



PEDOGENETIC CHARACTERISTICS
OF SOIL IN ROAD CUT-SLOPES

道路边坡创面成土特性

艾应伟 陈 娇 等 著



科学出版社

道路边坡创面成土特性

艾应伟 陈 娇 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以道路边坡为对象,论述了不同形态道路边坡创面的成土特性。内容主要包括:道路边坡治理现状、生态恢复特点及其影响因素;道路边坡土壤养分特性与土壤水分特性;道路边坡植物多样性与植被恢复;道路边坡土壤微生物特性与土壤酶特性;道路边坡土壤结构特性;道路边坡土壤腐殖质特性;道路边坡土壤重金属污染特性。

本书可供从事土壤学、地理学、园林学、生态学、岩土工程学和环境科学等方面的科技工作者、大专院校师生以及企业工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

道路边坡创面成土特性/艾应伟等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-049997-4

I. ①道… II. ①艾… III. ①边坡-道路工程 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 229650 号

责任编辑:张井飞/责任校对:韩 杨

责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:400 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

撰 写 人 员

第一章	道路边坡治理与生态恢复	艾应伟
第二章	道路边坡土壤养分特性与植物多样性	刘浩、陈娇、艾应伟
第三章	道路边坡土壤水分的时空变异	李伟、王明田、刘浩
第四章	道路边坡植被恢复	艾应伟、王倩、于燕华
第五章	道路边坡土壤微生物的时空变异	艾应伟、裴娟、王倩
第六章	道路边坡土壤酶的时空变异	艾应伟、答竹君、李沛锡
第七章	道路边坡土壤结构特性	陈娇、曾丽霞、艾应伟
第八章	道路边坡土壤有机质	高宏英、黄成敏、艾小燕
第九章	道路边坡土壤重金属污染特性	陈朝琼、艾应伟

序

道路是经济社会发展的重要基础设施。随着社会进步和城乡建设的快速发展，各地道路建设也越来越多。道路特别是高速公路、高速铁路建设中，伴随着大量的开山劈石，造成了很多裸露的道路边坡。因山体切挖形成的道路边坡，不仅破坏了自然景观，而且引起的水土流失、地质灾害和生态破坏现象十分严重。

道路边坡生态修复关系到交通安全、造林绿化、国土治理、水土保持、环境保护等多个行业领域，涉及土壤学、岩土工程学、生态学、地理学、植物学、水土保持学、园林学等多个学科的交叉融合。道路边坡生态修复是促进我国道路建设与生态文明建设协同发展的重要抓手，具有大量的社会需求和广阔的发展前景。

道路边坡所处生境十分特殊，而且大部分是裸露的岩石边坡，植物生长所必需的土壤条件遭到剥离，致使植物难以生存。土壤是生命之基，道路边坡土壤是道路边坡生态修复的根本保障。

本书作者艾应伟教授及其研究团队，针对道路边坡生态修复中的关键科学问题，对道路边坡创面成土特性做了开创性的研究工作，在国际上最早提出了边坡人工土壤的概念，对裸露边坡土壤修复与植被重建的相互关系和作用机制进行了率先研究，取得了很好的研究成果，引起了社会的广泛关注和高度评价。

本书是作者总结 10 余年系统深入研究的成果撰写而成，并获得了国家科学技术学术著作出版基金项目的资助。本书的出版将对科学建设道路、维护生态安全起到重要的指导作用。

中国工程院院士



2016 年 10 月

前 言

道路作为重要的交通运输功能载体,对经济和社会的发展有显著促进作用,是不可缺少的人流、物流基础设施。由山地、丘陵和地形比较崎岖的高原所构成的山区是世界陆地的主要组成部分,也是陆地的主要地貌骨架。世界山区面积占整个陆地的 30%,而中国山区面积占全国陆地的 69%。在山区的道路工程建设中经常要开挖大量边坡,道路边坡的开挖破坏了原有土壤植被覆盖层,导致出现大量的次生裸地以及产生严重的水土流失现象,造成生态环境的极大破坏,边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏形式还会给人民生命和财产带来巨大的损失。

道路边坡的不稳定性通常分为表层不稳定性、浅层不稳定性 and 深层不稳定性。道路坡面不稳定过程受不同形态的能量驱动,其结果是产生以侵蚀形式发生的坡面物质的迁移。道路边坡的稳定性与坡面的土壤侵蚀直接相关,而坡面的土壤侵蚀又受边坡坡度、坡长、植被、气候等因素的综合影响。道路修建后形成的道路边坡土层十分瘠薄,甚至坡面岩石直接裸露。降雨、重力的作用使得道路边坡土壤极易发生侵蚀,细沟侵蚀、侵蚀沟以及坡面物质大量位移等侵蚀现象非常严重。

道路的修建对原有生境中各种生态过程产生直接或间接影响,其影响尺度从种群一直延伸到景观。在景观尺度上,道路边坡的开挖不可避免地会对道路周边原有的土壤和植被造成严重的破坏,形成大量的裸露岩石边坡和光秃的斑块,从而导致景观破碎化现象。景观破碎化会影响到原有物种的组成和迁移,改变物种的分布和区域生态多样性。景观破碎化对周围生境的破坏作用远大于道路边坡建设本身导致的生境破坏。

道路边坡按边坡创面的状况可分为土质边坡与岩石边坡。岩石边坡比土质边坡的异质性强,不具备植物生长所必需的土壤环境。岩石边坡生态护坡是在坡面构建基质-植被综合保护体系,通过体系本身的护坡工程性能保护整个坡面,可看作是特殊的复合材料系统。生态护坡工程是一个在岩石边坡创面上形成人工客土、培养植物的过程。生态护坡工程所需人工土壤是岩石边坡生态护坡的物质基础,既要满足能较好地附着和固定在岩石边坡创面上,又要能为植物的持续生长提供水分和营养物质。

人工防护和绿化是道路边坡生态恢复的重要手段,因社会对环保要求的不断提高,对裸露道路边坡的生态恢复治理问题日益引起人们的重视。随着国家对基础设施建设投资力度的加大,特别是道路建设的飞速发展,科学、合理重建道路边坡土壤植被系统是当今协调道路工程建设与生态环境建设的根本出路。道路边坡生态恢复是对因道路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、改善环境的目的,进而提高

道路沿线的生态环境质量。

道路边坡土壤是植物形成、生长和演替的基础,而植被在道路边坡防护以及生态景观恢复方面有着不可取代的重要作用。植被在道路边坡保护和侵蚀控制方面的功能是土壤植被系统中土壤与植被相互作用的结果。土壤植被系统是在一定地区由植物根系分布范围内的土壤、母质和岩石以及以植被为主的生物群所构成的有机整体,良好的土壤植被系统是提高道路边坡生态护坡效果的根本措施。道路边坡创面的成土特性不仅关系到道路边坡土壤的质量,而且与道路边坡的生态护坡效果密切相关。因此,针对道路工程建设产生的不同形态的道路边坡,开展道路边坡创面成土特性研究成果的系统论述与经验总结,在理论上和应用上都具有十分重要的意义。

本书的主要内容有:第一章介绍道路边坡治理现状、生态恢复特点及其影响因素;第二章至第四章论述道路边坡土壤养分特性、土壤水分特性、植物多样性、植被恢复方面的基础研究成果;第五章至第六章论述道路边坡土壤微生物特性和土壤酶特性方面的基础研究成果;第七章至第九章论述道路边坡土壤结构特性、土壤腐殖质特性、土壤重金属污染特性方面的基础研究成果。

本书是在艾应伟承担的国家自然科学基金项目(40571064、40771087、41171175)、四川省科技支撑计划项目(07FG001-018、2016FZ0056)等多项国家和地方重点科研任务的基础上,总结10余年系统深入研究的成果,由艾应伟、陈娇、刘浩、李伟、陈朝琼、王倩、于燕华、裴娟、答竹君、艾小燕、曾丽霞、高宏英、李沛锡、黄成敏、王明田共同撰写而成。本书作者来自四川大学、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、四川省气象局等多家单位。本书主要有以下特点:

(1) 针对道路边坡创面成土特性的基础研究,立足于创新,围绕自然地理学、岩土工程学、土壤学、园林学等不同学科的交叉融合,注重理论探讨与技术开发的紧密结合,取得了一些新的研究进展和新的见解。在 *Nature* 出版集团旗下期刊 *Scientific Reports* 以及 *Journal of Hazardous Materials*、*Ecological Engineering* 等知名期刊上发表了一系列学术论文,并且获得了“泥岩源基材对石质边坡生态防护的方法”、“泥岩岩石边坡绿化基质的制备方法”、“边坡人工土壤改良剂”等一系列授权发明专利。

(2) 研究内容涉及道路边坡创面土壤植被系统的综合研究,结构层次清晰,剪系统性强。既有创新性的应用技术知识内容,又有深入的基础理论研究成果;既有前瞻性的长远目标研究,又有现实意义的实际应用研究。不仅在人工土壤研究方面有理论上的突破,而且为人工土壤的后续研究提供了很有参考价值的数据资料。所形成的“裸露边坡土壤修复关键技术及成土特性”成果荣获2014年度四川省科技进步一等奖。

(3) 对道路边坡创面土壤特性的影响因素、变化趋势及其与自然边坡土壤、农田土壤的差异性进行了系统的研究论述。这不仅对丰富土壤发生学的内涵有积极作用,而且对认识道路边坡这一特殊生境条件下土壤植被系统的结构功能、道路边坡防护以及景观恢复都有着重要的指导意义。

当然，关于道路边坡创面成土特性的研究还有许多未知的理论和应用问题需要人们去探索，并不能因为本书的出版而画上句号。无论是在各地区道路边坡创面成土特性的研究广度上，还是在对道路边坡创面成土特性各学科专业研究的深度上，都还需要进一步加强研究工作。

本书的出版得到了 2016 年度国家科学技术学术著作出版基金项目的资助。本书的研究数据资料是在国家自然科学基金项目（40571064、40771087、41171175）、四川省科技支撑计划项目（07FG001-018、2016FZ0056）资助下取得的，并得到了许多老师、同事、朋友的热情帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者和有关专家批评指正。

艾应伟

2016 年 8 月 26 日

目 录

序

前言

第一章 道路边坡治理与生态恢复	1
第一节 我国道路边坡治理现状及其对策	2
一、道路边坡种类与特点	2
二、道路边坡治理现状	2
三、道路边坡治理对策	3
第二节 道路边坡的生态恢复	5
第三节 影响道路边坡生态恢复的因素	7
一、气候因素对道路边坡生态恢复的影响	7
二、边坡性质对道路边坡生态恢复的影响	8
三、植物对道路边坡生态恢复的影响	9
四、土壤性质对道路边坡生态恢复的影响	10
五、土壤重金属对道路边坡生态恢复的影响	11
参考文献	12
第二章 道路边坡土壤养分特性与植物多样性	17
第一节 坡位对道路边坡土壤养分与植物多样性的影响	18
一、土壤养分在道路边坡上的空间变异性	18
二、道路边坡不同坡面位置的植物分布特征	20
三、道路边坡上植被分布特征与土壤性质的相关性分析	21
四、坡位与道路边坡土壤植物系统的相关性探讨	22
第二节 坡向对道路边坡土壤养分和植物物种多样性的影响	24
一、道路边坡不同坡向土壤性质的季节变化	24
二、道路边坡不同坡向植物物种多样性的季节变化	28
三、坡向与道路边坡土壤植物系统的相关性探讨	30
第三节 基材对道路边坡土壤养分和植物物种多样性的影响	31
一、道路边坡基材不同配比土壤性质的月间动态	32
二、道路边坡基材不同配比植物物种多样性的月间动态	34
三、基材与道路边坡土壤植物系统的相关性探讨	36
参考文献	37
第三章 道路边坡土壤水分的时空变异	43
第一节 道路边坡坡面状况对土壤水分的影响	43
一、道路边坡不同坡度土壤水分空间变异性	43
二、道路边坡不同坡长土壤水分空间变异性	44

三、道路边坡不同坡位土壤水分空间变异性	44
四、道路边坡坡面状况与土壤水分的相关性探讨	45
第二节 道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析	46
一、道路边坡不同坡位土壤水分空间变异性	46
二、道路边坡不同坡向土壤水分空间变异性	47
三、道路边坡不同季节土壤水分时间变异性	47
四、道路边坡不同坡位、坡向、季节土壤水分之间的相关性	48
参考文献	48
第四章 道路边坡植被恢复	50
第一节 道路边坡植被恢复概述	51
一、道路边坡植被恢复研究进展	51
二、道路边坡植被选择的生物多样性原理	53
三、生物多样性在道路边坡植被恢复中的应用	55
四、岩石边坡的植被护坡	57
第二节 道路边坡植物多样性的时空变异	59
一、不同坡位植物多样性的空间分布	59
二、不同坡向植物物种多样性的空间分布	62
三、道路边坡不同坡位植物物种多样性的时间变化	63
四、道路边坡不同坡向植物物种多样性的时间变化	67
第三节 成昆铁路的道路边坡植被恢复	68
一、植被类型及其结构特征	68
二、植被恢复物种组成及其特征	70
三、不同坡向和坡质边坡物种多样性对比	73
第四节 成达铁路的道路边坡植被恢复	74
一、植被类型及其结构特征	74
二、植被恢复物种组成及其特征	75
第五节 成渝铁路的道路边坡植被恢复	77
一、植被类型及其结构特征	77
二、植被恢复物种组成及其特征	77
第六节 四川盆地道路边坡上的优势植物	79
一、芒萁的生长特性	79
二、地瓜的生长特性	81
三、金发草的生长特性	81
四、丛毛羊胡子草的生长特性	83
参考文献	84
第五章 道路边坡土壤微生物的时空变异	89
第一节 土壤微生物的影响因子与测定方法	90
一、土壤微生物的影响因子	90
二、土壤微生物的测定方法	93

第二节 道路边坡不同坡位的土壤微生物生物量碳、氮、磷	96
一、道路边坡不同坡位土壤微生物生物量碳的时空变异	96
二、道路边坡不同坡位土壤微生物生物量氮的时空变异	98
三、道路边坡不同坡位土壤微生物生物量磷的时空变异	99
第三节 道路边坡不同坡向的土壤微生物生物量碳、氮、磷	100
一、道路边坡不同坡向土壤微生物生物量碳的时空变异	100
二、道路边坡不同坡向土壤微生物生物量氮的时空变异	102
三、道路边坡不同坡向土壤微生物生物量磷的时空变异	103
第四节 道路边坡土壤微生物生物量碳、氮、磷与有关因子的相关性	104
第五节 道路边坡不同坡位的土壤微生物数量	105
一、道路边坡不同坡位土壤微生物数量的时空变异	105
二、道路边坡不同坡向土壤微生物数量的时空变异	109
参考文献	112
第六章 道路边坡土壤酶的时空变异	116
第一节 土壤酶研究概述	117
一、土壤酶的主要种类	117
二、影响土壤酶活性的因素	119
第二节 道路边坡不同坡位的土壤酶活性	123
一、坡位对道路边坡土壤酶活性的影响	123
二、季节对道路边坡不同坡位土壤酶活性的影响	124
三、坡位、季节和土壤酶活性之间的关系	125
第三节 道路边坡不同坡向的土壤酶活性	125
一、坡向对道路边坡土壤酶活性的影响	125
二、季节对道路边坡不同坡向土壤酶活性的影响	126
三、坡向、季节和土壤酶活性之间的关系	127
第四节 不同类型边坡土壤酶活性的季节差异性	128
一、边坡类型、季节对土壤酶活性的影响	128
二、边坡类型、季节和土壤酶活性之间的关系	130
第五节 土壤酶活性与坡向、季节、土壤理化性质的相关性	130
参考文献	132
第七章 道路边坡土壤结构特性	139
第一节 土壤结构特性研究概述	139
一、土壤颗粒	139
二、土壤质地	140
三、土壤结构分类	141
四、团聚体形成机理	141
五、土壤结构评价指标	143
六、土壤结构与生态环境的关系	144
七、土壤结构评价指标	146

第二节 不同来源植生土的道路边坡土壤结构特性	147
一、道路边坡土壤颗粒大小分布 (PSD) 特征	147
二、道路边坡土壤结构评价	148
第三节 道路边坡土壤颗粒分形特征与土壤理化性质的关系	152
一、土壤水分	152
二、土壤容重	152
三、土壤有机质	152
四、分形维数与土壤其他理化性质的关系	153
第四节 道路边坡不同岩土比植生土对土壤结构特性的影响	153
第五节 道路边坡不同坡位对土壤结构特性的影响	155
参考文献	156
第八章 道路边坡土壤腐殖质特性	160
第一节 道路边坡坡位对土壤腐殖质组分的影响	160
一、道路边坡坡位对土壤腐殖质组分的影响	160
二、道路边坡土壤腐殖质组分与土壤理化性质的相关性	162
第二节 道路边坡坡向对土壤腐殖质组分影响	164
参考文献	165
第九章 道路边坡土壤重金属污染特性	167
第一节 铁路运输对道路边坡土壤重金属富集的影响	168
一、不同护坡年限边坡的重金属污染及风险评价	169
二、距铁轨不同距离处的重金属污染情况及生态风险	177
三、不同类型边坡土壤重金属污染情况及生态风险评估	180
第二节 道路边坡土壤重金属的形态分布特征及风险评价	183
一、不同年限边坡土壤重金属形态分布与风险评价	184
二、距铁轨不同距离处重金属的化学形态及风险评价	190
三、不同类型边坡土壤重金属的化学形态及风险评估	193
四、影响土壤重金属形态分布的因素	194
第三节 道路边坡土壤重金属富集/耐受护坡植物的筛选	195
一、重金属元素在护坡植物和根际土中的富集	196
二、护坡年限对护坡植物和根际土壤重金属富集的影响	199
三、重金属在护坡植物中的富集和转移	203
四、根际和非根际土壤重金属元素含量的变化	204
五、富集系数随根际土壤重金属含量的变化规律	205
六、Pb 和 Cd 各化学形态的植物有效性	205
七、根际土壤有机质与护坡植物重金属元素含量的关系	208
参考文献	209

第一章 道路边坡治理与生态恢复

道路作为重要的交通运输功能载体,是不可缺少的人流、物流基础设施。山地、丘陵和地形比较崎岖的高原所构成的山区是世界陆地的主要组成部分,也是陆地的主要地貌骨架。世界山区面积占整个陆地的 30%,而中国山区面积占全国陆地的 69%。为了开发山区、建设山区、改变山区经济滞后的面貌,提高人民生活水平,交通是否便利是需要首先考虑的问题,公路、铁路建设对促进山区经济和社会的发展起着十分重要的作用。近年来,随着基础设施建设项目投资力度的不断加大,公路、铁路建设项目越来越多。在山区的铁路、公路工程建设中,道路多穿行于河谷山川之间,经常要开挖大量边坡。边坡的开挖破坏了原有土壤植被覆盖层,导致出现大量的次生裸地以及产生严重的水土流失现象,造成生态环境的破坏。边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏形式还会给人民生命和财产带来巨大的损失(杨喜田等, 2000; 张俊云等, 2000; Salvini et al., 2013)。

道路的修建对原生境中各种生态过程产生直接或间接影响,其影响尺度从种群一直延伸到景观(Andrews, 1990; 李月辉等, 2003)。在景观尺度上,边坡的开挖不可避免地会对道路周边原有的植被和土壤造成严重的破坏,形成大量的裸露岩石边坡和光秃的斑块,从而导致景观破碎化现象(Miller et al., 1996)。景观破碎的影响对周围生境的破坏作用远大于道路建设本身导致的生境破坏。Miller 等(1996)的研究结果得出,道路密度与景观破碎化程度并非一定是正相关关系,道路对其周围生境的作用存在差异性。McGarigal 等(2001)的研究认为道路对景观格局的影响存在尺度的差异性,从更大空间尺度上来看,对景观格局的影响可能并不显著。

景观的破碎和斑块化,影响了原有物种的组成和迁移,从而影响了物种的分布,导致区域生态多样性的丧失,并且这一影响通常是长远的(Dale et al., 1993; Turner et al., 1996)。道路生态学的研究最初主要集中在道路影响下路旁植被的变化和对小型哺乳动物活动造成的影响。道路在较小尺度上的影响主要体现在对环境的理化影响上,由此导致对物种组成和迁移的影响等(Forman and Alexander, 1998; Forman et al., 2003)。张镱铨等(2002)对青藏公路格尔木至唐古拉山段对沿线景观格局的影响的研究表明,道路的建设导致沿线景观破碎化程度加剧、景观多样性加剧。

山区道路建设破坏了原有土壤植被覆盖层,形成了大量的裸露道路边坡创面,这些创面很容易受到降雨的影响,导致出现严重的水土流失现象。边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏形式还会给人民生命和财产带来巨大的损失(Morgan et al., 1995; 杨喜田等, 2000; 张俊云等, 2000)。王代军等(2000)的研究表明,裸露的公路边坡风速比林地大 15 倍、比草地大 8 倍,道路边坡风蚀严重,极其不利于水分保持。路堤边坡的主要侵蚀形式是沟蚀,沟蚀量较面蚀量大得多,主要侵蚀因子是次降水量及路堤顶面宽度。除此之外,道路边坡由于土壤渗透性差,边坡土壤对降水截流较小,容易产生水土流失,导致坡面土壤贫瘠、立地条件差,往往不利于植物生长。由此可见,对道路边坡

的治理与恢复已经迫在眉睫。

第一节 我国道路边坡治理现状及其对策

道路建设对经济和社会的发展有显著促进作用,但同时给环境带来一定的影响和破坏。道路建设不仅大量使用土地资源,而且还要经常挖山填方,所产生的道路边坡一方面会引起水土流失、滑坡、泥石流、局部小气候的恶化、光声污染及生物链的破坏,另一方面会造成道路景观环境的破坏。人工防护和绿化是道路边坡生态恢复的重要手段,因社会对环保要求的不断提高,对裸露道路边坡的生态恢复治理问题日益引起人们的重视。随着国家对基础设施建设投资力度的加大,特别是道路建设的飞速发展,给人们带来便利生活的同时,所带来的副作用也会越来越严重。科学治理道路边坡对公共安全和生态环境的危害,是促进我国道路建设健康发展的根本出路。

一、道路边坡种类与特点

在山区的道路修建过程中,因山区地形、地貌变化大,地质构造和岩土类别复杂,所形成的道路边坡类型也是多种多样。目前,依据分类原则、分类标准和分类目的不同,国内外对道路边坡已有很多分类方法。但其共同特点是:或只着眼于变形形式的分类,或仅对某一种(或几种)边坡变形(如滑坡)按不同的准则进行细部分类。一般而言,按边坡与工程关系可分为自然边坡和人工边坡;按人工边坡的形成方式可分为填方路堤边坡和挖方路堑边坡;按边坡变形情况可分为变形边坡和未变形边坡;按边坡岩性把未变形边坡统分为岩质边坡、土质边坡和土石边坡;按边坡高度不同可分为超高边坡、高边坡、中边坡和低边坡;按边坡坡度不同可分为平缓边坡、陡坡边坡、急坡边坡和悬坡(姜德义和王国栋,2003)。

道路工程建设对生态系统的破坏具有工程规模大、持续时间长、影响不可逆和影响范围大等特点,这不仅会产生廊道效应、接近效应、城镇化效应等造成生态环境的影响和破坏,还会导致道路边坡小气候复杂以及限制因素增多(王代军等,2000;舒翔等,2001)。裸露的公路边坡风速比林地大15倍、比草地大8倍,道路边坡风蚀严重,极其不利于水分保持,加之边坡土壤渗透性差等原因,边坡土壤对降水截流较小,容易产生水土流失,导致坡面土壤贫瘠,立地条件差,往往不利于植物生长(欧宁等,2003)。公路和铁路工程的岩质边坡在山区道路边坡中占有相当大的比重,一般设计坡度都在1:0.75以上,有的可达1:0.3。其边坡坡度大,雨水径流速度大,在高降雨地区极易形成冲刷侵蚀,坡面自然风化的土壤颗粒很难留存,受水力和重力作用而堆积坡脚。岩质边坡不同于土质边坡,不具备植被形成所必需的土壤条件及养分条件,其岩体保水功能差,含有的活化养分低,植物很难从边坡岩层中吸收水分及养分,致使植物难以生存(张俊云等,2000)。

二、道路边坡治理现状

我国在道路边坡创面生态工程方面虽然取得了一定的成果和效益,但由于对植被演

替规律的深层次规律认识不足,在道路边坡创面生态工程的实施上仍带有很大的盲目性和随意性。其研究和应用尚处于初级阶段,还存在以下问题:普遍采用单一或简单的混合草种而抛弃乔灌木,草本植物在护坡前期效果不错,但由此建立的生态系统相当脆弱,很容易遭破坏;在栽种草本植物时,过多地把注意力放在国外草种的引进上,而忽视了在本地适应更好、更易于形成良好群落结构和稳定关系的地方草种(王代军等,2000;张俊云等,2002;欧宁等,2003)。

道路边坡防护设计中大量采用浆砌片石护坡、锚索护坡等劳动密集型的边坡防护方式。这些防护方式由于材料简单、施工干扰大,导致质量难以控制。许多道路建设的设计文件中都没有对环境生态进行专门设计。大量采用的浆砌片石护坡及喷射水泥砂浆等防护方式完全封闭了植物生长的环境,使得由于道路开挖而破坏的自然植被永久不能恢复。少量的绿化设计往往只是局部贴草皮,没有对边坡整个植被的逐步恢复进行考虑。缺乏植物覆盖的边坡加剧了水土流失,给生态环境带来了不利影响。

我国的道路建设,特别是高速公路建设因起步较晚,建设资金有限,在观念上、技术上和建设规模上与发达国家相比有一定的差距,在道路边坡设计、边坡防护治理措施方面普遍存在以下问题:地貌破坏,植被难以恢复,造成大量水土流失;高填深挖,边坡不稳定性增大;大量采用石料,资源紧张,成本高;路容外观较差,噪声大等(舒翔等,2001)。相比之下,美国、日本等发达国家非常重视保护生态环境。这些国家建设高速公路的时间比较早,很早就已将生态保护和恢复措施纳入了高速公路建设之中,并且为此进行了长期的研究和实践。如今这些国家已基本废除了浆砌片石和喷射水泥砂浆护面等破坏自然环境的工艺,在边坡防护中取而代之的是各种柔性支护和绿化措施,基本上实现了全路段绿化(李旭光等,1995;王代军等,2000)。

近年来,我国在道路建设中普遍采用了三维网植草、喷混植草和客土喷播等国外的生态护坡工程技术对高速公路岩质边坡进行防护和绿化,但其余道路边坡除少数需要浆砌片石、喷射水泥砂浆护面、浆砌挡墙和砌石护坡等传统工程护坡方式进行边坡治理外,大部分边坡一是采取传统的树、草单种或混种的方式进行边坡治理,二是未进行人工绿化而保持原貌,这当中还包括少部分高速公路边坡(舒翔等,2001;张俊云等,2002;欧宁等,2003)。建设时期久远的道路边坡,特别是较偏远的山区公路边坡除个别采取了工程护坡处理外,大多数是直接种植树、草或未作任何绿化处理,其边坡创面上的植物基本上是自然生长所形成的。随着人们对生态环境保护的要求越来越高,对我国道路边坡绿化工作提出了更高的要求。我国道路边坡种类繁多且面积较大,大多数边坡绿化水平还远远未达到生态恢复和边坡治理的目的,道路边坡每年植被恢复与重建所需草种、生态种植基等的费用将会非常大,因此道路边坡生态绿化的任务还十分艰巨。

三、道路边坡治理对策

科学合理的设计施工是防范道路边坡不稳定性,实现生态防护,提高经济效益的根本途径。道路边坡的设计施工应遵循可持续发展战略,预防因规划和建设项目实施后对环境造成不良影响,促进经济、社会和环境的协调发展。在选线设计、施工建设及运营管理中,做到进行精心设计,使边坡处于安全稳定的环境中。应采用合理边坡坡率和边

坡形式,充分地确保路基的稳定,充分考虑桥、涵、路的结合,减少高填深挖,设置合适的防护工程,注意防水和排水,临河路堤要防河渠水的冲刷与浸泡(杨喜田等,2000;舒翔等,2001)。全面贯彻环境保护的思想,以少占林地、少占农田、保护水源地、保护水源林和渔地等为目标,采用土地复垦恢复植被等一切必要的措施,恢复自然,保护环境。道路边坡从设计到施工,应引入竞争机制,选择一个资质好的承包单位,先提出多个设计方案,邀请专家评审,确定最佳方案,再进行施工。施工过程中,应进行工程监理,以确保方案正确、投资合理和施工质量良好,使治理工程达到预期目的。

在维护边坡稳定与恢复边坡生态景观的实践中,以植被为主体的坡面生态工程逐渐发展起来,植被越来越成为控制侵蚀和稳定边坡的一个有效措施(Coppin and Richards, 1990; Nordin, 1993; Gray and Sotir, 1996)。道路边坡的不稳定性通常可分为表层不稳定性、浅层不稳定性 and 深层不稳定性,在我国的广大山地,表层和浅层的不稳定过程是边坡最常见的两类侵蚀类型,植被对解决这两类不稳定性具有很大潜力(Coppin and Richards, 1990; 周跃, 2000)。道路坡面过程受不同形态的能量驱动,其结果是以侵蚀形式发生的坡面物质的移迁。植被作为地表的保护层,能够以不同方式影响坡面侵蚀过程。决定土壤侵蚀过程的重要因素有气候、土壤、水文和地形,前面三个受植被的影响,草本植物及灌木的枝叶和根系集中分布于土壤表面,能够削弱有效降水量和调节土壤的抗蚀性,植被对坡面的水文和机械保护效应所产生的深根锚固、浅根加筋、降低孔压、削弱溅蚀和控制径流的生态作用,使坡面具备抗蚀护坡的工程性能(Coppin and Richards, 1990; 台培东等, 2001; 张俊云等, 2002)。

道路边坡土壤是植物形成、生长和演替的基础,而植被在道路边坡防护以及生态景观恢复方面有着不可取代的重要作用。植被在道路边坡保护和侵蚀控制方面的功能是土壤植被系统中土壤与植被相互作用的结果。土壤植被系统是在一定地区由植物根系分布范围内的土壤、母质和岩石以及以植被为主的生物群落所构成的有机整体,在系统内部,植被稳定土壤,土壤反过来养育植被,两者构成了所谓的“固结-维养关系”,使其具有克服不稳定因素,保持系统的稳定性以及保证土壤和植被之间的相互作用、促进整个系统发育演化的双重作用(周跃, 2000)。应充分发挥土壤保持技术、地表加固技术在道路边坡防护中的作用,建立良好的土壤植被系统,提高道路边坡的生态护坡效果。通过对坡面的有效覆盖和及时地保护表土,使其免受表面侵蚀和土壤退化的影响。通过植物根系固持土壤,降低土壤空隙水压来加固和提高抗滑力。土壤保持技术主要包括草皮移植、草播种、乔灌木播种、抗蚀网格和活枝网格,地表加固技术主要技术包括活枝扦插、枝条篱墙、活枝捆束、排水式活枝捆束、沟壑式栽种、压条和枝干篱墙等。

利用植物进行道路边坡坡面植被恢复,建立新的植物群落时需要合理选择植物的物种,使其具有适应性、生物多样性和功能性。为保证有良好的植被,在植物选择上,应废除传统的单一植草观念,选择适合当地气候及地质条件的植物,并对植物进行目标群落设计,以求达到恢复自然的目的。植物种类选择有别于普通植草,植物物种可尽量采用与当地天然植被类似的种类,使植被可以实现从草坪到树林的演替,而且乡土植物更容易与当地自然融为一体,使得人工植被更接近原始生态环境。

道路边坡坡面植被重建的设计与施工过程中,所选物种必须具有耐瘠性、耐旱性、

深根性、青绿期长、再生能力强、生长迅速、抗病虫害能力强和抗外界干扰能力强等特点。生物多样性是生态系统稳定的基础,较高水平的生物多样性有利于生态系统功能的发展和优化。道路边坡应采用乔、灌、草、藤、花等植物进行合理配植,使同一群落内功能相似类群的物种多样性增加,提高生态系统对环境变化的应变性及功能性。道路生态防护的植物物种选择与搭配是道路建设工程中可持续发展的对策之一。植物物种选择与搭配应使环保机能、景观机能及安全机能都相应得到提高,使其同时具有治理水土流失、绿化、美化、改善行车条件、防止眩光和降低噪声等多种功能。

第二节 道路边坡的生态恢复

道路边坡由于受到了不同程度的人为或自然灾害破坏,从景观、运行安全和生态多样性保护等角度考虑,道路边坡的治理与恢复问题亟待解决。我国的道路建设,特别是高速公路建设起步较晚,建设资金有限,在观念上、技术上和建设规模上与发达国家相比都有一定的差距(舒翔等,2001)。

在道路边坡设计、边坡防护治理措施方面,很长时期内都存在着以边坡稳定为全部目的的传统思路,采取石料、混凝土砌筑挡土墙和护面,或浆砌片石和喷射水泥砂浆护面等工艺。这样的治理方式其优点在于使用混凝土和石料等材料便于进行精确的力学分析以稳固边坡,采用这样的方式虽然能克服边坡带来的严重的水土流失、滑坡和泥石流等灾害,但是大量采用的浆砌片石护坡及喷射水泥砂浆等防护方式完全封闭了植物生长的环境,使得由于道路开挖而破坏的自然植被永久不能恢复(艾应伟等,2006)。同时使用传统的边坡治理手段还会带来严重的环境问题,如视觉污染、景观破碎和生态多样性丧失等。

理想的边坡治理结果是恢复边坡原有生态系统,而达成这一目标则需要突破传统的绿化观念,从生态学的角度看待边坡治理,即利用恢复生态学的基本理论指导边坡治理。道路边坡的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,是通过人工设计的恢复措施,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)(Lewis, 1989)。植被恢复是生态恢复的主要内容,是生态恢复的关键步骤。边坡植被恢复作为恢复生态学的重要组成,是以植物学、水土保持学和草坪学等为理论基础。边坡植被恢复在国外有 *Biotechnique*、*Vegetation* 或 *Revegetation* 等名称,在国内则称为植被护坡、坡面生态工程或坡面植被恢复等。

植被护坡是指单独用活的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。植被护坡的定义缺乏对生态学动态和完整性的描述,应结合植被恢复的演替和恢复后期形成的稳定群落以完善植被恢复的概念。植被恢复应是以恢复生态学原理作指导,对因工程建设而遭受生态破坏的道路边坡,通过人工设计和恢复措施,恢复和重建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,进而提高道路沿线的生态环境质量,使其更好地为经济建设服务(刘春霞和韩烈保,2007)。随着社会的进步与发展,人们逐渐意识到以恢复道路