

高速公路边坡植被恢复研究进展

刘春霞 韩烈保*

(北京林业大学草坪研究所,北京 100083)

摘要 我国高速公路边坡植被恢复研究严重滞后于高速公路建设,极大地制约了高速公路生态型绿色通道建设的发展。通过回顾国内外公路边坡植被恢复的主要研究内容,即植被恢复技术研究、植物选择与配置的研究、养护与管理的研究、植被群落的研究和路域生态环境的研究,并比较分析,明确了我国植被恢复研究落后的现状,指出了我国在各个研究领域的不足之处,和导致公路植被恢复失败的主导因素,为未来边坡植被恢复的研究提供了明确的研究方向。

关键词 高速公路边坡 植被恢复 研究进展

文章编号:1000-0933(2007)05-2090-09 中图分类号:Q145,Q16,Q948 文献标识码:A

Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes

LIU Chun-Xia, HAN Lie-Bao

College of Resource and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 2090 ~ 2098.

Abstract :The research of vegetation restoration of freeway slopes lagging in the construction of freeway seriously in our country, it has restricted the progress of construction of the environmental landscaped roadway of the freeway greatly. The paper reviewed the main researched contents of the slope vegetation restoration of freeway in domestic and international, and summarize as five respects: technological research, plant choose and proportioning research, maintenance and management searches, vegetation community research and ecologic environment of freeway. By comparing, it has defined the current situation of research in vegetation restoration of freeway in our country, and has pointed out the weak point in each research field and main reasons of defeated restoration, which had offered the clear direction of study on the future research in the slope vegetation restoration.

Key Words :freeway slopes; vegetation restoration; researches development

至 2005 年底我国高速公路通车里程已达到 4.1 万多 km。高速公路建设,形成大量新的岩土裸露,引发严重的生态问题。据不完全统计,从 2000 年起,高速公路边坡面积每年以 2 ~ 3 亿 m² 的速度迅速增长;在长江中、下游,因公路建设每年新增水土流失 5000 万 t,仅四川省因公路建设每年新增水土流失 2678 万 t^[1],植被恢复与重建已成为公路建设的重要部分。从 1996 年昆曲高速公路开始对公路边坡采取植被恢复与重建的形式,以减少水土流失,恢复生态环境,从此高速公路走向生态建设型道路。经过近 10a 的实践经验和研究总结,恢复技术渐趋成熟,研究成果丰硕,但与近些年高速公路的快速发展相比,相关研究严重滞后,尤其是近年

基金项目 北京市门头沟区科委生态修复重大专项资助项目

收稿日期 2006-03-02;修订日期 2007-01-18

作者简介 刘春霞 (1975 ~),女,山西河曲县人,博士生,主要从事高速公路边坡植被恢复与重建研究. E-mail:lcxfj@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:hanlb@tom.com

Foundation item This work was financially supported by Ecologic Restoration Project of Scientific and Technical Committee of MenTouGou in Beijing

Received date 2006-03-02; **Accepted date** 2007-01-18

Biography LIU Chun-Xia, Ph. D. candidate, mainly engaged in vegetation restoration of freeway slopes. E-mail:lcxfj@163.com

来一些早期恢复的公路边坡植被开始退化,形成再次裸露和二次绿化等问题,严重暴露了早期植被恢复的盲目性和科学研究的不足,这些均极大地制约了高速公路绿色通道建设的发展。据报道,在未来二三十年我国高速公路将建成 4 万多 km^[2],每建设 1 km 高速公路,形成的裸露坡面面积可达 5~7 万 m² [3],为植被恢复建设提供了广阔的市场。因此,为了弥补目前科研的不足,探索公路边坡植被恢复的可持续发展,实现我国高速公路生态型绿色通道的建设,公路边坡植被恢复的科学研究已成为目前迫切需要解决的问题,但从何进行研究?

本研究通过对国内外高速公路坡面植被恢复的研究现状进行分析、归纳、总结,明确研究方向和热点,指出目前我国研究中存在的问题和不足,为进一步开展相关研究提供科学依据。

1 公路边坡植被恢复的概念

植被恢复是生态恢复的主要内容,是生态恢复的关键步骤。生态恢复,是相对生态破坏而言的,其概念源于生态工程或生物技术,是通过人工设计和恢复措施,在受干扰破坏的生态系统的基础上,恢复和重新建立一个具有自我恢复能力的健康的生态系统(包括自然生态系统、人工生态系统和半自然半人工生态系统) [4]。边坡植被恢复,以恢复生态学、水土保持学、草坪学等为指导,属于生态恢复学的范畴,但因研究领域狭窄,至今国内外仍没有确切概念,国外有 Biotechnique, Soil bioengineering, Vegetation 或 Revegetation 等名称,国内有植被护坡、植物固坡、坡面生态工程、坡面植被恢复等说法 [5]。1994 年举行了以植被护坡为主题的首次国际会议,把植被护坡定义为“用活的植物,单独用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合,以减轻坡面的不稳定性 and 侵蚀” [6],但该概念强调植被护坡的工程过程,而未涉及恢复后植被的持续演替性。

作者认为高速公路边坡植被恢复是以现代恢复生态学原理作指导,对因工程建设而遭受生态破坏的边坡,通过人工设计和恢复措施,恢复和重新建立一个可持续演替发展的、健康的生态系统,以达到稳定边坡、保持水土、改善和美化环境目的,进而提高高速公路沿线的生态环境质量,使高速公路更好的为经济建设服务。其主要手段是通过对破坏边坡立地条件的分析和周围植被的调查,科学合理选择植物,利用适宜的工程技术手段,快速建立或恢复边坡植被,最终通过植物群落的自然演替,朝着地带性顶级植物群落的方向发展。

2 国内外研究进展

生态恢复理论与技术国内外均进行了大量的研究工作,Rapport 将近年来西方恢复生态学研究进展总结为如下 3 个方面的工作 [7]:一是退化生态系统营养物质积累和动态,提出资源比率的变化最终可导致群落物种组成成分的变化,即资源比率决定生态系统的演替过程 [8,9];二是外来物种对退化生态系统的适应对策;三是生态环境的非稳定机制。我国也是较早开展恢复生态实践和研究的国家之一,从 20 世纪 50 年代,我国就开始了退化生态系统的长期定位观测、试验和综合整治研究。在人工植被建植方面,刘慎谔教授总结出建立人工植被的几条原则 [10],一是人工植被的建立必须符合自然规律;二是研究和建立人工植被必须考虑结构,结构是植物生存竞争的结果,只有摸清了这一相互作用的关系才能建立比较完善的人工植被;同时指出自然演替是先有草后有灌木再有乔木,建立人工植被则只要有条件就采取草、灌、乔相结合的方式,必要时可以同级代替以促进作为一种模式。这些研究均为高速公路边坡植被恢复奠定了基础。

2.1 国外公路边坡植被恢复研究进展

2.1.1 植被恢复基础研究

(1)植物选择与配置研究

美国等发达国家从 20 世纪 30~40 年代就意识到了道路建设中生态平衡的重要性,开始在道路边坡开展植被恢复工作。早在 1943 年和 1944 年 Moorish, R. H. 和 Harrison, C. M. 就进行了公路两侧种植草皮的试验,通过不同播种时间、不同草种及草种组合的小区试验来探讨建立草皮的方法 [11,12]。经过半个多世纪的发展,产生了一些关于植物材料的选择与配置的研究成果,且涉及面广。2003 年 Kendra 研究了不同的 1 年生草本植物与其它多年生草本植物配置后对密度、盖度、生物量以及水土流失的影响,并比较筛选出较佳的边坡植物种类和配置形式 [13]。国外对荒漠中高速公路边坡植被恢复的研究较早,1983 年 Cary, R. F., and R. D.

Slayback. 等就对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^[4],科学解决了荒漠条件下植被恢复的关键问题。随着公路植被恢复的发展,野生乡土植物应用研究也得到了广泛的重视,1991 年 Hansen, D. J 等人提出了运用乡土植物对公路边坡进行植被恢复^[5],2000 年 Warren Mortlock 对植被恢复中乡土植物种子供求之间的矛盾及解决办法进行了研究^[6],促进了乡土植物在边坡植被恢复中的充分利用。

(2)恢复植被养护与管理研究

20 世纪 70~80 年代,由于公路植被的大量建植,如何管理和养护这些植被成为重要课题。1984 年 McElroy M. T 等人先后对化学除草剂和生长抑制剂进行了研究^[7];1998 年 Robin W. Tyser 等人研究了使用除草剂对边坡禾草及其种子库影响,指出喷洒除草剂能减小外来非禾本和本地非禾本物种的盖度,轻度增加本地禾本植物盖度,且有可能增加外来禾本状植物盖度^[8]。2004 年 S. L. Petersen 等人对公路边坡施肥对建植植被的生长、本地植物种与商品种的演替的影响,以及微地形对发芽的影响等进行了研究^[9];同时 Russell Alan Persyn 也对利用混合堆肥覆盖边坡植被来控制杂草进行了深入研究,主要是在公路边坡植被恢复期间,研究堆肥作为土壤表层或覆盖物的一种介质在土壤表层或亚表层对植物生物和抵制杂草的影响作用,指出堆肥在土壤表层和亚表层对植物生长有明显差异性,在表层显著减少了杂草的生长,而在亚表层土壤覆盖 5 cm 和 10cm 厚二者没有显著差异,说明较薄的覆盖对植物生长和抵制杂草较适宜^[20]。覆盖物质对公路边坡和其它扰乱环境的植被恢复的植物和杂草管理提供了希望。

(3)恢复植被群落研究

随着公路植被的科学建植和恢复后植被的生长演替,公路边坡植被群落的研究也成为重要课题。2000 年美国对弗吉尼亚主要高速公路边坡现存植物中未来入侵种的蔓延、分布进行了研究。2005 年 J. S. Rentch 等研究表明,公路边坡不同位置的土壤养分之间差异极小,植物群落组成没有明显差异,且植物群落不因公路建设的类型和地型而变化,但不同公路的植被有明显差异,并提出了对竞争力强于本地植物的未来入侵种的着生、生长的限制措施^[21],为公路边坡植被恢复中科学限制恶性杂灌草的入侵提供了科学的指导方法。

(4)对生态环境的影响

近几年,关于公路边坡植被对水土流失的影响的研究较多^[22-23]。2004 年 Esther Bochet 研究了不同坡面类型(不同坡度、坡位、坡向)对植被和水土流失的影响,指出影响公路边坡植被恢复的主要因素是坡度、坡位和坡向。同时对不同坡位的土壤侵蚀作了深入的研究,指出细沟侵蚀、面蚀、和沟蚀程度在切割边坡明显大于填充边坡^[24]。Lee-Hyung Kim 针对城市径流中冲刷掉、积累以及残留的污染物积累量进行了监测和模型的建立^[25]。Russell Alan Persyn 进行了高速公路建设中混合堆肥覆盖对控制土壤侵蚀、植被恢复和水质的影响的研究^[26]。这些研究均为公路边坡植被恢复中如何减少水土流失提供了科学的依据。

此外,还有其他关于高速公路生态恢复方面的研究,公路在工程建筑和运营期间对环境的影响,化学物质包括盐的带入^[27]和重金属^[28]、MMT 中锰沉积^[29],这些对边坡植被的生物学特性、群落组成、竞争和生长的影响^[30];公路生态环境对陆地和水体群落的影响^[31],对公路沿线湿地、小溪、公路盐份、外来植物、驼鹿、梅花鹿、两栖动物、林中鸟和草地鸟的影响^[32],对动物生存的影响^[33-34]等。同时有研究表明交通工具排放的尾气是公路边坡土壤中铅积累的主要来源^[35-39],且铅积累在表土层的 0~5cm,但氯化物的积累随着土层的加深而加深^[40],进一步对公路沿线成鸟和幼鸟器官中铅的积累进行了研究,指出公路沿线铅含量积累不会对繁衍的鸟类造成严重危害^[41]。总之,高速公路生态环境的研究有利于科学引导公路边坡植被恢复,扬长避短,使高速公路成为真正意义上的生态型绿色通道。

2.1.2 植被恢复技术研究

在恢复技术方面,国外关于公路边坡植被恢复的技术已很成熟。1953 年美国的 Finn 公司首先开发出了喷播机,实现了公路植被恢复的机械化。日本的植被恢复技术也处于世界前列,现已有种子喷播法、客土喷播法、厚层基材喷播法、植生带法、植生网法、肥料袋法、植生袋法等成熟的配套技术。其中,客土喷播法是目前

日本应用最为广泛的,已开发了 20 多种单项技术,会员施工公司发展了几百家,也研制了专门的产品,如植生袋、网、喷播设备和材料等,被誉为“从种子到树林的再生技术”^[42]。另外,对切割边坡的植被恢复,发现施用有机肥,并对播种的种子和移植的灌木进行覆盖,可有效提高盖度和其它植物种的迁移^[43]。在恢复方法上,一般均采用乔灌木相结合的方式,如苏联及芬兰、瑞典、挪威等北欧洲国家,他们的边坡坡度设计低缓,多采用 1:2~1:5 的坡度,用牧草处理,使与周围的牧场相协调,德国和奥地利等采用 1:1.5~1:2 稍陡的边坡,加拿大高速公路边坡坡度平均为 27°,它们是采用暂时先种草,然后再移植灌木、乔木的方法,以达到边坡植被与周围区域环境相协调的目的^[44]。

国外关于高速公路边坡植被恢复的研究时间较长,且研究内容全面、成熟。但在植被恢复的生态限制因子、基础理论、恢复的质量评价、恢复植被的群落演替等方面报道较少。

2.2 国内边坡植被恢复研究进展

我国高速公路建设 20 世纪 90 年代后才迅速发展,1996 年云南昆曲高速公路开始运用生态护坡进行绿化,从此公路植被恢复揭开了新的内容^[45]。与传统的护坡形式相比,生态护坡不仅能稳定边坡,保持水土,而且节约成本^[46]。但与绿化工程建设相比,相关研究严重滞后,也远远落后于一些发达国家。

2.2.1 植被恢复基础研究

(1)植物选择与配置

我国较早和较广泛应用的是单一植草护坡技术^[47],通过引种、栽培等试验发现狗牙根(*Cynodon dactylon*) + 百喜草(*Paspalum motatum*)混播组合护坡,可减少土壤侵蚀 7200t/km²^[48];野生狗牙根(*native wild Cynodon dactylon*)^[49]、弯叶画眉草(*Eragrostis*)^[50]、类芦(*Neyraudia reynaudiana* (kunth.) Keng)^[51]等在南方地区高速公路中具有较好的护坡效果。2001 年胥晓刚通过对 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、百喜草、草木樨(*Melilotus suaveana*)、弯叶画眉草具有较强的耐贫瘠、耐旱性^[52],从此,展开了对护坡植物选择的系统性研究。

随着研究的深入,展开了对草种配比与播种量的研究^[53],并对一些边坡防护植物的抗性作了初步探索。如在宁夏古王高速公路边坡生物防护中沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、紫花苜蓿(*Medicago Satival* L.)具有较强的抗逆性^[54],适合于干旱地区护坡;李西筛选出两种抗性强的岩生植物金发草(*Pogonatherum paniceum* (Lam.) Hackl)和丛毛羊胡子草(*Eriophorum comosum* Nees)^[55],它们在岩石边坡上均能正常生长。随着人们对植被恢复认识的提高,灌木类、藤本攀援植物类、野生草本植物在公路边坡防护中不断得到应用^[56~58],对建立公路边坡立体防护结构具有重要意义。

此外,在植物选择的方法上,提出运用 AHP (层次分析)法以植物的抗逆性、护坡效果^[59]、抗冲刷能力^[60]等作为评价指标,构建评价体系进行筛选,为植物材料的选择提供了科学的方法。在植物配置上,遵循生物多样性原理^[61]。

(2)养护与管理

关于公路坡面恢复植被后期养护与管理的研究较少,张玉珍提出了运用生物多样性的原理,在植被恢复后 2~3a,通过增加群落中植物种类、提高群落中木本植物比例,以改善植物群落功能^[62]。为公路边坡恢复植被后期养护提供了科学方法。

(3)恢复植被群落研究

关于边坡植被恢复后的群落研究较少,杨喜田等对黄土地区高速公路边坡植物侵入状况做了初步探讨,发现边坡侵入植物受坡度、坡向、坡长、坡面局部稳定性、土壤硬度及其自身生物学特性的影响,坡度陡、坡长大、阳坡、坡面不稳定、土壤硬度较大的边坡植物入侵慢^[63]。

(4)对生态环境的影响

关于公路生态方面的研究较多^[64 65],路域生态环境一直存在不同程度的植被破坏和土壤铅污染等问题,给动、植物、人类和自然保护区带来直接或间接影响^[66 67],同时也影响路域植被恢复的稳定性和持续性。近

些年,路域生态环保措施的研究不断深入,陈跃提出高速公路建设与生态环境可持续发展之间的问题及对策,指出公路建设中坚持“环保优先”的理念^[68],才能实现公路建设与生态环境可持续发展的协调发展。

2.2.2 植被恢复技术

生物与工程措施如何结合才能更好地起到防护作用?针对这一问题李志刚等对不同坡型的具体防护措施进行了试验研究,指出拱形防护的实用性^[69]。从液压喷播植草开始^[70],随着技术的不断引进,研究发现三维植被网不仅有利于植被恢复,还有增强抵抗自然水土流失的能力,这种技术可应用于土质、土石混合、石质边坡的植被恢复^[71],并提出了具体的施工工艺。随着技术的不断提高,针对岩石边坡生态治理的技术也渐趋成熟,如喷混植草防护技术^[72]、厚层基材喷播^[73]等的研究应用。2003年研究出的岩石边坡植生基质的PMS技术,在北京五环高速公路红山口岩石坡面防护中应用效果良好。至今,根据我国不同的坡面类型,已建立了多种综合技术体系,主要有开沟植草法、三维植被网施工技术、厚层基材喷播技术、土工格室护坡技术、种子袋护坡技术等^[74],可基本满足我国公路建设中植被恢复的需要。此外,在借鉴了国外喷播机械的基础上,研制出了适合我国国情的喷播机械^[77],实现了喷播机械的国产化。

我国关于边坡植被恢复的研究处于起步阶段,基础研究和技术研究均不全面、不完善,不系统,多属于初步探索阶段,急需引起广大研究者的重视,加大研究力度,深入研究,尽快赶上高速公路建设步伐,科学指导公路边坡植被恢复工程。

2.3 我国研究的不足

根据国内外研究概况,高速公路边坡植被恢复的研究主要存在以下问题:

(1)植物选择与配置研究

包括植物种类选择、配置、种植密度,以及野生乡土护坡植物的开发利用等研究。我国虽然已经有很多相关研究,但我国地域辽阔、气候地质地貌多样,植物选择与配置复杂,现有研究远远不能满足实际工程运用,仍是许多地区公路边坡植被恢复中尚未解决的问题。

(2)养护与管理研究

主要是质量评价、抵制杂草等,尤其是抵制侵占性强的恶性杂灌草的研究,我国在这方面的研究少见。如目前云南省许多路段公路边坡紫茎泽兰入侵导致边坡植被退化,这些问题极需解决。

(3)恢复后植被群落研究

包括不同边坡类型植被群落的抗蚀性、稳定性、多样性、演替等的研究。恢复后植被群落是否稳定是衡量植被恢复成功与否的关键,因此群落研究也是植被恢复研究的重要内容。但目前相关研究较少,尤其是我国植被恢复历史已经近10a,但缺乏植被恢复后期的相关跟踪报道,在一定程度上制约了我国植物恢复质量的提高。

(4)路域生态环境研究

主要指高速公路对生态环境,包括植物、动物、微生物、水土流失等的影响,与国外相比,国内相关研究较浅,尤其是公路建设对沿线生物影响的定量研究较少。

(5)边坡植被恢复的技术研究

我国关于技术方面的研究相对较多,但在荒漠、青藏高原、高陡岩石边坡等特殊地理环境条件下的植被恢复技术还欠缺。

因此,为了保证未来二三十年即将修建的4万多km高速公路边坡植被恢复的成功实施,应该加快在以上这些方面的研究进程,使我国高速公路边坡植被恢复的研究与工程建设同步发展,以科学引导实践,从而促进我国高速公路生态型绿色通道的建设。

3 结论

通过对国内外高速公路坡面植被恢复的研究现状进行分析、归纳发现,国内研究明显落后,与我国高速公路建设速度相比,研究严重滞后,使得工程实践缺乏科学指导。虽然在植物选择与配置、养护与管理、植被群

落、路域生态环境、恢复技术五方面均已展开相关研究,尤其是恢复技术的研究已获得较大成果,但与我国国情相比,在植物材料选择配置、养护管理、植被群落、技术方面还未能满足实际需要,在对生态环境影响方面还缺乏质的、科学的认识。因此,应积极开展相关研究,弥补研究中的不足,提高我国植被恢复的研究水平,促进我国植被恢复质量的提高。

References :

[1] Mao W B , Environment and sustainable development of Chinese highway industry ,2005. 3. 10. <http://www.iicc.ac.cn>.

[2] Chinese highway mileage is second ,<http://chanye.finance.sina.com.cn/jt/2006-01-16/274801.shtml>.

[3] Xu G G ,Lai Q W. Fast Ecological restoration on rock slop of highway. <http://www.buy888.com/news/show.php?id=84>.

[4] Lewis R R. Wetland restoration/creation/enhancement terminology ;Suggestions for standardization. Wetland Creation and Restoration :The Status of the Science , Vol. II. EPA 600/3/89/038B. U. S. Environmental Protection Agency , Washington , D. C , III ,1989.

[5] Kendra Meseley. et. Vegetation Management Practices ,2003.

[6] Ministry of Works and Transport. Use of bio- engineering in the road sector (geo- environmental unit). Nepal :Ministry of Works and Transport ,1999.

[7] David J. Rapport. Gaining Respectability :Development of Quantitative Methods in Ecosystem Health. Ecosystem Health. Volume 5 , Issue 1 , Mar ,1999. 1 — 2.

[8] Tilman D , May R M , Lehman C L , Nowak M A. Habitat destruction and the extinction debt. Nature ,1994 ,371 65 — 66.

[9] Tilman D ,Lehman C L , Kareiva P. Population dynamoics in spatiall habitats. In : D. Tilman and P. Kareiva , ed. Spatial ecology. Princeton University Press , Princeton , New Jersey ,1997. 3 — 20.

[10] Liu Shene. Dynamic botany. Beijing :Scienece Press ,1986. 179 — 228.

[11] Moorish R H. The establishment and comparative wear resistance of various grasses and grass-legume mixture to vehicular traffic. Highway Res Bd Roadside Dev Com Reports ,1949. 70 — 71.

[12] Hurrison C R. Climatic factors controlling roadside design and development. Highway Res. Bd. Readside Dev. Com. Reports ,1949. 9 — 19

[13] Kendra Meseley. et. Vegetation Management Practices ,2003.

[14] Cary R F , Slayback R D. Plant materials and establishment techniques for revegetation of California desert highways. Transportation Research record ,1983 ,969 24 — 26.

[15] Hansen D J , C M McKell. Native plant establishment techniques for successful roadside revegetation. Utah Department of Transportation , Salt Lake City , Utah , 1991.

[16] Esther Bochet and Patricio Garcia- Fayos , Factors Controlling Vegetation Establishment and Water Erosion on Motorway Slopes in Valencia. Restoration Ecology ,2004 ,12 (2) :166 — 174.

[17] McElroy M T , Piekie P E , McBurney S L. Utilizing plant growth regulators to develop a cost efficient management system for roadside vegetation , 1984. 169.

[18] Robin W Tyser at. Roadside Revegetation in Glacier National Park ,U. S. A. :Effects of Herbicide and Seeding Treatments. Restoration Ecology , 1998 6 (2) :197 — 206.

[19] Petersen S L , Roundy B A , Bryant R M. Revegetaion Methods for High-Elevation Roadsides at Bryce Canyon National Park , Utah. Restoration Ecology 2004 , 12 (2) :248 — 257.

[20] Russell Alan Persyn. Impacts of compost blankets on erosion control , revegetation , and water quality at highway construction sites in Iowa. Iowa State University , 2003.

[21] Rentch J S , Fortney R H , Stephenson S L , Adams H S , Grafton W N , Anderson J T. Vegetation-site relationships of roadside plant communities in West Virginia , USA. Journal of Applied Ecology 2005 , 42 :129 — 138.

[22] Grace J M , Rummer B , Stokes B J , Wilhoit J. Evaluation of erosion control techniques on forest roads. Transactions of the ASAE ,1998 ,41 383 — 391.

[23] Pilar Andres , Montserrat Jorba. Mitigation Strategies in Some Motorway Embankments. Restoration Ecology ,2000 8 (3) :268 — 275

[24] Esther Bochet and Patricio Garcia- Fayos , Factors Controlling Vegetation Establishment and Water Erosion on Motorway Slopes in Valencia , Restoration Ecology ,2004 ,12 (2) :166 — 174.

[25] Lee-Hyung Kim. Monitoring and Modeling of Pollutant Mass in Urban Runoff : Washoff , Buildup and Litter. University of California , 2002

[26] Russell Alan Persyn. Impacts of compost blankets on erosion control , revegetation , and water quality at highway construction sites in Iowa. Iowa State University , 2003.

[27] Davison A W. The effects of de-icing salt on roadside verges I. Soil and plant analysis. Journal of Applied Ecology ,1971 8 555 — 561.

[28] Rutter A E ,Thompson N E. Manual of the vascular Flora of the Carolinas. University of North Carolina Press , Chapel Hill , NC ,1986.

[29] Amrit K Bhuie. Environmental Dispersal of methylecyclopentadienyl manganese tricarbonyl , gasoline additive , beside the major highways in Greater Toronto Area , Canada. Faculty of Forestry & Institute for Environmental Studies University of Toronto ,2002.

[30] Atkins D P ,Trueman I G , Clarke C B , Bradshaw A D. The evolution of lead tolerance by *Festuca rubra* on a motorway verge. Environmental Pollution (Series A) ,1982 27 233 — 241.

[31] Angold P G. The impact of a road upon adjacent heathland vegetation :effects on species composition. Journal of Applied Ecology ,1997 34 :409 — 417.

[32] Richard T T. Forman and Robert D. Derlinger. The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U. S. A.) Suburban Highway. Conservation Biology ,2000 ,14 (1) 36 — 46.

[33] Stephen C. Trombulak and Christopher A. Frissell. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. Conservation Biology ,2000 ,14 (1) :18 — 30.

[34] Ashley EP , Robinson J T. Road mortality of amphibians ,reptiles and other wildlife on the Long Point causeway , Lake Erie , Ontario. Canadian Field-Naturalist ,1996 ,110 403 — 412.

[35] Wylie P B , Bell L C. The effect of automobile emissions on the lead content of soils and plants in the Brisbane area. Search ,1973 , (4) :161 — 162.

[36] Milberg R p , Lagerwerff J V , Brower D L , Biersdorf G T. Soil lead accumulation alongside a newly constructed roadway. J. Environ. Qual. ,1980 , 9) 6 — 8.

[37] Ho Y B , Tai K M. Elevated levels of lead and other metals in roadside soil and grass and their use to monitor aerial metal depositions in Hong Kong. Environ. Pollut. ,1988 ,(49) 37 — 51.

[38] Othman I , Al-Oudat M , Al-Masri , M. S. Lead levels in roadside soils and vegetation of Damascus city. Sci. Total Environ. ,1997 ,(207) :43 — 48.

[39] Li L Y , Preciado. Air , runoff and soil monitoring of highway pollution by metals along highway corridors. In : C. A. Brebbia. Air Pollution XII 2004.

[40] Abdul Sahib AL-Chalabi and Darryl Hawker. Distribution of Vehicular in Roadside Soil of Major Roads of Brisbane , Australia. Water ,Air and Soil Pollution ,2000 ,118 299 — 310.

[41] Christian E ,Grue ,Thomeas J ,O’shea ,David J. Hoffman. Lead Concentrations and Reproduction in Highway-Nesting Barn Swallows. The Cooper Ornithological Society. The Condor ,1984 ,86 383 — 389.

[42] 山寺喜成. 景观の土木手法-自然との共生をめさす技術データー (日本). 全国 SF 緑化工法協会行 ,1990.

[43] Mark W , Paschke , Claire DeLeo , Edward F. Redente. Regegetation of Roadcut Slopes in Mesa Verde National Park , U. S. A. . Restoration Ecology ,2000 ,8 (3) 276 — 282.

[44] 安保昭 writed. Zhou Q T translated. Green slope construction law. Beijing :People’s Traffic Publishing House ,1988.1 — 9 ,134 — 142.

[45] Yang M H. Landscape design of highway. Journal of China & Foreign Highway ,1998 ,18 (1) 1 — 4.

[46] Pu Z. The application of planting on highway slope. Gansu Shuili Shuidian Jishu ,2003 39 (4) 335 — 338.

[47] Liu J N , Gao H W , Wang Y Q , et al. The Techniques for Afforesting Side Slopes of Highways in Shanxi Province. Grassland of China ,1999 , (6) 23 — 26 33.

[48] Peng Y. The study on the turf planting of highway. Grassland of China ,2001 23 (5) 52 — 55.

[49] Chen Y H , Luo H B , et al. Experimental Study of Wild Bermuda Grass Utilized in Afforestation of Stony Slope of Freeway. Central South Forest Inventory and Planning ,2004 23 (2) 53 — 56.

[50] Xu X G ,Wang J P ,Yang D S ,Hu T X , Chen J R. Study on Adaptability of Eragrostis Grass Planting on Effloresce Rock Slope. Highway ,2003 , (11) :106 — 108.

[51] Sun F Z , Hu R , Zhang Y D , Zhou S L. The Mechanism and Evaluation of Appling the Neyraudia reynaudiana (kunth.) Keng. on the Rocks . Soil and Water Conservation in China ,2004 ,(7) 18 — 20.

[52] Xu X G. The Study on Ecological Restoration of Highway. Sichuan Agricultry University ,2004.

[53] Chen Y H , Zeng Z X. The Study on the Seeding and Seeds Ratio of Spraying on Highway. Hunan Forestry Technique ,2004 31 (3) :17 — 19.

[54] Zhang S E , Wang S C , Lan J , et al. Study on Selection of Protective Plants as Side Slope Biome of Gu-Wang Expressway in Ningxia II. Study on the Resistance of Herbaceus Plants. Ningxia Agricultur College Journal ,2004 25 (2) 29 — 32.

[55] Li X. The Study on the Soil Vegetation System of Two Lithophytic Plants Appling on the Slope Protection. Sichuan Agriculture University ,2004.

[56] Dong X B ,Wei G ,Yang H Z. Utilizing weeds to stabilize and beautify side slope. Shanxi Architecture ,2002 28 (11) :148 — 149.

[57] Huang Q T ,Zheng J P ,Chen S P. Study on the Selected System of Liana Applied to Expressway Side Slope in Fujian ,China. Fujian Forestry Technique ,2004 31 (1) :14 – 16.

[58] Chen Y H , Zhu K M , Luo H B. Technique of climbing plants Appling on the Stony slopes of TAN-ZHAO Highway. Hunan Forestry Technique , 2004 31 (2) :33 – 35.

[59] Li Z Q , *et al.* The Study on the Plants Selection by the mathematic model on the Ningxia-Shizhong Highway Slopes Protection. Ningxia Agriculture and Forestry Technique , 2003 , (3) :19 – 22.

[60] Li Z G ,Chen Y H ,Qian G C. Field Erosion Simulation Test Study for Expressway Slopes. Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2004 21 (1) :30 – 32.

[61] Liu K J , Liu L , Zhou C X. Application of Biological Diversity in the Vegetation Reinstatement in the Right-of-Way. Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2002 23 (4) :10 – 12.

[62] Zhang Y Z. Discussion on Using Biodiversity in Maintaining the Plant Community Among the Road. Traffic Environmental Protection ,2004 25 (2) :36 – 38.

[63] Yang X T. Yang X B , Su J L , Dong H Y , Feng J C. Study on Plant Intrusion on Expressway Slop in Loess Region. Journal of Soil and Water Conservation ,2001 15 (6) :74 – 77.

[64] Pan S L , Wang L , Gu B. Analysis of recoverable method for slope ecotope. Chinese Journal of Ecology ,2005 , (2) .

[65] Liang L J. Study on the Idea of Ecological Highway and Evaluation System. Changan University 2004.

[66] Suo Y R , *et al.* The Content and Evaluation of hod in Soils and Plants in Both Sides of Roads in Xining Region. Chinese Environmental Sciences , 1996 , (2) .

[67] Wu C H. Study on the Response of Plants Species Diversity to Pollution Soil by Lead and It’s Ecological Effects. Zhejiang University ,2004.

[68] Chen Y. Approach to Several Issues and Countermeasures on Sustainable Development of Highland Mountainous District — Expressway Construction and Ecological Environment During Western China Development. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology) 2003 28 (2) :127 – 131.

[69] Li Z G , Qian G C , *et al.* Test Study on Design for Synthetical Protection and Beautification of Expressway. Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2002 19 (6) :61 – 65.

[70] Liu D R ,Ma Y L ,Han L B , *et al.* The benefit analysis of greening slope quickly and compulsorily with hydroseeding method. . Journal of Beijing Forestry University ,2000 22 (2) .

[71] Gu J. Application of three- dimension vegetative net for planting grasses by spraying sowing to roadside slopes of highway. Ecology and Environmnet ,2003 12 (2) :155 – 156.

[72] Zhang H J , Zhang M T. New Technique of Fast Planting by Spraying the Mixture on Stony Slopes. Journal of China & Foreign Highway ,2000 20 (5) :30 32.

[73] Zhang J Y , Zhou D , *et al.* Study on the Characteristics of Thick Layer Base Material Spraying. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2001 20 (Increasing 1) :1010 – 1014.

[74] Zhao P. A Study on the Functional Feature and Application of Slurry Sprayers. Forestry Machinery & Woodworking Equipment ,2005 33 (4) :11 – 15.

参考文献：

[1] 毛文碧 ,中国公路行业的环境与可持续发展. 2005. 3. 10. <http://www.iicc.ac.cn>.

[2] 我国高速公路里程世界第二. <http://chanye.finance.sina.com.cn/jt/2006-01-16/274801.shtml>.

[3] 徐国钢 ,赖庆旺 ,等 ,高速公路岩石边坡的快速生态恢复技术. <http://www.buy888.com/news/show.php?id=84>.

[10] 刘慎谔. 动态地植物学. 北京 :科学出版社 ,1986. 179 ~ 228.

[42] 山寺喜成. 景观的土木手法-自然との共生をめさす技術データー (日本). 全国 SF 绿化工法协会行 ,1990.

[44] 安保昭著. 周庆桐译. 坡面绿化施工法. 北京 :人民交通出版社 ,1988. 1 ~ 9 ,134 ~ 142.

[45] 杨满宏. 高等级公路的景观设计. 中外公路 ,1998 18 (1) :1 ~ 4.

[46] 蒲智. 植物措施在公路工程护坡中的应用. 甘肃水利水电技术 ,2003 39 (4) :335 ~ 338.

[47] 刘建宁 ,高洪文 ,王运琦 ,等. 山西太旧高速公路边坡绿化种草技术研究. 中国草地 ,1999 , (6) :23 ~ 26 33.

[48] 彭燕. 高速公路草坪建植初探. 中国草地 2001 23 (5) :52 ~ 55.

[49] 陈迎辉 ,罗怀斌 ,朱开明. 用野生狗牙根草绿化湖南高速公路石方边坡的试验研究. 中南林业调查规划 ,2004 23 (2) :53 ~ 56.

[50] 胥晓刚 ,王锦平 ,杨冬升 ,等. 弯叶画眉草在风化岩石边坡种植的适应性研究. 公路 ,2003 , (11) :106 ~ 108.

[51] 孙发政 ,胡荣 ,张艺东 ,周水林. 类芦在岩壁上生长的机理及其应用评价. 中国水土保持 ,2004 , (7) :18 ~ 20.

[52] 胥晓刚. 高速公路路域生态恢复研究. 四川农业大学 2004.

[53] 陈迎辉,曾志新. 高速公路边坡喷播植草草种配比及播种量的研究. 湖南林业科技 2004 31 (3) :17 ~19.

[54] 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. 宁夏农学院学报,2004 25 (2) :29 ~32.

[55] 李西. 应用于植被护坡两种岩生植物土壤植被系统 (SVS) 研究. 四川农业大学 2004.

[56] 董效斌,卫刚,杨慧珍. 利用野草稳固美化边坡. 山西建筑 2002 28 (11) :148 ~149.

[57] 黄启堂,郑建平,陈世品. 福建省高速公路边坡绿化用藤本植物选择体系的研究. 福建林业科技 2004 31 (1) :14 ~16.

[58] 陈迎辉,朱开明,罗怀斌. 攀援植物在潭邵高速公路石方边坡绿化中的应用技术. 湖南林业科技 2004 31 (2) :33 ~35.

[59] 李自强,赵学仁. 运用数学模型解决宁夏石中高速公路北段边坡环保绿化植物的选择问题. 宁夏农林科技. 2003 (3) :19 ~22.

[60] 李志刚,陈云鹤,钱国超. 高速公路边坡野外模拟冲刷试验研究. 公路交通科技,2004 21 (1) :30 ~32.

[61] 刘孔杰,刘龙,周存秀. 生物多样性在路域植被恢复中的应用. 公路交通科技 2002 23 (4) :10 ~12.

[62] 张玉珍. 生物多样性在路域植被养护中的应用. 交通环保 2004 25 (2) :36 ~38.

[63] 杨喜田,杨晓波,苏金乐,等. 黄土地区高速公路边坡植物侵入状况研究. 水土保持学报,2001 15 (6) :74 ~77.

[64] 潘树林,王丽,辜彬. 论边坡的生态恢复. 生态学杂志 2005 (2) .

[65] 梁立杰. 生态公路理念及其评价体系研究. 长安大学 2004.

[66] 索有瑞,黄雅丽. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价. 环境科学 1996 (2) .

[67] 吴春华. 植物多样性对铅污染土壤的响应及其生态学效应. 浙江大学 2004.

[68] 陈跃. 高原山区高速公路建设与生态环境的可持续发展——问题与对策探讨. 昆明理工大学学报 (理工版),2003 28 (2) :127 ~131.

[69] 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. 公路交通科技 2002 19 (6) :61 ~65.

[70] 刘德荣,马永林,韩烈保,等. 坡面液压喷播快速强制绿化的效益分析. 北京林业大学学报 2000 22 (2) .

[71] 顾晶. 三维植被网喷播植草技术在高速公路边坡上的应用. 生态环境,2003 12 (2) :155 ~156.

[72] 章恒江,章梦涛. 岩质坡面喷混快速绿化新技术. 中外公路 2000 20 (5) :30 ~32.

[73] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射种植基的物理特性. 岩石力学与工程学报 2001 20 (增 1) :1010 ~1014.

[74] 赵平. 泥浆喷播机械功能特征与应用技术探讨. 林业机械与木工设备,2005 33 (4) :11 ~15.