

DOI: 10.20103/j.stxb.202412133075

任天宇, 肖春芳, 陈健, 卫涛, 周友兵, 邹大虎. 道路干扰对种子传播及幼苗更新影响的研究进展. 生态学报, 2025, 45(19): - .

Ren T Y, Xiao C F, Chen J, Wei T, Zhou Y B, Zou D H. A review of the impacts of road disturbance on seed dispersal and seedling regeneration. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

道路干扰对种子传播及幼苗更新影响的研究进展

任天宇¹, 肖春芳², 陈 健², 卫 涛², 周友兵¹, 邹大虎^{1,*}

1 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443000

2 五峰土家族自治县林业局, 宜昌 443000

摘要: 道路交通为人类提供便捷的同时也深刻地影响了道路周边的生态环境及其服务功能。其对环境的负面影响体现在: 车辆产生的噪音、化学、光污染以及生态环境的破坏。此前, 生态学家多关注道路对动物栖息地的破坏, 但对于道路干扰对植物的影响研究尚少, 道路对种子传播的影响结论尚不明晰, 后续级联效应对幼苗更新的影响并不明确。因此, 梳理了近 30 年来国内外关于道路干扰下植物种子传播及幼苗更新的研究, 以厘清道路对动植物互作和植被更新所产生的影响。研究发现, 道路明显干扰了动物介导的种子传播, 主要表现为直接影响动物种群数量、道路的屏障作用, 间接影响动物的行为和种子的传播距离; 道路带来的物理、化学干扰、天敌作用等因素也显著地削弱了幼苗的更新与植物体后续生长和更新模式等。并且道路的影响还会带来一系列的级联效应。未来从研究方法上应该侧重考虑道路的干扰对生态系统的长期影响, 进行更长久更深入的监测与观察; 从研究内容上应将研究范围进一步扩大, 更多考虑道路边缘与距离道路较远的生态系统之间的联系, 以求探究道路干扰对更大尺度的生态系统植物群落的空间结构产生的深远影响。研究加深了关于道路干扰对植物种子传播及幼苗更新影响认识, 并为全球气候变化背景下各类生态系统中的道路建设提供科学建议和理论支撑。

关键词: 道路干扰; 种子散布; 幼苗更新; 分散贮食; 传播距离

A review of the impacts of road disturbance on seed dispersal and seedling regeneration

REN Tianyu¹, XIAO Chunfang², CHEN Jian², WEI Tao², ZHOU Youbing¹, ZOU Dahu^{1,*}

1 College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443000, China

2 Wufeng Tujia Autonomous County Forestry Bureau, Yichang 443000, China

Abstract: Road traffic, while providing convenience to human life, profoundly impacts the surrounding ecological environment and its service functions. The negative environmental effects of roads are manifested in vehicle-generated noise, chemical pollution, light pollution, and ecological disruption. Previously, ecologists have primarily studied road impacts regarding animal habitats, while relatively few studies have investigated the effects of road disturbances on plants. The influence of roads on seed dispersal remains inconclusive, and the subsequent cascading effects on seedling regeneration are not well understood. Therefore, this study reviewed studies from the past three decades, both domestically and internationally, concerning the effects of road disturbances on plant seed dispersal and seedling regeneration. The objective was to clarify the impact of roads on plant-animal interactions and vegetation regeneration. The findings indicate that roads significantly interfered with animal-mediated seed dispersal. This interference mainly occurred through direct reductions in animal population sizes, road-induced barrier effects, and indirect impacts on animal behavior and seed dispersal distances. Additionally, physical and chemical disturbances caused by roads, combined with predator influences, notably weakened

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (32301344)

收稿日期: 2024-12-13; **网络出版日期:** 2024-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bigtigerzou@163.com

seedling regeneration and subsequent plant growth patterns. These disturbances may have triggered cascading effects within the ecosystem. Looking forward, future research methods should prioritize examining the long-term impacts of road disturbances on ecosystems, emphasizing extended and more in-depth monitoring and observation. In terms of research content, the scope should be broadened to better understand the connections between road edges and ecosystems situated farther from roads. This approach would facilitate a more comprehensive exploration of how road disturbances influence the spatial structure of plant communities within larger-scale ecosystems. This study advances the understanding of how road disturbances impact plant seed dispersal and seedling regeneration, offering scientific insights and theoretical support for road construction within ecosystems under the context of global climate change.

Key Words: road disturbance; seed dispersal; seedling renewal; dispersible food; dispersal distance

种子传播又称种子散布或种子扩散,是传播体脱离母株之后到达新点位的过程^[1],种子传播确保了植物繁殖和种群持续扩展、使各个生态系统能保持物种多样性,抵御环境压力^[2]。种子传播在植物种群更新过程中扮演着重要角色^[3]。当种子传播受阻时,会对生态系统造成一系列影响:(1)植物种群生长受限,减少植物多样性的同时也影响了植物的基因多样性^[4-5]。(2)生态系统自然更新的速度将显著减缓^[6]。(3)植物多样性的降低导致生态系统抵御不利环境的能力下降^[7-8]。

人为干扰在生态系统中非常普遍并且对种子传播的影响是多样且复杂的^[9]。人为干扰指人类的活动对生态系统造成的一系列影响,其包括破坏性干扰和增益性干扰。破坏性干扰会造成生态平衡失调和功能的退化,如过度放牧、乱砍滥伐等;增益性干扰对生态系统演替起到促进作用,例如合理砍伐、低效林分改造、森林抚育间伐等^[10]。人为干扰对种子传播的影响主要通过动物种群的动态变化,进而影响到动物对种子的传播^[11];城市化和城市热岛效应也是人为干扰的主要表现形式,其会阻断种子传播过程^[12]、影响种子的萌发^[13];另外,农业活动显著影响种子传播,耕作、放牧和农药使用等活动会破坏种子传播的途径^[14];在全世界范围内,动物种群和行为正受到人为干扰的威胁和破坏。越来越多的研究表明,人为干扰是物种灭绝风险升高和生物多样性丧失的关键因素^[15]。而道路的建设加剧了人为干扰造成的生态系统退化^[16]。

全球道路网的空前扩张为人类进入以前偏远的地区提供了便利^[17],但也带来了极强的负面效应,使之成为一种最为普遍的人为干扰形式(图1)。全球陆地的变化和人类活动的影响几乎覆盖了所有的陆地表面,其中道路带来的干扰尤为突出,98%的陆地受到道路的干扰或影响^[18]。在陆地生态系统中,全球90.7%的保护区(包括森林)经受着道路干扰^[19]。这些干扰不仅改变了自然栖息地的结构和功能,还在多个层面对生物群落产生了深远影响^[20]。这些不利效应对动物影响尤为明显,如田鼠等小型啮齿类靠近道路的个体密度更低^[21];鸟类和其他哺乳动物都有避开道路的趋势^[22];甚至蜚螂等节肢动物的生态服务功能都会受到影响^[23]。道路会通过交通噪音对动物的行为产生影响:交通噪音(如汽车鸣笛等)会使蝙蝠的繁殖和捕食行为发生改变^[24];另外还有道路交通带来的“路杀”现象会直接影响动物个体的数量^[25]。此外,道路的存在也影响了动物的行为模式^[26],进而干扰种子的传播过程,限制植物种群的扩散和生态系统的自然更新能力。

道路的干扰并不是孤立、单一的,它会产生一系列级联效应,从而影响植物种子传播和幼苗更新。在生态系统网络中,作为一种特殊的环境因子,道路对种子传播和幼苗更新的影响是复杂多样的,但以往研究多关注于道路对动物种群的直接影响,道路干扰对多种生态系统的深层次影响尚不明确,当前研究结论尚有矛盾冲突。本文通过梳理相关研究,按照“道路干扰-种子传播-幼苗更新-群落演替”级联效应模型,分为直接和间接两种方式系统整理了道路干扰对植物种子传播及幼苗更新的综合影响。有助于理解道路干扰影响植物种子传播和幼苗更新的生态机制,为保护道路周边生态系统和平衡道路建设与生态保护之间的冲突提供理论基础。

1 研究方法

如图2所示,在Web of Science (<https://webofscience.clarivate.cn>) 核心合集数据库中以检索公式TS =

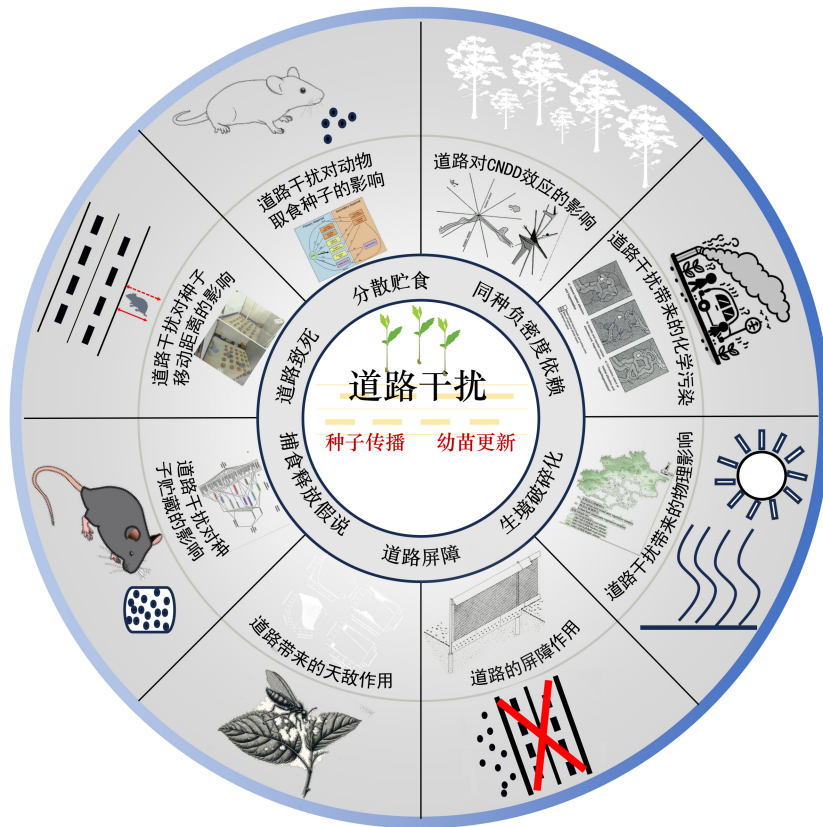


图 1 道路干扰对种子传播和幼苗更新的影响

Fig.1 The impact of road disturbance on seed dispersal and seedling regeneration

(road) AND TS = (seed dispersal) OR TS = (road) AND TS = (seedling regeneration) 搜索,时间截止至 2025 年 4 月 3 日,文章类型为“Article”,出版年限定在 2006—2025 年。去除无关领域的文章 5 篇,共搜到 299 篇文章。如图 3,近年来对道路干扰研究的文献数量年份分布较为平均,文献数量达到 20 篇的国家依次为美国、西班牙、德国、巴西、法国、中国和加拿大。

使用 VOSviewer 软件对 299 篇文献进行关键词聚类分析,选择出现 10 次以上的关键词,生成关键词共现图谱(图 4),可知物种丰富度(species richness)、物种多样性(species diversity)是被频繁使用的多样性代表指数,研究区域多集中在森林(forest)、雨林(rain-forest)、草地(grassland)。研究关注生态系统演替的各个阶段,如建立(establishment)、传播(spread)、补充(recruitment)、恢复(restoration)和再生(regeneration)。

2 道路干扰的直接影响

道路干扰的直接影响主要表现为对生态系统物理和生物特征的直接破坏。首先,道路的建设和存在会对

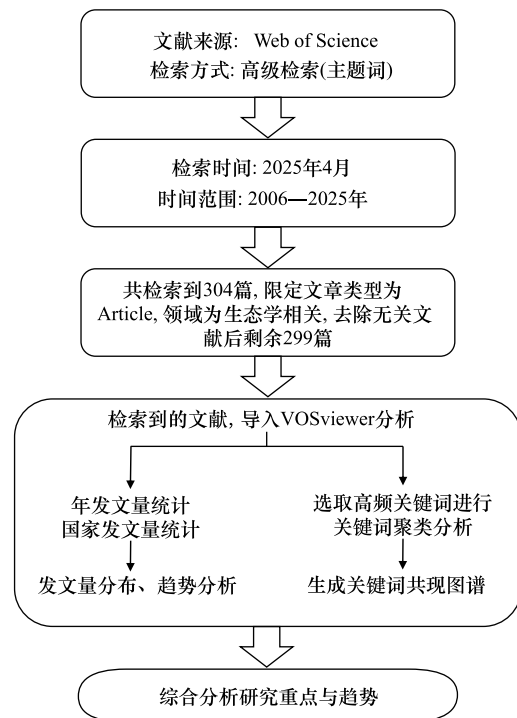


图 2 文献分析流程图

Fig.2 Literature analysis flowchart

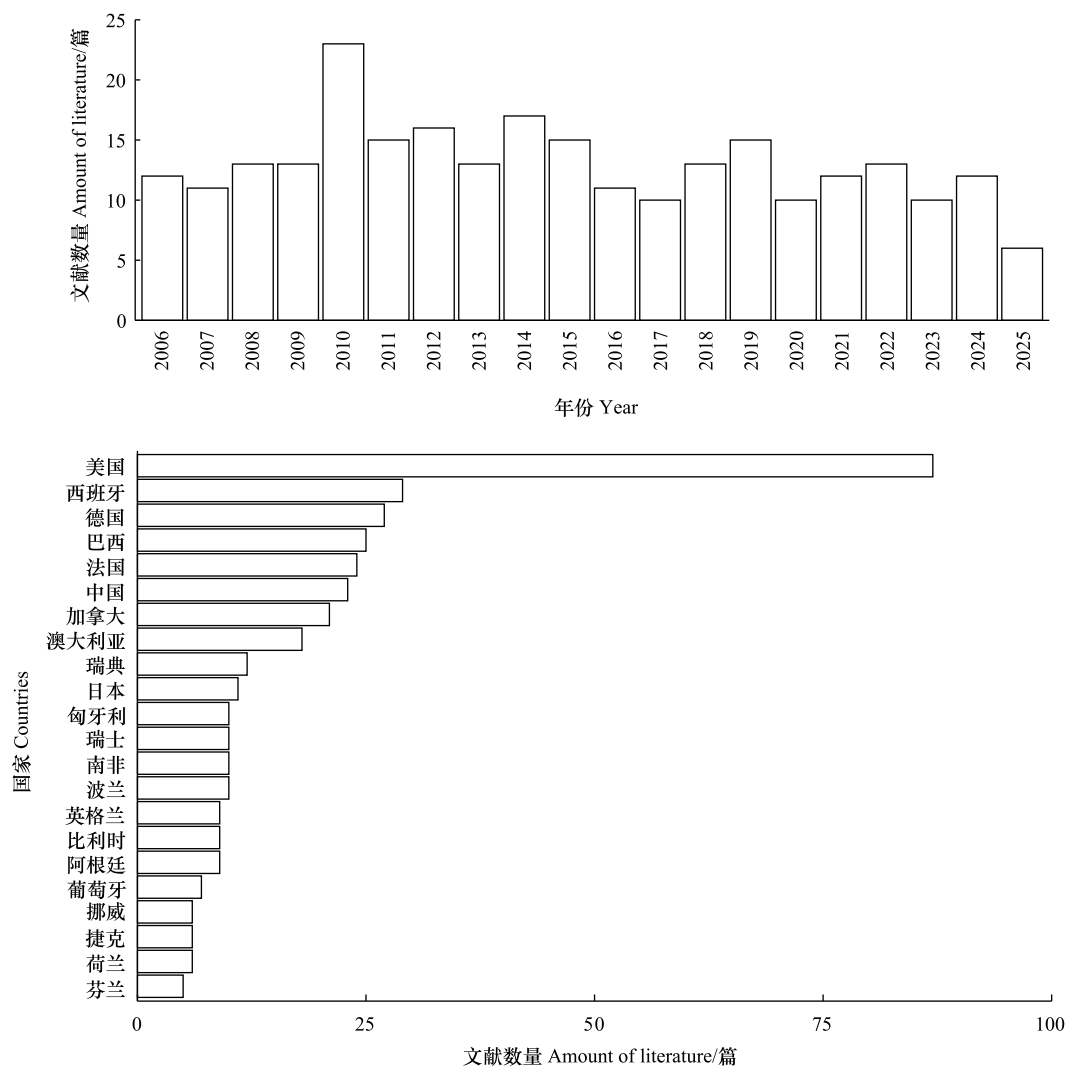


图3 2006—2025 年文献发表情况

Fig.3 Publication of literature form2006 to 2025

生态系统造成直接物理破坏,包括植被移除、土地改造、栖息地的丧失等^[27]。这种破坏不仅影响生物群落的组成,还重新配置了局部地形特征,导致陆地和水生生态系统的物理和生物特征受到影响^[28];另外,道路网络扩展增加了生态系统的破碎化程度,导致栖息地小片化和边界效应增强。研究表明,道路密度和生态干扰之间存在显著相关性,高密度道路网络对生态系统的干扰更为明显^[29]。最后,道路的存在还改变了物种分布和栖息地质量,某些动物如灰熊、沙漠龟等种群密度显著减少。特别是对于栖息地依赖性强的物种,道路的影响更为显著^[30]。

2.1 道路干扰对种子传播的直接影响

2.1.1 影响种子传播者种群数量

动物传播是一种极为重要的种子传播方式^[31],特别是在森林生态系统中,动物传播途径是不可替代的^[32]。动物往往扮演着种子的捕食者和传播者的双重角色^[17,33]。如啮齿动物,它们在充当种子取食者的同时,也介导了植物的更新过程^[34—35]。对于种子较大的树木,由于其无法借助风传播的方式进行种子的散布,动物传播途径成为其主要传播方式,如栎子、榛子等。星鸦 (*Nucifraga caryocatactes*) 作为红松 (*Pinus koraiensis*) 的首要扩散者,其喙部宽大且尖锐,完美适应了啄食种子的取食方式,其单次运输种子能力最高可达六十二枚^[36]。这些传播方式直观的反应出了动物与植物在森林更新过程中的互惠关系^[37]。

10000 辆/天时,动物穿越道路屏障就会受到极大影响;当日均车流大于 10000 辆/天时,野生动物几乎完全被道路隔断,无法穿过道路^[47]。例如,道路的栅栏对于一些猫科动物如欧洲野猫(*Felis silvestris*)具有阻断效应,致使这些欧洲野猫选择减少或者放弃过马路^[48]。此外,道路干扰还会形成一种行为屏障,例如挪威野生驯鹿倾向于利用位于道路 5km 之外的草地资源,其他小型哺乳动物及若干森林鸟类也倾向于在远离道路的区域活动^[46]。这一效应在许多研究中得到了证实,在对橡子-啮齿动物系统和米心水青冈(*Fagus engleriana*)坚果-啮齿动物系统的两项研究中,研究者发现了一个现象,即被标记的种子没有出现在道路另一边的样地^[17,49]。这一现象可能是和啮齿动物的习性有关,即啮齿动物无论在何种交通强度下,一般都不会选择通过道路^[26]。这也说明道路除了带来各种干扰因素之外,还作为物理屏障阻碍了啮齿动物对种子的扩散^[50]。

2.1.3 道路导致生境破碎化

道路干扰对动物栖息地的破坏是重要的影响因素,道路的建成将野生动物的栖息地隔离成独立的斑块,使自然生境破碎化^[51]。对于迁移能力较差的物种,由于无法进行有效的基因交流,在局部尺度上导致种群出现近交衰退现象^[52]。对于一些采取 K 对策的大型动物,他们种群密度较低,繁殖率低,对道路干扰更加敏感,例如有研究指出在美国蒙大拿州,高速公路附近灰熊(*Ursus arctos*)的种群密度显著下降,且种群基因多样性较低,这是因为高速公路形成了“生态屏障”,限制灰熊的活动范围,导致不同群体之间基因流减少^[53]。道路建设也会使草原生态系统退化并呈现出破碎化的趋势,在香格里拉市进行的一项研究表明道路附近的重度退化草地面积较大,尤其是在主干道和交通繁忙区域^[54]。对于栖息地被破坏产生的边缘化栖息地,某些野生动物会主动避开。对于那些不适合生活在森林边缘的物种,栖息地数量的显著减少会导致其种群数量下降^[55-56]。

2.2 道路干扰对幼苗更新的直接影响

幼苗更新作为森林更新的一个重要部分,在林木生命周期中极其关键,是森林群落演替过程中不可或缺的一环,对于维持和促进森林生态系统的健康及多样性至关重要^[57]。在生长过程中,植物幼苗极为敏感且对生长条件的要求较高^[58],故在很多林地中出现“只见大树不见苗”的情况^[59]。道路干扰下的幼苗更新受到物理化学干扰等因素的直接影响,产生的更新结果是多样复杂的。

2.2.1 土壤物理特性改变

道路至少改变了陆地环境的五个物理特征:土壤密度、温度、土壤含水量、光照、灰尘^[60]。长期使用道路会导致土壤压实,即使在停止使用后也会持续存在。封闭林道上的土壤密度持续增大,特别是在冬季^[61]。加利福尼亚州东北部使用 40 年以上的道路的土壤压实度比附近没有用做道路的地区高 20%^[62]。高土壤密度会导致氧气供应不足^[63]、水分渗透性差、养分供应受限^[64]、根系生长受限^[65]等多种不利影响,抑制幼苗的更新。道路下土壤的含水量也会出现下降,即使道路不使用这种下降也不可避免,这可能是对土壤孔隙度变化的反应,土壤水分不足会导致幼苗的生长发育受到抑制^[66]。根系无法充分吸收水分,导致叶片失水,生长停滞;缺水会使幼苗叶片萎蔫,叶温上升,光合作用效率降低,影响植物的正常生长^[67]。长期缺水会导致根系干枯,影响植物对水分和养分的吸收能力,严重时可能导致幼苗死亡^[68]。

2.2.2 道路带来的化学污染

道路干扰带来的化学污染是最多也是最复杂的^[60],对于幼苗来说,路边土壤的重金属污染^[69]和汽车尾气在空气中的残留都是有害的^[70]。重金属如铅(Pb)、镉(Cd)和锌(Zn)会抑制种子的萌发和发芽,导致种子活力下降,并且影响幼苗的根长、芽长、根鲜重和芽鲜重,导致幼苗生长受阻^[71];重金属还会引起植物体内电解质外渗、酶活性丧失及膜脂过氧化,干扰植物的正常生理代谢和生长发育^[72];重金属在植物体内的长时间累积也会导致植物中毒,表现为叶片黄化、萎蔫,甚至死亡^[73]。汽车尾气中含有臭氧(O₃)、氮氧化物(NO_x)等有毒物质,臭氧会引起叶片出现斑点、黄化和早期脱落,减少植物的光合作用面积^[74]。臭氧还会影响植物的根系发育,导致水分和养分吸收不足,从而抑制幼苗的生长^[75]。氮氧化物会通过气孔进入植物叶片,损害叶片细胞膜,降低叶绿素含量,阻碍光合作用。高浓度的氮氧化物还会引起植物叶片变色、脱落甚至枯死^[76]。

道路带来的污染物还含有多种的盐,高盐浓度会导致植物幼苗的根系发育受阻,根体积、根表面积和根长均显著减少。这会影响植物对水分和养分的吸收,进而抑制幼苗的整体生长^[77];在高盐环境下,植物会积累更多的脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质,以抵抗盐胁迫。然而,这些物质的过度积累也会对植物的正常生理功能产生负面影响^[78]。相对于成体,许多物种幼苗对盐更为敏感,这使得幼苗更容易受到环境干扰。受化学干扰,诸多植物的生长^[79]及其整体健康状况可能遭受抑制,严重时甚至可导致其死亡^[80]。

2.2.3 光照和温度的变化

与裸露的土壤相比,硬质路面上水汽输送的减少会提高道路的表面温度,这种影响随着路面厚度的增加而增加。储存在路面上的热量在夜间释放到大气中,在道路周围形成热岛^[81]。热岛效应会导致植物的生长季节发生变化,提前发芽和开花,推迟落叶和休眠,这种不正常的生长周期会影响植物的正常发育^[82];环境温度的升高会加速植物的蒸腾作用,增加水分流失,幼苗更容易出现干枯萎蔫现象。温度的升高还会引起病虫害的增加,因为高温环境有利于害虫繁殖传播,温度升高使幼苗更易于受到病虫害的侵袭^[83]。道路交通还会产生灰尘,当灰尘落在植物上时,会阻碍光合作用、呼吸和蒸腾作用,并对植物体造成伤害^[84]。

3 道路干扰的间接影响

道路干扰的影响可分为直接和间接两种。直接影响直观的表现“路杀”或造成动物的伤亡、栖息地斑块化和破碎化以及栖息地丧失、道路的屏障效应等^[60,85-87]。间接影响则表现为长期的时间尺度上,影响传播者繁殖、扩散等行为^[88];改变生态环境的微生境条件以及影响物种间的互作关系等,所以理解道路干扰对种子传播和幼苗更新的间接影响机制对解决当前研究结果存在的矛盾冲突至关重要。结合历史研究结果可梳理出道路干扰的间接影响有以下方面。

3.1 道路干扰对种子传播的间接影响

3.1.1 动物取食行为变化

动物对种子的取食是动物介导种子传播途径的第一步。世界上多达 90% 的热带树种以及 60% 的温带木本植物依赖于动物传播途径进行种子传播^[89]。在动物界中,啮齿类和鸟类主要取食和传播较大树木种子^[36],而大型哺乳动物包括野猪、黑尾鹿、马鹿则取食小型灌木、草本植物及其种子^[90]。

种子被动物取食的比例在不同生境下有差异^[91-93]。有研究表明鼠类对地表的种子捕食率更高^[94],即落叶覆盖层可以更好的保护种子免受鼠类捕食^[95]。道路建设和使用过程中林隙变大,使得更多阳光照射进地面,地表落叶覆盖层变的更密集,可以有效减少动物对种子的取食^[96-97]。另外有实验表明,同一年中树下的种子,相比于灌丛和无植被覆盖的地面,被动物更快的移走^[98],表明动物通常偏好于在收益最大化的位置,即树木下方的地表区域,进行觅食活动^[33]。

栖息地大小也会影响动物对种子的取食行为。研究者发现,鼠类在小林地的种子消耗量远远高于在大林地的种子消耗量^[90]。Santos 和 Tellería 在 1991 年实验中发现,小片栎树林中的栎子被消耗的数量是大片林地的 33.7 倍;而在 1994 年,则高出 3.1 倍。在这两年期间,相较于鸟类,小片林地内鼠类对种子的消耗量分别高出 49 倍和 95 倍,表明鼠类在小片栎树林中对栎子的消耗极为重要。道路的建设将生态系统碎片化,导致大块林地被切割成更多的小块林地,在这种情况下,啮齿动物对种子的取食将大大增加,从而降低种子传播成功率。

3.1.2 动物贮藏行为的变化

道路干扰带来的交通噪音和光污染对动物而言,是一种潜在的选择压力^[99]。噪音会改变动物的生理、行为(沟通、觅食、警惕)、繁殖、运动等一系列表型^[100-103],尤其是警惕和种子贮藏行为^[104]。很多动物尤其是啮齿动物有贮藏食物的习惯,这种习惯使它们可以更高效的利用食物资源,也为植物的种群更新提供一种有效途径^[105]。啮齿动物将种子转移至适宜的微环境并进行浅层掩埋,不仅增加了种子萌发的概率,进而促进植物种群的更新,还在一定程度上扩展了植物的分布范围^[106-107]。这一途径在部分植物的种子传播中极为重

要。例如,在一个羚羊角草种群中,超过 90%的新建成幼苗源自黄松花鼠所分散储藏的种子^[108]。

道路干扰对动物贮藏种子行为的影响是复杂且多样的^[104,109]。道路干扰影响动物贮藏种子的行为模式主要有两种方式^[50]:首先,路边的植被能为小型动物提供栖息地和庇护所^[110]。道路建设会破坏这些栖息地,使啮齿动物的活动频率、警惕性和种子贮藏行为发生改变。研究发现,中层植被提供了重要的掩护,使小型哺乳动物在觅食和贮藏种子时能够躲避捕食者。移除中层植被后,掩护减少,啮齿动物被捕食风险增加,导致觅食活动和种子贮藏行为相应减少^[97]。其次,道路建设过程中造成的残留物可能也会改变动物对种子的贮藏率,如爆破产生的砾石堆和在沼泽地上修建路基时使用的填充材料对啮齿动物来说都是极佳的人工庇护所。Jensen 和 Nielsen 发现鼠类通常展示出一种偏好,即沿特定路径移动并将种子储藏于枯落物层与矿物质颗粒之间的位置^[111]。建设道路时留下的庇护所是啮齿动物贮藏种子的理想场所。

3.1.3 种子传播距离缩短

啮齿动物感知到捕食的风险有所增加时,加之种子被盗食的风险较低,单个啮齿动物投入大量能量将其藏匿处分散在大面积、远距离上可能是不经济的^[104]。研究表明,种子在道路附近的传播距离缩短了 50%^[112]。这种现象可能是由于机动车和道路带来的噪音和空气污染影响程度过大导致的。道路附近的空气污染可以诱导“掩蔽效应”,损害野生动物的嗅觉交流^[113—114],致使动物重新安置种子付出更高的能量代价,导致种子被传播的距离变短^[115]。正如“搜索时间重定位假说”提出的那样,缩短种子扩散的距离可以让啮齿动物花费更多的时间来搜索更多食物^[116]。然而,道路干扰对种子传播距离的影响并不符合“道路梯度效应”,即离道路越近的地方影响越大。研究发现相比于距离道路 10 m 和 100 m 的样点,距离道路 200 m 的样点种子传播距离也并没有明显变长。这可能是由于其他环境因素的限制,比如周边资源的分布或种群间竞争,导致啮齿动物不愿将种子带到更远的地方^[112]。

3.2 道路干扰对幼苗更新的间接影响

3.2.1 种内竞争加剧

道路干扰带来的种子传播距离变短使得更多的种子散布在其母树周围,这一现象会带来不利后果。关于植物更新和种子扩散关系有如表 1 三种假说。同种邻居之间的相互影响通常比异种邻居大,这种现象被称为同种负密度依赖(CNDD, Conspecific Negative Density Dependence)效应^[117]。种子无法被传播到较远的距离,无法有效的规避同种负密度依赖效应(CNDD effects)的有害影响,将带来更为激烈的种内竞争,这意味着它们在有限的空间内需要争夺水分、养分、光照等资源,例如在一项研究中,自然再生的山毛榉林中,竞争是幼苗死亡的主要驱动因素,特别是在高密度分布下,相似大小的邻近幼苗之间的竞争对死亡率有显著影响^[118]。由于资源有限,这类竞争可能导致部分幼苗生长受阻甚至死亡^[119]。这导致母树周围同种植物的死亡率升高^[120—121]。

表 1 植物更新和种子扩散关系的三种不同假说

Table 1 Three different hypotheses for the relationship between plant regeneration and seed dispersal

假说名称 Name of hypothesis	假说内容 Elements of the hypothesis
Janzen-Connell 假说 Janzen-Connell hypothesis	Janzen 和 Connell 认为母树附近的种子和幼苗存活率较低,主要因为种子的死亡率受密度和距离的制约。目前许多研究结果支持了该假说 ^[120—121] 。
Hubbell 的假说 Hubbell's hypothesis	Hubbell 认为虽然母树附近的种子存活率很低,但那里的种子丰度很高,所以幼苗补充率仍然很高 ^[122] 。
Howe 的假说 Howe's hypothesis	Howe 认为被成堆扩散的种子,其种子捕食率不会受密度性制约,并且在母树附近的种子存活率较高 ^[123] 。

3.2.2 天敌作用增强

除了同种负密度依赖效应带来更为剧烈的种内竞争以外,道路干扰造成的高密度的幼苗分布也更易招引专一性天敌的攻击。根据詹森-康奈尔假说(Janzen-Connell hypothesis),专一性植食者以及其他天敌(主要指

捕食者)的捕食使得母树周围区域不适宜自身后代的生存。不论是距离敏感型捕食者(Distance-responsive predators,即那些倾向于捕食接近母树的种子及幼苗的捕食者),还是密度依赖性捕食者(Density-dependent predators,专门针对数量最为密集的种子与幼苗进行捕食的捕食者),均倾向于捕食位于母树周边的种子及幼苗,进而抑制该物种幼苗的更新;Harms 等在分析了巴拿马巴罗科罗拉多岛上的长期实验数据后发现昆虫(如蛀虫和幼虫)倾向于攻击聚集的幼苗,这种专一性行为进一步减少了高密度种群的幼苗存活率^[124]。

Janzen-Connell 假说认为,除了植食性动物类天敌对高密度幼苗产生威胁之外,宿主专一性的病原菌的攻击也同样是导致幼苗更新受到阻碍的一个因素^[120—121]。正如 Metz 等在亚马逊雨林中的研究发现,病原体是种子和幼苗阶段密度依赖性死亡的一个重要因素,在高密度的种子或幼苗聚集区,专一性病原体更容易传播,例如真菌和细菌等病害,导致较高的死亡率。病原体通过选择性杀死密度较高的种子或幼苗,抑制这些种群的扩张,减轻它们对资源的竞争压力,从而为其他物种腾出生态位^[125]。由此可见道路干扰也促使了幼苗更新过程中生态位的转变。

4 道路干扰的级联效应

道路干扰对种子传播带来的级联效应复杂而多样,大致可分为四种:生态位的转变、互惠网络的破坏、引起捕食释放效应、道路干扰引发幼苗更新模式改变(图 5)。

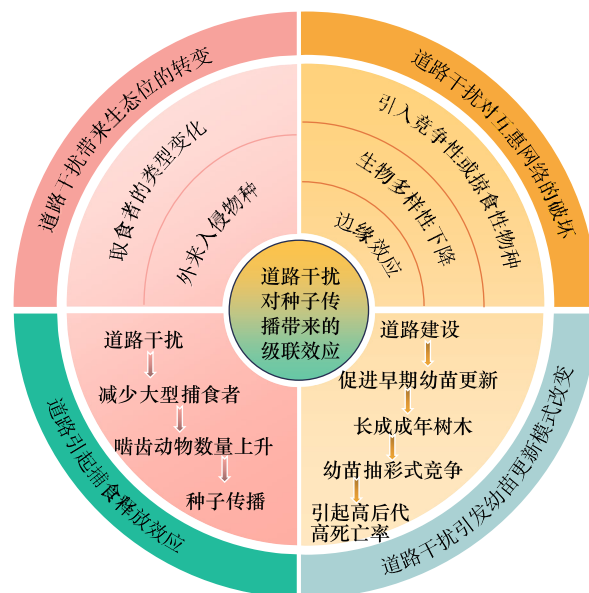


图 5 道路干扰对种子传播带来的级联效应

Fig.5 Cascading effects of road disturbance on seed dispersal

4.1 生态位的转变

道路干扰可以改变种子取食者的类型:研究发现,在距离道路 10 m 的样带的种子存放点,野猪没有吃带标签的种子,而在距离 100 m 的样带上的一个存放点和沿 200 m 样带的两个存放点,野猪吃了带标签的种子,这表明有蹄类动物可能会避免靠近道路,将距离道路更近的种子让由啮齿动物捕食^[49]。这是由于啮齿动物繁殖率高、家域小以及无论交通量如何都避开路面,它们的种群比大型哺乳动物种子传播者更能忍受道路干扰^[26,126—127]。由此看出,道路干扰可以带来的生态位的转变。

最近的研究显示,道路作为通道,使外来植物物种如三裂叶豚草(*Ambrosia trifida* L.)能够进入新的区域,道路建设和维护所带来的环境干扰为这些植物的生长和定植提供了有利条件。道路不仅直接通过建筑材料引入植物种子,而且通过提供交通途径(如车辆、机械等),进一步加速了种子的传播,推动了植物在更广泛区

域的扩散。作为外来入侵物种,三裂叶豚草通过与本地植物竞争、改变栖息地以及可能扰乱生态功能,改变当地原有物种生态位,对当地生物多样性构成严重威胁^[128]。

4.2 互惠网络的破坏

道路干扰可能通过多种方式破坏生态系统中的互惠网络^[129],例如道路导致的生物多样性下降,互惠网络的稳定性依赖于一些核心物种的存在,这些物种对于维持生态系统功能和生物多样性至关重要^[130]。当这些关键物种因环境扰动(如道路建设或栖息地破碎化)而消失时,互惠网络可能崩溃^[131];道路也会通过引入竞争性或掠食性物种破坏互惠网络,道路常成为入侵物种传播的通道,这些物种通过竞争或捕食,对本地物种及其生态网络造成严重破坏^[132]。道路环境的边缘效应同样是造成互惠网络破坏的因素,道路建设使森林碎片化程度增加,斑块交界处的边缘区域通常吸引更多的捕食者,因为这些区域提供了丰富的食物资源和栖息地,所以边缘效应使啮齿动物的捕食者增加^[133]。道路的干扰会使得网络中的物种数量减少,导致互惠网络更加简单、脆弱^[134-135]。网络的生态功能(如授粉效率、种子传播距离)可能显著下降,影响生态系统的健康和稳定性,进而对种子传播产生影响^[136]。

4.3 引起捕食释放效应

道路建设和相关活动对生态系统的干扰,可能通过改变捕食者与猎物之间的动态关系,导致猎物种群数量的上升或其他相关变化^[137]。捕食释放效应(Predator Release Effect)是指由于捕食者数量减少或捕食压力降低,使猎物种群繁殖率提高或种群规模扩大的一种生态现象^[138]。在某些森林或草原附近,由于道路建设减少了捕食者(如猛禽、蛇类、野生猫科动物)的活动频率,导致鼠类种群数量显著上升。例如有研究指出,有些小型哺乳动物如白足鼠(*Peromyscus leucopus*),由于极少上路、领地面积较小、繁殖率较高,斑块化的生境对他们并无影响^[139]。随着两栖爬行动物和以肉食为主的中大型哺乳动物由于种群破碎化以及交通干扰导致的栖息地数量减少^[44],白足鼠的捕食者减少,使白足鼠数量上升^[21]。由此可见,道路干扰通过捕食释放效应传递影响了种子传播。

4.4 道路干扰引发幼苗更新模式改变

道路建设过程中产生了树冠覆盖的中断,增加了树冠间隙。这一间隙可以促进早期幼苗更新,以及幼树的建立和存活^[140]。根据空间限制假说,在建成道路后,这些幼苗和树苗长成成年树木,大量的种子散布在周围,幼苗密度升高,导致幼苗的死亡率升高,更新转化率降低^[141]。这种情况下,幼苗之间发生近似于抽彩式竞争,而不是受到密度依赖效应的影响。在靠近道路的区域,树木更新过程更像是一个随机的抽彩过程,物种优先到达空斑块具有一定随机性^[142]。这一结论解释了一个有趣的现象,道路附近的树木相比林中更年轻,年龄和道路建设的时间大致保持一致。这可能是由于同种成年树会竞争和死亡,后续幼苗难以大量建成,导致新生树苗数量下降。进而引发了靠近道路的树木年龄与道路年龄相似的现象。

5 展望

综上所述,针对道路干扰下的植物种子传播和幼苗更新已经有了一定研究成果积累,也有部分的理论认识和实验依据,但较于道路干扰对动物影响的研究,对植物影响的认识仍然不足(图6)。第一,研究层次较单一,研究数量较少。现有研究主要集中在道路对啮齿动物行为的干扰如何改变种子传播能力,进而影响到幼苗更新,而且这类研究仍显不足。从多方面、多维度、深层次的理解各种沿道路影响的共同作用的研究目前较少。道路对种子传播和幼苗更新的影响在自然环境中复杂多样,干扰动物行为的效应在不同研究区域可能产生相反的结论;化学污染及植物的拮抗适应性、道路车辆和行人造成的物理破坏,这些因素交织成一个复杂的影响因子网络。对于生态系统演替来说,考虑多种因素的关联效应和多层次因素的级联效应是必不可少的。然而,对于道路干扰下的植物种子传播和幼苗更新重视程度仍然不足,道路的数量每年都在飞速增加^[19,143],随着更大的道路交通网络建成,影响将进一步加剧。

第二,研究的时间和空间尺度较小。研究者多关注3—5年内道路干扰对幼苗更新的变化,但对于大尺度

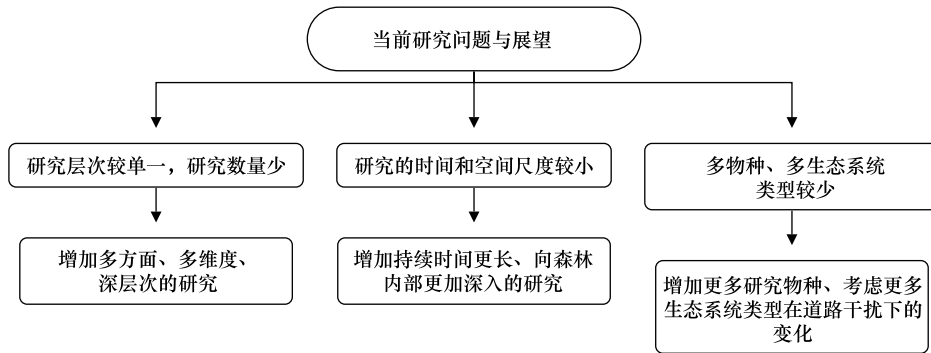


图 6 当前研究问题与展望

Fig.6 Current research issues and prospects

的生态系统来说,这一时间尺度是完全不足以认识整体演替规律的,树木的生长往往需几十年时间,在此期间种子传播效果、幼苗建立、树苗生长情况以及受到成年树木的影响等动态变化仍缺乏长期观测数据。未来研究应关注更长时间的更新动态变化,以便揭示道路干扰对植物幼苗更新的深层次影响;当前研究多关注道路沿线受到道路干扰的情况,而忽视了向生态系统内部的延伸效应,下一步应对道路干扰深入生态系统内部的深层次影响进一步探究,并在森林管理和交通基础设施可持续发展方面进行综合考量。

第三,多物种、多生态系统类型研究较少。目前研究主要聚焦在橡子和啮齿动物的关系上。未来研究应扩展到其他种子和传播者,以了解不同物种之间的相互作用如何受到道路的影响;另外,当前研究主要集中在单一生态系统中,未能建立多生态系统比较模型,未来研究需结合生态类型进行细化分析,对不同生态系统中道路影响模型的建立有助于合理规划交通基础设施的建设。

总之,研究道路干扰对植物种子传播和幼苗更新的影响意义是深刻的,随着科技发展,以森林为首的多种生态系统类型中出现道路的干扰和影响已经是不可逆的趋势,此后应通过持续规划、管理和监测进一步探索通过优化道路设计来减轻这些负面影响,从而促进森林再生和生态系统健康发展。

参考文献 (References):

- [1] 朱金雷, 刘志民. 种子传播生物学主要术语和概念. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2397-2403.
- [2] Perea A J, Wiegand T, Garrido J L, Rey P J, Alcántara J M. Legacy effects of seed dispersal mechanisms shape the spatial interaction network of plant species in Mediterranean forests. *Journal of Ecology*, 2021, 109(10): 3670-3684.
- [3] Hamrick J L, Murawski D A, Nason J D. The influence of seed dispersal mechanisms on the genetic structure of tropical tree populations. *Vegetation*, 1993, 107(1): 281-297.
- [4] Nathan R, Muller-Landau H C. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(7): 278-285.
- [5] Howe H F, Smallwood J. Ecology of seed dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, 13: 201-228.
- [6] Clark C J, Poulsen J R, Bolker B M, Connor E F, Parker V T. Comparative seed shadows of bird-, monkey-, and wind-dispersed trees. *Ecology*, 2005, 86(10): 2684-2694.
- [7] Seidler T G, Plotkin J B. Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. *PLoS Biology*, 2006, 4(11): 2132-2137.
- [8] Wang B C, Smith T B. Closing the seed dispersal loop. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(8): 379-386.
- [9] 王静, 闫巧玲. 干扰对动物传播森林植物种子有效性影响的研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(05): 1716-1726.
- [10] 刘增文, 李雅素. 论森林干扰. *陕西林业科技*, 1997, 25(1): 28-32.
- [11] 樊正球, 陈鹭真, 李振基. 人为干扰对生物多样性的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 31-34.
- [12] McDonnell M J, Hahs A K. The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology*, 2008, 23(10): 1143-1155.
- [13] 许格希, 裴顺祥, 郭泉水, 牛树奎. 城市热岛效应对气候变暖和植物物候的影响. *世界林业研究*, 2011, 24(6): 12-17.

- [14] Fischer J, Lindenmayer D B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(3): 265-280.
- [15] Camargo-Sanabria A A, Mendoza E, Guevara R, Martínez-Ramos M, Dirzo R. Experimental defaunation of terrestrial mammalian herbivores alters tropical rainforest understorey diversity. *Proceedings Biological Sciences*, 2015, 282(1800): 20142580.
- [16] Xia Z L, Li Y J, Guo S C, Zhang X G, Pan X Q, Fang H, Chen R S, Du P J. Assessment of forest disturbance and soil erosion in wind farm project using satellite observations. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 212: 107934.
- [17] Chen W W, Zhong J, Carson W P, Tang Z H, Xie Z Q, Sun S C, Zhou Y B. Proximity to roads disrupts rodents' contributions to seed dispersal services and subsequent recruitment dynamics. *Journal of Ecology*, 2019, 107(6): 2623-2634.
- [18] Verburg P H, Erb K H, Mertz O, Espindola G. Land System Science: between global challenges and local realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 433-437.
- [19] 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.
- [20] Biber-Freudenberger L, Bogner C, Bareth G, Bollig M, Dannenberg P, Diez J R, Greiner C, Mtweve P J, Klagge B, Kramm T, Müller-Mahn D, Moseti V, Nyamari N, Ochuodho D O, Kuntashula E, Theodory T, Thorn J P R, Börner J. Impacts of road development in sub-Saharan Africa: a call for holistic perspectives in research and policy. *iScience*, 2025, 28(2): 111913.
- [21] Downing R J, Rytwinski T, Fahrig L. Positive effects of roads on small mammals: a test of the predation release hypothesis. *Ecological Research*, 2015, 30(4): 651-662.
- [22] Benítez-López A, Alkemade 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.
- [23] Hosaka T, Niino M, Kon M, Ochi T, Yamada T, Fletcher C, Okuda T. Effects of logging road networks on the ecological functions of dung beetles in Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2014, 326: 18-24.
- [24] Gomes D G E, Page R A, Geipel I, Taylor R C, Ryan M J, Halfwerk W. Bats perceptually weight prey cues across sensory systems when hunting in noise. *Science*, 2016, 353(6305): 1277-1280.
- [25] Ascensão F, LaPoint S, van der Ree R. Roads, traffic and verges // Van Der Ree R, Smith D J, Grilo C. *Handbook of road ecology*. Oxford: John Wiley & Sons, 2015:325-333.
- [26] 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*, 2016, 113(30): 8472-8477.
- [27] Coffin A W. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*, 2007, 15(5): 396-406.
- [28] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 刘超, 郭瑞华, 陈红春. 道路生态学研究进展. *生态学报*, 2003, 23(11): 2396-2405.
- [29] 刘世梁, 温敏霞, 崔保山, 杨敏. 基于网络特征的道路生态干扰——以澜沧江流域为例. *生态学报*, 2008, 28(4): 1672-1680.
- [30] 丁宏, 金永焕, 崔建国, 赵林森, 朴正吉. 道路的生态学影响域范围研究进展. *浙江林学院学报*, 2008, 25(6): 810-816.
- [31] 姜明敏, 曹林, 肖治术, 郭聪. 都江堰林区取食樱桃果实(种子)的鸟类及其种子扩散作用. *动物学杂志*, 2010, 45(1): 27-34.
- [32] Will H, Tackenberg O. A mechanistic simulation model of seed dispersal by animals. *Journal of Ecology*, 2008, 96(5): 1011-1022.
- [33] 李宏俊, 张知彬. 动物与植物种子更新的关系 II. 动物对种子的捕食、扩散、贮藏及与幼苗建成的关系. *生物多样性*, 2001, 9(1): 25-37.
- [34] Norgauer J M, Röder G, Glauser G. Canopy gaps promote selective stem-cutting by small mammals of two dominant tree species in an African lowland forest: the importance of seedling chemistry. *Journal of Tropical Ecology*, 2016, 32(1): 1-21.
- [35] Elwood E C, Lichti N I, Fitzsimmons S F, Dalglish H J. Scatterhoarders drive long- and short-term population dynamics of a nut-producing tree, while pre-dispersal seed predators and herbivores have little effect. *Journal of Ecology*, 2018, 106(3): 1191-1203.
- [36] Hutchins H E, Hutchins S A, Liu B W. The role of birds and mammals in Korean pine (*Pinus koraiensis*) regeneration dynamics. *Oecologia*, 1996, 107(1): 120-130.
- [37] 李宁, 钟明, 冷欣, 万安, 方淑波, 安树青. 食果动物传播植物种子的有效性. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 2041-2047.
- [38] 龚明昊, 欧阳志云, 徐卫华, 宋延龄, 戴波. 道路影响下野生动物廊道的选址——以大熊猫保护廊道为例. *生态学报*, 2015, 35(10): 3447-3453.
- [39] Barbosa P, Schumaker N H, Brandon K R, Bager A, Grilo C. Simulating the consequences of roads for wildlife population dynamics. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 193: 103672.
- [40] Laurance W E, Croes B M, Tchignoumba L, Lahm S A, Alonso A, Lee M E, Campbell P, Ondzeano C. Impacts of roads and hunting on central African rainforest mammals. *Conservation Biology*, 2006, 20(4): 1251-1261.
- [41] Mazerolle M J, Huot M, Gravel M. Behavior of amphibians on the road in response to car traffic. *Herpetologica*, 2005, 61(4): 380-388.
- [42] Moore L J, Petrovan S O, Bates A J, Hicks H L, Baker P J, Perkins S E, Yarnell R W. Demographic effects of road mortality on mammalian

- populations: A systematic review. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2023, 98(4): 1033-1050.
- [43] 张洪峰. 道路干扰下秦岭有蹄类动物迁移及适应对策[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [44] Forman R T T, Alexander L E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 207-231.
- [45] van der Zande A N, ter Keurs W J, van der Weijden W J. The impact of roads on the densities of four bird species in an open field habitat—evidence of a long-distance effect. *Biological Conservation*, 1980, 18(4): 299-321.
- [46] Boarman W I, Sazaki M. A highway's road-effect zone for desert tortoises (*Gopherus agassizii*). *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(1): 94-101.
- [47] Iuell B, Bekker G J, Cuperus R, Dufek J, Fry G, Hicks C, Hlavác V, Keller V, Rosell C, Sangwine T. *Wildlife and traffic: A European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. Utrecht: KNNV, 2003: 14-28.
- [48] Klar N, Herrmann M, Kramer-Schadt S. Effects and mitigation of road impacts on individual movement behavior of wildcats. *The Journal of Wildlife Management*, 2009, 73(5): 631-638.
- [49] Cui J F, Chen W W, Newman C, Han W W, Buesching C D, MacDonald D W, Xie Z Q, Zhou Y B. Roads disrupt rodent scatter-hoarding seed-dispersal services: implication for forest regeneration. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2018, 34: 102-108.
- [50] Lambert T, Sumpter K, Dittel J, Dupre S, Casanova K, Winker A, Adler G. Roads as barriers to seed dispersal by small mammals in a neotropical forest. *Tropical Ecology*, 2014, 55(2): 263-269.
- [51] 李斌, 栾晓峰, 马武昌. 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*, 2011, 39(18): 11131-11134, 11222.
- [52] 周乐, 殷宝法, 杨生妹, 淮虎银, 李世平, 张懿铿, 魏万红. 青藏公路对高原鼠兔种内遗传分化的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3572-3577.
- [53] Waller J S, Servheen C. Effects of transportation infrastructure on grizzly bears in northwestern *Montana*. *Journal of Wildlife Management*, 2005, 69(3): 985-1000.
- [54] Zhou Z L, Cheng F, Wang J L, Yi B J. A study on the impact of roads on grassland degradation in shangri-La city. *Sustainability*, 2023, 15(10): 7747.
- [55] Andrews A. Fragmentation of habitat by roads and utility corridors: a review. *Australian Zoologist*, 1990, 26(3/4): 130-141.
- [56] Hending D, Randrianarison H, Andriamavosoloarison N N M, Ranohatra-Hending C, McCabe G, Cotton S, Holderied M. Impact of forest fragmentation and associated edge effects on the population density of four nocturnal lemur species in North West Madagascar. *Animal Conservation*, 2024, 27(4): 522-537.
- [57] 阎玺羽, 张广奇, 臧丽鹏, 刘庆福, 陈丹梅, 隋明滨. 基于 2012—2021 年英文文献计量学的森林幼苗更新研究进展分析. *山地农业生物学报*, 2024, 43(4): 23-30.
- [58] Wright S J, Muller-Landau H C, Calderón O, Hernández A. Annual and spatial variation in seedfall and seedling recruitment in a neotropical forest. *Ecology*, 2005, 86(4): 848-860.
- [59] 李洁琼, 宋晓阳, 曹敏. 云南哀牢山和玉龙雪山森林树种幼苗对海拔梯度的响应及其季节性差异. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3403-3412.
- [60] Trombulak S C, Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 18-30.
- [61] Pacaldo R S, Aydin M, Amarille R K. Soil respiration and controls in warmer winter: a snow manipulation study in postfire and undisturbed black pine forests. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(3): e11075.
- [62] Vora Robin S. Potential soil compaction forty years after logging in northeastern California. *The Great Basin Naturalist*, 1988, 48(1): 117-120.
- [63] 王宁, 刘俊娥, 周正朝. 生物土壤结皮对种子萌发和幼苗建植的影响研究进展. *生态学报*, 2021, 41(18): 7464-7474.
- [64] 史欢欢, 雪穷, 于振林, 汪承焕. 密度、物种比例对盐沼植物种子萌发阶段种内、种间相互作用的影响. *植物生态学报*, 2023, 47(01): 77-87.
- [65] 熊韞琦, 赵彩云, 赵相健. 埋深和播种密度对豚草种子出苗及幼苗生长的影响. *生态学报*, 2021, 41(24): 9621-9629.
- [66] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 陈艳秋, 谭文. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响. *生态学报*, 2016, 36(3): 748-757.
- [67] 张现慧, 钟悦鸣, 谭天逸, 吕爽, 王健铭, 李景文. 土壤水分动态对胡杨幼苗生长分配策略的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5): 92-99.
- [68] 张彦妮, 雷蕾, 夏斌. 干旱胁迫及复水对黄连花幼苗生长和生理特性的影响. *草业科学*, 2016, 33(9): 1681-1689.
- [69] Leharne S, Charlesworth D, Chowdhry B. A survey of metal levels in street dusts in an inner London neighbourhood. *Environment International*, 1992, 18(3): 263-270.
- [70] Mehringer H, Bauch J, Frühwald A. Holzbiologische untersuchungen an buchen aus waldschadensgebieten. *Holz Als Roh- und Werkstoff*, 1988, 46(12): 447-455.

- [71] 杨龙. 重金属 Cd、Zn 胁迫对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [72] 魏学玲. 重金属铅胁迫对小麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2010.
- [73] Yao L R, Wang J C, Li B C, Meng Y X, Ma X L, Si E J, Yang K, Shang X W, Wang H J. Influences of heavy metals and salt on seed germination and seedling characteristics of halophyte *Halogeton glomeratus*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 106(3): 545-556.
- [74] 李同囡, 邱嘉馨, 房春生. 环境中臭氧的危害与防治浅析. *世界环境*, 2020, (5): 16-18.
- [75] 颜贝. 臭氧胁迫对罗汉松和香樟幼苗生长及生理特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [76] 另青艳. 园林植物对汽车尾气的生理反应及抗性研究. *绿色科技*, 2015, (6): 206-207.
- [77] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 周健. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响. *生态学报*, 2017, 37(24): 8511-8517.
- [78] 梁鹏飞, 郭全恩, 魏少萍, 陈洁, 李景峰, 刘鑫, 南丽丽. 盐胁迫对 8 种草本植物幼苗生长和生理特性的影响. *草原与草坪*, 2022, 42(3): 63-72.
- [79] Petersen A, Eckstein D, Liese W. Holzbiologische untersuchungen über den einfluß von auftausatz auf hamburgener straßenbäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 1982, 101(1): 353-365.
- [80] Ye C J, Zheng S Y, Jiang D G, Lu J Q, Huang Z N, Liu Z L, Zhou H, Zhuang C X, Li J. Initiation and execution of programmed cell death and regulation of reactive oxygen species in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(23): 12942.
- [81] Asaeda T, Ca V T. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 65(1): 159-179.
- [82] 孟丹, 刘蕊蕊, 张聪聪. 北京市植物物候对热岛效应的响应. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 844-854.
- [83] 王亚婷, 范连连. 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性. *生态学报*, 2011, 31(20): 5992-5998.
- [84] Farmer A M. The effects of dust on vegetation—a review. *Environmental Pollution*, 1993, 79(1): 63-75.
- [85] Mader H J. Animal habitat isolation by roads and agricultural fields. *Biological Conservation*, 1984, 29(1): 81-96.
- [86] Forman R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 31-35.
- [87] Goosem M. Effects of tropical rainforest roads on small mammals: inhibition of crossing movements. *Wildlife Research*, 2001, 28(4): 351.
- [88] Reijnen R, Foppen R. The effects of car traffic on breeding bird populations in woodland. I. evidence of reduced habitat quality for willow warblers (*Phylloscopus trochilus*) breeding close to a highway. *The Journal of Applied Ecology*, 1994, 31(1): 85.
- [89] Vander Wall S B, Moore C M. Interaction diversity of North American seed-dispersal mutualisms. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(11): 1377-1386.
- [90] Santos T, Tellería J. Vertebrate predation on Holm Oak, *Quercus ilex*, acorns in a fragmented habitat: effects on seedling recruitment. *Forest Ecology and Management*, 1997, 98(2): 181-187.
- [91] Gill D S, Marks P L. Tree and shrub seedling colonization of old fields in central New York. *Ecological Monographs*, 1991, 61(2): 183-205.
- [92] Naoya W D. Dwarf bamboos affect the regeneration of zoochorous trees by providing habitats to acorn-feeding rodents. *Oecologia*, 1993, 94(3): 403-407.
- [93] Schupp E W. Seed-seedling conflicts, habitat choice, and patterns of plant recruitment. *American Journal of Botany*, 1995, 82(3): 399-409.
- [94] Hulme P E. Post-dispersal seed predation in grassland: its magnitude and sources of variation. *The Journal of Ecology*, 1994, 82(3): 645.
- [95] Myster R W, Pickett S T A. Effects of litter, distance, density and vegetation patch type on postdispersal tree seed predation in old fields. *Oikos*, 1993, 66(3): 381.
- [96] Jarvis P G. Interference by *Deschampsia flexuosa* (L.) trin. *Oikos*, 1964, 15(1): 56.
- [97] Kellner K F, Lichti N I, Swihart R K. Midstory removal reduces effectiveness of oak (*Quercus*) acorn dispersal by small mammals in the Central Hardwood Forest region. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 182-190.
- [98] Vander Wall S B, Balda R P. Coadaptations of the Clark's nutcracker and the pinon pine for efficient seed harvest and dispersal. *Ecological Monographs*, 1977, 47(1): 89-111.
- [99] Swaddle J P, Francis C D, Barber J R, Cooper C B, Kyba C C M, Dominoni D M, Shannon G, Aschehoug E, Goodwin S E, Kawahara A Y, Luther D, Spoelstra K, Voss M, Longcore T. A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(9): 550-560.
- [100] Stone E L, Jones G, Harris S. Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 2009, 19(13): 1123-1127.
- [101] Francis C D, Barber J R. A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(6): 305-313.
- [102] van Geffen K G, van Eck E, de Boer R A, van Grunsven R H A, Salis L, Berendse F, Veenendaal E M. Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 2015, 8(3): 282-287.

- [103] Dwyer R G, Bearhop S, Campbell H A, Bryant D M. Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *Journal of Animal Ecology*, 2013, 82(2): 478-485.
- [104] Lichti N I, Steele M A, Swihart R K. Seed fate and decision-making processes in scatter-hoarding rodents. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2017, 92(1): 474-504.
- [105] 路纪琪, 肖治术, 程瑾瑞, 张知彬. 啮齿动物的分散贮食行为. *兽类学报*, 2004, 24(3): 267-272.
- [106] 康海斌, 王得祥, 常明捷, 康冰, 胡有宁, 于飞, 庞越, 滕青林. 啮齿动物对不同林木种子的搬运和取食微生境选择机制. *生态学报*, 2017, 37(22): 7604-7613.
- [107] Jenkins S H, Rothstein A, Green W C H. Food hoarding by merriam's kangaroo rats: a test of alternative hypotheses. *Ecology*, 1995, 76(8): 2470-2481.
- [108] Hart E B. Food preferences of the cliff chipmunk, *Eutamias dorsalis*, in northern *Utah*. *The Great Basin Naturalist*, 1971, 31: 182-188.
- [109] Chen W W, Zhang Z, Buesching C D, Newman C, MacDonald D W, Xie Z Q, Sun S C, Zhou Y B. Discrimination behavior mediates foraging quality versus quantity trade-offs: nut choice in wild rodents. *Behavioral Ecology*, 2017, 28(2): 607-616.
- [110] Carthew S M, Garrett L A, Ruykys L. Roadside vegetation can provide valuable habitat for small, terrestrial fauna in South Australia. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22(3): 737-754.
- [111] Jensen T S, Nielsen O F. Rodents as seed dispersers in a heath—oak wood succession. *Oecologia*, 1986, 70(2): 214-221.
- [112] Chen W W, Xie Z Q, Zhou Y B. Proximity to roads reduces acorn dispersal effectiveness by rodents: Implication for forest regeneration and management. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 625-632.
- [113] Yi X F, Wang Z Y, Zhang H M, Zhang Z B. Weak olfaction increases seed scatter-hoarding by Siberian chipmunks: implication in shaping plant-animal interactions. *Oikos*, 2016, 125(12): 1712-1718.
- [114] Leonard R J, Hochuli D F. Exhausting all avenues: why impacts of air pollution should be part of road ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(8): 443-449.
- [115] Li Y, Zhang D Y, Zhang H M, Wang Z Y, Yi X F. Scatter-hoarding animal places more memory on caches with weak odor. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2018, 72(3): 53.
- [116] Jorge M L S P, Brown J S, van der Merwe M. Handling time and the evolution of caching behavior. *Behavioral Ecology*, 2012, 23(2): 410-417.
- [117] Jansen P A, Visser M D, Wright S J, Rutten G, Muller-Landau H C. Negative density dependence of seed dispersal and seedling recruitment in a neotropical palm. *Ecology Letters*, 2014, 17(9): 1111-1120.
- [118] Collet C, Le Moguedec G. Individual seedling mortality as a function of size, growth and competition in naturally regenerated beech seedlings. *Forestry*, 2007, 80(4): 359-370.
- [119] Meiners S J, Handel S N. Additive and nonadditive effects of herbivory and competition on tree seedling mortality, growth, and allocation. *American Journal of Botany*, 2000, 87(12): 1821-1826.
- [120] Janzen D H. Herbivores and the number of tree species in tropical forests. *The American Naturalist*, 1970, 104(940): 501-528.
- [121] Connell J H. On the role of natural enemies in preventing competitive exclusion in some marine animals and in rain forest trees dynamics of populations. *Proceedings of the advanced study institute on dynamics of numbers in Populations*. Wageningen: Pudoc, 1971: 298-312.
- [122] Hubbell S P. Seed predation and the coexistence of tree species in tropical forests. *Oikos*, 1980, 35(2): 214.
- [123] Howe H F. Scatter-and clump-dispersal and seedling demography: hypothesis and implications. *Oecologia*, 1989, 79(3): 417-426.
- [124] Harms K E, Wright S J, Calderón O, Hernández A, Herre E A. Pervasive density-dependent recruitment enhances seedling diversity in a tropical forest. *Nature*, 2000, 404(6777): 493-495.
- [125] Metz M R, Sousa W P, Valencia R. Widespread density-dependent seedling mortality promotes species coexistence in a highly diverse Amazonian rain forest. *Ecology*, 2010, 91(12): 3675-3685.
- [126] Suárez-Esteban A, Delibes M, Fedriani J M. Unpaved roads disrupt the effect of herbivores and pollinators on the reproduction of a dominant shrub. *Basic and Applied Ecology*, 2014, 15(6): 524-533.
- [127] Laurance W F, Peletier-Jellema A, Geenen B, Koster H, Verweij P, Van Dijck P, Lovejoy T E, Schleicher J, Van Kuijk M. Reducing the global environmental impacts of rapid infrastructure expansion. *Current Biology*, 2015, 25(7): R259-R262.
- [128] Son D, Chu Y, Lee H. Roads as conduits for alien plant introduction and dispersal: The amplifying role of road construction in *Ambrosia trifida* dispersal. *Science of The Total Environment*, 2024, 912: 169109.
- [129] Ascensão F, Fahrig L, Clevenger A P, Corlett R T, Jaeger J A G, Laurance W F, Pereira H M. Environmental challenges for the Belt and Road initiative. *Nature Sustainability*, 2018, 1(5): 206-209.
- [130] Fricke E C, Ordonez A, Rogers H S, Svenning J C. The effects of defaunation on plants' capacity to track climate change. *Science*, 2022, 375(6577): 210-214.

- [131] Wang X R, Peron T, Dubbeldam J L A, Kéfi S, Moreno Y. Interspecific competition shapes the structural stability of mutualistic networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023, 172: 113507.
- [132] Shochat E, Lerman S B, Anderies J M, Warren P S, Faeth S H, Nilon C H. Invasion, competition, and biodiversity loss in urban ecosystems. *BioScience*, 2010, 60(3): 199-208.
- [133] Storch I, Woitke E, Krieger S. Landscape-scale edge effect in predation risk in forest-farmland mosaics of central Europe. *Landscape Ecology*, 2005, 20(8): 927-940.
- [134] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367(6461): 363-365.
- [135] Simmons B I, Wauchope H S, Amano T, Dicks L V, Sutherland W J, Dakos V. Estimating the risk of species interaction loss in mutualistic communities. *PLoS Biology*, 2020, 18(8): e3000843.
- [136] Donoso I, Fricke E C, Hervías-Parejo S, Rogers H S, Traveset A. Drivers of ecological and evolutionary disruptions in the seed dispersal process: research trends and biases. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 794481.
- [137] 刘世梁, 崔保山, 温敏霞. 道路建设的生态效应及对区域生态安全的影响. *地域研究与开发*, 2007, 26(3): 108-111, 116.
- [138] Jachowski D S, Butler A, Eng R Y Y, Gigliotti L, Harris S, Williams A. Identifying mesopredator release in multi-predator systems: a review of evidence from North America. *Mammal Review*, 2020, 50(4): 367-381.
- [139] Rytwinski T, Fahrig L. Why are some animal populations unaffected or positively affected by roads? *Oecologia*, 2013, 173(3): 1143-1156.
- [140] Suárez-Esteban A, Fahrig L, Delibes M, Fedriani J M. Can anthropogenic linear gaps increase plant abundance and diversity? *Landscape Ecology*, 2016, 31(4): 721-729.
- [141] Eriksson O, Ehrlén J. Seed and microsite limitation of recruitment in plant populations. *Oecologia*, 1992, 91(3): 360-364.
- [142] 周淑荣, 刘亚峰, 王刚. 集合种群水平上的抽彩式竞争. *草业学报*, 2004, 13(3): 40-46.
- [143] 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.