

doi 10.3969/j.issn.1671-3168.2010.03.008

高速公路对路域生态系统的影响及修复技术研究进展

马国强^{1,2}, 李秋洁³, 张堂松³, 胡光万², 杨汉忠⁴, 刘春霞⁴, 龙春林²

(1.西南林业大学保护生物学学院, 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224

2.中国科学院昆明植物研究所, 云南 昆明 650204 3.西南林业大学资源学院, 云南 昆明 650224

4.北京深华科交通工程有限公司, 北京 100071)

摘要: 综述国内外就高速公路建设和使用过程对路域生态系统生物个体、生物种群、生物群落的影响研究情况, 以及路域生态系统修复中的植被恢复基础研究、恢复技术研究情况. 分析了当前我国在高速公路路域生态系统修复过程中存在着缺少适用于多种路域的技术体系和生态修复模式; 植物种类与配置简单, 生态适应性差; 缺乏后期养护与管理等问题. 藉此提出了相应的对策.

关键词: 高速公路; 路域生态系统; 修复技术; 植被恢复; 生物群落

中图分类号: S718.5 F540.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2010)03-0029-06

The Impact of Freeway on Route Ecosystem and Progress on Study of Technology for the Restoration

MA Guo-qiang^{1,2}, LI Qiu-jie³, ZHANG Tang-song³, HU Guang-wan², YANG Han-zhong⁴,
LIU Chun-xia⁴, LONG Chun-lin²

(1. Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, Faculty of Conservation Biology, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China 2. Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences,

Kunming 650204, China 3. Faculty of Resources, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China

4. Beijing Shenhuake Traffic Engineering Limited Company, Beijing 100071, China)

Abstract The study on the impact of freeway construction and its utilization progress on biological individuals, population and community in route ecosystem at home and abroad and fundamental study about vegetation restoration were elaborated. The issues in the progress of ecological restoration in freeway areas in our country could be identified as lack of technological system and ecological restoration model suitable for multiple routes, mono-plant species and layout with poor ecological adaptability, short of rearing and managing and etc. Thus some corresponding measures were put forward as well.

Key words freeway; ecosystem within road domain; restorative technology; vegetation restoration; population

近年来,我国高速公路建设非常迅速,根据交通部《公路水路交通“十一五”发展规划》至2010年,全国公路总里程将达到230万km,其中高速公路6.5万km,二级以上公路45万km,县乡公路180万km.但是在高速公路建设过程中,因为开山采石、挖路修桥等一系列工程活动,形成大量新的裸露边坡,造成水土流失、生态系统破坏、动植物的生存环

境受到严重干扰等危害^[1],形成的道路网络对自然景观和路域生态系统具有分割、孤立、干扰、破坏、退化和污染等各种负面影响^[2-6].在高速公路修建过程中,直接影响到路基(50~100m)及其两侧200m范围内的植被,在一些特殊地段(如滑坡点、陡坡地)甚至影响公路两侧1km范围内的植被^[7].桥梁和隧道等工程构筑物虽然起到了减少植被破坏、提

收稿日期: 2010-03-23

基金项目: 云南省科技厅“新街一河口公路路域(红河流域)生态恢复与水土保持应用示范项目(2007CA027); 云南省森林灾害预警与控制重点实验室资助; 云南省重点学科野生动植物保护与利用资助(XKZ200904).

作者简介: 马国强(1982-),男,甘肃天水人,硕士,主要从事路域植被恢复和生物多样性保护方面的工作. E-mail: gsmgq2005@yahoo.com.cn

通讯作者: 龙春林. E-mail: long@mail.kib.ac.cn; chunlinlong@hotmail.com

供生物廊道的作用,却在一定程度上打破了和谐的自然景观格局。

如何缓解公路建设与生态环境之间激烈的矛盾问题,减少公路对生态环境的影响,对路域生态系统做出科学的修复与研究,是公众和公路建设者都在考虑的问题。在这样的背景情况下,道路生态学 (road ecology) 正越来越引起人们的重视。Richard T. Forman 认为道路生态学是研究与道路和车辆相关的有机体与无机环境之间相互作用的科学,或探索自然环境与道路系统的相互关系的科学^[8]。陈爱侠指出,当公路建成以后,随着绿化和生态恢复为主的环保工程的实施而出现了一个新的生态系统,范围一般是公路用地界之内宽约 50~70 m,长数十至数百公里的地带,其中生物因素包括中央分隔带的植被、边坡植被、护坡道植被、立交区植被和隔离栅植被等。另外,这里栖息了许多小型哺乳和爬行动物、灌丛和枝头的鸟类、农田迁来的害虫和天敌,排水沟的两栖类等这一系统的成分、结构、演替等比周围自然生态群落要单纯,比农田等人工生态系统又要复杂。其代表性的特点是外来种属的引进,乔、灌、草、动物等生物多样性的变化,此“路域生态系统”在很长的线型地域内其边界是灰色模糊的^[9]。毛文碧等指出,路域生态系统由路域人群、过往车辆、公路设施以及相应条件下的自然生态环境组成,这些组分通过生态与经济纽带形成具有一定结构和功能的有机整体。路域生态系统的结构由空间结构、营养结构、层级结构 3 方面组成^[10]。

本研究通过对国内外高速公路对生态系统的影响及修复对策的研究现状进行分析、归纳、总结,追寻目前的研究方向和热点问题,结合我国在路域生态系统修复过程中存在的主要问题和不足,为以后的路域生态系统修复提供科学依据。

1 高速公路对生态系统的影响

公路路域生态系统是一个人工化的生态系统,是一个复合的、动态的系统。公路路域系统是由人工构筑物覆盖和叠加在自然生态系统上形成的,它既有人工构造物的成分,也有自然生态系统的成分。公路路域系统的复合性和动态性在不同阶段的影响有不同的体现^[10]。高速公路的修建引起的道路密度和车辆的增加在一定程度上非常有利于外来病原体、外来昆虫、外来植物的传播和入侵,给生态系统的安全健康带来隐患。高速公路的建设和正常营运改变了路域周边的原生生境,对原生生境造成生境的损

失、退化和孤立,这些改变将造成植被分布格局和动物移动格局的改变,最终导致路域生态系统结构和作用发生改变,直接影响高速公路的健康发展和可持续营运。

1.1 对生物个体的影响

高速公路的建设对生物个体的影响主要指各个生态因子对生物个体产生影响,这些生态因子包括气候、土壤、地形和生物因子等。在高速公路修建的过程中,往往为了取其线路的通直及减少建设经济成本,在穿越山岭和河流时有可能改变原有地形和环境,形成不同的新地形,新形成的坡向、坡位、坡度等地形条件直接影响到水热资源的再分配和土壤状况,其中任何一个因素的改变都会导致对生物个体的影响^[11]。景宏伟等通过对中国沙棘 (*Hippophae sinensis* Rousi) 生长特征、生物量及其分配格局等因子在不同坡向的研究得出,在同一坡向几个因子无显著差异,其生态适应性均具有趋同性,而在不同坡向时却恰恰相反^[12]。成子桥的研究认为,高速公路阻止了当地植物花粉和种子的传播,为外来植物个体的入侵开辟了通道,并提供了足够的空间,严重地影响了乡土植物个体的正常生长和后代的繁殖及更新^[1]。Shine 等研究了沙砾道路对加拿大红边蛇 (*Thamnophis sirtalis parietalis*) 移动行为和引诱能力的影响。研究结果表明,当遇到植被覆盖率低、辐射高的道路时它就会立即回避,并改变方向,沿着道路边缘移动,道路在一定程度上甚至影响到雄蛇的配偶定位能力^[13]。

在高速公路建设过程中所形成的分割作用,使动植物栖息地和食物源在不同程度上发生减少,迁徙通道和交配路径受阻,活动区域和视野范围减小,最终导致动物个体生活力下降、优势性状退化,严重影响动植物群落组分和结构的稳定。

高速公路的建设形成了一个新的人为土——路域土壤,在路域土壤形成过程中,土壤的粉砂粘粒含量、有机质和养分含量趋于下降,pH 值趋于升高;随着道路的营运,汽车尾气排放出的重金属化合物也在污染着土壤。大量的研究也证明,尾气主要成分之一——铅在高速公路 25 m 范围内含量最高,5~8 m 范围内的草本植物的组织中具有更高浓度的铅,土壤中的含铅量与到公路边缘之间的相互关系符合高斯衰减分布模型^[14-20];这一系列的改变使原有的土壤发生了很大改变,原生土壤中的大型土壤动物随之消失,而在路域土壤的形成过程当中,土壤动物的类群和密度存在着明显的差异^[21]。路域土壤的改变对

于路域周边的乡土植物来说将会造成个体生长发生异常,最终导致死亡甚至在路域生态系统中消失,却为外来植物的入侵和繁殖提供了足够的空间,最终使路域生态系统中植被结构发生变化。

1.2 对生物种群的影响

种群是在一定空间中,能相互进行杂交、具有一定结构和一定遗传特性的同种个体总和。种群与组成种群的个体不同,种群有其单独的个体特征,如种群密度、分布格局、年龄结构、种群增长型和种群调节等一系列特征^[21]。高速公路的建设通过直接或间接的方式对种群产生着影响。丁宁等以陕西省靖王高速公路路基两侧不同地形条件下生长的紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.) 种群为研究对象,通过相关指标调查得出平整带上的种群生长最好,北边坡的种群次之,南边坡的种群生长最差^[23]。丁宁等对在高速公路边坡不同地形部位的沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 种群进行研究,结果表明,随着土壤水分和养分储量的增大,茎、花、果的生物量比例增大,根系和叶片的比例下降^[24]。这与其种群内部竞争及其种群自我调节是相一致、相协调的,扩大了种群在高速公路修建的逆境条件下对环境资源的获取和利用范围。

Eaglin和 Hubert通过研究发现, Wyoming 流域中鲑鱼的生物量和河床生境质量与河流和道路交叉点有关,随交叉点的增加,其生物量和河床生境质量下降^[25]。Findlay和 Houlihan通过研究发现,湿地物种多样性随半径 2 km 范围内的道路密度的增加而下降^[26]。高速公路的修建及营运在一定程度上引起了生境的破碎,从而使原生地的种群结构发生变化,对于植物来说,原来路域周边的常绿及耐阴植物种群将消失,一些易繁殖、易扩散的喜阳植物种群在高速公路两侧的路域内将迅速地生长起来。对于动物和微生物种群等的影响主要是来自于植被的破坏、道路阻隔、施工污染及营运后期的噪声及废气、废物的污染。

1.3 对生物群落的影响

高速公路的路域群落是一个比较特殊的群落,是一个生活在受高速公路修建和营运的影响环境中并且彼此相互作用的植物、动物、微生物的组合,它形成具有一定组成、结构、环境关系的生命系统。高速公路的修建和营运往往会对路域范围内的群落物种多样性、群落中的物种相互作用关系和群落的结构产生直接或间接的影响。公路建设不可避免地破坏了原生境的群落特征,使路域生态系统产生分割

和破碎,形成许多“生态孤岛”。而“生态孤岛”的形成在一定程度上限制了动植物之间的交流,使群落结构和群落特征发生了变化,限制了一些物种的生长和发育。

董炜华等通过对半干旱典型草原地带公路路域植被自然恢复过程中不同演替阶段土壤动物群落的研究表明,当原有土壤植被受到彻底破坏后,大型土壤动物也随之消失,植被恢复阶段土壤动物的类群和密度明显增加,但是植被恢复阶段和植被发育顶级阶段土壤动物的多样性差异较小^[14]。董世魁等对大保高速公路老营段路域进行研究,发现路域边坡植物群落在恢复演替过程中,植被恢复模式和恢复时间对植物群落物种数量有一定的影响,本土物种在植物群落物种组成中所占的比例及植被功能群的组成也受到恢复模式和恢复时间的影响^[27]。

在路域植被恢复过程中,植物群落的结构和物种多样性同样也受到恢复模式和恢复时间的影响。刘杰等通过对纵向岭谷区高速公路建设对植物生物量的影响研究得出,高速公路建设通过影响绿色植物的数量和光合作用等生理过程对沿线植物生物量产生影响,其中乔木主要受负面影响,灌木和草本主要受正面影响;高速公路沿线乔木层的生物量随距离公路远近变化的曲线呈“J”形,灌木和草本的生物量的变化曲线呈“单峰”形,最大值出现在距离公路 20~50 m 的范围,紧邻和远离公路的样点处均较小^[28]。Reijnen等通过高速公路对鸟类群落造成的影响研究得出,与道路相邻的林地及草地生态系统中现存的鸟类种群中,有将近 60% 的种群密度都有下降的趋势。在道路影响区,鸟类的总密度下降了 1/3 种的丰富度减少,接近道路则种群逐渐消失^[4-5]。

2 路域生态系统的修复

路域生态系统的修复主要是通过植被恢复来完成的,而植被恢复是生态恢复的关键措施。路域边坡植被恢复就是通过人工恢复措施,把受高速公路修建和营运影响干扰较大的生态系统恢复和重新建立起一个具有自我恢复能力的生态系统(包括自然生态系统、人工生态系统、人工模拟自然生态系统)。经过 20 多年的发展,国际生态恢复协会 (SERI) 对生态恢复的最新定义为:帮助退化、受损或破坏的生态系统恢复的过程^[29]。Dobson 等将恢复分为修复 (Rehabilitation) 和自然过程 (Natural processes) 或原生演替 (primary succession) 2 个层面^[30-31]。高速公

路路域生态系统的修复主要通过边坡植被恢复来进行,是以恢复生态学、水土保持学、森林培育学等原理作为指导,恢复和重新建立一个具有顺向的、可持续演替发展的路域生态系统,以提高高速公路路域生态系统的稳定性。

2.1 路域植被恢复基础研究

路域植被恢复的主体是植物,由于高速公路边坡的立地条件较差,坡度较陡,沿线地质以及气候因素变化复杂,给路域植被的恢复带来了困难。国外发达国家对路域植被恢复起步较早,开展了相关一系列的试验。Cary and Slay 等就加利福尼亚荒漠中高速公路边坡植被恢复的植物材料选择与恢复技术进行了研究,科学解决了荒漠条件下植被恢复的关键问题^[32]; Hansen 等提出了运用乡土植物对公路边坡进行植被恢复^[33]。我国植被护坡的历史源远流长,最早有记载的植被护坡应用出现在 1591 年^[34]。在很早以前,柳树等植物就已经应用在河岸边坡的加固和保护当中。但是我国高速公路路域植被恢复建设是 1996 年随着对云南省昆曲高速公路生态护坡进行绿化而开始的,为高速公路的植被恢复揭开了新的篇章^[35]。

在植物选择与配置方面,郭晓荣等通过路域植物广布性、固氮性、繁殖能力、覆盖能力等指标进行研究得出,在滇中地区,旱冬瓜 (*Ahus nqalensis* D. Don)、马鞍叶羊蹄甲 (*Bauhinia brachycarpa* Wall ex Benth.) 苦刺花 (*Sophora davidii* Pavol)、毛刺山黄麻 (*Trama tomentosa* (Roxb.) Hara)、葛藤 (*Pueraria lobate* (Willd.) Ohwi)、野拔子 (*Elsholtzia rugulosa* Hemsl.)、蜜蜂花 (*Melissa axillaris* (Benth.) Bakh.) 等植物对路域环境具有较强的适应能力,具有较好的护坡效果^[36]。

胥晓刚就 13 种植物在四川高速公路中的生长适应性进行比较发现,狗牙根 (*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.)、百喜草 (*Paspalum natatum*)、草木樨 (*Melilotus suaveolens* Ledeb.)、弯叶画眉草 (*Eragrostis curvula* (Schrad) Nees) 具有较强的耐贫瘠、耐旱性^[11]。李西筛选出 2 种抗性强的岩生植物——金发草 (*Pogonatherum panicum* (Lam.) Hack.) 和丛毛羊胡子草 (*Erioscipus comosum* (Wall.) Palla), 它们在岩石边坡上均能正常生长^[37]。

张淑娥等对宁夏古王高速公路边坡生物防护研究中发现,沙打旺、紫花苜蓿 (*Medicago sativa* Linn.) 具有较强的抗逆性,适合于干旱地区护坡^[38];随着人们环境意识和对植被恢复认识的提高,对高速公

路路域生态系统中边坡护坡植物选择的系统性研究及立体防护模式的研究将更加得到重视。

2.2 路域植被恢复技术研究

在路域植被恢复技术方面,国外关于高速公路边坡植被恢复技术已经很成熟。1953 年美国 Fing 公司开发出了喷播机,标志着高速公路边坡植被恢复机械化时代的到来。在日本,植被护坡与道路建设同步发展,至今已拥有半个世纪的历史,开发出了众多适应其气候、地质等的植被护坡技术^[39],比如种子喷播法、客土喷播法、厚层基材喷播法、植生带法、植生网法、肥料袋法、植生袋法等一系列比较成熟的配套技术。20 世纪 80 年代至今,日本在本国和国际上注册的植被防护的专利技术就多达 40 多项^[40]。目前,喷射绿化技术已成为日本应用最为广泛的生态护坡技术^[41]。

我国在路域植被恢复技术方面的研究起步较晚,植被护坡技术在现代中国始于 20 世纪 50 年代,一般多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等护坡方法。70 年代开始,植被护坡技术在中国得到了进一步发展^[42]。1989 年,广东省水利水电科学研究所从香港引进一台喷播机,开始在华南地区进行液压喷播试验。1993 年,我国引进土工材料植草护坡技术,随后土木工程界与塑料制品生产厂家合作,开发研制出了各式各样的土工材料产品,如三维植被网、土工格栅、土工网、土工格室等,结合植草技术在铁路、公路、水利等工程的边坡植被恢复中陆续获得应用^[43]。李志刚等对不同坡形的边坡具体防护措施进行了试验研究,指出拱形防护的实用性^[44]。

3 我国在路域生态系统修复过程中存在的主要问题及发展对策

3.1 缺少适用于多种路域的技术体系和生态修复模式

高速公路里程长,在修建与营运过程中跨越许多不同地域和生态环境,不同路域的温度、水分、自然植被类型和坡面特征等均存在着差异。目前对高速公路路域生态系统的研究主要集中在生物多样性比较丰富的热带、亚热带地区,而对于北方干旱、半干旱风蚀区,沙漠化、石漠化等环境条件较差,边坡植被恢复难度大的地区缺乏大范围的路域生态系统修复研究。

因此,根据目前高速公路建设的需要,针对不同地理和气候类型的高速公路边坡特性、植被景观类

型,进一步结合公路生态建设的基本要求和路域生态系统修复方案的选择,形成多样的、适应性广的、易恢复的、自然的路域生态修复模式,为高速公路的生态化建设提供科学依据,也为相同类型的裸露边坡生态系统修复提供理论参考。

3.2 植物的选择与配置简单,生态适应性差

高速公路路域生态系统修复中边坡生态恢复的主体是植物,由于高速公路边坡植物立地条件较差、坡度较陡,受路域范围内地层、水文及气候等因素的影响较大。而目前高速公路路域生态系统修复中普遍存在着“强调短期效果、忽视长期效果”,往往为了验收或者交工而用外来的一种或很少的几种植物来进行植被恢复,忽视了植物的异质性、地域性、适应性和多种植物的共生性^[46]。比如广东佛开高速公路、云南玉元高速公路、四川成雅高速公路和成乐高速公路等边坡植草品种单一,建成后不久就呈现出不同程度的草坡退化现象^[46]。

在进行路域边坡恢复植物选择时,应该结合物种的生态特性即扩展性、抗逆性、速生性、降尘减污性、美学特性及景观价值和经济成本等综合特性来进行恢复植物的选择^[47],以避免以往生态建设和生产实践中植物选择的片面性(单方面强调生态特性或生态价值)。高速公路路域生态系统修复中应优先选用乡土植物,因为乡土植物是经过长期进化自然选择的结果,能够适应当地的自然条件。

在植被的选择过程中,选择乡土植物或者与当地植物习性相近的外来植物,将乔、灌、草植物有机结合,以灌木为主,乔木、草本为辅进行选择。在植物配置上,结合群落演替方向和当地群落结构特征,将植物的演替规律和演替特征与植物的配置充分结合,合理考虑先锋植物、中期植物和目标植物的搭配,建立新的人工路域自然群落,缩短路域植被演替的时间,以达到路域生态系统修复的目的。

3.3 缺乏后期养护与管理

高速公路路域生态系统的修复往往是在施工后进行,甚至有的路域是通车后才进行修复,造成路域生态系统修复工程与主体工程不能同步进行,严重影响了路域生态系统修复的质量,给后期养护管理也带来困难。“三分种,七分管”是高速公路路域生态系统修复能否成功的根本保障,然而我国高速公路植被后期养护严重存在“重建设,轻养护”的现象,使路域生态系统修复效果达不到预期目的,造成重大的资源浪费和经济损失。

在后期养护与管理方面,应设置专业人员,建立

有效监督措施,设置专项资金以解决后期管理与养护中技术人员生态观念落后、管理被动、资金到位难的突出问题。同时,高速公路环保的“三同时”原则得不到有效落实,环评工作成为项目立项的桥梁,对在施工过程中的相关环保项目监督和检查力度不够,并没有形成项目施工前后的环评,使高速公路的生态修复能否按照专家意见得到实施成为问题。

因此,需要结合高速公路路域生态系统修复的实际情况,通过对路域边坡的稳定性、水土保持能力、动植物栖息环境、生物多样性、景观效果及建设过程中是否按照专家意见进行施工与修复等指标进行标准化、规范化的评估,为高速公路路域生态系统修复确立一个科学、可行的评价标准体系。

参考文献:

- [1] 成子桥. 高速公路建设的生态环境问题及其对策 [J]. 交通世界, 2007(5): 124-125.
- [2] HAM ILTON R S, HARR ISON R M. Heavy metal pollution in roadside urban parks and gardens in Hong Kong [J]. Science and the Total Environment, 1987, 59: 325-328.
- [3] MADER H J. Animal habitat isolation by roads and agricultural fields [J]. Biological Conservation, 1984, 29: 81-96.
- [4] REIJNEN R, FOPPEN R, TERBRAAK C, et al. The effect of car traffic on breeding bird population in woodland [J]. Journal of Applied Ecology, 1995, 32: 187-202.
- [5] REIJNEN R, FOPPEN R, MEEUWSEN H. The effects of traffic on the density of breeding birds in Dutch agricultural grasslands [J]. Biological Conservation, 1996, 75: 255-260.
- [6] 何磊, 唐亚, 李绍才. 道路网络生态影响研究进展 [G]. 段昌群. 生态科学进展 (第二卷) [C]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 175-193.
- [7] 巨天珍, 石垚, 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.
- [8] RICHARD T T, FORMAN. Road Ecology Our Giant on the Land [EB/OL]. 2002. CTE Condensed Transcription, 2002. Http://www.itre.nesu.edu/cte.
- [9] 陈爱侠. 路域生态系统环境功能与稳定性的初步研究 [J]. 长安大学学报 (建筑与环境科学版), 2003, 20(1): 10-13.
- [10] 毛文碧, 段昌群. 公路路域生态学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] 胥晓刚. 高速公路路域生态恢复研究 [D]. 四川农业大学, 2004.
- [12] 景宏伟, 李跃才, 丁宁, 等. 中国沙棘种群在沙漠高速公路中的生态适应性研究 [J]. 公路, 2007(8): 199

- 201.
- [13] SH NE R, LEMASTER M, WALLM, et al Why did the snake cross the roads Effects of roads on movement and location of mites by garter snake (*Thamnophis sirtalis parietalis*) [J]. *Ecology and Society*, 2004, 9(1): 9.
- [14] 董炜华, 殷秀琴, 顾卫, 等. 公路路域植被不同演替阶段土壤动物群落特征 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 678- 685.
- [15] 范秀英, 张微, 韩圣慧. 我国汽车尾气污染物状况及其控制对策分析 [J]. *环境科学*, 1996, 20(5): 102- 108.
- [16] 索有瑞. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价 [J]. *环境科学*, 1996, 17(2): 74- 76.
- [17] 江玉林, 杜娟. 高等级公路生态环境保护问题与对策 [J]. *公路*, 2000(8): 68- 72.
- [18] 王勇, 王德生, 张军. 论水土保持生态修复与生态安全 [J]. *人民黄河*, 2003, 25(2): 24- 26.
- [19] 于秀藏, 陈立标, 刘建军. 高速公路绿化设计 [J]. *河北林业科技*, 1999, 74: 47- 52.
- [20] 潘海. 论高速公路景观设计 [J], *重庆交通学院学报*, 1998, 17(3): 48- 53.
- [21] 余海龙, 顾卫, 姜伟. 高速公路路域土壤质量退化演变的研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 195- 198.
- [22] 李景文, 王义弘, 赵惠勋, 等. 森林生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1994.
- [23] 丁宁, 景卫清, 孙峰谕, 等. 靖王高速公路路基两侧不同地形条件紫穗槐种群生长的差异 [J]. *西部林业科学*, 2008, 37(1): 108- 111.
- [24] 丁宁, 魏俊奇, 孙峰谕, 等. 高速公路边坡不同地形部位沙打旺种群的生态适应对策研究 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 2(3): 21- 24.
- [25] EAGLN G S, HUBERTW A. Effects of logging roads on substrate and trout in streams of the Medicine Bow National Forest Wyoming [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1993, 13: 844- 846.
- [26] FNDLAY C S, HOULAHAN J Anthropogenic correlates of species richness in southeastem Ontario wetlands [J]. *Conservation Biology*, 1997(11): 1000- 1009.
- [27] 董世魁, 崔保山, 丁宗凯, 等. 大保高速公路老营段路域植被生态恢复 [J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1483- 1490.
- [28] 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.
- [29] Society for Ecobgical Restoration Intemational Science & Policy Working Group. 2004. The SER Intemational Primer on Ecobgical Restoration [EB/OL]. Tucson: Society for Ecobgical Restoration Intemational.
- [30] ANDY P, DOBSON B A D, BAKER A JM, Hope for the future Restoration ecology and conservation biology [J]. *Science*, 1997, 277: 515- 522.
- [31] 常磊, 朱清科, 薛智德. 对恢复生态学几个问题的探讨 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(1): 44- 49.
- [32] CARY R F, SLAY BACK R D. Plant materials and establishment techniques for revegetation of California desert highways [J]. *Transportation Research record*, 1983, 969: 24- 26.
- [33] HANSEN D J C M MCKELL. Native plant establishment techniques for successful roadside revegetation [Z]. Utah Department of Transportation, Salt Lake City, Utah, 1991.
- [34] LEE I W Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. *Hong Kong Inst of Engineer*, 1985, 13(7): 9- 12.
- [35] 杨满宏. 高等级公路的景观设计 [J]. *中外公路*, 1998, 18(1): 1- 4.
- [36] 郭晓荣, 江玉林, 龙春林, 等. 滇中地区公路路域防护植物的初步研究 [J]. *山地学报*, 2000, 18(2): 115- 121.
- [37] 李西. 应用于植被护坡两种岩生植物土壤植被系统 (SVS) 研究 [G]. 四川农业大学, 2004.
- [38] 张淑娥, 王思成, 兰剑, 等. 宁夏古王高速公路边坡生物防护植物选择研究 (II): 草本植物抗性研究 [J]. *宁夏农学院学报*, 2004, 25(2): 29- 32.
- [39] 张涟云, 李绍才. 岩石边坡植被护坡技术 (1) — 植被护坡简介 [J]. *路基工程*, 2000, 92(5): 1- 4.
- [40] 冯俊德. 路基边坡植被护坡技术综述 [J]. *路基工程*, 2001, 9(5): 20- 23.
- [41] 叶建军, 许文年, 鄢朝勇, 等. 边坡生物治理回顾与展望 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 173- 176.
- [42] 方华, 林建平. 植被护坡现状与展望 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 283- 286.
- [43] 郭小平, 朱金兆, 周心澄, 等. 植被护坡技术及其应用 [J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(4): 112- 116.
- [44] 李志刚, 钱国超, 云鹤, 等. 高速公路边坡综合防护与美化设计试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2002, 19(6): 61- 65.
- [45] 李海芬, 卢欣石, 江玉林, 等. 高速公路边坡生态恢复技术进展 [J]. *四川草原*, 2006, 123(2): 34- 38.
- [46] 谭少华, 汪益敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考 [J]. *水土保持学报*, 2004, 11(3): 81- 84.
- [47] 董世魁, 崔保山, 刘世梁, 等. 云南省公路路域绿化护坡植物的生态区划与选择 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(26): 1038- 1046.