

道路的生态学影响域范围研究进展

丁宏^{1,2}, 金永焕¹, 崔建国², 赵林森³, 朴正吉⁴

(1. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳农业大学 林学院, 辽宁 沈阳 110161;
3. 西南林学院 园林学院, 云南 昆明 650224; 4. 吉林省长白山科学研究院, 吉林 安图 133600)

摘要: 道路建设在促进社会经济发展、方便人们生活的同时, 也带来了环境污染、动植物栖息地破碎等严重的生态学后果, 道路生态学随之成为生态学研究的重要前沿领域之一。20 世纪 90 年代, 道路生态学的研究重点转移到道路的生态学影响域等相关领域, 包括生态学影响范围、类型及其形态、格局等。大量研究表明, 道路对周边动植物等生物因子以及周围环境中土壤、水分和空气成分等生态因子的影响范围各不相同, 道路生态学影响域的范围随着道路利用率以及各生态因子种类及其变化特点而有所不同。在综述国内外学者对道路生态学影响域范围研究结果的基础上, 建议中国应开展道路生态学影响域的综合研究, 并将研究成果应用于道路规划的实践中, 推动国内道路生态学研究的发展。参 58

关键词: 道路生态学; 生态学影响域; 综述; 道路规划

中图分类号: Q149; S7-05 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2008)06-0810-07

Review on ranges of ecological road-effect zones

DING Hong^{1,2}, JIN Yong-huan¹, CUI Jian-guo², ZHAO Lin-sen³, PIAO Zheng-Ji⁴

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, Liaoning, China; 3. School of Landscape Architecture and Gardening, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China; 4. Changbai Mountain Academy of Sciences of Jilin Province, Antu 133600, Jilin, China)

Abstract: Road construction has brought environmental pollution, caused habitat fragmentation for wildlife and plants, and contributed to other severe ecological problems in adjacent areas; meanwhile it has promoted social and economic development and improved daily life for human beings. Road ecology has become one of the most important frontier fields in ecological research. In the late 1990's, the focus of road ecology research shifted to an ecological road-effect zone and other related fields including the ecological influence of range, type, form, and pattern of roads. Many studies have shown that in the peripheral surroundings the various road systems impact soil properties, moisture, air composition, and other ecological factors, as well as species of wildlife and plants, differently. The range of the ecological road-effect zones produced by a road system also varies along with traffic volume, types of ecological factors, and specific change patterns of each factor. After summarizing both domestic and overseas studies on the range of the ecological road-effect zone, this paper recommended that comprehensive research should be carried out in China with research achievements being applied to road system planning practices so as to improve the development of road ecology in China. [Ch, 58 ref.]

Key words: road ecology; ecological road-effect zone; review; road planning

收稿日期: 2008-01-16; 修回日期: 2008-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30670389)

作者简介: 丁宏, 从事道路生态学研究。E-mail: dingding-518@163.com。通信作者: 金永焕, 副研究员, 从事森林生态学和道路生态研究。E-mail: jinyh@iae.ac.cn

道路贯穿于各类景观中，是典型的人为活动产物，道路建设及其运营过程为社会发展提供保障，促进经济发展的同时，也带来了环境污染、栖息地及景观破碎^[1]等生态学问题。道路对生态学过程的影响深远而广泛，尺度从种群一直到景观^[2-3]，随着人们对道路产生的生态影响的极度关注，道路生态学也随之成为生态学中重要的前沿领域^[4-6]。20 世纪 90 年代末期美国学者开始将道路生态学的研究重点转移到道路网络、道路影响域及其相关领域^[7-11]。目前，道路生态学理论上的研究重点转向道路影响域(road effect-zone)。道路及其载体交通流量对各种生态过程的影响范围形成道路影响域，其大小往往数 10 倍于道路本身。如美国道路的面积仅占国土面积的 1% 左右，但是其影响区域可以达到总面积的 20%，甚至是 25%^[12-14]；在我国，受道路网络影响的国土面积也占到了 18.37%^[15]。道路影响域作为研究道路影响的量化指标之一，被认为是弥合自然生态和人类活动之间，即自然景观过程和道路规划之间距离的重要桥梁^[16]。因此，开展道路影响域的研究具有重要意义。道路的生态学影响域研究包括空间距离、范围、格局、形态、影响类型和影响度等^[4]，相关研究大部分都集中在空间距离及范围，形态及其他方面的研究并不多见^[4,7]，其中对影响域范围的广泛研究大都由国外学者完成。在我国，此方面的研究尚不多见^[17]。鉴于此，作者就道路的生态学影响域范围研究作一综述，以期引起国内同仁对这一方面的关注。

1 道路对陆栖动物的影响域范围研究

1.1 道路对鸟类的影响域范围研究

鸟类受道路干扰的现象十分明显。道路干扰对鸟类密度和种群数量的影响范围是随道路交通量、物种和附近栖息地类型的不同而不同的。在城郊景观中，草地上道路旁的某一范围内，鸟类遇见率随着交通量的增加而下降^[18]。在荷兰的农业用地上，50% 以上的鸟类在公路旁 100 m 范围内的密度和种群数量有所减小^[19]；通车量为 0.5 万辆·d⁻¹ 的公路对鸟类的干扰范围为 20 ~ 1 700 m，综合干扰范围为 120 m，随交通量增加，干扰范围也大大增加，通车量为 5.0 万辆·d⁻¹ 时，干扰范围增加到 65 ~ 3 530 m，综合干扰范围也增加到 560 m^[19]。另外，鸟类的配对、繁殖以及筑巢习性也会受到道路不同程度的干扰。Foppen 等^[20]发现出生于道路区域的雄性柳莺 *Phylloscopus trochilus* 幼鸟扩散到离路较远的栖息地中进行繁殖。在美国，栖息于林内的灶巢鸟 *Seiurus aurocapillus* 在路旁 150 m 范围内配对成功率较低^[21]；草原鹰 *Aquila rapax* 在巢穴的 100 ~ 800 m 范围内，如果有摩托车和汽车产生的噪声，草原鹰就会放弃原有的巢^[22]。对鸟类来说，噪声导致鸟类社群通信扭曲，从而直接导致配对及繁育等行为的失败。

1.2 道路对哺乳动物的影响域范围研究

道路对大型哺乳动物影响范围的大小很大一部分取决于哺乳动物回避道路的程度。很多哺乳动物，特别是栖息在林内的动物及边缘敏感种都回避公路。道路极大地增加了人类进入物种栖息地的机会，从而造成合法捕猎和非法偷猎现象增加，并且随着公路密度的不断提高，土地利用方式也呈现出多样化，可见，人为干扰加大可能是导致道路回避的主要原因。尤其对于大型哺乳动物来说，人为干扰加大极大地增加了各类哺乳动物回避公路的程度，扩大了公路对其各方面影响的范围。

哺乳动物回避道路的范围随种类和性别的不同而不同。在美国，骡鹿 *Odocoileus hemionus* 和麋鹿 *Cervus canadensis* 对道路的回避范围达 200 m，这一范围内种群数量显著减少^[23]；灰熊 *Ursus arctos* 很少利用离公路 100 m 范围内的栖息地^[24]，有研究表明，灰熊^[25]及雌性灰熊^[26]分别在路旁 50 m 和 200 m 范围内采取回避行为，且雌性灰熊大多数都在至公路 3.0 ~ 4.5 km 以外设置栖息地；另外，噪声与视觉干扰、食物质量和数量降低等导致近道路栖息地面积和质量下降，从而导致动物主动回避公路^[21,27-28]。Aune 等^[29]研究发现，当距离汽车 300 m 时，成年熊通常都撤退到隐蔽处，并且在食物匮乏的年份，熊的活动范围扩大从而导致回避范围减小^[30-31]；道路密度也影响灰狼 *Canis lupus* 对栖息地的选择，Mech 等^[32]利用道路密度确定出灰狼的出现阈值为 0.58 km·km⁻¹，即当区域道路密度大于阈值时，灰狼不会在此区域中建立它们的栖息地。

哺乳动物受道路的影响不仅仅表现在垂直于道路的方向上，同时也表现在沿道路的方向上，草原

田鼠 *Microtus pennsylvanicus* 便借助高速公路边缘草丛向外扩散, 分布范围沿着公路延伸了 90 ~ 100 km^[33]。而对于某些少数动物来讲, 道路的存在不但没有使它们产生道路回避的现象, 反而使它们在路旁处更为活跃, 例如, 在道路旁 1 ~ 3 km 范围内, 狼獾 *Gulo gulo* 的个体数量是此范围以外分布数量的 15 倍, 更有趣的是它们还在春季和夏季借助运材路移动到河流的底部以及高地的下部^[34]。可见, 道路不仅可以使哺乳动物产生道路回避, 也可以为一些哺乳动物种类扩散提供媒介, 同时促进哺乳动物数量增加。

1.3 道路对爬行及两栖动物的影响域范围研究

道路附近区域内的很多爬行动物和两栖类动物密度及丰富度都比较低^[35-36]。在佛罗里达, 公路对蛇分布数量的影响一直延伸到路旁至少 850 m 的范围^[36]。沙漠龟 *Gopherus agassizii* 受道路的影响明显并且呈现出鲜明的规律性。LaRue^[37], Beapler^[38]和 Boarman^[39]对位于不同区域的研究表明, 沙漠龟的分布数量分别在道路旁 305, 175 和 400 m 范围内随着至道路距离的增大而增加。蜥蜴 *Microlophus albemarlensis* 面临危险时会自断部分或全部尾巴作为它们的逃生策略, 随距离道路的渐远, 蜥蜴断尾率明显下降, 丰富度显著增加, 断尾率由临近道路处的 10% 降至距离道路 100 m 处的 7%, 超过 200 m 时断尾率已低于 1%, 且每远离道路 100 m, 蜥蜴的丰富度就增加 29%^[40]。生物基因变化幅度的减小是生物多样性降低的根本原因, 公路附近池塘中的一种蛙 *Rana dalmatina*, 其种群每个酶素上的等位基因数平均为 2.23 个, 小于远离公路的未受干扰池塘内蛙种群的等位基因数 2.50 个。这种蛙因受到道路的干扰而表现出种群数量变小, 生物多样性降低, 部分基因枯竭等特征; Reh 等^[41]发现, 道路(包括)铁路会导致 3 ~ 4 km 范围内青蛙 *Rana temporaria* 种群的基因被隔离。

2 道路对植物的影响域范围研究

道路产生交通干扰, 改变微环境, 使部分当地种受到胁迫, 并为某些植物的扩散提供途径^[42]; 由道路产生的特殊边缘生境, 如温度升高、土壤密度增大、土壤水分减少、灰尘浓度增大和地表径流发生改变等决定了路旁植被物种组成、类型以及丰富度等各种植被特征明显不同于其他各处。道路对植被的影响也可能是由于汽车排放氮氧化物, 导致富营养化作用下植物种的竞争能力发生改变所致。道路运营也会产生空气和水等污染, 从而抑制植物的光合作用和呼吸作用等新陈代谢过程, 对植物的正常生长和发育产生极大的综合性危害^[43]。美国阔叶林林下, 由于道路的影响, 路旁(0 m)林冠层郁闭度、枯枝落叶层盖度和高度、粗木质残体盖度都比较低, 并随着至道路距离的逐渐增大而逐渐增加, 直至到达路旁 15 和 20 m 处达到最大并保持稳定。植物组成结构变化在路旁 5 m 内最明显, 10 ~ 15 m 时变化逐渐减弱直至消失^[44]。Angold^[45]发现主干道路 200 m 范围内维管束植物生长加快, 草本植物丰富度增大, 地衣和其他植物丰富度下降。这些变化过程 and 变化趋势均与至道路的距离、道路通行量及道路宽度呈显著相关, 还可能与路旁土壤的性质有关^[46]。不同植物对铅等重金属污染的响应不同。如汽车排放尾气中的铅在远离道路 200 m 以外的植物体内都有积累^[45]。道路对沿线植物生物量的影响也很大, 并且影响范围因植被类型的不同而有所不同。研究表明, 道路对沿线乔木、灌木和草本的生物量均有不同程度的影响, 影响范围集中在 125 ~ 285 m, 其中对乔木生物量的影响范围最小, 灌木居中, 草本最大^[17]。道路亦影响路旁植物的生物学特性, 如在路旁山龙眼 *Banksia menziesii* 和 *Banksia hookeriana* 树冠的大小和花叶球的数量均比距道路 50 m 处的山龙眼大 2.5 倍, 种子储藏量也几乎比其他地方大 5.0 倍^[47-48]。

3 道路对其他因子的影响域范围研究

道路上释放重金属、盐和臭氧等污染物, 污染物随着水流对周围环境产生的影响范围大, 程度深。土壤中的铅浓度与距离道路的远近有明显的正相关关系, 在道路周围 80 m 范围内土壤中的铅浓度显著增加^[49-50], 因为铅的复合物在土壤中很少溶解且大量富集在土壤表面^[51]。重金属钠则主要积累在路旁 5 m 内的土壤中, 钠能改变土壤结构, 从而影响植物生长。道路经常产生有机和无机污染物, 这些污染物向路边转运的距离不定。在挪威, 包括有机碳和金属离子在内的污染物在路旁 5 m

内的雪中含量很高，路旁 300 m 范围内仅有少量分布^[52]。在英国，土壤呼吸速率在路旁 100 m 范围内很低，这和此范围内微生物活动的降低有关^[53]。道路灰尘能为植物的生长提供养分，同时也能改变土壤 pH 值，甚至影响植被。Santelman 等^[54]发现道路灰尘的影响距离通常小于 10 ~ 20 m，但是在顺风的方向能扩展到 200 m 处。另外，道路撒盐 (NaCl) 能对周边 120 m 范围内北美乔松 *Pinus strobes* 的叶子产生危害^[55]。除此之外，道路盐也能对周围植物产生正面的积极作用，如在尼德兰，道路盐促进了 3 种沿海外来植物蔓延达 150 km^[56]。

4 展望

道路生态学影响域范围只是影响域研究的一个方面，国外学者已开展了广泛的研究，而在中国相关的研究并不多见，可以说是一个崭新的研究方向，很多方面都有待探索。根据前人工作基础，归纳出以下 3 点建议以供参考。

4.1 总结国内外现有成果，开展相关研究

全面系统地总结国内外近年来道路生态学研究成果和相关学科如景观生态学和恢复生态学等方面的研究，仔细揣摩研究方法，并结合本国的实际研究状况适当加以借鉴和应用，逐步开展相关研究。如景观生态中用于定量判定边界影响域的经典方法即移动窗口法 (moving split-window analysis) 已被中国学者李月辉应用到道路影响的空间距离的定量判定中^[16]。另外，国内外学者在开展道路生态学影响域范围的大多数研究中，只是针对一个或几个因子，诸如 Forman 等^[12]对马萨诸塞州 2 号路对河流、冰盐、动植物和鸟类等 9 种生态因子和过程影响域范围的完整案例研究非常少见。在道路的规划设计中，考虑道路建设将带来的各种生态学影响是至关重要的，只有全面考虑各种生态学影响的范围和程度，并努力寻求生态学影响的最佳补偿方法，才能对道路影响域及其产生的边际效应进行调控，增加其正面影响的同时将负面影响控制在最小范围。因此，开展道路对各种生态因子影响范围的完整研究是十分必要的。

4.2 将研究成果应用于道路规划的实践中，实现人与自然和谐发展

传统的道路规划大多从人类开发利用的角度设计，例如保护区道路的设计主要考虑对旅游资源的开发，并没有考虑它们产生的生态学影响，如道路对动物和植物等资源的影响，以及对这些资源的生态影响予以补偿。道路生态学影响域以及道路生态效应的应用研究恰好可以弥合自然生态过程和道路规划间的距离^[5]，道路影响域研究已被应用到其他国家的自然生态系统中^[57]。例如，Reijnen 等^[58]基于鸟类群落受干扰的距离评价出 1986 年占尼德兰国土面积 8% 的土地受到道路的干扰，并预计到 2010 年将有 11% ~ 16% 的土地受到道路的干扰。在澳大利亚的维多利亚，已运用道路影响域的概念确定了自然草原上公路发展的潜在影响^[57]。由于有道路生态学影响域的研究成果作理论参考，使道路规划更加合理，因此，将研究成果应用于具体的道路规划是至关重要的。例如不得不在麋鹿 *Cervus canadensis* 栖息地附近修建道路的情况下，考虑到麋鹿对道路的回避范围为 200 m 左右时^[23]，那么在道路规划时尽量保证道路边缘到麋鹿栖息边缘的距离大于 200 m，即大于麋鹿对道路的回避距离，使麋鹿不必为了回避道路而被迫离开栖息地，将道路对麋鹿的影响降到最低。将研究成果应用于道路规划，深刻地体现了人与自然和谐发展的主题。

4.3 开展道路生态影响域的全面研究，推动道路生态学发展

道路生态学影响域的研究是多方面的。目前，国内外大部分的研究都集中在道路生态学影响域范围上，而对于道路生态学影响域的格局、形态、影响类型以及影响度等的研究却很不足，只有全面研究道路生态学影响域，才有助于我们全面深入了解道路附近动植物及各种生态因子受道路影响的程度，才能更好的保护和管理动植物自然栖息地乃至生态系统等，具有科学的指导作用和现实意义。因此，建议中国学者从道路生态影响域的各个方面入手，那也将意味着没有多少前人的研究基础作参考，这对中国学者来说是一个巨大挑战，但也会带来更多的机遇，因属于前沿研究，一定具有重要的发展前景，这些研究将积极推动我国道路生态学的发展。

5 本文的不足之处

本文主要从道路对不同类型因子如动物、植物、有机碳和灰尘等方面入手,将道路对这些因子的影响域范围作一个总结,并没有针对道路的宽窄、交通流量强弱和基质特征等重要主体因子开展综述,并总结出具有一定规律性的结论。之所以没有选择主体因子开展综述,原因如下:

首先,从大的研究背景来看,“道路生态学”这个概念在我国是个新事物,在国外也是近年才提出的。近些年,我国的公路绿化、环保景观设计和新理念指导下的公路设计等均是我国道路生态学相关领域的突破性研究进展,然而,道路生态学所包含的内容、研究方法、理论体系和经验总结等等的研究深度和发展速度却很落后。20世纪90年代末期美国学者开始将道路生态学的研究重点转移到道路网络、道路影响域及其相关领域,道路生态学影响域研究包括空间距离、范围、格局、形态和影响类型、影响度等,其中相关研究的大部分都集中在空间距离及范围上,形态及其他方面的研究并不多见,并且对影响域范围的广泛研究也大都由国外学者完成。在中国,此方面的研究尚不多见。

其次,鉴于篇幅,对阅读过的国内外文献中出现的不同道路没有进行仔细描述,仅仅对个别道路进行简单描述,如道路宽几米等,并且也都没有对不同宽度、不同交通流量道路的影响域范围做对比,诸如 Reijnen 等^[19]有关不同交通流量的道路对鸟类影响范围不同的相似研究并不多见,因此,很难从道路宽窄、交通流量强弱及基质特征等重要主体因子入手开展综述。

基于上述原因,本文主要将道路对动物、植物和土壤等几个因子的影响域范围的相关研究做一个总结,以期让读者了解道路都对哪些因子存在影响,影响的范围大致为多少,并期望引起国内同人对这一方面研究的关注,并为日后的相关研究做一个参考。相信随着国内外学者对此方面研究的深入,更多学者能够从道路的主体因子及更深入的角度阐述道路生态学影响域范围的全面研究进展。

参考文献:

- [1] SAUNDER S C, MISLIVETS M R, CHEN J Q, *et al.* Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA[J]. *Conserv Biol*, 2002, **103**: 209 - 225.
- [2] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 等. 道路生态研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, **14** (3): 447 - 452.
- [3] 刘世梁, 温敏霞, 崔保山, 等. 道路网络扩展对区域生态系统的影响——以景洪市纵向岭谷区为例[J]. *生态学报*, 2006, **26** (9): 3 018 - 3 024.
- [4] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 等. 道路生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2003, **23** (11): 2 396 - 2 405.
- [5] FORMAN R T T, ALEXANDER L E. Roads and their major ecological effects[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1998, **29**: 207 - 231.
- [6] FORMAN R T T. Roads ecology: a solution for the giant embracing us[J]. *Landscape Ecol*, 1998, **13**: iii-V.
- [7] FORMAN R T T, FRIEDMAN D S, FITZHENRY J D, *et al.* Ecological effects of roads: toward three summary indices and an overview for North America[C]//CANTERS K. *Habitat Fragmentation & Infrastructure: Proceedings*. Delft: Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 1997: 40 - 54.
- [8] FORMAN R T T, HERSPERGER A M. Road ecology and road density in different landscapes, with international planning and mitigation solutions[C]//[s. n.]. *Trends in Addressing Transportation Related Wildlife Mortality*, Proceedings of the Transportation Related Wildlife Mortality Seminar. Florida: Department of Transportation Tallahassee FL, 1996: 1 - 22.
- [9] KAREIVA P. Roads and ecology[J]. *Trends Ecol Evol*, 2001, **16** (8): 430 - 440.
- [10] SPELLERBERG I F. Ecological effects of roads and traffic: a literature review[J]. *Global Ecol Biogeogr Lett*, 1998, **7**: 317 - 333.
- [11] TROMBULAK S C, FRISSELL C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities[J]. *Conserv Biol*, 2000, **14**: 18 - 30.
- [12] FORMAN R T T, DEBLINGER R D. The ecological road effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway[J]. *Conserv Biol*, 2000, **14**: 36 - 46.
- [13] FORMAN R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States [J]. *Conserv Biol*,

- 2000, **14**: 31 – 35.
- [14] REED R A, JOHNSON-BARNARD J, BAKER W L. Contribution of roads to forest fragmentation in the Rocky Mountains[J]. *Conserv Biol*, 1996, **10** (4): 1 098 – 1 106.
- [15] 李双成, 许月卿, 周巧富, 等. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析[J]. 地理科学进展, 2004, **23** (5): 77 – 85.
- [16] 李月辉. 大兴安岭典型区森林景观变化及人为驱动力分析[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2003.
- [17] 刘杰, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区高速公路建设对沿线植物生物量的影响[J]. 生态学报, 2006, **26** (1): 83 – 90.
- [18] FORMAN R T T, REINEKING B, HERSPERGER A M. Road traffic and nearby grassland patterns in a suburbanizing landscape[J]. *J Environ Manage*, 2002, **29** (6): 782 – 800.
- [19] REIJNEN R, FOPPEN R, MEEUWSEN H. The effect of traffic on the density of breeding birds in Dutch agricultural grasslands[J]. *Biol Conserv*, 1996, **75**: 255 – 260.
- [20] FOPPEN R, REIJNEN R. The effects of ear traffic on breeding bird populations in woodland . Breeding dispersal of male willow warblers (*Phylloscopus trochilus*) in relation to the proximity of a highway[J]. *J Appl Ecol*, 1994, **31**: 95 – 101.
- [21] ORTEGA Y K, CAPEN D E. Effects of forest roads on habitat quality for Ovenbirds in a forested landscape[J]. *Auk*, 1999, **116**: 937 – 946.
- [22] BERRY K H. A review of the effects of off-road vehicles on birds and other vertebrates[C]//DEGRAAF R M, TILGHMAN N G. *Workshop Proceedings: Management of Western Forests and Grasslands for Nongame Birds*. Washington DC: USDA Forest Service, 1980: 451 – 467.
- [23] ROST G R, BAILEY J A. Distribution of mule deer and elk in relation to roads[J]. *J Wildlife Manage*, 1979, **43** (3): 634 – 641.
- [24] MELELLALL B N, SHACIDETON D M. Grizzly bears and resource extraction industries: effects of roads on behavior, habitat use and demography[J]. *J Appl Ecol*, 1988, **25**: 451 – 460.
- [25] BRANNON R D. *Influence of Roads and Developments on Grizzly Bears in Yellowstone National Park*[R]. USDI, Inter-agency Grizzly Bear Study Team, Bozeman, M T. 1984: 52.
- [26] FREDERICK G P. *Effects of forest roads on Grizzly Bears, Elk and Grey Wolves: A literature Review*[M]. Washington, DC: USDA Forest service, 1991: 53.
- [27] 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[J]. *J Appl Ecol*, 1994, **31**: 8 – 94.
- [28] REIJNEN R, FOPPEN R, TER BRAAK C, *et al*. The effects of car traffic on breeding bird populations in woodland III. Reduction of density in relation to the proximity of main roads[J]. *J Appl Ecol*, 1995, **32**: 187 – 202.
- [29] AUNE K, KASWORM.W. *Final Report East Front Grizzly Studies* [R]. Helena: ontana Dept Fish, Wildlife and Parks, 1989: 332.
- [30] JONKEL C J. *Rocky Mountain East Front Grizzly Studies*, 1979[R]. Univ Montana. Annual Report: University of Montana Border Grizzly Project, 1980: 207.
- [31] SCHALLENBERGER A. Review of oil and gas exploration impacts on grizzly bears[J]. *Int Conf Bear Res Manage*, 1980, **4**: 271 – 276.
- [32] MECH L D, FRITTS S H, RADDE G L, *et al*. Wolf distribution and road density in Minnesota[J]. *Wildlife Soc Bull*, 1988, **16**: 85 – 87.
- [33] GETZ L L, COLE F R, GATE D L. Interstate roadsides as dispersal routes for *Microtus pennsylvanicus*[J]. *J Mammalo*, 1978, **59** (1): 208 – 212.
- [34] HORNOCKER M G, HASH M S. Ecology of the wolverine in northwestern Montana[J]. *Canadian J Zool*, 1981, **59**: 1 286 – 1 301.
- [35] FAHRIG L, PEDLAR J H, POPE S E, *et al*. Effect of road traffic on amphibian density[J]. *Biol Conserv*, 1995, **73**: 177 – 182.
- [36] RUDOLPH D C, BURGDORF S J, CONNER R N, *et al*. Preliminary evaluation of the impact of roads and associated vehicular traffic on snake populations in eastern Texas[C]//EVINK G L, GARRETT P, ZEIGLER D, *et al*. *Proceedings*

- of the International Conference on Wildlife Ecology and Transportation (Missoula, MT). Tallahassee: Florida Department of Transportation, 1999.
- [37] Jr LARUE E L. Distribution of desert tortoise sign adjacent to highway 395, San Bernardino County, California[C]//[s.n.]. *Proceedings of the 1992 Desert Tortoise Council Symposium*. Beaumont: Desert Tortoise Council, Inc., 1993: 190 – 204.
- [38] BAEPLER D H, HEINDL A. A Study of the Impacts of Highways on Desert Tortoise Populations[R]//[s.n.]. *Harry Reid Center for Environmental Studies*. Las Vegas: Report to Nevada Department Transportation, 1994.
- [39] BOARMAN W I, SAZAKI M. A highway's road-effect zone for desert tortoises (*Gopherus agassizii*)[J]. *J Arid Environ*, 2006, **65**: 94 – 101.
- [40] DAWN T, JIM P. Road effects on abundance and fitness of Galápagos lava lizards (*Microlophus albemarlensis*)[J]. *J Environ Manage*, 2006, **32**: 187 – 202.
- [41] REH W, SEITZ A. The influence of land use on the genetic structure of populations of the common frog *Rana temporaria* [J]. *Biol Conserv*, 1990, **54**: 239 – 249.
- [42] TIKKA P M, Hgmander H, Koski P S. Road and railway verges serve as dispersal corridors for grassland plants[J]. *Landscape Ecol*, 2001, **16** (7): 659 – 666.
- [43] 章家恩, 徐琪. 道路的生态学影响及其生态建设[J]. *生态学杂志*, 1995, **14** (6): 74 – 77.
- [44] RADLEY Z, WATKINS, CHEN J Q, et al. Effects of Forest Roads on Understory Plants in a Managed Hardwood Landscape[J]. *Conserv Biol*, 2003, **17** (2): 411 – 419.
- [45] ANGOLD P G. The impact of a road upon adjacent heathland vegetation: effects on plants species composition[J]. *J Appl Ecol*, 1997, **34** (2): 409 – 417.
- [46] OLANDER L P, SCATENA F N, SILVER W L. Impacts of disturbance initiated by road construction in a subtropical cloud forest in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico[J]. *For Ecol Manage*, 1998, **109**: 33 – 49.
- [47] LAMONT B B, REES R G, WITKOWSKI E T F, et al. Comparative size, fecundity and ecophysiology of roadside plant of *Banksia hookeriana*[J]. *J Appl Ecol*, 1994, **31**: 137 – 144.
- [48] LAMONT B B, WHITTEN V A, WITKOWSKI E T F, et al. Regional and local (road verge) effects on size and fecundity in *Banksia menziesii*[J]. *Australian J Ecol*, 1994, **19**: 197 – 205.
- [49] CLIFT D, DICKSON I E, ROOS T, et al. Accumulation of lead beside the Mulgrave Freeway[J]. *Victoria Search*, 1983, **14**: 155 – 157.
- [50] COLLINS J A. Roadside lead in New Zealand and its significance for human and animal health[J]. *New Zealand J Sci*, 1984, **27**: 93 – 98.
- [51] WYLIE P B, BELL L C. The effect of automobile emissions on the lead content of soils and plants in the Brisbane area [J]. *Search*, 1973, **4**: 161 – 162.
- [52] GJESSING E, LYGREN E, BERLIND I, et al. Effect of highway runoff on lake water quality[J]. *Sci Total Environ*, 1984, **33**: 247 – 257.
- [53] LI H, FRANKLIN J F, SWANSON F J, et al. Developing alternative forest cutting patterns: a simulation approach [J]. *Landscape Ecol*, 1993, **8**: 63 – 75.
- [54] SANTELMAN M V, GORHAM E V. The influence of airborne road dust on the chemistry of *Sphagnum* mosses [J]. *J Ecol*, 1988, **76**: 1 219 – 1 231.
- [55] HOFSTRA G, HALL R. Injury on roadside trees: leaf injury on pine and white cedar in relation to foliar levels of sodium chloride[J]. *Canadian J Bot*, 1971, **49**: 613 – 622.
- [56] AANEN P, ALBERT W, BEKKER G J, et al. *Nature Engineering and Civil Engineering Works*[M]. Wageningen: PUDOC, 1991: 139.
- [57] WILLIAMS N S G, LEARY E J, PARRIS K M, et al. The potential impact of freeways on native grassland[J]. *Victorian Naturalist*, 2001, **118** (1): 4 – 15.
- [58] REIJNEN R, FOPPEN R, VEENBAA G. Disturbance by traffic of breeding birds: Evaluation of the effect and considerations in planning and managing road corridors[J]. *Biodiversity Conserv*, 1997, **6** (4): 567 – 581.