (连新明等, 2012)。两路之间的狭长走廊带相当于双重的高风险区域。研究发现, 藏羚羊迁徙期放弃楚玛尔河大桥而选择五北大桥, 很可能是因为楚玛尔河桥附近的狭长走廊带过窄 (数百米), 且走廊带开阔, 直接将藏羚羊暴露在公路和铁路的双重干扰之下, 藏羚羊习性多疑, 对人类活动非常敏感, 因此两路并行且间距过小对藏羚羊产生双重叠加影

响,导致藏羚羊迁徙期无法穿越楚玛尔河桥;而五北大桥附近的铁路和公路间距约 1500 m,两路之间成为藏羚羊迁徙的缓冲地带,目前成为藏羚羊主要迁徙通道(王云等,2017)。

青藏高原的有蹄类动物对交通干扰存在适应性。青藏铁路施工期,藏羚羊受建设影响非常大,当铁路施工完毕,藏羚羊迅速适应通道,在 2006 年,通道穿越率达到 98.17% (Yang *et al.*, 2008)。通过雄性藏羚羊行为时间分配来看,青藏铁路运营期觅食和“其他”行为时间比例明显增加,而警戒和卧息行为时间比例显著降低,说明青藏铁路运营后对雄性藏羚羊影响降低(苗紫燕等,2020)。根据对青藏公路藏羚羊穿越的观测,藏羚羊受公路交通的干扰较小,对交通量并不敏感,甚至选择交通量最大的中午前后穿越公路(Xia *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008)。此外,藏原羚回避距离也不受交通量的干扰(连新明等,2012),野生动物可以通过自身调节来适应青藏铁路建设带来的变化(殷宝法等,2006)。本研究也证实了有蹄类动物对交通干扰的适应性,甚至藏羚羊在夏季交通量最大的时候靠近公路活动,这与其迁徙期不得不穿越公路和铁路有关,因此在路侧大量出现,这也可以解释藏羚羊道路影响域与月度日均交通量呈负相关关系,迁徙期 5—8 月正值青海和西藏旅游高峰期,公路上交通量大。此外,调查中我们发现,有蹄类动物基本不受到车辆的干扰,即使停车动物们也不离开,仅仅抬头警示,但如果人员靠近则会逃离。因此,未来应重点限制路侧的人为活动干扰,特别是在藏羚羊迁徙期和野生动物通道附近。

本研究的创新点在于首次研究了青藏高原两条交通线路叠加后对 4 种青藏高原特有种的影响,本研究成果可指导未来青藏高速公路的建设;此外,通过 13 年的长时间序列的数据积累和观测,发现 4 种有蹄类动物的适应周期,对于理解高原野生动物适应交通干扰,推动高原道路生态学发展具有重要作用。

4 结论

不论青藏公路和铁路的间距大小,两条线路都对藏羚羊产生了显著的叠加阻隔影响,而对藏野驴、藏原羚和野牦牛则无显著叠加影响。并且,随着两条线路间距的增大,藏羚羊记录数量有增多的趋势;根据现有经验,藏羚羊迁徙廊道处两条线路间距约 1.5 km,中间地形起伏起到一定的隐蔽作用,因此未来青藏高速公路应与现有两条线路间距至少在 1.5 km 以上,且在线路之间走廊带营造起伏地形和遮光降噪等工程措施,有助于藏羚羊迁徙期穿越高速公路动物通道;过去 13 年的持续监测表明,藏羚羊、藏原羚和藏野驴对公路的回避距离有减小趋势,藏羚羊适应周期约为 4 年,而藏原羚和藏野驴的适应周期仅 2 年,4 种有蹄类动物回避距离与交通量的变化关系不大,显示 4 种有蹄类动物基本适应了青藏公路的交通干扰。本研究路侧 2 km 范围内数据较为精确,超过 2 km,受路侧起伏地形影响,加之藏羚羊、藏原羚等体型较小,毛发颜色与环境几乎一致,较难分辨,统计记录数量存在误差。但这不会对结果产生明显影响,在叠加阻隔影响调查中,样带宽度最大 2.4 km,与 2 km 基本接近,因此记录数据具有较高的精确度;在道路影响域调查中,我们只记录距离公路最近的动物数量及距离,根据前人研究及现场观察,4 种有蹄类动物的影响域均在 1 km 范围内,因此本研究调查数据具有较高的可信度。

致谢 感谢美国 McFarland Johnson 公司的 Jed Merrow 先生在摘要润色方面提供的帮助。

参考文献

- 陈济丁,王新军,李祝龙,等. 2014. 高海拔高寒地区高速公路建设环境问题及其保护. *公路与自然*, **21**(2): 95-99. [Chen JD, Wang XJ, Li ZL, *et al.* 2014. Environmental problems and protection of expressway construction in high altitude and alpine regions. *Highway & Nature*, **21**(2): 95-99.]
- 戴强,袁佐平,张晋东,等. 2006. 道路及道路施工对若尔盖高寒湿地小型兽类及鸟类生境利用的影响. *生物多样性*, **14**(2): 121-127. [Dai Q, Yuan ZP, Zhang JD, *et al.* 2006. Effects of alpine wetland road and road

- construction on habitat using of small mammals and birds. *Biodiversity Science*, **14**(2): 121-127.]
- 国务院新闻办公室. 2018. 青藏高原生态文明建设状况白皮书. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1633895/1633895.htm> [The State Council Information Office of the People's Republic of China. 2018. Ecological Progress on the Qinghai-Tibet Plateau. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1633895/1633895.htm>]
- 交通运输部规划研究院. 2009. 西部地区公路建设生物资源保护技术研究研究报告. [Transport Planning and Research Institute of Ministry of Transport. 2009. Report of protective measures of ecological resources of highway construction in western China.]
- 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. [Lian XM, Li XX, Xu T. 2012. Avoidance distances of four ungulates from roads in Kekexili and related protection suggestions. *Chinese Journal of Ecology*, **31**(1): 81-86.]
- 苗紫燕, 吴彤, 陈佳萍, 等. 2020. 青藏铁路对雄性藏羚行为时间分配的影响. 兽类学报, **40**(2): 135-142. [Miao ZY, Wu T, Chen JP, et al. 2020. Effect of the Qinghai-Tibet Railway on diurnal behavioural time budgets in male Tibetan antelopes. *Acta Theriologica Sinica*, **40**(2): 135-142.]
- 裘丽, 冯祚建. 2004. 青藏公路沿线白昼交通运输等人类活动对藏羚羊迁徙的影响. 动物学报, **50**(4): 669-674. [Qiu L, Feng ZJ. 2004. Effects of traffic during daytime and other human activities on the migration of Tibetan Antelope along the Qinghai-Tibet highway, Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Zoologica Sinica*, **50**(4): 669-674.]
- 王云, 关磊, 陈济丁, 等. 2017. 青藏高速公路格拉段野生动物通道设计参数研究. 公路交通科技, **34**(9): 146-152. [Wang Y, Guan L, Chen JD, et al. 2017. Study on design parameters of wildlife passage in Golmud-Lhasa Section of Qinghai-Tibet Expressway. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, **34**(9): 146-152.]
- 王云, 关磊, 陈济丁, 等. 2014. 青藏高原线形工程野生动物保护研究进展. 公路与自然, **21**(2): 106-109. [Wang Y, Guan L, Chen JD, et al. 2014. Research progress in wildlife protection of linear project in Qinghai-Tibet plateau. *Highway & Nature*, **21**(2): 106-109.]
- 王云, 关磊, 朴正吉, 等. 2016. 环长白山旅游公路对中大型兽类的阻隔作用. 生态学杂志, **35**(8): 2152-2158. [Wang Y, Guan L, Piao ZJ, et al. 2016. Barrier effect of ring Changbai mountain scenic highway on middle and large sized mammals. *Chinese Journal of Ecology*, **35**(8): 2152-2158.]
- 王云, 关磊, 周红萍, 等. 2020. 共和-玉树高速公路穿越星星海保护区路段野生动物保护对策研究. 公路工程, **45**(1): 88-91. [Wang Y, Guan L, Zhou HP, et al. 2020. Protection to wildlife along Xingxinghai nature reserve section of Gonghe-Yushu expressway. *Highway Engineering*, **45**(1): 88-91.]
- 殷宝法, 淮虎银, 张镜铨, 等. 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. [Yin BF, Huai HY, Zhang YL, et al. 2006. Influence of Qinghai-Tibetan railway and highway on wild animal's activity. *Acta Ecologica Sinica*, **26**(12): 3917-3923.]
- Buho H, Jiang Z, Liu C, et al. 2011. Preliminary study on migration pattern of the Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) based on satellite tracking. *Advances in Space Research*, **48**: 43-48.
- Collinson W, Davies-Mostert H, Roxburgh L, et al. 2019. Status of road ecology research in Africa: Do we understand the impacts of roads, and how to successfully mitigate them? *Frontiers in Ecology and Evolution*, **7**: 479. doi: 10.3389/fevo.2019.00479
- Pan WJ, Lin L, Luo AD, et al. 2009. Corridor use by Asian elephants. *Integrative Zoology*, **4**: 220-231.
- Pinto FAS, Clevenger AP, Grilo C. 2020. Effects of roads on terrestrial vertebrate species in Latin America. *Environmental Impact Assessment Review*, **81**: 106337.
- Van der Ree R, Smith DJ, Grilo C. 2015. Handbook of road Ecology. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Wang Y, Guan L, Chen JD, et al. 2017. The overlapping impact of Qinghai-Tibet Highway and Railway on

ungulates. *Pakistan Journal of Zoology*, **49**: 1507-1510.

Xia L, Yang QS, Li ZC, *et al.* 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**: 352-357.

Yang QS, Xia L. 2008. Tibetan wildlife is getting used to the railway. *Nature*, **452**: 810-811.

作者简介 王云, 男, 1980年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为道路生态学, 野生动物保护等。E-mail: wangyun80314@163.com

责任编辑 张敏

王云, 关磊, 杜丽侠, 曲家鹏, 王明月, 韩用顺, 杨艳刚, 周红萍, 孔亚平. 2021. 青藏公路和铁路对青藏高原四种典型有蹄类动物的叠加阻隔和回避影响. *生态学杂志*, **40**(4)

Wang Y, Guan L, Du LX, Qu JP, Wang MY, Han YS, Yang YG, Zhou HP, Kong YP. 2021. Overlapping barrier and avoidance effects of the Qinghai-Tibet highway and railway on four typical ungulates on the Tibetan plateau. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(4)