

# 公路建设干扰下的生态系统变化及其机理

刘杰, 崔保山, 董世魁, 朱建军

(北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 在总结公路建设直接和间接生态干扰作用的基础上, 从生态系统组分入手, 论述了公路建设干扰下非生物组分(土壤、地形、气候等), 个体、种群、群落等层次的生物组分、生态系统整体特征(结构和功能)等方面的生态变化内容; 分析了公路建设干扰下生态系统的演替方向和植被类型的改变趋势, 并从生态系统结构和功能两方面构建了公路建设干扰下生态系统变化的表征指标体系; 对公路建设干扰下生态系统的变化机理进行了分析, 指出公路建设促成了土壤、地形等非生物组分和各层次生物组分的变化, 从而改变了生态系统结构和功能特征, 使得其演替方向和植被类型发生了更替。

**关键词:** 生态系统变化; 机理; 生态干扰; 公路建设

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2006)02—0031—05

中图分类号: U4, X24

## Ecosystem Changes and Their Mechanisms Caused by Disturbances of Highway Construction

L IU Jie, CUI Bao-shan, DON G Shi-kui, ZHU Jian-jun

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on summation of direct and indirect disturbances caused by highway construction, the changes of non-biological components (such as soils, landforms and weather), biological components (on levels of individual, population and community) and the whole ecosystem characteristics (structure and functions) caused by highway construction were discussed. The changing trends of ecosystem succession and vegetation types were analyzed. The index system of the ecosystem changes caused by highway construction was set up from the aspects of ecosystem structure and functions. The mechanisms of ecosystem changes were discussed. It was pointed out that disturbances of highway construction made non-biological and biological components change; disturbances of highway construction and the changes of non-biological and biological components made structure and functions of ecosystem change; and eventually the changes of ecosystem succession and vegetation types occurred.

**Key words:** ecosystem change; mechanism; ecological disturbance; highway construction

公路建设是当前人类改造自然最主要的活动之一, 在带给人们经济繁荣的同时, 也对生态环境产生了严重影响。公路建设的生态干扰作用具有高强度、大面积和长时间等特征<sup>[1]</sup>, 往往会造成生态系统结构和功能的严重退化, 并使生态系统处于一种过渡状态<sup>[2]</sup>。公路建设的生态干扰作用及其干扰下的生态变化已经成为了当前生态学研究领域中的热点问题之一, 内容以植被破坏、水土流失、景观破碎、边缘效应及道路污染等为重点, 并采用指标分析、野外观测和 RS 等方法对公路建设干扰下的生态变化进行了定量研究, 实现了定性与定量的结合<sup>[3-8]</sup>; 但现有研究多基于个体、种群和群落等层面, 缺乏公路建设对生态系统整体结构和功能特征的影响研究, 多层面的综合研究几乎空白。将立足于生态系统层面并强调

其层次特性, 对公路建设干扰下的生态变化进行多层次剖析并探讨其机理, 将个体、种群和群落等层次的生态变化纳入生态系统结构和功能变化体系, 以期对全面认识公路建设的生态影响起到积极作用。

### 1 公路建设的生态干扰作用

公路建设的生态干扰作用可分为直接和间接两类。直接干扰主要包括工程占地、植被破坏、污染灾害、生境破碎、水土流失、通道阻隔等方面<sup>[3-4]</sup>; 间接干扰则指公路建设通过影响周边地区的经济、文化和观念等间接地改变政策导向和人类行为方式, 进而引起更为复杂的生态问题<sup>[15]</sup>, 结果会导致人类活动能力的增强和生态影响范围的扩大, 使公路建设干扰下生态变化的强度、速度和范围显著增大<sup>[16]</sup>。

表 1 公路建设的生态干扰作用

干扰类型	发生原因	干扰途径
道路污染	车辆噪声和尾气污染;施工污染等	施工扬尘和废气造成沿线生态系统组分变化,并危及动植物生存和繁殖 公路两侧 200~300 m 范围是严重污染带,该区动物习性发生改变
工程占地	永久占地;施工场地道路、取土场等临时占地	土地征用将造成植被永久清除,造成了严重的植被破坏 临时占地破坏土壤和植被,地表裸露增加,环境稳定性下降
植被破坏	土石方、道路占地、平整、施工、材料堆放等	引发水土流失并严重将影响植被恢复,生物多样性降低 影响植物光合蒸腾作用,群落生物量降低,结构和功能受损
直接干扰	水土流失 景观破碎	高挖低填、取土弃土;路肩边坡、塌方滑坡 道路切割;植被破坏;取弃土场;桥梁涵洞
阻隔作用	生境破碎、物理障碍;噪声污染和车辆运动等	导致土层厚度减小,肥力下降,生物量降低,严重时完全丧失造成地表植被消失和破坏,进一步加速光秃坡地的土壤侵蚀 土地类型复杂化,边缘效应和异质性增加,特有种增多 路边生境更加破碎,动物与车辆碰撞概率增高,损害生物多样性
廊道作用	公路建设沿线区域提供了一些特有资源	分裂自然过程,影响植物扩散、繁殖并约束动物活动行为 与干扰和回避效应一起作用,减少了动物能够成功通过路面的概率 为多种特有生物提供迁移通道和栖息地,支持物种多样性 车辆和人类通过携带(种子、活体等)促进物种传播
间接干扰	公路带来经济、政策、文化等方面的变化	导致人类活动能力显著增强,生态影响范围迅速扩大,沿线土地利用发生巨大改变,从而强化了其对生态系统的干扰作用

## 2 公路建设干扰的生态系统变化

生态系统由生物组分和非生物组分构成,生物组分从高到低包括群落、种群和个体等多个层次;非生物组分则指对生物生长、发育、生殖、行为和分布有直接或间接影响的无机要素,例如土壤、地形和气候因子等。公路建设干扰下非生物组分和生物组分都将发生改变,生态系统整体结构和功能特征也将随之变化。由于不同组分具有不同的生物学特征,在公路建设干扰下发生的生态变化的内容也不相同。对于非生物因子而言,在公路建设干扰下的变化主要体现在其组成、分布和对生物的支持能力等方面的变化上<sup>[9,12]</sup>。对于生物组分而言,个体是具有独立生命能力的单个生物体,在公路建设干扰下的生态变化主

要体现在其生命状态与生理机能的改变上<sup>[10]</sup>;种群是栖息于同一地域中的同种个体组成的复合体,在公路建设干扰下的生态变化主要体现在其分布、规模以及密度效应等方面的变化上<sup>[10,14]</sup>;群落是栖息于同一地域中相互联系的所有种群构成的复合体,在公路建设干扰下的生态变化主要体现在其结构、演替和稳定性等方面<sup>[11]</sup>。生态系统是同一地域中生物群落和非生物环境组成的复合体,具有整体性特征<sup>[19]</sup>,公路建设干扰下的生态变化主要体现在结构与功能(物质循环、能量流动和信息传递)两方面。等级系统理论认为低层次组织系统是高层次组织系统的组成和细节特征<sup>[17-18]</sup>,因此,公路干扰下非生物组分、个体、种群和群落等层次的生物组分的变化均为生态系统结构和功能变化的具体内容(图 1)。

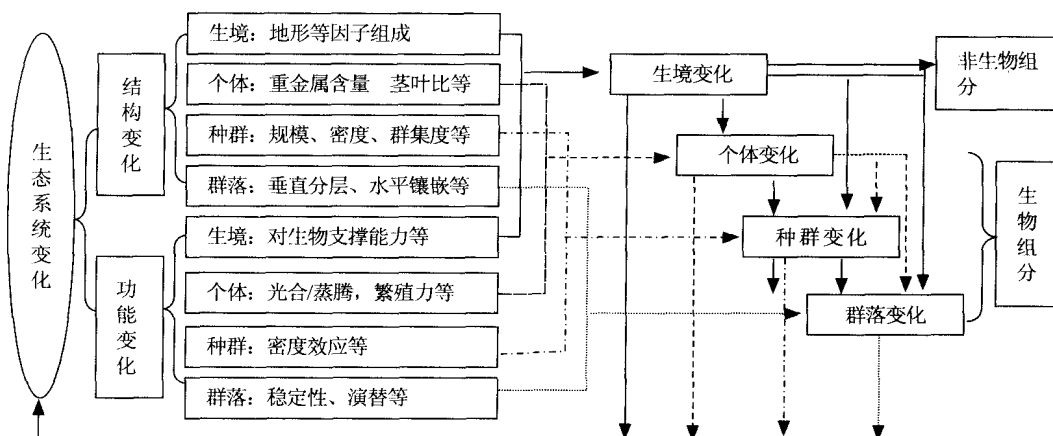


图 1 公路建设干扰下生态系统变化模式与内容

公路建设干扰下的生态系统变化最终必将通过具体指标加以定性或定量描述,因此构建其指标体系至关重要。指标体系的构建应从生态系统结构和功

能入手,综合考虑公路建设的干扰作用及干扰下非生物组分,个体、种群和群落等层次的生物组分,生态系统整体特征等方面的具体变化内容(表 2)<sup>[3-16,19]</sup>。

表 2 公路建设干扰下生态系统变化的表征指标体系

种类		表征指标		
公路干扰作用	直接干扰	工程占地数量、种类;植被破坏程度,植被覆盖率;水土流失量、水土侵蚀模数;空气污染指数、水污染指数、噪声污染指数;景观破碎程度、斑块数量、密度;廊道效应等		
	间接干扰	道路设计合理程度、施工方案合理程度、施工人员活动强度、服务区人员活动、交通量特征、公路沿线商业和工业布置等		
生态系统变化	整体特征	系统组分(非生物组分和生物组分);时间格局与演替特征;空间分布特征(水平结构和垂直结构);营养结构特征等		
	结构变化	非生物组分	土壤	类型、结构、有机质含量、水分含量、粒度、空隙度等
			地形	地貌类型、坡度、坡向等
			气候	辐射强度、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、CO <sub>2</sub> 含量、SO <sub>2</sub> 含量、NO <sub>x</sub> 含量等
	生物组分	群落	整体变化	水平镶嵌特征、垂直分层特征、演替、物种多样性、外貌等
			种群变化	整体变化 动物:分布、密度、规模及其增长方式等 植物:分布、规模、密度、盖度、高度、重要值等
个体变化			动物:重金属含量、栖息地、觅食地、活动范围等 植物:有机质含量、重金属含量、干重、茎叶比等	
整体特征	参与物质循环的物质、物质循环的途径等;太阳能吸收效率、转化效率、生物量、总呼吸量、单位能流值等;熵值、信息势差、信息量和传递强度等			
功能变化	非生物组分	土壤	土壤肥力、对生物的支持、适应能力等	
		地形	对生物群落的支持、适应能力等	
		气候	对生物群落的支持、适应能力等	
生物组分	群落	整体特征	种间关系(竞争、捕食、寄生等)、群落稳定性、抗逆能力等	
		种群变化	整体特征 密度效应、重要值、优势种、亚优势种、建群种等	
		个体变化	动物:生长状态、抵抗疾病能力、繁殖能力等 植物:光合作用、呼吸作用、水分利用率、受粉等	

公路建设的干扰作用改变了生态系统的结构和功能特征,进而会影响生态系统的演替方向。在自然条件下,生态系统的演替一般要经历从简单到复杂,从幼年到成熟的过程<sup>[19]</sup>。公路建设带来了植被破坏、水土流失、环境污染等后果,将使得生态系统的演替过程受阻,其演替方向也会发生改变。植被是生态系统的重要生态因素,也是生态系统演替的主要标志,在物质大循环的基础上起着重要的生物小循环的作用<sup>[19-20]</sup>,因此公路建设干扰下植被类型的变化能够在一定程度上代表生态系统的演替方向。根据对云南西部公路沿线区域进行的现场调查及前人研究成果<sup>[15,20]</sup>,公路干扰下植被演替方向与自然条件下相比发生了逆转或部分逆转,但公路建成后如果采取封山育林、生态恢复等措施,生态系统逆行演替能够得到控制和改善<sup>[12,15]</sup>(图 2)。

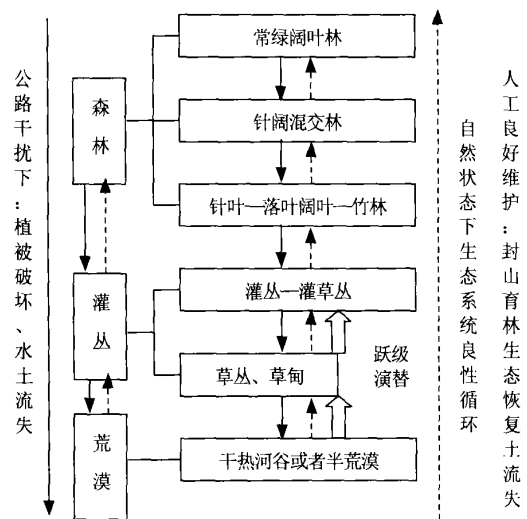


图 2 公路建设干扰下生态系统演替方向变化(滇西部)

### 3 公路建设干扰下生态系统变化机理

#### 3.1 非生物组分变化机理

公路建设的干扰作用会导致沿线土壤、地形和气象等非生物组分发生变化,从而对生物生长、发育、生殖和分布产生了影响。公路建设会引发水土流失,造成土壤有机质含量的减小,土壤结构、肥力和质地都将变差(趋于沙土质地和大颗粒结构)<sup>[9-10]</sup>;公路施工和运营过程中的车辆、机械通过时会使土壤孔隙度变小<sup>[9]</sup>,影响土壤动物的生存分布;施工和人类活动的增加会迫使土壤动物发生迁徙<sup>[11-13]</sup>。

公路建设过程中将不可避免地削高填低、开山劈坡,从而将改变沿线原有地形状况、地貌状况,破坏原有的植被,随之生境中的光照、气温、湿度等各气象要

素也将发生变化<sup>[8-9]</sup>;公路建设对地形和气象要素的影响程度随建设地点的不同差异很大,一般而言,公路在山区建设时经常穿山越谷,削高填低,植被破坏严重,对地形和气候因素的影响较大,而在平原地区影响小。

可见,公路建设干扰下土壤、地形和气象等非生物组分均发生了一定程度的改变,非生物因子对原有生物的支撑能力将减弱,并支撑新的物种出现,因此植被生长状态、种类和分布都将因此改变<sup>[5-9]</sup>,如:当公路东西走向且穿越山地时会形成一些新的阴阳坡地,而阴阳坡地的光照、营养物质等环境因子的分布特征不同,必然导致植物种类的明显差异。表 3 为国道 112 线河北丰宁段建设中形成的新阴阳坡地经 2 a 恢复后的植物种类对比。

表 3 公路建设形成阴阳坡地植物类型对比

序号	海拔/ m	年积温/ °C	代表植物类型	
			阳坡	阴坡
1	1 600	2 000 以下	针茅、苔草、落叶松、榛木、毛白杨等	云杉、苔草、落叶松、六道木、忍冬等
2	1 400	2 000 ~ 2 300	地榆、骆驼蒿、油松、绣线菊等	桦树、苔划、云杉、山杨等
3	800	2 600 ~ 3 200	蒿类、羊草、山杏、荆条、绣线菊等	落叶松、榛木、绣线菊等
4	400	3 200 ~ 3 500	绣线菊等	胡枝子、苔草等

注:资料来源《国道 112 线丰宁段改造工程环境影响报告书》。

#### 3.2 生物组分变化机理

非生物因子对生物生长、发育、生殖、行为和分布等有着直接或间接的影响,而个体、种群和群落等层次的生物组分之间存在着紧密联系,因此,公路建设干扰下各层次的生物组分的变化与非生物组分和其它层次生物组分的变化密切相关。

(1) 个体变化机理。公路建设干扰下,个体变化主要体现在其生命状态的改变和生理机能的丧失上。公路建设通过破坏植被、占用土地和施工等干扰活动对生物个体产生了直接影响,通过施工活动、削高填低、破坏植被和水土流失等作用造成了土壤、气候和地形等非生物因子的改变,进而对生物个体产生了间接影响。公路建设直接和间接干扰的综合作用促成了生物个体变化。根据生物耐受法则<sup>[19]</sup>,当公路建设对生物个体的综合干扰强度超出其耐受范围时,个体生命完结并丧失全部机能,当干扰强度控制在个体耐受范围时,个体作为生命形式将延续,但它们的某些生命机能会受到干扰而丧失。研究表明,动物个体生态变化主要体现在其迁徙、繁殖和抵抗疾病的能力等方面<sup>[7,10-11]</sup>,而植物个体的生态变化表现为长势状况,具体可通过光合速率、蒸腾速率、受粉几率等指标变化反应<sup>[10,19]</sup>。

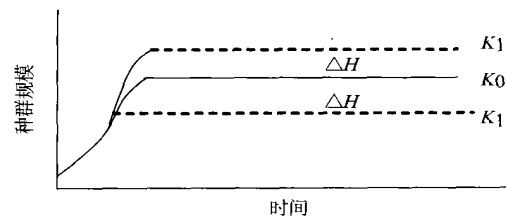


图 3 公路干扰下的种群增长曲线变化

(1)  $H$  可正可负,正值(正值)表示公路建设削弱(增强)了环境因子的限制作用,种群扩大(减小);(2)  $H$  具有针对性,随物种不同而不同;(3)生境破碎使物种迁入和迁出困难,生境破碎程度与  $H$  的值呈正比。

(2) 种群变化机理。种群变化主要体现在其分布和规模的变化上,公路建设的切割作用及其干扰下的个体变化是主要原因。公路建设前,若环境状况单一,每一个体在种群领域内出现的机会相等,此时种群分布为均匀型;公路从中穿过造成了生境破坏和种群分割,动物个体将向远离道路的方向迁徙,植物也会由于公路附近生境的破坏和个体的消亡而主要集中在路网中心区域,此时种群向集群型发展。随分布方式变化而来的是种群规模的改变,种群规模的生长曲线最初基本呈现“J”字型,而后逐渐呈“S”型并稳定

在某一规模  $K_0$  左右。根据最小可存活种群理论,种群以一定概率存活一定时期具有最小规模的限制<sup>[19]</sup>。公路建设造成了种群破碎并形成多个局部种群,种群规模和生境成倍缩小<sup>[10,14]</sup>;公路建设对生物个体的影响造成了个体的死亡或生理机能的丧失,从而导致了构成种群的个体数量减少或质量下降,最终也将影响种群规模。当受公路干扰后的种群规模小于最小可存活种群规模限制时,种群将消亡;当大

于这个限度时,种群将持续发展,其规模将重新稳定在一个新平衡点 ( $K_1$ ),但此时与  $K_0$  相比已有偏差  $H(K_0 - K_1)$  (图 4)。种群分布和规模的变化必然引起不同的密度效应,种群的某些群体特征也将随之改变,如公路两侧 200 ~ 300 m 范围内形成的噪声和大气污染可造成鸣鸟性别比、年龄比发生变化<sup>[21]</sup>,植物的破坏会导致种群重要值、渐变群种类等指标发生变化。

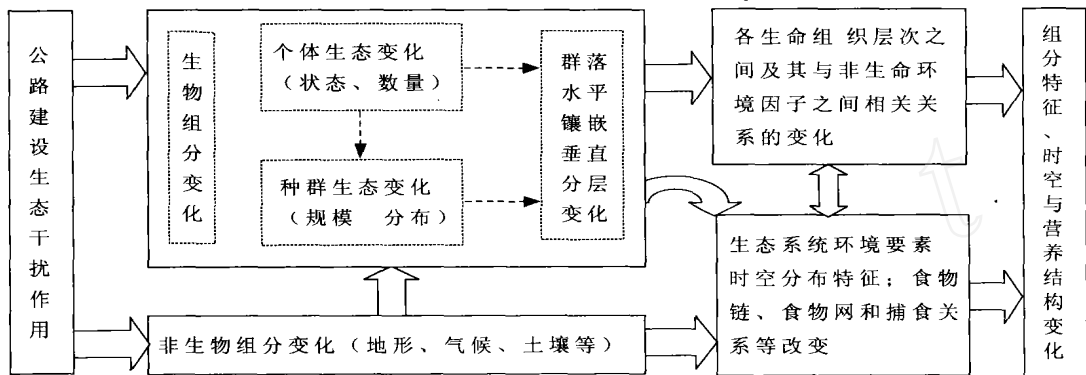


图 4 公路建设干扰下生态系统结构变化机理

(3) 群落变化机理。公路建设及其干扰下的种群变化造成了群落结构、演替和稳定性的变化。群落结构包括垂直结构和水平结构,前者指群落分层现象,与光能利用密切相关;后者主要指群落组分的配置状况或水平格局,环境因子的不均匀是主要成因。公路施工过程中将砍伐部分森林,优势种群损失严重并会失去优势地位,各种群的地位变得相对均衡并将重新展开对光能和空间的争夺,此时群落垂直分层不再明显;此外,人流和车流的进入也将造成群落生物多样性降低和层次缺失<sup>[10-11]</sup>,因此群落垂直结构在短期内将得到简化。公路建设干扰下沿线生境发生了较大改变,原有群落组分因受不再适应新生境而受到损害,但随着时间推移必然会出现适应新生境的先锋物种、优势种和建群种等,新群落形成,此时群落垂直结构的复杂性取决于群落的类型和发育时期。公路建设改变了沿线气候、地形和土壤等因子的分布,各环境因子变得不再均匀,造成了多个微地形和微气候区的形成并能支持多物种的存在,从而群落水平镶嵌格局将变得复杂<sup>[5,7]</sup>。群落结构的变化决定着其稳定程度和演替方向,一般认为,结构简化将造成对环境抵抗能力和调节能力的下降,群落稳定性将降低,变得易感染病害和遭受风折,并可能导致群落演替终止甚至逆行演替<sup>[19]</sup>。

### 3.3 生态系统变化机理

公路建设干扰下非生物组分和各层次生物组分的变化是生态系统结构变化的主要原因。公路建设干扰下,非生物组分的分布、个体生物状态、种群规模与分布、群落结构和演替等都将发生变化,各组分之间的关系将重新确定,从而系统食物链和食物网重新建立。可见,公路建设干扰下生态系统组分、时空和营养结构都将改变(图 4)。结构决定功能,公路建设也将对生态系统物质循环、能量流动和信息传递三大功能产生影响。

公路建设和运营过程中会增加环境中  $CO_2$ ,  $SO_2$  和  $NO_x$  等物质从而使得参与循环的物质含量发生变化,并能通过改变沿线生境状态改变物质循环的方式<sup>[19-20]</sup>;公路建设对植被的破坏降低了进行光合作用的绿色植物的数量和质量,从根源上削弱了生态系统的光合作用能力<sup>[9,19]</sup>;公路建设导致的空间异质性的加大会造成受影响区域与外界信息势差的加大,信息流将增强,对动物影响敏感,如噪声造成了动物对声音信息敏感程度降低等<sup>[7-9]</sup>。

结构和功能是生态系统的基本特征并且决定着生态系统的类型和演替,因此,公路建设干扰下生态系统结构和功能变化将促成生态系统演替方向和植被类型的更替。

## 4 结 论

(1) 公路建设的生态干扰作用包括直接和间接两类,前者指工程占地、植被破坏、环境污染、生境破碎、水土流失和通道阻隔等;后者则指通过影响周边地区的经济、文化和观念等间接地改变政策导向和人类行为方式从而引起更为复杂的生态问题。

(2) 公路建设干扰下生态系统变化表现为非生物成分(土壤、地形和气候等)、生物成分(包括个体、种群和群落等层次)和生态系统整体特征(结构、功能和演替)变化等方面。

(3) 公路建设的生态干扰作用促成了沿线土壤、地形和气候等非生物组分和各层次生物组分的变化,公路建设及非生物组分、生物组分的变化共同改变了生态系统的结构和功能特征,从而将促成生态系统演替方向的偏转和植被类型的更替。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Shugart H H. Terrestrial Ecosystems in changing environments[J]. Cambridge University Press,1998. 537—562.
- [2] 江洪,张艳丽. 干扰与生态系统演替的空间分析[J]. 生态学报,2003,23(9):1861—1877.
- [3] 陈辉,李双成,郑度. 青藏公路铁路沿线生态系统特征及道路修建对其影响[J]. 山地学报,2003,21(5):559—567.
- [4] 张镜铨,阎建中. 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[J]. 地理学报,2002,57(3):253—266.
- [5] Davide G. Biodiversity Impact Assessment of roads:an approach based on ecosystem rarity Environmental[J]. Impact Assessment Review,2003(23):343—365.
- [6] 黄锦辉,李群,刘晓丽. 河南周口至省界段高速公路建设对生态环境的影响[J]. 生态学,2002,21(1):74—79.
- [7] 项卫东,郭建,魏勇,等. 高速公路建设对区域生物多样性影响的评价[J]. 南京林业大学学报,2003,27(6):43—48.
- [8] Borrego C, Tchepel O, Barros N, et al. Impact of road traffic emissions on air quality of Losbon region[J]. Atmospheric Environment,2000,34(27):4683—4690.
- [9] Van H D,Bohemen H. W, Janssen H et al. The influence of Road infrastructure and Traffic on Soil, water and Air quality[J]. Environmental Management,2003,(31):50—68.
- [10] Alexander S M, Nigel M W. The effects of highway transportation corridors on wildlife: a case study of Banff National Park[J]. Sage Urban Studies Abstracts,2001,29(1):3—135.
- [11] Tikka P M, Mander H, Harri K, et al. Road and railway verges serve as dispersal corridors for grassland [J]. plants. Landscape Ecology,2001,16(7):659—666.
- [12] Forman R T, Alexander L E. Roads and their ecological effects[J]. Annual Review of Ecology and Systematics,1998,29:207—231.
- [13] Delgado J D, Arevalo J. Road and topography effects on invasion: edge effects in rat foraging patterns in two oceanic island forests (Tenerife, Canary Islands) [J]. Ecography,2001,24(5):539—546.
- [14] ThieruLod. Effect of motorway on mortality and isolation of wildlife populations[J]. AMBIO,2001,29(3):163—166.
- [15] 曹力媛. 高速公路建设的生态环境问题及对策研究[J]. 山西交通科技,2002(2):7—8.
- [16] 闫百兴,刘景双. 高速公路建设对环境的影响分析[J]. 农村生态环境,1997,13(4):20—24.
- [17] 何念鹏,周道玮,吴冷. 乡村生态学研究的尺度与等级特征[J]. 干旱区资源与环境,2002,16(2):22—27.
- [18] 常学礼,赵爱芬,李胜功. 生态脆弱带的尺度与等级特征[J]. 中国沙漠,1999,19(2):115—119.
- [19] 孙儒泳,李博,诸葛阳,等. 普通生态学[M]. 北京:高等教育出版社,1993. 2—13.