

DOI: 10.20103/j.stxb.202404180860

赵佳玮, 黄麟. 基于文献计量的道路生态影响研究进展. 生态学报, 2025, 45(17): - .

Zhao J W, Huang L. Research progress in road ecological impact based on bibliometric measurement. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

基于文献计量的道路生态影响研究进展

赵佳玮^{1,2}, 黄 麟^{1,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 道路长度的增加、陆路交通走廊的深入、陆路交通网络的扩张对全球生态系统的功能及其完整性产生了巨大影响。本文运用 CiteSpace 开展了道路生态影响研究的可视化知识图谱分析, 从其时间演化、热点研究等方面出发, 回溯道路生态影响的研究现状、评价方法、潜在效益, 揭示了该研究当前存在的问题, 并展望该方向的研究趋势。道路生态影响研究经历了起步期、快速发展期、热点发展期 3 个阶段, 从探讨单条道路的负面影响逐渐发展为交通走廊和路网对水、土、气、生等多生态要素的综合影响, 热点区集中在中国和美国, 聚焦道路产生的水系切割与水文变化、土壤理化改变与土壤侵蚀、大气污染、碳排放与微气候效应、野生动物个体及种群、植物群落及覆盖度、景观与生境破碎化等问题以及其时间累积和空间叠加的效应, 生态影响的评价和效益分析。当前, 存在生态影响分析定性多定量少、动态评估薄弱、准确性不足, 道路累积和叠加效应不清, 影响评价不全面、量化方法缺乏, 效益与贡献不明, 预测精度不足等问题。未来研究应更加关注道路时空尺度效益、累积叠加效应以及监测评估精细量化, 效益与贡献厘定, 预测与规划, 从源头保护。

关键词: 道路; 知识图谱; 信息可视化; 生态影响; 研究趋势

Research progress in road ecological impact based on bibliometric measurement

ZHAO Jiawei^{1,2}, HUANG Lin^{1,*}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, University of Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The increasing length of roads, the deepening of land transport corridors, and the expansion of land transport networks have a dramatic impact on the functioning and integrity of global ecosystems. In this paper, CiteSpace was used to carry out the visual knowledge graph analysis of road ecological impact research. Starting from the aspects of time evolution and hot research, this paper reviews the research status, evaluation methods, and potential benefits of road ecological impact research, reveals the current problems in this research, and predicts the research trend in this direction. The research on road ecological impact has experienced three stages: initial stage, rapid development stage, and hot spot development stage. From discussing the negative impact of a single road, it has gradually developed into the comprehensive impact of traffic corridors and road networks on multiple ecological factors such as water, soil, air, and biomass. The hot spots are concentrated in China and the United States. Focus on water system cutting and hydrological changes, soil physicochemical changes and soil erosion, air pollution, carbon emissions, and microclimatic effects, individual and population of wild animals, plant communities and coverage, landscape and habitat fragmentation, as well as their effects of time accumulation and space superposition, ecological impact evaluation and benefit analysis. At present, there are many problems in ecological impact analysis, such as more qualitative and less quantitative analysis, weak dynamic assessment,

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目课题(2021YFB2600102)

收稿日期: 2024-04-18; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsrr.ac.cn

insufficient accuracy, unclear cumulative and overlapping effects of roads, incomplete impact assessment, lack of quantitative methods, unclear benefits and contributions, and insufficient prediction accuracy. Future research should pay more attention to the temporal and spatial scale benefits, cumulative and superimposed effects of roads, the fine quantification of monitoring and evaluation, the determination of benefits and contributions, forecasting and planning, and the protection from the source.

Key Words: road; knowledge maps; information visualization; ecological impact; research trend

道路覆盖了全球陆地表层面积的 20% 以上^[1-2], 将陆地生态系统分割为几十万个斑块, 这些斑块面积多数小于 1 km²。道路仍在迅速扩张, 并将深入到众多维持生物多样性和重要生态系统功能的生态敏感地区, 预计到 21 世纪中叶, 全球新建公路、铁路将超过 2.5×10^7 km^[3-4], 将对生态完整性和生态系统功能形成重大潜在风险甚至产生不可逆转的影响^[5-7]。陆路交通网络的扩张将直接对动物种群、植物群落、土壤、水文系统、栖息地质量、景观格局以及其他组分产生切割、隔离、阻碍和催化作用, 导致路域生态系统的结构受损、生物多样性下降、生产力降低和自然景观破碎或丧失^[8]。此外, 当地资源开发、旅游发展、工业化和城镇化进程等间接作用与公路铁路的直接影响会共同引起路域或区域生态系统的累积变化。因此, 道路成为全球生态系统退化的最重要因素之一, 其引发的生态问题成为一个全球性的问题^[9]。自 20 世纪 70 年代开始, 随着生态环境保护意识的不断增长, 各国政府、组织和专家学者越来越多的关注到遍布全球的交通网络及其对生态环境的影响。因此, 运用生态学、信息学的知识和原理来探索了解道路对生态环境的影响机理, 为降低道路生态影响、促进生态系统功能恢复提供理论支持, 是十分必要的。

1 基于 CiteSpace 的可视化知识图谱分析

文献计量学工具 CiteSpace 可以通过可视化手段来得到知识图谱, 呈现某领域科学知识的结构、规律和分布情况, 展示该领域的研究主题及研究趋势^[10]。以 Web of Science 平台 WOS 核心合集数据库作为文献来源, 检索方式为“关键词 or 主题词=road、railway、ecosystem、ecological impact”, 检索时间段为 2001—2023 年, 进行精确检索, 检索共得到 2196 条面板数据。对检索得到的结果进行人工筛选, 删除会议论文、社论材料等不符合要求的词条, 略过与道路生态影响主题不相符的文献, 并在 CiteSpace 内进行数据去重后得到 945 篇研究性文章及综述。运用 CiteSpace 6.3.R1 进行知识图谱分析, 分析时间设置为 2001—2023 年, 单位为 1 年, 选择标准为 g 指数。分别将节点类型设置为“作者”、“国家/地区”和“机构”, 对这三类进行合作网络分析, 其中节点大小反映该作者、国家/地区和机构的发文量; 将节点类型设置为“关键词”, 其中节点大小表示文献的被引次数, 连线颜色代表首次共被引时间, 分别进行时间线图、关键词突现、共被引分析, 用可视化的手段客观地呈现道路生态影响领域的研究现状及发展趋势。

1.1 时间演化特征

2001—2023 年, 通过文献发表数量反映的研究活跃程度, 可将道路领域研究大致分为研究起步期 (2010 年之前)、快速发展期 (2010—2015 年)、热点发展期 (2015 年至今) 3 个阶段 (图 1)。研究起步期, 高频关键词“fragmentation”、“human disturbance”、“mortality”代表道路的负面影响, 热点聚焦在“habitat”、“landscape”、“biodiversity”。快速发展期, 关键词“corridor”、“dynamics”、“remote sensing”的出现意味着研究对象从线性交通工程扩展到交通走廊, 研究周期更长, 关注动态变化, 以及研究方法的多样性, 高频关键词“climate change”、“heavy metal”成为热点。热点发展期的高频关键词包括被道路扩张干扰的“protected area”、道路叠加产生的累积影响“accumulation”、以及“street dust”、“ecological risk”等等, 说明道路生态影响研究的范围越来越广, 研究问题越来越深入 (图 2)。

1.2 研究热点区域

开展道路生态影响领域研究的国家数量以欧洲最多, 而热点最高的国家依次为美国、中国、加拿大、澳大

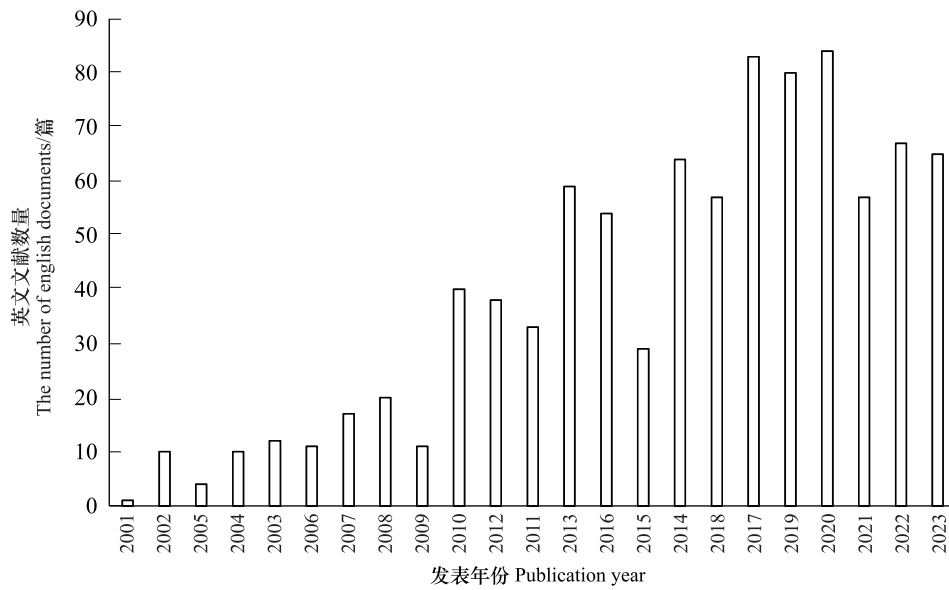


图1 道路生态影响领域年度文献数量

Fig.1 Annual number of literatures in the field of ecological impacts of road

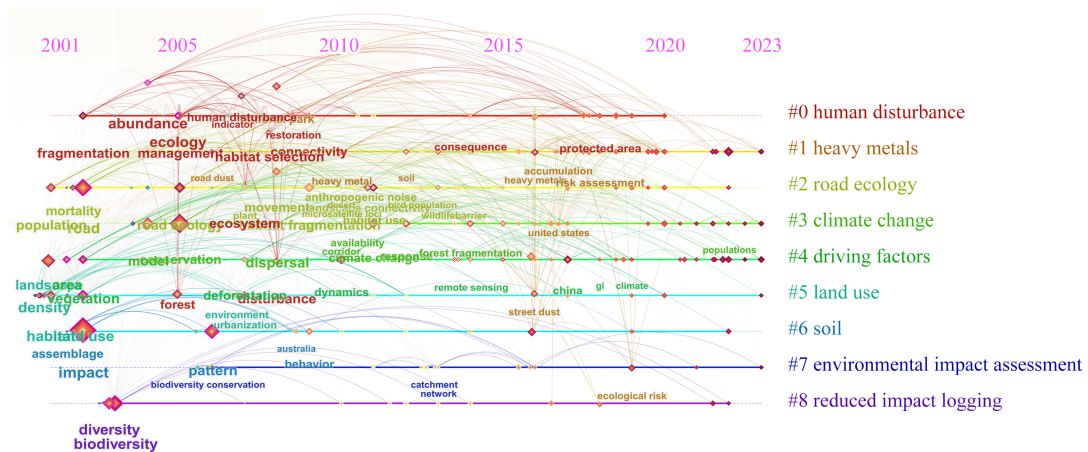


图2 道路生态影响领域关键词时间线图

Fig.2 Road ecological impact field keyword timeline map

利亚、英国等(图3)。

1.3 研究机构及学者

全球开展陆道路生态影响领域研究的机构中,中国科学院发文量最多,达77篇,其次是美国林务局和佛罗里达大学(图4),分别是13篇和11篇。从学者共线分析图谱可以看出,道路生态影响领域的核心学者总体呈现出“整体分散、局部聚集”的特点,发文量最高的是 Schlacher Thomas(9篇)、随后是 Perz Stephen、Thompson Luke 以及 Van der ree, Rodney,发文量均为4篇(图5)。

1.4 热点关键词分析

道路生态影响领域的共被引网络聚类视图显示,共有8大聚类,其中聚类大小表示文献数量,数量最高的聚类为“human disturbance”,共有44篇,但同质性较低,即该聚类内文献信息相似性低。同质性最高的聚类为“soil”,同质性数值为0.928,文献数量为22篇。平均年份指聚类中引用文献的远近,年份近的聚类文章相对更为前沿。

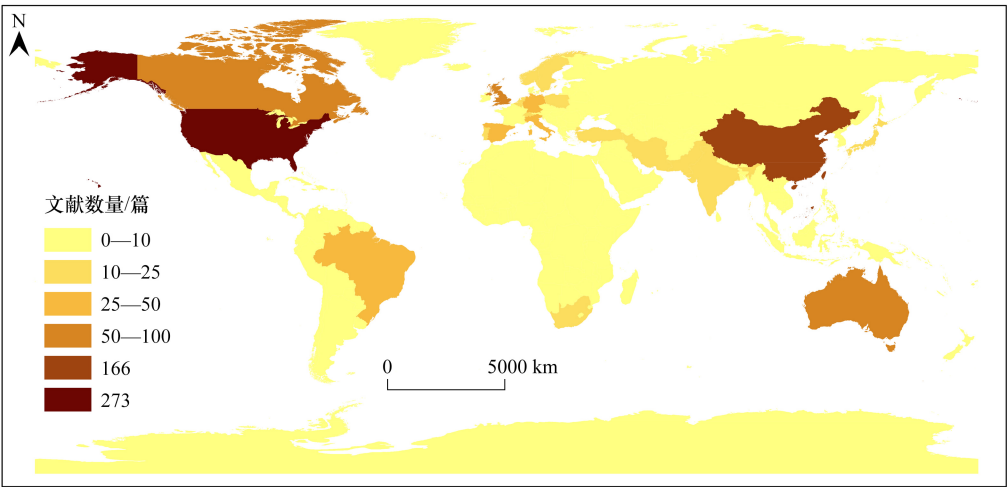


图 3 道路生态影响领域研究热点区域空间分布
Fig.3 Regional spatial distribution of research hotspots in the field of ecological impact of road

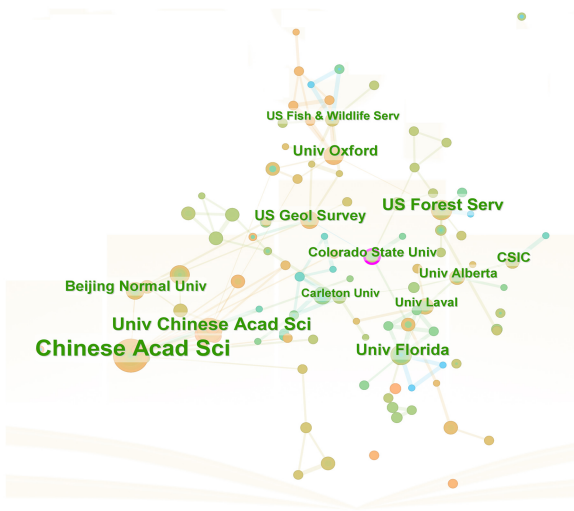


图 4 道路生态影响领域研究机构可视化知识图谱
Fig.4 Visual knowledge map of research institutions and scholars in the field of ecological impact of road

表 1 道路生态影响关键词聚类信息表

Table 1 Road ecological impact keywords cluster information table

聚类序号名称 Cluster number name	大小 Size	同质性 Homogeneity	平均年份 Average year
0 人类干扰 Human disturbance	44	0.681	2009
1 重金属 Heavy metals	40	0.775	2016
2 道路生态学 Road ecology	37	0.686	2011
3 气候变化 Climate change	33	0.56	2014
4 驱动因素 Driving factors	32	0.754	2017
5 土地利用 Land use	28	0.717	2007
6 土壤 Soil	22	0.928	2008
7 环境影响评价 Environmental impact assessment	18	0.839	2012
8 低影响伐木 Reduced impact logging	17	0.871	2009

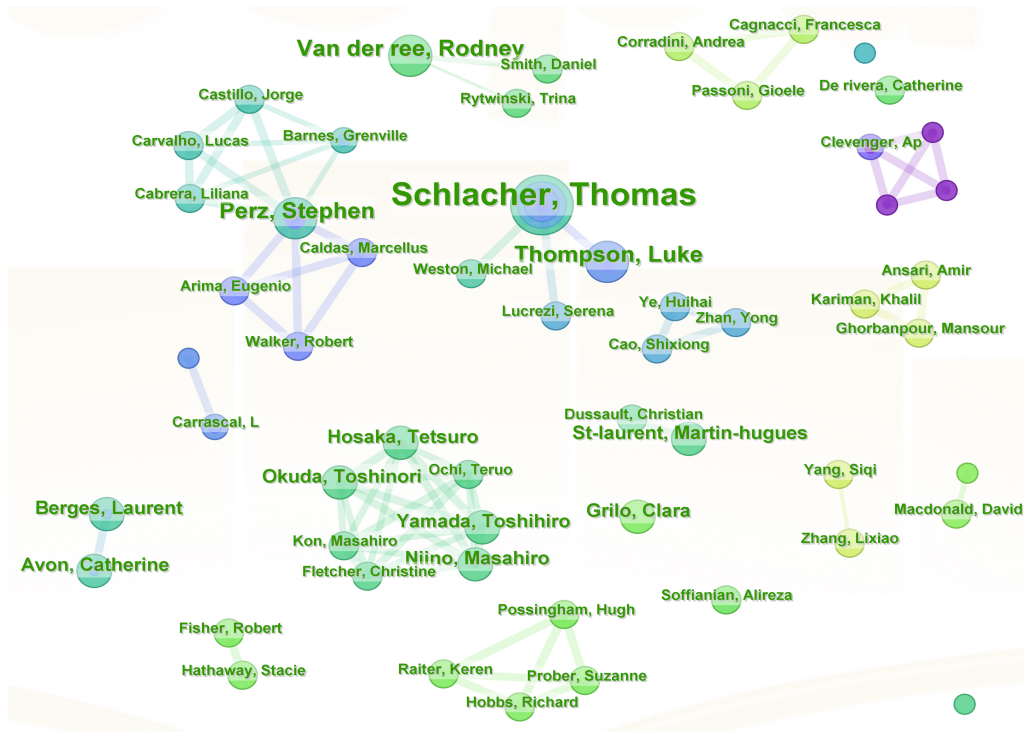


图5 道路生态影响领域研究学者可视化知识图谱

Fig.5 Visual knowledge map of research scholars in the field of ecological impact of road

关键词突现率检测能够解释研究领域的发展趋势以及研究前沿。近5年,突现英文关键词按照强度由高到低依次为:heavy metals、protected area、contamination、infrastructure、ecological risk(图7),表明当下的研究热点聚焦在道路对生态的风险及危害方面。

2 道路生态影响的研究现状

以欧美国家为主导的国际路域生态影响研究多侧重运营期道路对植被、动物、湿地、水文水系、大气等的影响,近年来聚焦路网对景观与栖息地破碎化、生物入侵、土地利用变化等方面。道路的屏障、辐射、边缘效应使其生态影响范围数百米至数公里不等,且具有显著的区域分异特征^[11],不同类别、结构、特征的道路引发不同类型和强度的影响。

2.1 水系切割与水文变化

道路产生水系阻隔及其引起的水力学变化和水体内化学成分异常。道路穿越会割裂路域水系,结构上会对水流产生明显的遏制甚至造成枯竭^[12],功能上阻碍水系上下游物质传输,干扰当地生态平衡。对于非水系区域,高度压实的路面入渗率极低,影响道路两侧地下水水位差,改变地下水流向及流量的同时,也会改变地表降雨径流的汇流时间和流量峰值等水文过程,研究表明加勒比海南岸未硬化道路的入渗率是土壤的1/4,产生路面径流的降雨阈值是土壤的1/10^[13]。而道路运营产生的重金属等其他有毒物质也会通过暴雨径流^[14]污染水体,美国纽约阿迪朗达克公园里流域内有道路的水体钠和氯含量比无道路影响的水体增加6.5

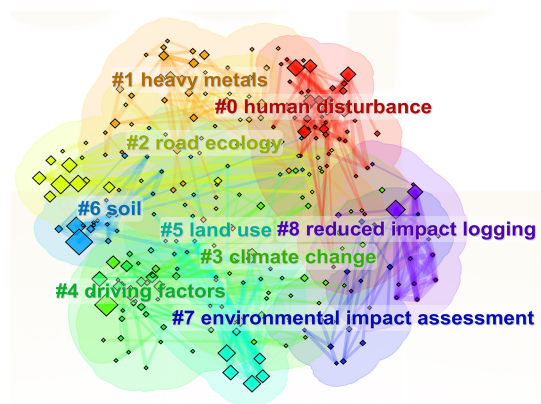


图6 道路生态影响关键词共被引聚类视图

Fig.6 Road ecological impact keywords co-citation cluster view

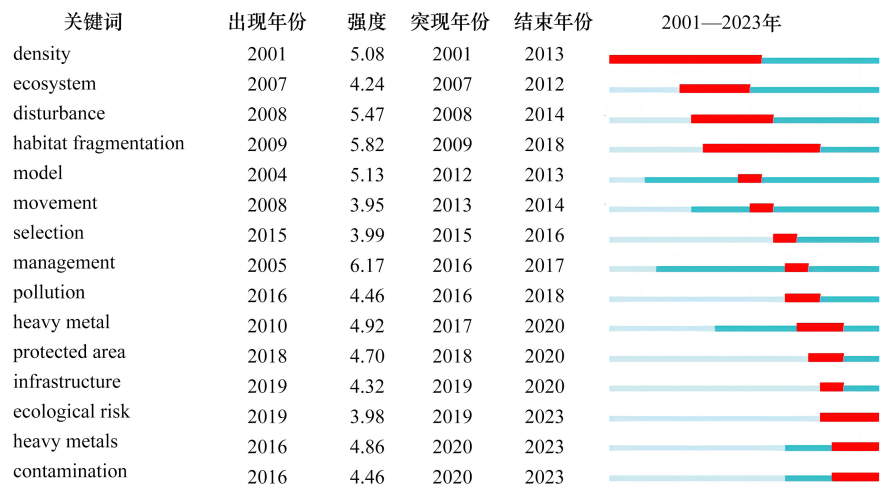


图 7 道路生态影响研究关键词突现图

Fig.7 Keyword with the strongest citation bursts of ecological impact of road

倍和 30 倍^[15],随着物质循环最终危害动植物生长。

2.2 土壤理化改变与土壤侵蚀

道路的建设会对地表产生破坏,直接造成土壤流失,降雨也会产生径流造成路面和路基两侧的损失,严重的道路侵蚀甚至会造成道路坍塌,在极端情况下会导致山体滑坡^[16]。同时道路建设、运营会改变土壤 pH 值、粒度大小,因为结构改变而造成土壤侵蚀,还引起边际土壤重金属污染。多数研究^[17—18]都表明靠近道路的土壤 pH 值趋于上升并表现为弱碱性,但影响范围不超过 10m;我国呼伦贝尔、拉萨等地靠近道路的土壤中粗砂比例较高^[18—20]、粘粒有所流失,反映路域土壤产生了一定程度的退化。土壤侵蚀的影响范围多在道路两侧 500m 内,道路建设导致土质边坡发生较强烈的土壤侵蚀^[20—21]。路域土壤中,镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)的含量均有可能超过背景值,不同种类的重金属集中沉降范围也因地理位置、道路类型等原因不尽相同,比如长白山自然保护区内道路 30m 范围是 Zn 污染物的主要沉降区^[22],黄河三角洲湿地附近以及青藏高原等地绝大多数重金属含量都在路域 50m 以内达到峰值,之后逐渐降低至标准值^[23—24]。此外,道路会对生态敏感区的土壤产生额外影响,青藏高原多年冻土区路网逐年扩张,道路建设、运营使得周边气温升高,造成难以防治的热融滑塌^[25]等问题。另一方面,阿拉斯加北极冻原道路沿线 5m 内的土壤温度升高 3—5℃^[26],该温差为灌木和维管植物的生长提供了有利的条件。

2.3 大气污染、碳排放与微气候效应

道路建设、运营过程中产生的碳排放和尾气排放,直接影响空气质量和路域微气候环境。研究显示,郑州市 5 km 尺度下大气中 PM10 含量与道路主干道面积占比呈正相关^[27],兰州市尾气排放的一氧化碳、含氮氧化物等多种污染物的污染负担率均超过 50%^[28],对大气环境造成严重污染。道路建设期间,筑路材料的生产、材料运输和机械设备的使用都会产生大量的碳排放^[29]。连霍高速高速公路运营期间,车速越快,碳排放量也相应增加^[30];且随运营时间增长,年碳排放量也呈增长趋势。碳排放促进了温室效应,再加上车辆行驶过程产生的热量,使得道路边缘气温较高,影响周围环境的微气候效应,这一点在周围环境较为封闭的城市道路中(如上海)尤为明显^[31]。

2.4 影响野生动物个体及种群

道路对野生动物的影响主要有三类,包括阻隔和致死、物种丰富度变化、回避行为等。野生动物穿越道路过程中存在阻隔和致死问题^[32],主要与道路类型、路网密度、车速和流量等相关,比如印度高速公路密度的增加导致当地野猪、狍的种群数量大量减少^[33],同时与所在区域的物种有关,相似条件下,移动速度慢的野牛等物种穿越致死的概率高于速度相对较快的黑鹿、老虎、豹子。绝大多数物种丰富度与道路暴露程度呈负相

关^[34],种群数量较小的物种通常随着与道路距离的减小而具有较低的相对丰度,但是更常见的物种则可能会在靠近道路的情况下丰富度增加^[11]。一项 Meta 分析结果显示,鸟类物种丰度的道路影响范围可达 2 km、哺乳动物可达 10 km(图 8)^[35]。但不同地区野生动物对道路的回避行为差异较大,呼伦贝尔二卡保护区内濒危鸟类从未在道路 600 m 以内出现^[36],而秦岭大熊猫和青藏高原野牦牛等哺乳动物对道路的回避距离从 200 m 到 1000 m 不等,距离随物种移动速度的增加而减小,对其活动的影响范围可超过 5 km^[37—38]。

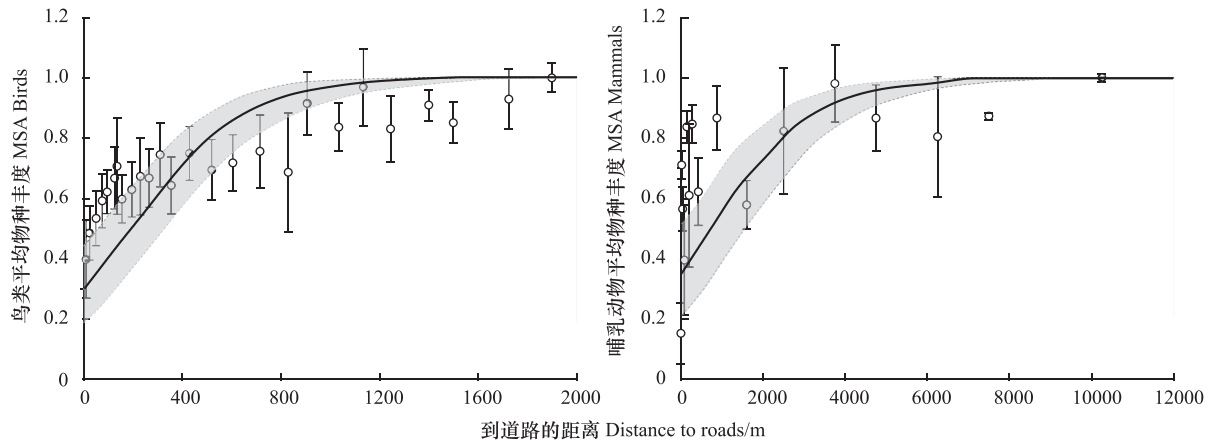


图 8 道路对鸟类和哺乳动物 MSA(平均物种多度)的影响范围^[35]

Fig.8 Logistic regression between mean species abundance of birds and distance from infrastructure

2.5 影响植物群落及覆盖度

道路建设中永久占地导致植被完全破坏,而临时占地通过后期修复能够恢复植被覆盖甚至优于原生植被,但植被群落能够恢复以及恢复到何种程度,取决于修复采用近自然原生植物种类还是速生植物种类。运营期,尾气中有毒气体导致叶绿素失去光合活性,粉尘引起植物色素变化影响路域植物的快速生长^[26],重金属污染在植物体内蓄积破坏植物叶绿素。这些影响从道路中心向两侧扩散,影响范围差异较大,重金属影响范围较小,比如青藏高原上道路边缘 5m 内阔叶植物中 Pb 浓度显著高于距道路边缘 50 m 处^[24],道路对植被覆盖度的影响不超过路两侧 500 m。道路沿线的植物物种受益于恢复措施,或土壤压实使得竞争植被密度低,或森林内部道路光照强度增加等因素,多样性指数可能会出现从中心向两侧减少的趋势^[17]。

2.6 景观与生境破碎化

道路的景观生态效应起源于景观格局改变,格局破碎化导致物质流、信息流、物种流的水平流动受阻,从而影响到景观水平方向上的生态过程,造成景观整体及组分的功能受损。不同地理区域、不同道路类型、不同等级道路对景观格局的影响不同。道路的建设和使用会导致土地利用类型向建设用地、工业用地转移^[39],引起土地破碎化,对生态系统构成威胁,导致路域景观破碎度增加、聚集度和蔓延度指数减小^[40],但影响距离与地区有关,青藏公路在格尔木市的影响范围为 3 km,但在五道梁为 1 km^[41]。同时,长时间序列研究表明,运营期的景观格局仍会持续恶化,随着道路的聚集效应,建设用地面积增大,景观破碎度仍在持续增加^[42]。从社会发展角度来说,道路建设和使用会影响附近居民的生活方式、社会关系和文化遗产,研究表明,经济增长是道路网络扩展的原因,道路建设增加了秦岭山区生态景观的破碎度,却提高了社会连通度,并且景观破碎度与社会连通度之间呈正相关^[43]。

陆路占用自然生态空间以及景观破碎化必然引起生境丧失、破碎化或岛屿化,从而造成栖息地面积减小、质量降低^[44],引起种群数量下降甚至造成一些物种在当地消失。May 和 Hamer 等分析了以交通运输为主导的廊道网络对生态系统的破坏和分离情况^[45—46]。道路密度、到最近道路的距离和相对平均物种丰度(MSA)作为道路网络的三个主要指标,可用于评价路网对栖息地的影响^[6]。此外,有研究认为道路穿过受威胁大型

食肉动物主要栖息地时会成为非法野生动物贸易新来源^[47]。

2.7 陆路交通走廊的生态累积效应

生态累积效应通常是性质相同的项目通过加和作用或性质不同的项目通过交互协同作用使生态效应在时空尺度上产生累积的生态环境影响,特定项目的累积效应是由该项目影响源的特性和受项目影响的生态环境的性质决定的。由于项目本身的复杂性以及人类和自然干扰相互影响的复杂性,导致目前生态累积效应的研究还缺乏适当的、科学的和定量的评估方法,现有的相关研究主要针对环境要素和生态过程的累积效应进行评价。国际上,20 世纪 70 年代,美国加州《环境质量法案》最先提出项目单独造成的影响可能非常小,但是累积起来可能极大。1978 年,美国环境质量委员会(USCEQ)在国家环境政策法案(NEPA)中将累积效应定义为当某一项目与过去、现在和未来可以合理预见的项目结合在一起时对环境产生的增加的影响。80 年代,欧洲提出环境评价中考虑累积影响并提出相关规定和要求。90 年代年,加拿大《环境影响评价法》要求必须在 EIA 的项目筛选、综合研究以及仲裁审查过程中全面考虑潜在的累积效应,随后发布了累积影响评价实践指南。国内开展累积效应研究较晚,1997 年颁布《非污染生态影响》的环评技术导则中要求对自然资源开发等项目的区域生态影响考虑累积效应。

虽然生态累积效应研究的应用普及有限,但是尺度和领域不断拓展。累积效应相关研究多聚焦在煤矿区、水电开发、铁路及公路建设、绿洲开发、湿地开发和流域管理等方面,在累积效应的基本概念、效应源、效应途径、效应评价方法等方面开展了研究,先后建立了生态累积效应的解释结构、DPSIR、源-路径-效应、广义线性累积效应评价、模糊多层次综合评价等模型与分析方法,涉及大气、水、土壤和植被、驱动力-压力-状态、景观格局和土地利用变化、开发强度和环境问题等方面指标。但是,在理论应用到实际评价方面仍然存在较大不足,对实际项目产生的累积效应的研究较少。

3 道路生态影响的评价及效益分析

3.1 道路生态影响评价

国际上开展了较多具有鲜明系统科学特征的生态环境影响评价,例如战略环境影响评价(Strategic Environmental Assessment, SEA)、区域环境影响评价(Regional Impact Assessment, RIA)、健康影响评价(Health Impact Assessment, HIA)、可持续发展影响评价(Sustainability Impact Assessment, SIA)以及累积影响评价(Cumulative Impact Assessment, CIA)。欧美发达国家和地区集中在自然植被、野生动物、水土流失和水文水系等方面,通过 AHP 法、灰色关联分析法、主成分分析法、模糊综合评判法、空间配对实验、线性混合模型等,理解道路对生物多样性、生态系统结构和功能的影响^[6,8]。我国一般利用样地法、有效栅格法、景观格局分析、矩阵半定量、模糊综合评价、单因子评价等分析公路引起景观与栖息地破碎化、入侵植被种类和分布格局变化,呈现从实地调查到遥感监测、从数理模型到空间分析、从样本点到区域范围、从静态评价到动态评价等趋势特点。近些年,公路的生态环境影响后评价成为热点。2015 年,《建设项目环境保护事中事后监督管理办法(试行)》,规定了公路正式使用后要按照相关要求对环境影响后评价情况进行监督管理;2016 年,《建设项目环境影响后评价管理办法(试行)》规定了要对生态环境产生不良影响的建设项目进行跟踪性监测和验证评价;2017 年,《建设项目环境影响评价技术导则总纲》进一步明确了建设项目后评价的工作程序、范围、内容和方法。

在学术研究方面,国内在该领域对高速公路^[48-49]的生态环境影响评价相对较多,建立了包含地表植被、生物多样性、农业生态、水土流失、土地利用等多个方面的评价指标体系。青藏工程走廊等特殊地形下的道路也受到了广泛关注,研究多针对青藏公路或铁路对沿线土地利用变化和景观格局的影响^[50],以及由此产生的滑坡、热融滑塌^[25]等问题。Laurence 等(2014,2017)通过“全球道路地图”项目开展了道路的影响评价和潜在风险预测,评估亚太和赤道非洲地区道路基础设施项目对陆地生态系统的影响和经济效益,并预测新道路和基础设施对环境的影响^[51]。从不同尺度开展多元评估,物种尺度评估道路影响物种的范围-强度评估^[32],项

目尺度评估影响大型食肉动物主要栖息地的因素^[47],区域尺度,评估亚马逊 75 个道路项目的生态环境影响与经济效益权衡^[52]。

3.2 道路生态效益分析

道路既引起负面的生态影响,亦能产生正面的生态效益,生态效益包括直接的和间接的生态效益。首先,通过规划、设计阶段科学合理的替代选址、重新布线等源头保护措施,甚至取消道路建设,可以避免、减少、补救、抵消道路对区域生态系统的负面影响,甚至取得关键目标的净效益^[11]。比如,研究表明通过实施“关键栖息地”生物多样性影响缓解措施,可能实现生物多样性的“净收益”^[7]。

其次,在道路建设过程中,通过低影响建造和生态修复重建等措施,能够比常规建造的更为有效减少负面生态影响,可认为其提升了生态效益。这些生态效益可分为几种类型,一种是采取绿色总体设计、低影响甚至无害化建造工艺、受损生态系统修复重建技术,与常规设计、建造工艺相比,获得了更好地源头生态保护效果;一种是由于道路的建设工程措施,在一定程度上改善了局部区域的土壤侵蚀强度、解决了土地沙化或石漠化生态问题,比如透水性更好的路面材料^[53]以减少径流对路域土壤的冲刷;一种是对建设过程中受损的生态系统,采取人工辅助修复工程措施能够比自然恢复取得更好的恢复效果,包括植被恢复措施^[54]、野生动物过境设施^[55]等。

此外,道路的磁吸和催化作用引发人类活动聚集在路域内,以适度的生态环境成本促进土地集约节约利用并保护自然生态系统^[3]。因此,亟需评估道路建造或改善的潜在成本和效益,确定可能具有较低成本和巨大潜在收益的区域和方案。并且在工程规划、设计、建造、生态修复重建措施优化遴选,需要深入研究和准确认识其实施的最佳空间范围和影响起效周期,以更大程度减少道路建设全过程产生的影响。

4 现有研究存在的问题

虽然道路对整个陆路生态系统都造成深远影响,但目前多数研究仍聚焦于局部路段的影响且关注单一目标,缺乏多时空尺度路域生态系统量化影响评估,对生态保护、恢复的效益与贡献研究也极为匮乏,在道路的生态影响、生态影响评价、生态效益分析等研究方面尚存在以下挑战。

4.1 定性多定量少、动态评估薄弱、准确性不足

道路的生态影响研究存在定性多定量少、动态评估薄弱、准确性不足的问题。陆路交通影响生态系统的复杂性决定了综合评估的难度。当前研究多聚焦局部影响模式及缓解措施有效性,缺乏针对公路生态环境影响线形特征和全要素的系统研究,道路影响对象和范围不确定、影响过程和特征不明确,对陆路交通建设模式如何影响未来几十年的生物多样性也知之甚少^[6]。建设运营对沿线不同生态系统类型、不同范围影响区和不同区段的影响强度和范围具有差异性,且随着道路长度和运营时长的增加对生态环境的影响不断累积和叠加,然而,缺乏适当、科学和定量的方法对生态影响进行动态评估。多关注直接影响,而忽视其间接影响,导致影响的真实范围估计偏向保守^[6]。

4.2 陆路交通走廊生态环境累积和叠加效应不清

由于生态系统的时滞和非线性响应,时空尺度对于影响评估极为重要。公路铁路建设影响评估需要考虑跨时空的生态过程,即长时间尺度、不同场景^[50]。然而,实际应用依据 EIA、SEA 评估影响,尚缺乏多时空尺度的路域生态系统量化影响评估,对于陆路交通走廊长期影响的累积效应、设施叠加的复合效应以及其潜在生态环境风险知之甚少^[6]。

4.3 影响评价不全面,量化方法缺乏

目前,道路对生态环境的影响评价不全面,量化方法缺乏。当前研究的尺度多聚焦于区域尺度及以下,较少开展大空间范围的全面影响评价^[3]。同时数据监测获取的不易,指标量化方法的缺少,精细尺度线形空间数据缺乏,现有数据难以纳入已有模型^[6],导致道路生态影响评估难以从半定性半定量到精准量化转变。

4.4 效益与贡献不明,预测精度不足

已有研究表明,通过设计阶段选址、线路优化等措施^[6],可以避免、减少、补救、抵消道路对生态敏感区生

态环境的影响,甚至可以通过生态恢复重建取得关键目标的净效益^[10]。但是,当前研究更多聚焦于负面影响评价,对生态保护、恢复的效益与贡献研究极为匮乏,不仅效益与贡献不明,对于项目可能产生的生态影响预测精度也不足,限制了研究者对道路生态环境影响及其既有效益的准确认识,也不利于规划和建造阶段开展多维效应的科学权衡。

5 研究趋势及展望

5.1 时空尺度效益、累积叠加效应

从规划期、建设期到运营期,道路的生态影响会随着时间逐渐累积;空间上从单一道路到多条道路叠加形成的交通走廊的生态影响变化不只是简单的堆叠。目前常见的单次的工程前、后评价不能完全解释其生态影响,为了更全面地揭示道路时空尺度影响,累积叠加效应研究正逐渐成为研究者关注的重点。但当前累积叠加效应的评价方法和定量化技术都存在一定局限性,未来研究应着力解决不同等级的道路对水土气生各类生态要素、生态系统完整性和功能的影响持续时间有何差异,道路建设前、中、后全过程产生的时间累积效应如何计算;空间上如何区分单条道路和交通走廊的生态影响差异,实现空间叠加效应的定量评价,包括影响类型、范围和程度等方面。

5.2 监测评估精细量化

针对目前道路生态影响监测评估不够全面、缺少指标量化方法的问题,未来的生态影响监测评估研究会着重于在技术上通过集成“空-天-地”多源数据,研究多源数据融合算法,研究高精度生态因素监测技术和快速巡查技术,应对道路影响区内的植被状况、水文水系、景观生态、水土流失、重要保护物种等基本生态状况保持定期监测和调研,比如如何构建优化红外相机地面布设方案,监测道路对物种多样性和动物活动的影响。生态影响评估方面,构建基于生态系统结构-功能-服务-生物多样性的生态环境影响评估综合指标体系,发展科学、有效、准确并适应当前全过程生态环境约束的多模式耦合影响评价模型,突破传统评估方法以半定性半定量为主难以实现生态环境影响定量化的不足,研发基于多源异构数据融合、人工智能和云平台的路域生态系统参数量化技术。

5.3 效益与贡献厘定

为了实现可持续发展,在建设之后通过生态修复抵消环境影响,突破传统方法难以科学回答道路生态环境效益的不足,发展生态环境影响、偏离、修复、植物群落恢复、措施效益等系列指数的估算方法;厘清道路对生态环境产生的效益及其贡献率,如何在进行评价的同时排除其他因素比如气候变化等对生态系统的影响,建立道路生态影响的净贡献率计算方法,以适用于道路生态环境保护和修复重建影响评估的多维度需求也成为当前的研究热点。

5.4 预测与规划,从源头保护

在交通工程建设依旧迅速发展的情况下,从规划设计阶段便开始考虑预测可能产生的生态影响,从源头出发尽量减弱甚至避免交通工程对生态环境的影响,是最理想的结果。而如何通过规划包括替代选址、重新布线等措施,将损失降到最小化,取得最大净效益,达到人和自然和谐相处,也是研究者最终要达到的目标。

参考文献 (References):

- [1] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, Pe'er G, Kati V, Biber-Freudenberger L, DellaSala D A, Vale M M, Hobson P R, Selva N. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 2016, 354(6318): 1423-1427.
- [2] Dominguez J C, Calero-Riestra M, Olea P P, Malo J E, Burrige C P, Proft K, Illanas S, Viñuela J, García J T. Lack of detectable genetic isolation in the cyclic rodent *Microtus arvalis* despite large landscape fragmentation owing to transportation infrastructures. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12534.
- [3] Laurance W F, Clements G R, Sloan S, O'Connell C S, Mueller N D, Goosem M, Venter O, Edwards D P, Phalan B, Balmford A, Van Der Ree R, Arrea I B. A global strategy for road building. *Nature*, 2014, 513(7517): 229-232.

- [4] Laurance W F, Arrea I B. Roads to riches or ruin? *Science*, 2017, 358(6362): 442-444.
- [5] Haddad N M. *ECOLOGY*. Corridors for people, corridors for nature. *Science*, 2015, 350(6265): 1166-1167.
- [6] Carter N, Killian A, Easter T, Brandt J, Ford A. Road development in Asia: Assessing the range-wide risks to tigers. *Science Advances*, 2020, 6(18): eaaz9619.
- [7] Narain D, Maron M, Teo H C, Hussey K, Lechner A M. Best-practice biodiversity safeguards for Belt and Road Initiative's financiers. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 650-657.
- [8] Thomas B Deen-- Forman R T T. *Road ecology: science and solutions*. Washington, DC: Island Press, 2003
- [9] Laurance W F, Goosem M, Laurance S G W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(12): 659-669.
- [10] 路云静, 唐海萍. 生态系统文化服务研究进展——基于 CiteSpace 的可视化分析. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(4): 524-532.
- [11] Cooke S C, Balmford A, Donald P F, Newson S E, Johnston A. Roads as a contributor to landscape-scale variation in bird communities. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3125.
- [12] 李艺, 王红旗, 李晓珂. 公路建设对湿地水系连通性的阻隔效应研究. *公路交通科技*, 2017, 34(11): 143-150, 158.
- [13] Ramos-Scharrón C E, LaFevor M C. The role of unpaved roads as active source areas of precipitation excess in small watersheds drained by ephemeral streams in the Northeastern Caribbean. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 168-179.
- [14] 李晨笛. 农村道路系统水文影响的分析与模拟研究——以溧阳中田舍为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [15] Kelting D L, Laxson C L, Yerger E C. Regional analysis of the effect of paved roads on sodium and chloride in lakes. *Water Research*, 2012, 46(8): 2749-2758.
- [16] Zhao L S, Hou R. Human causes of soil loss in rural Karst environments: a case study of Guizhou, China. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 3225.
- [17] Zhou T, Luo X Y, Hou Y P, Xiang Y C, Peng S L. Quantifying the effects of road width on roadside vegetation and soil conditions in forests. *Landscape Ecology*, 2020, 35(1): 69-81.
- [18] 哈斯图力古尔. 道路建设对景观格局及土壤理化性质的影响研究——以鄂尔多斯市伊金霍洛旗为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2012.
- [19] 雷军, 孙禹, 元志辉, 哈斯·额尔敦. 呼伦贝尔道路对草地土壤表层颗粒组成空间变异的影响. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 18-21, 27.
- [20] 王冠星. 拉萨市区及周边道路交通对路侧土壤环境的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [21] 乌玲琰, 严力蛟. 基于 GIS 和 RUSLE 模型道路对土壤侵蚀格局的影响研究——以浙江省杭衢高速诸暨段为例. *生态学报*, 2014, 34(19): 5659-5669.
- [22] 李善龙, 金永焕, 王铎, 丁宏, 孙超, 朴正吉, 宗占江, 王景田. 长白山自然保护区道路影响域土壤 Zn 和 Pb 分布及污染分析. *土壤通报*, 2012, 43(2): 477-483.
- [23] 王天巍. 黄河三角洲道路网络特征及其对生态影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [24] 安思危. 青藏高原重要交通沿线土壤-植被重金属累积特征与过程解析. 西南大学, 2021.
- [25] 杨林. 青藏高原多年冻土地区热融滑塌形成机理及处治措施探讨——以青藏铁路格拉段 K¹¹⁵⁴⁺900—K¹¹⁵⁵⁺000 段为例. *青海科技*, 2022, 29(1): 87-90.
- [26] Ackerman D E, Finlay J C. Road dust biases NDVI and alters edaphic properties in Alaskan Arctic tundra. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 214.
- [27] 陈岚琪, 夏铎, 张习文, 田国行, 王腾飞, 雷雅凯. 郑州市道路网络结构特征对大气颗粒物污染的影响及尺度效应. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 562-568.
- [28] 张会敏, 刘佳佳, 王翔, 王剑锋, 田良. 兰州市公共交通线路特征及其大气影响分析. *甘肃科技*, 2005, 21(1): 19-22.
- [29] 胡志勇. 沙漠区域高速公路建设对廊道碳排放与沙丘移动影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [30] 谢林芳. 高速公路限制速度对机动车碳排放的影响[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [31] 姜允芳, 韩雪梅, 石铁矛, 宋丹然. 城市道路肌理形态多维指标的微气候影响分析——上海实证研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2020(3): 129-147.
- [32] Blackburn A, Heffelfinger L J, Veals A M, Tewes M E, Young J H. Cats, cars, and crossings: The consequences of road networks for the conservation of an endangered felid. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01582.
- [33] Saxena A, Chatterjee N, Rajvanshi A, Habib B. Integrating large mammal behaviour and traffic flow to determine traversability of roads with heterogeneous traffic on a Central Indian Highway. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18888.
- [34] Torres A, Jaeger J A G, Alonso J C. Assessing large-scale wildlife responses to human infrastructure development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(30): 8472-8477.
- [35] Benítez-López A, Alkamade R, Verweij P A. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis.

- Biological Conservation, 2010, 143(6): 1307-1316.
- [36] Xie S L, Wang X K, Yang T, Huang B B, Wang W J, Lu F, Zhang L, Han B L, Ouyang Z Y. Effect of highways on breeding birds: example of Hulunbeier, China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01554.
- [37] He K, Dai Q, Gu X H, Zhang Z J, Zhou J, Qi D W, Gu X D, Yang X Y, Zhang W, Yang B, Yang Z S. Effects of roads on giant Panda distribution: a mountain range scale evaluation. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1110.
- [38] 兰家宇. 青藏公路和青藏铁路沿线四种有蹄类动物种群数量分布和回避效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [39] 汪自书, 刘语凡, 魏建兵, 曾辉. 快速城市化地区道路格局对土地利用的影响研究. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 180-185.
- [40] 王娟, 崔保山, 刘世梁, 刘杰, 翟红娟. 各等级道路网对纵向岭谷区景观结构健康的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 261-268.
- [41] 张懿锂, 刘林山, 摆万奇, 郑度, 李双成, 阎建忠. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例. *地理学报*, 2002, 57(3): 253-266.
- [42] 陈耀. 郑(州)禹(州)高速公路路域景观环境梯度变化与尺度效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
- [43] 杨新军, 石育中, 王子侨. 道路建设对秦岭山区社会—生态系统的影响——一个社区恢复力的视角. *地理学报*, 2015, 70(8): 1313-1326.
- [44] 李俊生, 张晓娟, 吴晓蕾, 全占军, 范俊韬. 道路交通的生态影响研究综述. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1169-1175.
- [45] May S A, Norton T W. Influence of fragmentation and disturbance on the potential impact of feral predators on native fauna in Australian forest ecosystems. *Wildlife Research*, 1996, 23(4): 387.
- [46] Hill J K, Hamer K C. Using species abundance models as indicators of habitat disturbance in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35(3): 458-460.
- [47] Farhadinia M S, Maheshwari A, Ali Nawaz M, Ambarlı H, Gritsina M A, Koshkin M A, Rosen T, Hinsley A, MacDonald D W. Belt and Road Initiative may create new supplies for illegal wildlife trade in large carnivores. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3: 1267-1268.
- [48] 马明芳. 公路建设项目环境后评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [49] 冯畅. 渝黔高速公路建设项目影响后评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [50] 张慧, 沈渭寿, 张华, 邹长新. 青藏铁路建设对沿线景观格局的影响. *农村生态环境*, 2004(3): 20-23.
- [51] Laurance W F, Balmford A. A global map for road building. *Nature*, 2013, 495: 308-309.
- [52] Vilela T, Malky Harb A, Bruner A, Laísa da Silva Arruda V, Ribeiro V, Auxiliadora Costa Alencar A, Julissa Escobedo Grandez A, Rojas A, Laina A, Botero R. A better Amazon road network for people and the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(13): 7095-7102.
- [53] Tirpak R A, Winston R J, Simpson I M, Dorsey J D, Grimm A G, Pieschek R L, Petrovskis E A, Carpenter D D. Hydrologic impacts of retrofitted low impact development in a commercial parking lot. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125773.
- [54] Song S Z, Xiong K N, Chi Y K. Ecological stoichiometric characteristics of plant-soil-microorganism of grassland ecosystems under different restoration modes in the Karst desertification area. *Agronomy*, 2023, 13(8): 2016.
- [55] 王云, 关磊, 陈济丁, 孔亚平, 张伟. 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*, 2017, 34(9): 146-152.