

道路建设扰动下的生态效应分析及其消减对策

田甜¹, 李绍才^{1,2}, 孙海龙³, 龙凤², 陈敏²

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 四川大学生命科学学院,

四川成都 610064; 3. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610064)

摘要: 道路建设给人类带来社会、经济效益的同时, 亦在一定程度重塑生态系统结构与功能, 影响生态系统的健康。从道路建设诱发的不利生态效应入手, 运用机理探讨的方法, 对生态系统的“组成—结构—功能”这一梯级响应过程进行了较深入的分析。论述了道路建设扰动下生态系统结构在时空尺度上的变异性, 如水文格局、植被群落演替、野生动物分布格局的改变, 以及对生态系统物质循环、能量流动、信息传递等功能过程连续性的扰动作用。结合道路建设的“规划—设计—施工—运营—维护”等过程的干扰特性, 从生态设计、生态恢复与生态补偿角度提出了消减道路建设生态影响的对策, 以期促进道路建设的社会效益、经济效益和生态效益的协调统一。

关键词: 生态效应; 道路建设; 消减对策

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0199-06

中图分类号: X171.1, U4

Ecological Effects and Mitigation Measures Under the Disturbance of Road Construction

TIAN Tian¹, LI Shao-cai^{1,2}, SUN Hai-long², LONG Feng³, CHEN Min²

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China; 3. State Key

Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract: Road construction brings social and economical benefits, but meanwhile seriously destroys the structure and disturbs the functions of ecosystem. Thus it becomes a threat to ecosystem health. The ecological effects of road construction are analyzed in terms of the components, structure, and functions of ecosystem, which appears a cascade response process. The method used to analyze such ecological effects is mechanism discussing. The variability of ecosystem structure in space and time scales under the disturbance of road construction is discussed, such as the changes of hydrology pattern, vegetation succession, and wildlife distributing structures. Road construction also disturbs the continuity of the process of ecosystem cycle, energy flow, and information transmission. Ecological measures to mitigate the ecological effects during the programming, constructing, and running period are raised, which involve ecological programming, ecological restoration, and ecological compensating. The ecological theories and methods are used to guide the construction of roads in order to find a way of harmony development among social, economic, and ecological benefits and eventually achieve sustainable development.

Keywords: ecological effect; mitigation measure; road construction

道路建设是社会和经济发展的必然产物, 其分布范围之广和发展速度之快是其他人类建设工程所不能比拟的^[1]。

道路建设包括规划、设计、施工、运营、管理和维护等过程以及其它辅助措施。随着国家对基础设施投资力度的不断加大, 公路、铁路建设进入了高速发

展期, 势必会加大原有地貌的扰动, 景观格局的改变, 自然资源的消耗和生态平衡的破坏, 尤其是道路网的建设, 更增强了人类干扰的广度和深度, 其影响尺度从个体到景观, 影响时间贯穿道路建设的规划设计到施工运营整个过程, 具有空间上的变异性及时间上的动态性。

收稿日期: 2009-06-15

修回日期: 2009-07-14

资助项目: 环保公益性行业科研专项(200809086); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD39B04)

作者简介: 田甜(1984—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 主要从事生态评价及重大工程建设与生态系统之间相互作用机理研究。

E-mail: tiantian968@126.com.

通信作者: 李绍才(1965—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 教授, 主要从事道路边坡生态恢复研究。E-mail: lizist@vip.sina.com.

道路对生态系统影响的研究起源于 20 世纪 70 年代, 主要集中在对野生动物行为的影响^[2]; 到 20 世纪末期, 关于这方面的研究逐渐扩展到景观尺度上^[3]。随着社会经济的发展和道路网络的不断完善, 越来越多的学者投入到相关研究中并取得了一定的成果, 主要集中在对水土流失、景观破碎、植被破坏、道路致死、边缘效应、路域污染等问题的研究上。目前关于道路生态效应的研究除了定性描述外, 主要涉及到的定量评价方法有 3S 法、指标评价法、取样调查法等^[4-10]。总结道路建设生态效应现有的研究发现, 从区域大尺度及生态系统层面上的系统性研究较少, 对其引起生态系统结构及功能方面的影响仍缺少比较全面和深入的探究, 同时对生态过程的研究也缺乏长时间序列的反应。对于消减道路建设引起生态影响的对策, 国内外的研究多集中在建立野生动物通道^[11]和植被恢复上。鉴于生态效应的动态性, 一个完整的对策体系是保证道路建设全周期生态协调性的前提。

本文从道路建设所产生的生态效应入手, 分析了道路建设对生态系统结构及功能的胁迫效应, 针对道路“规划—建设—运营—养护等”过程探讨了道路建设生态影响的人为适应对策, 以期用生态学的理论与方法来指导道路建设。

1 道路建设对生态系统结构的影响

1.1 道路建设对非生物组成及其时空格局的影响

由于道路及路网建设对其周围局域环境具有强烈的扰动作用, 使得路域内水、土、气、声、热等非生物环境因子产生一系列变异, 并伴随有时空格局的改变。由于扰动机制的不同, 可将其分为物理干扰和化学干扰。

1.1.1 物理干扰 物理干扰源自道路建设过程中人类活动和道路结构的耦合作用。作为一种镶嵌在生态系统中的人工廊道, 道路改变了地表径流的固有形势(图 1 : 1, 即图 1 中标号为数字“1”的过程, 下同), 弱透水地面的增加使降雨入渗变得微弱, 产流历时缩短, 天然河流的过水断面、流速等水文条件也会受到影响(图 1 : 2), 从而改变了水文格局^[4]。施工工程会强烈地扰动原生土壤, 并破坏原有植被形态, 从而减弱了植物对降雨的截留作用及根系对土壤的锚固作用, 增强了土壤可蚀性, 这样在风力、重力、水力等外力的作用下就会产生严重的土壤侵蚀^[5](图 1 : 3)。景观尺度上, 路网长度和密度的增加使原本是一个整体的生境破碎化^[6], 易产生“生态孤岛效应”, 中断了水平的生态流, 增加了边缘比例^[7]。

道路网与河网相互作用, 破坏了洪峰强度和河流生态系统恢复力之间的平衡, 加大了洪峰流及流域泥石流的发生频率^[2]。水文及景观格局的改变导致泥沙运移路径的变化, 会不同程度的降低陆生及水生环境的质量。

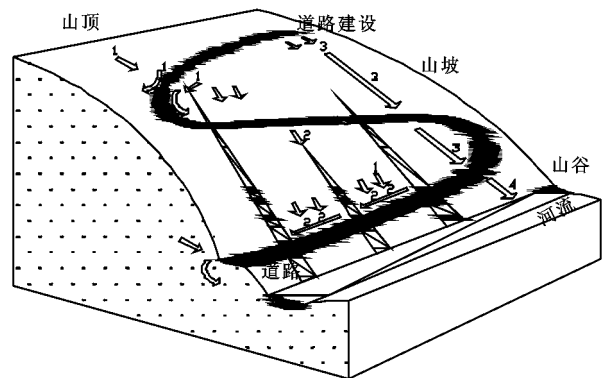


图 1 道路建设扰动下的水土迁移过程^[8]

1.1.2 化学干扰 化学干扰源自道路施工及运营期污染物质被直接排放到生态系统中。侵蚀的土壤、轮胎磨损物、车载泄露物及车辆排放的废弃物等会随地表径流流入水体, 增强了水体污染(图 1 : 4)。道路建设对大气的干扰也是较显著的环境效应, 其中对生态系统影响较大的大气污染物为: NO_x , VOCs , PAHs , NH_3 , HNO_2 , 金属和微粒, PM_{10} ^[9]。路网建设使这些污染行为在时间与空间上产生一定的累积效应, 从而不同程度地增加了污染强度。

1.2 道路建设对生物组成及其时空结构的影响

1.2.1 道路建设对路域植被结构的影响 道路工程行为、人类干扰活动及生境破碎等因素会改变路域气候、土壤质量及水文循环等生物赖以生存的环境条件, 势必会引发植被的物种组成、种群空间分布格局^[12]、群落结构^[13]及植被动态等一系列梯度响应过程。

对物种而言, 建设初期的工程开挖会直接破坏一定的植物个体; 建设过程中地形、地貌和植被覆盖的改变, 使得局域气候产生变化, 生物个体某个发育阶段不能满足自身需要, 发育将就此停止; 运行期间, 汽车尾气则会对植物的生理及健康状况产生一系列的影响, 如导致细胞膜渗透率的增加, 叶绿素浓缩及氮浓度升高^[8], 引起植物病虫害及改变冠层状况等^[14]。伴随着植物个体生长状况的改变, 使得植被形态格局发生变化, 最终影响植被结构。

对植物群落而言, 工程干扰会使群落发生次生演替, 尤其是入侵种的大量进入, 经过迁移、定居、群聚、竞争、反应和稳定等阶段形成新的群落结构。次生演替的发生使路域乔木生物量降低, 灌木和草本生物量

增大, 将导致物种多样性的降低、群落层次结构不明显等现象发生^[15]。

运营期, 车辆释放的 NO_x, NH₃ 导致路域氮元素的富集, 经过一定时间的演变使得物种组成与道路距离的增加呈现出一定的梯度性^[19]。

因此, 道路建设都对植被从“个体—种群—群落”的空间尺度以及“植物生活史—种群动态—群落演替”的时间尺度上产生了比较深远的影响(图 2)。对植被的改变直接影响了食物链网的基础组成, 导致生态系统结构稳定性发生变化。

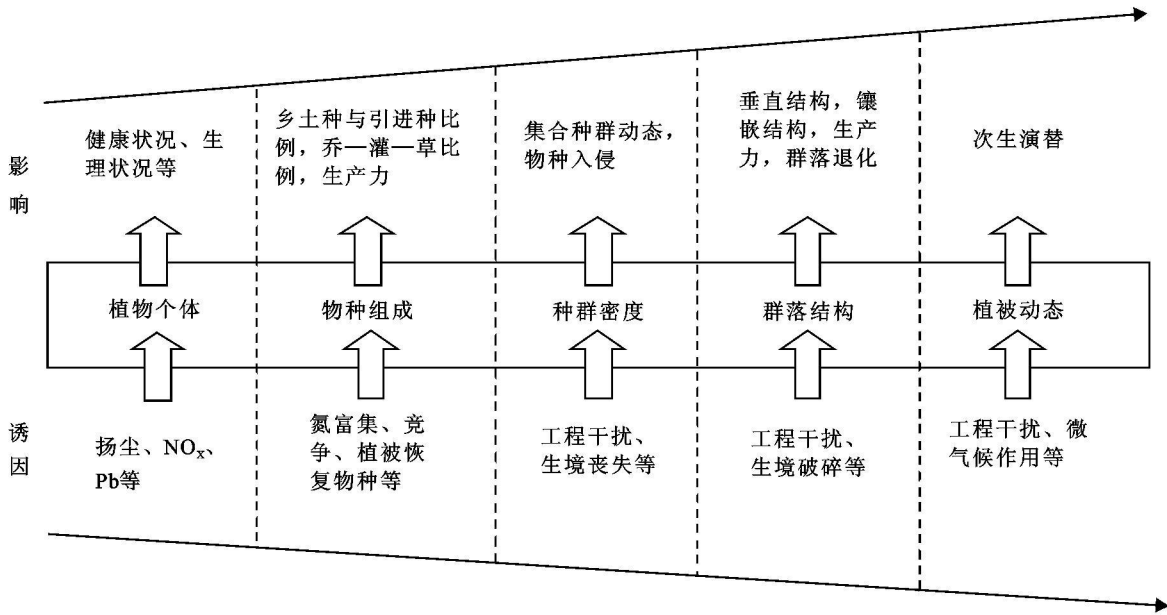


图 2 道路建设对路域植被结构的影响

1.2.2 道路建设对野生动物分布格局的影响 道路建设不仅会直接伤害工程区来不及迁移的野生动物, 捣毁动物虫卵等, 还会由于生境退化、丧失、破碎等原因间接导致动物个体的生命状态和生理机能、觅食、寻找配偶行为、种群密度、种群连通性及分布格局^[3]的一系列变化。其中道路及路网结构对野生动物的阻碍效应最为明显, 主要表现在 2 个方面: 道路致死与渗透效应(图 3)。

(1) 道路致死。道路致死是指动物穿越道路时与车辆发生碰撞而导致死亡的现象, 它已成为野生脊椎动物死亡的首要原因。从无脊椎动物到两栖类^[3]、爬行类、鸟类和兽类等多数种类都是这种事故的受害者(表 1), 它使得种群死亡率高于自然死亡率, 导致种群衰退, 对于一些种类还有可能产生局部灭绝, 从而严重威胁到渐危、濒危物种的长期存活^[17]。

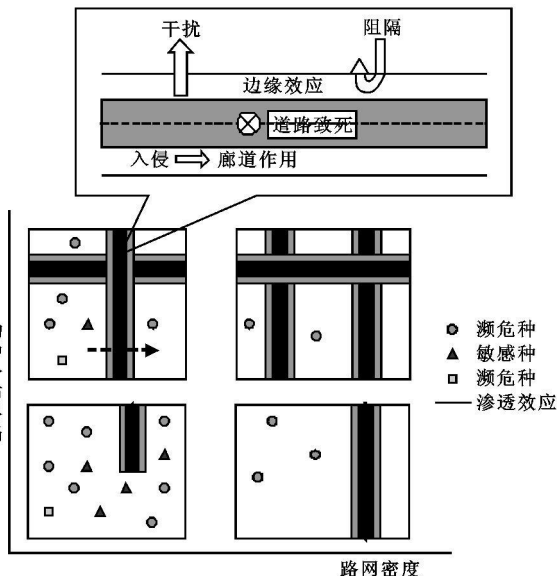


图 3 道路及路网结构对动物分布格局的影响

国家	动物种类	数量/10 ⁴ 只	文献
荷兰	兽类	1 519	[17]
	鸟类	6 513	[17]
澳大利亚	两栖和爬行类	550	[18]
	刺猬	11.3~34	[18]
美国	鹿	50	[19]
西班牙	脊椎动物	1 000	[5]

由于道路致死对野生动物的影响较大, 因此对其发生概率的计算引起了众多专家学者的研究热情。如 Tove Hels 给出动物穿越道路时可能存活概率模型^[18] :

$$P = \frac{1}{\pi} \int_{-2/\pi}^{2/\pi} e^{-\frac{Nv}{v \cos \alpha}} d\alpha$$

式中: N ——单位时间穿过道路的机动车数量;

a ——机动车致死宽度； v ——动物运动的速度； α ——穿过道路的角度。

结合模型可知，道路致死的主要因素有动物的生活史特性、个体大小、饮食特性、性别与年龄、分布范围、种群密度、路域植被格局^[11]、车流速度、车流量及道路宽度等。

(2) 渗透效应。道路廊道阻隔了某些物种的通过，但同时也作为特殊的线性通道使得某些生物能够迁入，这种对物种具有选择性的通过作用称为渗透效应(图 3)。道路阻隔作用会影响动物对巢区的选择；引起动物行为及空间分布格局的改变；干扰稀有或濒危物种的恢复；妨碍鸟类的领域性行为导致鸟类繁殖下降^[17]；降低遗传多样性及种群的变异性，如美洲野猫和山狗由于道路的阻碍每一代至少损失 0.5% 的基因^[11]。道路的通道作用有利于小型物种沿道路边缘扩散，往往会引起物种入侵现象的发生。

2 道路建设对生态系统功能的影响

2.1 道路建设对物质循环的影响

道路施工及运营阶段，人类活动和车流量的增加必将导致排入环境中的 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 的增加，从而破坏道路沿线原有 C、S 和 N 的物质循环。一般 CO_2 的增加有助于植物的光合作用，加速其生长， SO_2 一般起抑制作用， NO_x 对绿色植物的影响视植物种类不同而不同。植被结构的变化影响到生态系统中的初级生产者，初级生产者的变化必将引起生态系统消费者和分解者的连动变化，进而影响到物质循环通道的组成及结构。图 4 以 CO_2 增加为例介绍道路建设对碳循环的影响。

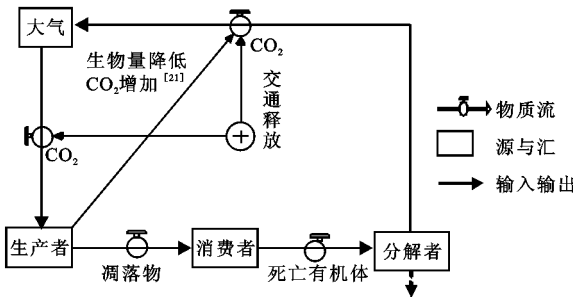


图 4 CO_2 增加对碳循环影响的箱式模型

2.2 道路建设对能量流动的影响

道路建设对能量流动的影响主要是减少流入生态系统中的能量，往往体现在以下几个方面。(1) 道路建设对绿色植物光合作用的影响必然会对生态系统太阳能的吸收量产生影响，建设过程对各种植物的破坏从根源上削减了生态系统对太阳能的利用率。工程施

工及运行期间产生的粉尘等物质覆盖在植物叶表，也减弱了植物对太阳能的吸收能力；(2) 永久性占地，物种多样性减少，土壤质量及结构的改变也都会损失净初级生产量及总生物量，减少进入生态系统中的能量；(3) 生态干扰会改变食物网结构进而改变能量流动的通道，也起到减少进入生态系统能量的作用。

2.3 道路建设对信息传递的影响

道路建设对生态系统中植物信息流的影响主要是形成了新的信息势差。一般认为建设以前，其将要经过的生态系统是稳定的，此时系统内部的信息势差小，信息流弱。建设过程不可避免地造成沿线生境的改变，空间异质性的加大造成了受影响区域与外界信息势差的加大^[19]，信息流将增强。对动物信息流的影响包括对物理信息、化学信息和行为信息等方面的影响。道路建设造成的噪声增加将使得动物对于声音信息敏感程度降低，造成动物用声音等物理手段传播信息的障碍。道路建设造成 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等物质的增加，扰乱了动物对于气味信息的辨别。扬尘造成能见度的降低会干扰动物的视力(图 5)。

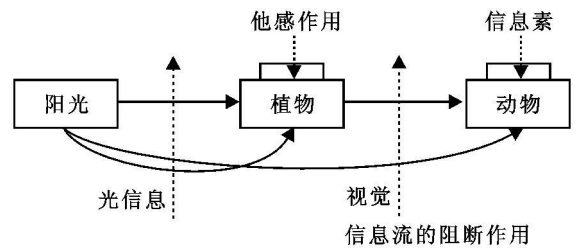


图 5 道路建设对信息传递影响的箱式模型

3 道路建设生态影响的消减对策

道路建设扰乱了生态系统原有的平衡性和结构的稳定性，不同程度地阻碍了系统功能的发挥。如何促进经济、社会和生态效益的协调一致，实现可持续发展，是道路建设需要解决的重要问题。基于生态环境保护的立场，提出了生态设计、生态恢复、生态补偿等生态化对策以消减道路及路网建设给生态系统带来的冲击。

3.1 生态设计

道路建设应合理规划，加强土地利用的合理性，强化工程设计中的生态学意识。

(1) 区域道路网规划设计时，要充分考虑当地的生态环境阈值，做到合理选线，合理布局，将岛屿理论应用到生态设计中，考虑适当的景观连接度。

(2) 当路网设计无法避免对野生动物的影响时，在道路设计时，要考虑设计有利于保护野生动物的特殊建筑结构，用于在重要危险地区对动物进行适当的

“引导”,如根据野生动物生活习性设计动物通道,包括地下通道(underpass)、地上通道(overpass),建立栅栏(fence)、警示牌等^[11],并在重点保护的野生动物分布区及野生动物丰富区增加桥涵、通道密度与尺寸,必要时建设绿色通道即绿桥(green bridge),这样也可以提高景观连接度。在设计野生动物走廊之前,要仔细调查动物的主要迁移路线以选择合理的走廊地点,这样能提高减缓影响的成效。野生动物对通道的利用效率也成为现今的研究热点,是否应该建立动物通道及如何建设高效的动物通道是具有较大争议的课题之一。

3.2 生态恢复

大量边坡的开挖和填方形成了面积巨大的裸露边坡,往往造成强烈的土壤侵蚀等生态环境问题,要进行生态恢复以降低其对生态环境的威胁。恢复要充分考虑到道路的交通功能、景观功能、生态功能的协调性^[19-21]。

(1) 要对恢复边坡的自然条件有详细的了解,包括坡度、坡向、气候条件、扰动土壤状况等,针对当地自然气候条件选择适应性较强的物种,包括要耐瘠、耐旱,地上生物量不要太大,而且根系要具有较强的锚固作用。

(2) 恢复模式要以草本—灌木—乔木相结合的

复合模式,这样不仅能体现层次美,达到物种间的有效生态位错位,而且还能增加物种的多样性以及系统的稳定性。

(3) 注重乡土植物的应用,这样不仅可以减少外来物种对当地生态环境的干扰,并且乡土物种对当地的自然气候条件有较高的适应性,可以提高恢复成效。

3.3 生态补偿

当以上措施无法弥补生态敏感点明显的损失时,就应考虑生态补偿措施。在道路建设的生命周期,明确其对生态环境的影响,指定合适的生态补偿措施来减少对生态系统的负面影响。生态补偿包括资金、技术及实物补偿。资金上的补偿是指对于生态影响损失受体给予一定的资金,可以简单分其为纵向补偿与横向补偿。我国对于道路建设的生态补偿应该采取纵向补偿(政府的补偿)与横向补偿(受益体之间的补偿)相结合的复合补偿模式,对于横向补偿,应该是一个长期的补偿模式,并针对生态系统的不同状况核算出不同的补偿金额,当生态系统恢复到可接受的程度,就可以视为补偿的终点截止补偿行为,这样可以督促对生态系统恢复措施的有效进行。

根据各工程阶段所产生的不同生态效应,表 2 列出了具体的消减对策。

表 2 道路建设生态影响的消减对策

工程阶段	生态效应	消减措施
初步设计阶段	损失生态敏感区	谨慎选线,避免占用特别有价值的区域/调整生态廊道,考虑重点保护野生动物的活动范围与活动频繁区域
设计阶段	干扰和减少野生动物物种 野生动物栖息地的损失/增加	调整路基、涵洞、桥和路障的设计
	噪声污染,土壤侵蚀	采取控制侵蚀的措施,进行植被恢复,提高施工现代化水平,加强管理
建设期	扬尘污染	合理安排施工时间,提高施工现代化水平,加强管理
	干扰和减少野生动物物种 野生动物栖息地的损失	控制对森林的砍伐 异地补偿
	大气污染	路域防护、路面材料,控制交通流量
	噪声污染	建设噪声屏障 ^[22] ,控制交通流量
运营期和维护期	水质污染	建设特殊结构,进行 BMPs 措施,如设置拦截水池,过滤水沟,过滤带等 抑或进行景观与植栽设计
	干扰生物群落 ^[8]	控制交通流量
	道路致死 ^[2]	减少潜在的交通风险,设计通道、护栏等防护措施,控制车流及降低车速等,加强路域植被的管理
	阻隔效应 ^[2]	设计动物通道 ^[23]

4 结论

由于道路具有多尺度及影响域的特点,决定道路

生态效应具有空间上的变异性及时间上的动态性。识别道路建设对生态系统结构与功能的影响因素与影响过程,是消减道路建设不利生态效应的先决条

件。道路建设对生态环境的扰动程度取决于当地的地质地貌及气候条件,如在脆弱的山区进行道路建设可能带来的生态影响就较大,同时还取决于道路的等级、长度、密度、施工强度等工程条件。一般情况下,道路建设施工期的扰动是最直接的,而运营期的影响往往具有潜在性、长期性、累积性等特点。发展更为有效的生态措施以减轻道路建设带来的生态影响将是众多决策者和学者所关心的课题。基于施工前期的道路建设生态设计是保护野生动植物的有利手段;施工期的生态恢复措施正逐渐应用到道路建设中,国内外在这方面取得了一定的研究成果;生态补偿手段的采用成为了现今生态学领域的热点问题之一,众多学者也进行了一定的探索。

[参 考 文 献]

- [1] 刘世梁,温敏霞,崔保山,等.基于网络特征的道路生态干扰:以澜沧江流域为例[J].生态学报,2008,28(4):1672-1680.
- [2] Coffin A W. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads[J]. Journal of Transport Geography, 2007, 15: 396-406.
- [3] Cushman S A. Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus[J]. Biological Conservation, 2006, 128: 231-240.
- [4] Cuo L, Giambelluca T W, Ziegler A D, et al. Use of the distributed hydrology soil vegetation model to study road effects on hydrological processes in Pang Khum Experimental Watershed, Northern Thailand[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224: 81-94.
- [5] Akay A E, Erdas O, Reis M, et al. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques[J]. Building and Environment, 2008, 43: 687-695.
- [6] Saunders S C, Mislivets M R, Chen J, et al. Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA[J]. Biological Conservation, 2002, 103: 209-225.
- [7] Delgado J D, Arroyo N L, Arévalo J R, et al. Edge effects of roads on temperature, light, canopy cover and canopy height in laurel and pine forests (Tenerife, Canary Islands)[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 81: 328-340.
- [8] Forman R T T, Daniel Sperling. Road Ecology: Science and solutions[M]. Washington DC: ISLAND Press, 2003: 1-178.
- [9] Bignal K L, Ashmore M R. Ecological impacts of air pollution from road transport on local vegetation[J]. Applied Geochemistry, 2007, 22: 1265-1271.
- [10] 刘杰,崔保山,董世魁,等.公路建设干扰下的生态系统变化及其机理[J].水土保持通报,2006,26(2):31-36.
- [11] Riley S P D, Pollinger J P, Sauvajot R M, et al. A southern California freeway is a physical and social barrier to gene flow in carnivores[J]. Molecular Ecology, 2006, 15: 1733-1741.
- [12] 巨天珍,石焱,安黎哲,等.公路建设期路域生态区植物种群空间分布格局:以宝(鸡)天(水)高速公路为例[J].生态学报,2008,28(7):3365-3374.
- [13] Hernández-Stefanoni J L, Dupuy J M. Effects of landscape patterns on species density and abundance of trees in a tropical subdeciduous forest of the Yucatan Peninsula[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255: 3797-3805.
- [14] Cristofolini F, Giordani P, Gottardini E. The response of epiphytic lichens to air pollution and subsets of ecological predictors: A case study from the Italian Prealps[J]. Environmental Pollution, 2008, 151: 308-317.
- [15] 赵慧,崔保山,白军红,等.纵向岭谷区高速公路对沿线土壤、植物系统的影响[J].科学通报,2007,52(S):176-184.
- [16] Truscott A M, Palmer S C F, McGowan G M, et al. Vegetation composition of roadside verges in Scotland: the effects of nitrogen deposition, disturbance and management[J]. Environmental Pollution, 2005, 136: 109-118.
- [17] 胡忠军,于长青,徐宏发,等.道路对陆栖野生动物的生态学影响[J].生态学杂志,2005,24(4):433-437.
- [18] Hels T, Buchwald E. The effect of road kills on amphibian populations[J]. Biological Conservation, 2001, 99: 331-340.
- [19] Haikonen H, Summala H. Deer-vehicle crashes: Extensive peak at 1 hour after sunset[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2001, 21(3):209-213.
- [20] 陈广生,田汉勤.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J].植物生态学报,2007,31(2):189-204.
- [21] 宋桂龙,高小虎,韩烈保,等.北京市西山地区道路边坡生态环境调查及修复对策[J].水土保持通报,2008,28(2):112-115.
- [22] 沈丽,邱飞程.高速公路噪声生态环境因子分析与治理[J].公路,2004(11):22-25.
- [23] Bissonette J A, William Adair. Restoring habitat permeability to roaded landscapes with isometrically-scaled wildlife crossings[J]. Biological Conservation, 2008, 141: 482-488.