

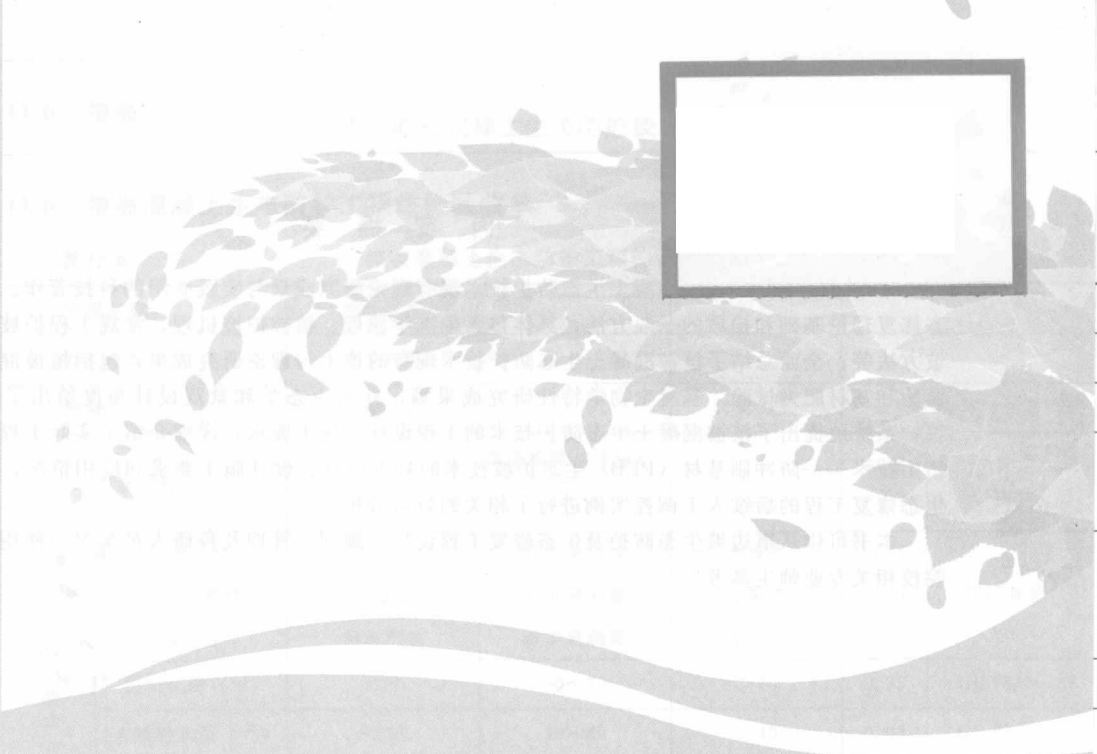


植被混凝土生态 防护技术理论与实践

许文年 夏振尧 周明涛 刘大翔 夏栋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



植被混凝土生态 防护技术理论与实践

许文年 夏振尧 周明涛 刘大翔 夏栋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一本介绍植被混凝土生态防护技术现有理论研究成果与实践应用的科技著作。主要阐述了生态修复理论基础和护坡的一般方法,具体包含生态学原理、植被护坡机理、常规工程护坡方法和生态护坡方法等;全面总结了植被混凝土生态防护技术现有的技术与理论研究成果,包括植被混凝土力学性能试验和基材肥力试验、基材生物学特性研究成果等,并从生态学和景观设计角度给出了物种选择的建议;系统地提出了植被混凝土生态防护技术的工程设计与施工要求;详细介绍了实际工程应用情况以及衍生技术——防冲刷基材(PEB)生态护坡技术的基本原理、设计施工要求和应用情况,同时亦对已建生态修复工程的后续人工调控实例进行了相关的效益分析。

本书可供从事边坡生态防护及生态修复工程设计、规划、管理及科研人员学习与使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

植被混凝土生态防护技术理论与实践 / 许文年等著
— 北京:中国水利水电出版社,2012.5
ISBN 978-7-5084-9774-7

I. ①植… II. ①许… III. ①植被—护坡—混凝土工程—研究 IV. ①U417.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第100336号

书 名	植被混凝土生态防护技术理论与实践
作 者	许文年 夏振尧 周明涛 刘大翔 夏栋 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

序

人类对各种自然资源的开发利用致使多种类型的生态系统,尤其是原生生态系统被破坏,继而引发了一系列的生态环境问题。生态与环境保护已成为当今人类面临的重大课题。我国自改革开放以来,经济建设、工业化、城市化速度加快,由此造成的生态环境问题很严重,尤其是城建、交通、矿山、水电工程等基础设施的建设导致大量山体开挖与填埋,既破坏了原有的地形地貌和原生植被,同时也造成地质灾害隐患,加剧了生态环境的恶化与生态系统的退化。党和政府高度重视生态环境问题,在科学发展观与构建和谐社会的指导思想中均指出人与自然的和谐是构建和谐社会的重要基础。在《中华人民共和国国民经济与社会发展第十二个五年规划纲要》中,再次强调节约自然资源、保护生态环境。当前,生态保护与可持续发展已成为全社会关注的重大课题。

恢复生态学与生态工程针对受损生境的恢复开展研究,具有良好的发展前景与广泛的社会需求。其涉及多个行业,并且与生态学、植物学、土壤学、微生物学、水土保持学、土木工程、景观学等多个学科相关,在宏观大尺度上进行整合研究,同时在微观尺度上进行恢复技术的探索。在理论指导下的多种生态恢复实践以及成功的范例则为恢复生态学与生态工程的实际应用与理论的创新奠定了坚实的基础。

本书作者许文年教授及其研究团队,在对恢复生态学与生态工程长期定位研究和边坡生态防护技术实践成果的基础上编写了本书,其基础研究和技术推广应用积累了丰富的经验和素材,在社会效益、经济效益和生态效益方面均取得了重要成就。在本书中,他们对植被混凝土基材基本性能进行了系统的总结,并对工程实践案例在技术和施工上进行了阐明,创新性地提出具有自己特色的生态修复技术与工程规范,对不同类型受损边坡生境的恢复提出了不同的恢复策略及施工技术。他们的专利技术——植被混凝土生态防护技术,在国内不同类型受损边坡生境修复实践应用中获得大量的成功案例,受到广泛社会关注和高度评价。

许文年教授和他的团队承担着繁重的教学和管理工 作，仍能坚持数年从事科研工作，并卓有成效，实属不易。我相信本书的出版，将对我国生态环境建设事业的发展起到重要的指导作用，同时也谨祝许文年教授及其研究团队在恢复生态学与生态工程领域取得更大的成就。

付梓之前，有幸先阅此著，愿为之序。

马克平

2011年12月于北京

前言

近年来,随着国家基础设施建设的大力开展,工程所在地生态环境不可避免地遭到不同程度的破坏。在人力或机械的介入下,工程活动大规模地改变了地表结构,破坏了生态系统的空间连续性,对生态系统造成了强烈干扰,植被遭到大量破坏,次生裸地伴随出现,进而导致在工程扰动区内出现生物多样性降低、水源涵养能力下降、水土保持功能丧失等一系列生态环境问题,严重影响工程所在地及周边地区的环境、景观及可持续发展。

2006年颁布的《国家中长期科学和技术发展纲要(2006~2020)》国发[2005]44号文件中,明确将“生态脆弱区域生态系统功能的恢复重建”确定为优先支持的主题,体现了国家实施生态修复与治理的决心。相关数据显示,我国边坡生态修复面积自2000年起每年以2亿~3亿 m^2 的速度迅速增长。

工程的顺利实施离不开正确的技术措施。在政策引导及民众对自然生态内在需求的双重作用下,近十年来边坡生态修复技术在国内得以蓬勃发展。现阶段,常用的较为成熟的边坡生态修复技术基本采用喷播方式,典型技术有:厚层基材喷射护坡技术(TBS)、三维植被网喷播植草技术、客土喷播绿化技术、植生基材喷射技术等。但这些技术不同程度地存在基材强度低、抗冲刷能力弱、养分供给不持久等弱点,难以满足高陡边坡生态修复要求。

植被混凝土生态防护技术正是在此种背景需求下应运而生的。该技术在基材中加入了常规硬性凝结材料——水泥,从而使基材强度更高、抗冲刷性更强,适用于坡度介于 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 各类坡面的生态修复;同时基材中还加入了自主研发的绿化添加剂,其可有效调节基材物理、化学及生物特性,促进形成良好的植被生长环境,属国际首创,实现了传统硬性加固措施与生态修复措施的有机结合。2003年7月19日,水利部国际合作科技司在宜昌主持召开了“植被混凝土生态防护技术”项目成果鉴定会,以郑守仁院士为主任的鉴定委员会一致认为该技术总体达到国际先进水平,其中边坡防护和绿化的有机结合属国际领先水平。

截至今日,植被混凝土生态防护技术已在全国20余省(自治区、直辖市)得到推广应用,涉及水利水电、铁路、公路、矿山料场、旅游景区等领域。作者领衔的研究团队在推广应用的同时,先后主持了国家高新技术研究发展

计划(863项目)“镇江水环境质量改善与生态修复技术研究及示范”五分项“通内江河道生态修复与面源控制技术研究及示范工程(2003AA601100-5-3)”、科技部农业科技成果转化资金项目“土地资源保护和生态修复技术转化应用(05EFN216800399)”、科技部“十一五”国家科技支撑计划项目“重大工程建设区生态恢复整治技术研究项目西南重大水电工程区生态保护与泥石流滑坡防治技术示范(2006BAC10B04-2)”、国家自然科学基金“工程扰动区植被恢复工程基材特性及修复机理研究(50879043)”、国家“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项课题“陡坡消落带生态防护的土壤改良和稳固技术研究及示范(2008ZX07104-003-03)”等国家及省部级项目。通过对实际工程中发现的新问题给予及时解决,该技术得以不断改进,理论体系也日趋完善。植被混凝土生态防护技术2003年获湖北省科技进步二等奖,2006年获湖北省科技成果推广二等奖,2008年入选水利部《水利先进实用技术重点推广指导目录》,2009年获湖北省科技进步特等奖。本书写作意图即是将植被混凝土生态防护技术现有研究成果加以总结与汇编,以期抛砖引玉,供相关人员参考与借鉴。

本书内容分为三部分,即:第1篇理论基础,主要阐述生态修复理论基础和护坡一般方法,具体包含生态学原理、植被护坡机理、常规工程护坡方法和生态护坡方法;第2篇研究成果,具体包含植被混凝土力学性能试验和土壤肥力试验成果,以及从生态学和景观设计角度阐述的对物种选择的建议;第3篇技术应用,先阐述了植被混凝土生态防护技术从工程设计到施工的要求,详细介绍了实际工程应用情况,随后介绍了衍生技术——防冲刷基材(PEB)生态护坡技术的基本原理、设计施工要求和应用情况,并简介了对已完建生态修复工程后续人工调控的实例。

本书由三峡大学土木与建筑学院土木工程学科资助出版。在本书撰写过程中,李少丽、丰贍、孙超、郭萍、黄晓乐、熊诗源、毛思禹、侯燕梅、蔡显扬、周正军、赵娟、祝顺波、赵自超、赵冰琴等硕士研究生做了大量工作,同时也得到了三峡大学化生学院陈芳清教授、王建柱副教授的大力支持,在这里一并谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平和时间的限制,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

于宜昌

2011年10月

目 录

序

前言

第1篇 理论基础

第1章 绪论	3
1.1 边坡生态修复必要性	3
1.2 边坡生态修复研究进展	7
本章主要参考文献	18
第2章 边坡生态修复理论基础	21
2.1 恢复生态学原理	21
2.2 物种选择原理	25
2.3 肥料学原理	28
2.4 植被护坡机理	29
2.5 植被群落设计与人工调控原理	35
本章主要参考文献	42
第3章 边坡生态修复常用技术	44
3.1 边坡	44
3.2 边坡生态修复常用技术	47
本章主要参考文献	52

第2篇 研究成果

第4章 植被混凝土生态防护技术	55
4.1 技术简介与原理	55
4.2 基材配方	57
4.3 主要技术指标	64
本章主要参考文献	65
第5章 植被混凝土物理力学特性研究	66
5.1 水泥掺入比、龄期、浸水条件对植被混凝土强度的影响	66
5.2 有机质对植被混凝土孔隙率和强度的影响	70
5.3 植被混凝土冻融特性及改进措施	74

5.4 植被混凝土根—土复合体强度与分形特性	83
5.5 植被混凝土力学稳定性分析	91
5.6 植被混凝土力学时变性分析	96
本章主要参考文献	98
第6章 植被混凝土肥力特性研究	99
6.1 不同年限植被混凝土肥力变化分析	99
6.2 植被混凝土肥力可持续性分析	101
6.3 坡位及坡向对植被混凝土肥力的影响	106
6.4 基材 pH 值、有机质及其与速效养分的相关性分析	108
本章主要参考文献	111
第7章 植被混凝土生物学特性研究	112
7.1 植被混凝土生物特性的时间变异规律	112
7.2 不同植被恢复模式对植被混凝土基材微生物特征的影响	115
7.3 不同有机质对植被混凝土微生物特征的影响	122
7.4 植被混凝土盐分胁迫对灌木种子萌发的影响	125
7.5 植被混凝土植被单体对水体典型污染物的消减作用	130
本章主要参考文献	135

第3篇 技术应用

第8章 植被混凝土生态防护技术应用	139
8.1 工程设计与施工	139
8.2 应用实例	141
第9章 防冲刷基材 (PEB) 生态护坡技术	163
9.1 基本原理	163
9.2 工程设计	165
9.3 工程施工与应用	166
第10章 生态修复工程人工调控	171
10.1 评价指标体系的确立	171
10.2 人工调控的实例	173
本章主要参考文献	179

附录

附录 I 植被混凝土化学生物学指标测定方法	183
附录 II 植被混凝土生态防护技术规程 (暂行)	190

第 1 篇 理 论 基 础

第1章 绪 论

随着社会的高度发展、世界人口数量的不断增长,社会消费需求也不断增加,从而对地球自然资源产生了巨大压力。人为开发导致森林和绿地面积锐减,工业化生产导致环境污染与生物多样性降低,大量基础设施的修建导致地球“伤疤”面积骤增,诸多问题的出现需要人类积极推出应对措施。如今,可持续发展已成为人类社会发展的共识,如何保证生态环境与社会经济发展的和谐统一,如何利用有限资源实现人类社会又好又快发展,如何实现生存与发展的和谐统一,已成为全球不断探索的重大课题。

人们在利用聪明才智开发大自然的同时,也在无情地破坏赖以生存的生态环境。在公路、铁路、水利、电力、采矿等工程实施过程中,经常伴随大量的边坡开挖,从而破坏了原有植被覆盖层,导致大量土地裸露,造成了一系列生态环境问题,如水土流失、滑坡、泥石流、局部小气候恶化、光声污染及生物链丧失等。据水利部、中国科学院、中国工程院组织完成的“全国水土流失与生态安全综合科学考察”结果显示,“十五”期间,全国开发建设项目扰动地表面积达 5.5万 km^2 ,弃土弃渣量达92亿t,近几年每年因人为因素新增的水土流失面积超过 1.5万 km^2 ,增加的水土流失量超过3亿t,对我国整体生态环境质量构成了严重威胁。

基础工程建设造成的不良影响,制约了社会经济的可持续发展,对人类生存和社会发展构成了威胁,而此类问题仅靠植被的自身恢复能力是难以解决的,如不尽快进行人工生态治理,将导致生态破坏程度进一步加剧,最终难以实现经济与环境的可持续发展。本章将分别从宏观政策需求、水土保持需求、生态保护需求和水质保护需求四个方面对人工生态修复必要性加以阐述,并从新技术开发、基材特性、生态效应等方面介绍边坡生态恢复研究的进展。

1.1 边坡生态修复必要性

1.1.1 宏观政策需求

“十五”以来,国家加大了对水电、铁路、公路等基础设施建设的投入,如西南水电资源丰富地区大中型水电枢纽大规模的规划和开发,公路系统“五纵七横”约 3.5万 km 的国道主干线系统,铁路系统在“四纵两横”既有路网基础上强化“八纵八横”的路网主骨架等。众多大型建设项目的实施,在人力或机械的介入下,不可避免地对工程所在地造成巨大的工程扰动,大规模地改变了地表结构,破坏了生态系统的空间连续性,对生态系统造成了强烈干扰,植被遭到大量破坏,次生裸地伴随出现,进而导致工程扰动区内出现生物多样性降低、水源涵养能力下降、水土保持功能丧失等一系列的生态环境问题,严重影响工程扰动区及周边的环境、景观及可持续发展。在开挖、回填、支护等工程活动中,自然生境剧烈改

变, 植被赖以生存的土壤和环境丧失, 植物在扰动区内自然定居过程极其缓慢。

2000 年国务院 31 号文件明确指出了建设绿色山川的重大举措, 要求我国从总体上构建以重点林业生态为骨架, 实现以城镇、村庄绿化为依托的国土绿化战略的需要; 《国家中长期科学和技术发展纲要 (2006~2020 年)》(国发 [2005] 44 号) 中要求将“生态脆弱区域生态系统功能的恢复重建”确定为优先支持的主题; 同时随着国家对环境问题的重视, 岩土工程学科中增加了环境保护的内涵, 岩土体开挖创面的植被恢复技术、废弃渣体的合理利用等都已成为岩土与生态环境工程界研究的热点。此外, 2010 年 10 月发布的《中共中央关于制定国民经济和社会发展十二个五年规划的建议》也明确指出了“坚持把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点, 深入贯彻节约资源和保护环境基本国策”。在政策引导及民众对自然生态的内在需求双重作用下, 生态修复技术在国内近十年兴起并蓬勃发展。

1.1.2 水土保持需求

我国的水土流失非常严重, 以黄土高原为例, 有关数据显示在近 30 年间, 黄土高原人口增加 1 倍多, 森林砍伐严重, 子午岭森林线已后退 20km, 土壤侵蚀量由百年前的 13.3 亿 t 增加到现在的 22.3 亿 t, 水土流失的加剧显而易见。

“没有植被, 也就无所谓土壤”, 自然土壤退化的最直接原因就是植被遭到毁损, 生物量明显下降。因此, 保持良好的植被结构能防治土壤退化、提升土壤肥力, 同时能最大程度防止水土流失。植被具有显著的水土保持功能, 这种功能所产生的巨大作用, 使林草植被建设在防治土壤侵蚀和控制水土流失的各项措施中, 成为一项长远且有效的根本性措施。林草植被建设是融生态、经济和社会效益于一体的人与自然协调发展的生态工程, 越来越受到人们的重视。像任何其他事物一样, 植被能够保持水土存在其自身的内在规律以及特征, 只有弄清这些规律和特征, 并总结相关的研究结果, 才能在总体上把握植被在时间上和空间上保持水土的能力, 进而阐释它对外界作用因素的影响, 这对客观分析和评价植被的作用和效果、正确制定和实施水土保持政策具有极其重要的意义。

植被的水土保持功能主要与植被结构和降水有关, 因此研究植被保持水土的作用, 离不开这两个主要因子。但在生态修复中, 考虑更多的是构建合理的目标植被结构。植被结构对水土保持的贡献可分为地上部分——茎叶作用和地下部分——根系作用, 具体阐述见第 2 章第 4 节植被护坡机理。此外, 植被水土保持过程中另一个发挥主导作用的是由植被残体构成的地被物层, 因为地被物层直接覆盖地表。吴钦孝 (2001) 认为地被物层在保持水土、涵养水源方面有着独特的地位和主导作用, 进行生态修复工程的最终目的就是要在地表形成植被, 其首要目的便是要能够发挥保持水土的功效。林地去掉枯落物层后, 径流量比原状林显著增加; 而在地被物层和植物根系共同保护和作用下的采伐地, 土壤产沙量与农地产沙量相比十分微小。在《植被保持水土的基本规律和总结》(吴钦孝, 2001) 一文中: 据 1988~1996 年对试验区域各处理径流小区的连续观测, 林地在去掉枯落物层后, 径流量比原状林增加 5.8 倍, 相当于农地径流量的 70.8%; 而在地被物层和植物根系共同保护和作用下的采伐地, 土壤产沙量仅占农地产沙量的 0.2%。油松林不同处理的产流产沙量比较情况见表 1.1。

表 1.1 油松林不同处理的产流产沙量比较

测定项目	雨季降雨量 (mm)	油松林		林地去枯落层		采伐地		农地	
		径流深	泥沙量	径流深	泥沙量	径流深	泥沙量	径流深	泥沙量
1988~1996 年平均值	345.6	2.00 mm	1.60 t/km ²	11.54 mm	44.27 t/km ²	2.07 mm	4.28 t/km ²	16.30 mm	2213.94 t/km ²
相当于农地 百分比 (%)	—	12.3	0.1	70.8	2.0	12.7	0.2	100.0	100.0

可见，地被物层在保持水土、涵养水源方面有着独特的地位和主导作用。进行边坡绿化和生态修复工程的最终目的就是要在地表形成植被，其首要目的便是要能够发挥保持水土的功效。

混交林（草）具有比纯林更好的水土保持效益。混交林（草）由于其地上和地下部分彼此交错镶嵌分布，可以有效利用不同空间和土层深度的光、温度和水分、养分条件，形成良好的结构，比纯林（草）具有更大的水土保持功能。吴钦孝（2001）通过对陕西省永寿县7~8年生沙棘、侧柏混交林的研究结果表明，在相同立地条件下，混交林比侧柏纯林更能改善小气候环境和土壤肥力状况，并能减少土壤流失，显著增加侧柏树高、胸径和材积生长量。

生态、社会、经济效益有机结合是确保植被水土保持功能充分发挥的基础。对于水土保持林草，除以保持水土、实现社会公益为主要经营目的外，在改善农业经济结构和山区经济发展方面同样有着不可忽视的作用。政府部门在积极发动群众参与水土保持工作的同时，还可充分利用该工作成果所产生的经济效益，并配合指导与推广营销，使其成为群众摆脱贫困的重要途径，真正实现生态、社会、经济效益的有机结合。

1.1.3 生态保护需求

国家林业局于2003年11月至2005年4月进行了第3次全国荒漠化和沙化监测，结果显示：截至2004年底，中国荒漠化土地为263.62万km²，占国土面积的27.46%；沙化土地面积为173.97万km²，占国土面积的18.12%。与1999年相比分别减少37924km²和6416km²，但形势依然十分严峻。以黄河为代表的河流断流问题日趋严重，草地退化愈演愈烈，森林生态功能不断退化，湿地破坏加剧。这些越来越严重的生态问题对人类的生存环境以及经济社会的可持续发展构成了严重威胁。如何整治日趋恶化的生态状况，防止以生物多样性降低、生态功能下降为特征的各式各样生态系统退化情况的加剧，恢复和重建已破坏的生态系统，成为保护生态环境、提高区域生产力、实现可持续发展的关键。

20世纪60年代以来，减缓和防止自然生态系统的退化萎缩，恢复和重建受损的生态系统，越来越受到国际社会的广泛关注和重视。在此种背景下，恢复生态学（Restoration Ecology）应运而生，目前已成为世界各国的研究热点和国际前沿学科之一。1996年，美国生态学会年会把生态学作为应用生态学的5大研究领域之一。而中国作为当今世界上生态破坏最严重的国家之一，恢复和重建受损生态系统显得更加迫切。我国当前正进行西部大开发，既要发展区域经济，又要保护当地生态环境，必须将经济开发与生态治理有机结合起来。在人为合理干扰下，充分利用生态系统的自我修复功能，达到经济发展与生态环境

的协调统一。因此,重视并开展生态修复研究具有十分重要的现实意义。

1.1.4 水质保护需求

随着我国经济的发展,资源和环境问题日益突出,尤其是水资源短缺和水污染已成为我们不得不面对的严重生态危机之一。各种调查数据显示,中国是一个“水资源紧缺的国家”,目前国内人均水资源占有量只是世界平均水平的 1/4。由于水资源分布不均,使得北方地区水资源的人均占有量更低,尤其是一些缺水山区,人畜生活饮水都困难,连基本的生存都受到威胁。但就是在这种情况下,全国 80%的水库、河流都普遍出现使用过度现象。过度使用水体导致一些地区出现了水生物数量下降、地下水位下降、海水入侵和地面沉降等严重的生物、生态问题。水资源日益短缺只是问题的一方面,水污染日益加剧则是另一个重要的方面。水利部的数据显示:目前中国 70%以上的河流湖泊遭受不同程度污染。2004 年,淮河、黄河污染反弹,其中淮河主要水质污染指标已达到或超过历史最高水平;黄河干流 40%河段的水质为劣 V 类,基本丧失水体功能。

俗话说,有水则灵。如果一个区域的水生态系统功能丧失的话,将会影响到整个地区的植物生长、经济生产以及居民生活。面对目前出现的水资源困境,我们的策略就是一方面合理使用水源,做到开源节流,同时更要研究新技术,积极采用新工艺,净化和改善现有的水资源状况。

处理污水水使其能够再利用,国内外有很多方法和途径。近年来,生物处理方法越来越受到人们的重视,研究的广度和深度都有了长足进展。目前有一种观点认为:自然界是一个大的生物圈,万事万物都融在其中,组成一条条生物链,一张张生态网,最后构成自然界这一有机整体,各种生物,包括动植物都在各自的生物链上发挥作用,有其用途,关键是如何有效利用它们。植物作为生物链的基础环节,对水质净化有着不可替代的重要作用。

生态修复是一项投资少,效益高,发展潜力大的新兴技术,在近几十年内才逐渐形成其理论和技术体系。目前解决水质问题比较成熟的方法包括土地处理、氧化塘、湿地处理等。其中,土地处理系统是将污水经过土壤生物系统,去除污水中的营养成分和污染物,使出水水质等于或超过传统 3 级处理的出水水质。相关试验数据比较显示(见表 1.2、表 1.3),污染水经过绿化植被后典型水质指标得到了一定程度消减,说明植被对污染物进行了吸附—吸收—转化的作用过程,使得有机、无机和富营养化的物质减少。从理论上分析,植物净化作用表现在两个方面:①植物的根、茎、叶吸收污染物质;②根、茎、叶表面附着的微生物转化污染物质。植被对污染物有较好的消减作用,说明了绿化单体在处理水质问题方面所具有的实际应用价值。可见,生态恢复工程不仅可以用来保持水土、生态修复,更可以用来净化污染水,有效改善水体条件。

表 1.2 白三叶样地消减前后水质指标的比较

水样 \ 指标	TN	TP	BOD	电导	酚类	COD _{Cr}	Cr ⁶⁺
A 类(平均值)(mg/L)	11.99	73.54	7.00	554.00	47.78	1254.34	1.25
B 类(平均值)(mg/L)	8.03	57.69	3.40	281.00	33.12	1016.46	1.00
消减平均值(mg/L)	3.96	15.85	3.60	273.00	14.66	237.88	0.25
去除率(%)	33.00	21.60	51.40	49.30	19.00	30.70	20.00

表 1.3 高羊茅样地消减前后水质指标的比较

水样 \ 指标	TN	TP	BOD	电导	酚类	COD _{Cr}	Cr ⁶⁺
A 类 (平均值) (mg/L)	18.12	98.54	10.90	554.00	47.78	1254.34	1.25
B 类 (平均值) (mg/L)	12.60	79.32	5.49	303.00	39.66	906.88	1.10
消减平均值 (mg/L)	5.52	19.22	5.41	251.00	8.12	347.46	0.15
去除率 (%)	30.20	19.50	49.06	45.20	17.00	27.70	19.20

客观而言，生态修复技术目前存在一些问题，如：如何更好地发挥植被单体对污染物的降解作用；如何减小季节变化对净化作用的影响等。但不可否认的是，在当前大力提倡保护环境的口号下，它是我们使自然尽可能向着有利于人类方向发展的有效方式。我们应该充分发挥生态修复技术的长处，在实践中广泛应用，同时注重改进与消除不利因素，如进一步研究典型草种对不同污染物类型的消减作用和效应，使修复达到边坡绿化、环境美化以及治理典型污染区域水环境的多重功效。只有通过多方面努力，生态修复技术得到日臻完善，才能获得更广泛的应用。

1.2 边坡生态修复研究进展

1.2.1 边坡生态修复技术的发展

边坡生态修复可定义为：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和侵蚀。英文有称 Biotechnique, Soilbioengineering, Slope Ecoengineering, Vegetation 或 Revegetation 等，国内也有边坡生态防护、植被护坡、植被固坡、生态修复，坡面生态工程等名称。生态护坡工程利用生物（主要指植物）对边坡进行植被重建，并建立新的植被群落，以达到修复生态环境、治理水土流失之目的。从恢复生态学来看，植被重建是生态修复的第一步，能否成功地重建坡面植被是坡面生态系统成功与否的关键。

边坡生态修复的雏形是植被护坡，最初用于河堤护岸以及荒山的治理。1591 年中国最早将柳树等应用于河岸边坡的加固与保护。17 世纪利用植被护坡技术保护黄河河岸。1633 年日本学者采用铺草皮、栽树苗的方法治理荒坡，至 20 世纪 30 年代，这种生物护坡方法首次被引入中欧，并在欧洲推广应用。1936 年北美开始应用植被护坡技术，并借鉴中欧的经验致力于与农林业和道路建设相关的土壤侵蚀控制。20 世纪 50 年代美国 Finn 公司开发出喷播机，实现了边坡植被恢复与重建的机械化，随后英国发明了用乳化沥青作为黏结剂的液压喷播技术，至此边坡植被与重建的技术飞速发展。

欧美实行了严格的资源保护制度，基础建设对植被等自然资源的破坏较小，其边坡生态防护和工程防护研究是同步进行的。边坡生态修复技术的研究，从喷播基质配比、物种选择、施工工艺到养护管理均已较为成熟，常用技术有液压喷播（Hydroseeding）、活枝捆垛（Live Fascine）、表面覆盖（Mulching）秸秆和干草、植物枝条插种、树桩插种、石堆种植（Vegetated Riprap）、绿化墙（Vegetated Wall）、框格绿化法、土工网（一维或

三维)绿化法、阶梯墙绿化法、带孔砖(或砌块)等。在植被选配上,一般采取乔、灌、草相结合的方式,如前苏联、芬兰、瑞典及挪威等欧洲国家,其边坡坡度设计低缓,多采用 $1:2\sim 1:5$ 的坡度,坡面用牧草处理,使与周围牧场相协调;德国和奥地利等国家采用 $1:1.5\sim 1:2$ 稍陡的边坡;加拿大高速公路边坡坡度平均为 27° ,其在边坡上先临时种草,然后再移植灌木、乔木,以达到边坡植被与周围区域环境相协调的目的。此外,欧美国家在近几十年时间内相继开发出形式多样的土工网、土工布或毯(如平面网、三维网、土工格室等),这些材料结合各种传统和新兴生态修复方法,产生了名目繁多的生态护坡与植被重建的方法。

边坡生态防护和植被重建技术的大规模推广应用出现于日本。随着喷射乳化沥青和植物种子喷播技术从欧美传入日本,日本技术人员开发出了喷射绿化技术——沥青乳剂覆盖膜养生绿化技术,并用于名古屋至神户的高速公路生态修复工程中。20世纪60年代初,日本从美国引进了喷播机和喷射专用纤维,并把当时先进的液压喷播技术也用在名古屋至神户高速公路的生态修复工程中。1965年,日本实现了喷射纤维国产化。1973年,日本开发出了纤维土绿化方法(Fiber-soil Greening Method),标志着岩体绿化工程的开始,这也是日本最早开发的厚层基材喷射法。该方法采用了纤维和沙质土,并呈台阶形喷射。但此法有较大缺陷,主要是初期pH值过高,易受侵蚀,喷层保水、保肥性能差。为克服纤维土绿化方法的缺点,日本于1983年开发出了高次团粒SF绿化方法(Soil Flock Greening Method),此法的主要特征是使用了纤维、壤土和乳化沥青,喷层pH值呈中性,抗侵蚀性更强。1987年,日本从法国引进连续纤维加筋土方法并与已有的技术方法结合,开发出了连续纤维绿化方法(TG绿化方法),该法使用连续纤维和沙质土,喷层具备更高的抗侵蚀性;施工体系由绿化基材供给系统、团粒剂供给系统、连续纤维供给系统组成,机械化程度高。上世纪末,在已有技术基础上,日本开发出土壤菌永久绿化法,用有效土壤菌加速岩石的土壤化进程,快速形成适应草本生存所需的土壤,人为地制造出一个生态循环系统,以促进植物生长。目前,日本在岩石生态修复上已形成一整套技术系统,即“从种子到树林的再生技术”,除已开发的一系列客土喷射技术外,还有框架生态修复技术、框架+客土喷射绿化技术、植生袋绿化技术、开沟钻孔客土绿化技术等。

与发达国家相比,新中国在生态修复技术上的研究与实践起步较晚,20世纪90年代以前一般多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等护坡方法。国内常见的边坡植被重建方法根据实施手段的不同,可分为点播法、铺挂法和喷播法。1989年,广东省水利水电科学研究所从香港引进1台喷播机,开始在华南地区进行液压喷播试验,开始了机械化的以植草为新型技术的坡面植被重建手段。自此,边坡植被重建机械喷播的技术开发与应用在借鉴国外相似技术的基础上飞速发展。短短数十年,国内可查的有关喷播类植被重建的技术名词有液压喷播、水力喷播、客土喷播、混喷快速绿化技术、喷播绿化技术、混喷植生技术(阶梯式植生带绿化工法)、喷混植草、植被混凝土、边坡生态种植基、喷植、三维植被网喷播植草、乳液喷播建植、TBS植被护坡、边坡植生基质生态防护、有机基材喷播绿化、植生基材喷射技术(PMS技术)等。其中,关于岩石边坡的植被重建技术,通过技术鉴定并获得科技进步奖项的有TBS植被护坡技术、植被混凝土生态防护技术、植生基材喷射技术(PMS技术)等,国内的应用也以这几种技术为主。虽然这