



刘瑛 高甲荣 / 著

土壤生物工程 技术在河流生态修复中的应用

本书由国际科技合作项目（2009DF A32490）资助出版

中国林业出版社



刘瑛 高甲荣 / 著

土壤生物工程技术在河流生态修复中的应用



中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤生物工程技术在河流生态修复中的应用 / 刘瑛, 高甲荣著. —北京: 中国林业出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5038-6819-1

I. ①土… II. ①刘… ②高… III. ①土壤生物学 - 应用 - 河流 - 生态环境 - 生态恢复 - 研究 IV. ①X171.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 262258 号

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)

电话 (010) 83229512

发行 新华书店北京发行所

印刷 北京卡乐富印刷有限公司

版次 2012 年 12 月第 1 版

印次 2012 年 12 月第 1 次

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 12.25

印数 1 ~ 1000 册

字数 250 千字

定价 45.00 元

前 言

自古以来，治河是治水的重要内容。随着经济社会的快速发展，一方面河道在保障经济生活和建设良好生态环境中的作用越来越大，另一方面由于人类活动的影响，与我们生活生产息息相关的河道功能退化、水质恶化，水多为患，水少为愁，水脏为忧，此类突出问题集中反映在河道。

传统的河溪治理方式主要是采用水利工程方法，使用大量的钢筋混凝土，强调安全性及耐久性，较少考虑生态因素。这对当地溪流生态产生冲击，如溪流栖息地岛屿化，洄游生物道路阻隔，栖息地单一化，深潭、湍流、溪流蜿蜒的风貌随之消失，护岸材质不利于滨岸水陆交界处的生物栖息，水温改变，泥沙搬运及流量改变，等等。这不仅破坏了物种多样性和生态多样性，而且影响了河溪的美学价值。

随着环境意识、生态观念的增强以及生活水平的提高，广大人民群众迫切要求整治河道、改善水环境，全社会和政府主管部门对河道治理也十分关注。学者们提出一些河流生态治理的概念和措施，如：近自然河溪治理、自然型护岸、多自然型河道治理、生态水工学、土壤生物工程学等等。这些技术或概念在基本思想上是一致的，都是在一定程度上对河流进行修复，使河流既满足人类的需要，又兼顾生态系统的健全。

目前,国内在河溪近自然治理方面的研究多处于理论探讨阶段,实践经验较少。因此,如何结合河溪的具体生态特点进行近自然治理,在保护生态环境的同时,兼顾地区的经济开发,促进社会、经济和谐发展,将是河溪近自然治理在很长一段时间内的研究热点,也是我国河溪近自然治理未来主要的发展趋势。

本书主要针对土壤生物工程河流生态修复技术展开研究与讨论。土壤生物工程是20世纪后期发展起来的河流生态修复的一种技术手段,由于它具有的生物属性和生态特征,使其不同于传统的土木工程。它把植物对坡面、河岸不稳定的影响与侵蚀过程联系起来,在防止坡面侵蚀的同时,还可以起到河流生态修复的作用,并逐渐促进河流的自我修复和更新,是解决河流生态退化的一个关键技术措施,在欧美等国家已经得到了广泛应用。目前,国内对土壤生物工程的研究刚刚起步。在当前我国河流生态系统退化严重的背景下,开展以土壤生物工程措施为基础的河流生态修复研究,达到建设一个稳定的河流地貌和生物群落多样性并可以自我调节的生态系统,对目前河流的生态恢复有很重要的意义。

全书共分为十章:第一章从宏观角度介绍了河流生态系统以及河流健康评价的内容;第二章从8个方面阐述了当前河流生态治理的研究概况,并对有利于生物栖息环境的生态工程进行了详细的介绍;第三章重点阐述土壤生物工程的基本原理和内涵,使读者对土壤生物工程技术有一个宏观上的认识;第四章对常用的土壤生物工程技术措施及施工工艺作有关的介绍;第五章为土壤生物工程示范区的概况介绍;第六章通过不同土壤生物工程技术措施在研究区的示范及其效果调查,探讨土壤生物工程技术在北京当地环境下的可行性;第七章从植物材料适宜性、根系生长特征、固土能力和植物生长特征与抗拉力之间的相关关系出发,对不同植物应用于土壤生物工程中的机理进行研究;第八章从植物力学角度出发,探讨北京地区适宜的土壤生物工程施工植物;第九章从减少坡面侵蚀效果、温湿度效果和防洪设计三个方面对土壤生物工程施工后的效果进行评价;第十章提出本书的研究结论和建议。

本书是作者在多年从事土壤生物工程研究、对已发表论文进行总结以及在野外进行相关调查取得研究成果的基础上完成的。笔者

所在的研究团队在土壤生物工程在河流生态修复的应用方面做了大量的工作。比如：在国际合作方面，和奥地利维也纳自然资源与应用生命科技大学的土壤生物工程所有长期的项目合作关系（2001年至今），每年就研究课题进行互访。一方面笔者多次参加国外的土壤生物工程施工工作和研究工作，在施工技术和理论方面获得了丰富的第一手材料，积累了许多知识和经验，这也为本书的顺利完成奠定了良好的基础；另一方面，国外的专家也参与国内的土壤生物工程施工工作，为示范区的顺利建设以及后期监测提供指导。在国内，通过与北京市水务局和北京市怀柔水务局的合作，在北京地区开展了一系列土壤生物工程的施工示范工作，取得了良好的效果。在土壤生物工程机理研究方面，设置了可做破坏性试验的实验基地，以方便对各种植物的生长特性及固土机理进行深入的调查和研究。从刚开始接触土壤生物工程、初期尝试把土壤生物工程技术引入北京地区，直至在掌握相关技术的基础上建立土壤生物工程示范区并对其机理的研究，每一过程都饱含笔者和研究团队的辛苦，炎炎烈日，风霜雨雪，大家虽苦尤乐。

本书在完成过程中，王玉杰教授、王礼先教授、朱金兆教授、周心澄教授、余新晓教授、朱清科教授、贺康宁教授、赵廷宁教授、丁国栋教授、齐实教授、杨海龙教授给予热情的帮助和指导，并提出了许多宝贵的意见。感谢北京市怀柔区水土保持工作站魏自刚站长、寇忠泰高级工程师、段红祥工程师等在试验设计、野外调查和数据分析中给予的支持和帮助。奥地利维也纳自然资源与应用生命科技大学的 Florin Florineth 教授、Hans Wolfgang Winemeister 教授、Hanspeter Rauch 博士、Stangl Rosemarie 博士、Walter Lammeranner 博士在研究中提供了许多有建设性的意见和建议；北京市水土保持工作站段淑怀高级工程师在资料收集给予了热情的帮助，在此一并表示感谢！同时，感谢研究团队王敏、王芳、高阳、冯泽深、陈子珊、吕晶、娄会品、王颖、顾岚、钱斌天、王越、张金瑞、崔强、杨麒麟、李柏等在研究工作中给予大力支持与帮助，感谢在外业调查和内业处理中参与研究工作的众多本科生。

本书面向的读者对象是水利工程、水土保持及城市规划专业的设计及科研人员、政府管理人员、高等院校相关的师生以及关注河

■ 前 言

流生态修复的社会各界人士。本书记录了在土壤生物工程技术应用于北京市河流生态修复方面开创性的工作，希望能有很好的参考价值，为土壤生物工程更好、更快、更为广泛地应用到河流生态修复或治理中起到抛砖引玉的作用。同时，缺点、错误在所难免，敬请读者批评指正。

著者
2012年8月

目 录

前 言

绪 论	1
0.1 研究背景与意义	1
0.2 问题的提出	2
0.3 研究内容与技术路线	3
第 1 章 河流生态系统及健康评价	7
1.1 河流生态系统	7
1.2 河流健康评价	14
第 2 章 河流生态治理及生物栖息环境生态工程	21
2.1 河流生态治理研究概况	21
2.2 生物栖息环境生态工程	28
第 3 章 土壤生物工程的内涵及研究进展	34
3.1 土壤生物工程的定义	34
3.2 土壤生物工程的功能	36
3.3 土壤生物工程施工材料	36
3.4 植物在土壤生物工程中的意义和作用	37
3.5 土壤生物工程施工方法的选择	42

3.6	土壤生物工程措施的管理和维护	42
3.7	土壤生物工程可服务期限	43
3.8	土壤生物工程与传统工程的区别	44
3.9	国外土壤生物工程技术研究进展	45
3.10	国内土壤生物工程技术研究进展	46
第4章	土壤生物工程技术及施工工艺	48
4.1	扦插 (live staking, cuttings)	49
4.2	扦插-抛石联合措施 (joint planting)	50
4.3	灌丛垫 (bushmattress)	51
4.4	梢捆 (fascines)	53
4.5	篱墙 (wattle fence)	55
4.6	层栽 (brush layer/brush layering)	56
4.7	植生原木挡土墙/植生格框挡土墙 (vegetated crib wall) ...	58
4.8	植生石笼墙 (vegetated gabions)	60
4.9	石质丁坝 (rock groyne)	61
4.10	梢捆丁坝 (fascine groyne)	62
4.11	河床石质阶梯 (ground ramp)	63
4.12	潜坝 (sills or weirs)	63
4.13	根桩 (root stock)	65
第5章	研究区概况及生态河道治理情况	66
5.1	研究区概况	66
5.2	怀柔区传统河流治理中存在的问题	68
5.3	近期怀柔区河流治理状况	69
第6章	土壤生物工程在研究区的示范及效果调查	73
6.1	示范点分布情况	73
6.2	研究方法	74
6.3	怀九河示范点	82
6.4	雁栖河示范点	85
6.5	琉璃河示范点	86
6.6	根系生长特征	89
6.7	讨 论	91
第7章	施工植物的适宜性及其固土力学机理研究	95
7.1	根系研究	95
7.2	研究方法	100

7.3	植物对环境适宜性分析	105
7.4	坡面根系分布	108
7.5	扦插植物垂直抗拉研究	110
7.6	幼龄旱柳拉力研究	123
7.7	四年生扦插金丝柳拉力研究	129
7.8	讨论	133
第 8 章	植物柔韧性研究	136
8.1	研究方法	137
8.2	荷载位移曲线	138
8.3	抗弯强度	140
8.4	弹性模量	141
8.5	讨 论	142
第 9 章	土壤生物工程效应评价	143
9.1	减少坡面侵蚀效果	143
9.2	温湿度效应	145
9.3	防洪设计	148
9.4	讨 论	158
第 10 章	结论与建议	161
10.1	结 论	161
10.2	建 议	163
参考文献	165
附图		
附图 I	白浮土堤实验区加拿大杨根系侧视图	179
附图 II	白浮土堤实验区荆条根系侧视图	180
附图 III	白浮土堤实验区金丝柳根系侧视图	181
附图 IV	白浮土堤实验区红皮柳根系侧视图	182
附图 V	白浮土堤实验区馒头柳根系侧视图	183
后 记	184



0.1 研究背景与意义

自古以来，治河是治水的重要内容。人们通过治导、疏浚和护岸等措施，对河流进行治理和控制，以期除患兴利，实现行洪除涝、取水利用、交通运输之目的。传统的河岸带保护措施和治理技术多采用浆砌石或干砌石、现浇混凝土、预制混凝土块体等结构形式。传统的河流治理工程在一定程度上起到立竿见影的作用，使河流看上去整洁、干净、漂亮，却产生了许多负面影响。比如河道治理后，径流速度加快，导致下游地区大量泥沙沉积。整齐划一的石砌护岸削弱了河床、河岸的自然特征和功能，使视觉美感减弱。垂直陡峭的河岸，快速流动的水流使得人们走在河边有一种畏惧感，河流的亲水性大大下降。硬化的河道破坏了河道两岸动植物的生存环境，两栖动物的生境走廊被切断，水生昆虫不能正常羽化。我国有近 2/3 的河流受到不同程度人类活动干扰，北京地区河流状况更令人担忧。随着经济社会的快速发展，一方面河道在保障经济生活和建设良好生态环境中的作用越来越大；另一方面由于人类活动的影响，与我们生活生产息息相关的河道功能退化、水质恶化。水多为患，水少为愁，水脏为忧。人民群众迫切要求整治河道、改善水环境，全社会和政府主管部门对河道治理十分关注。恢复河流的原貌并发

挥河流的生态功能是当前亟待解决和关注的重要问题之一。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的重点领域“生态脆弱区域生态系统功能的恢复重建”中确定了优先主题“建立不同类型生态系统功能恢复和持续改善的技术支持模式”，《林业科学和技术中长期发展规划》中重点发展领域包括“生态体系构建与退化生态系统修复”。河流系统是地球上多样性最丰富、变化最快、最为复杂的生境之一。目前，河流的退化已被公认是一个全球性的生态环境问题，受到国际社会的普遍关注，社会对退化河流生态系统的生态修复或自然修复的要求越来越迫切。2011年1月29日的中央一号文件《关于加快水利改革发展的决定》中提出要加快中小河流治理。

20世纪60年代后期，德国及瑞士等欧洲国家认识到传统的河流治理工程是导致河流生态系统退化的根本原因，并开始把生态学原理引入河流的治理工程当中，开展河流近自然恢复的试验研究。Seifert (1938) 提出近自然河流治理(near natural stream control)的概念，其基本理念是从维持生态系统平衡的观点出发，减轻人为活动对河流的干扰和胁迫、维持河流生境多样性、物种多样性及其河流生态系统平衡并逐渐恢复自然(高甲荣, 2002)。瑞士、德国等国家在20世纪80年代末提出了“自然型护岸”技术，日本在20世纪90年代初提出了“多自然型河道治理”技术，目前，许多国家则利用“土壤生物工程(soil bioengineering)”来对河流进行生态修复，如：美国阿拉斯加 Kenai 河护岸、加拿大 Jacques Cartier 公园河岸保护、英国约克郡戴尔斯三峰地区国家公园自然环境恢复和欧盟水体修复等项目都采用了该技术。

由于人类对河流的长期开发利用，已经形成了一个新的河流生态系统，而这个系统与原始的自然动态生态系统是不一致的。通过河流地貌及生态多样性的恢复，达到建设一个具有地貌多样性和生物群落多样性的动态稳定的、可以自我调节的河流系统(董哲仁, 2004)。人为的干扰导致河流退化，生态环境不断恶化，不仅表现在水质退化方面，也表现在河流系统结构与功能退化方面。

目前国内对河流恢复与重建的方法多集中在对河流水质的恢复，针对河流生态系统结构、功能的修复则所见不多。在当前以生态修复和保护的河流治理工程中，应当考虑如何发挥或重建自然河流的环境效应和多方面的生态功能，利用目前国际上普遍认可的土壤生物工程技术进行河流生态修复，并进行机理性的研究对于我国的河流生态修复工作具有重要意义。

0.2 问题的提出

河流不仅是可供开发的自然资源，更是地球生命系统的载体，因此

不仅要关注河流的资源功能，还要关注河流的生态功能。北京城市化发展迅速，河流系统遭受到不合理开发建设的强烈干扰，各种自然属性也在所难免地遭到不同程度的破坏，从而影响到河流生态服务功能的正常发挥。水资源已经成为制约北京经济快速发展的瓶颈，保护和利用好北京地区的河流资源，不仅对北京地区生态环境的保护有着重要的意义，其对北京社会经济的稳定发展也有着不可忽视的作用。河流生态系统的退化得到了政府和学者的广泛关注，在国务院批复《北京城市总体规划（2004~2020年）》中，强调了河流生态修复的重要性，北京市政府已开始实施主要河道水环境整治和河湖水系整治。如何更好地对退化的河流生态系统进行生态修复成为当前的研究重点。

国内外已展开对生态型护岸技术的研究，并提出多种结构形式的生态型护岸技术，其中土壤生物工程护岸技术也引起了广泛的关注。土壤生物工程是传统工程有益和必需的补充方式(Zeh, 2007)。土壤生物工程技术措施通过植物和河流岸坡的相互作用机制在防止坡面侵蚀的同时，还可以起到河流生态修复的作用，并逐渐促进河流的自我修复和更新，是解决河流生态退化的一个关键技术措施，在欧美等国家已经得到了广泛应用。目前，国内对土壤生物工程的研究刚刚起步。在当前我国河岸带生态系统退化严重的背景下，北京市河流退化中也存在许多亟待解决的问题，开展以土壤生物工程措施为基础的河岸带生态修复研究，达到建设一个稳定的河流地貌和生物群落多样性并可以自我调节的生态系统，对目前河流的生态恢复有很重要的意义。

土壤生物工程利用植物的枝条或根等组织部分进行无性繁殖，达到修复河岸的目的，施工的前提条件是选择恰当的施工植物材料。在北京地区缺乏适于土壤生物工程施工的植物材料的知识。土壤生物工程在北京地区开展，以下问题亟待解决。首先是适宜树种的问题，哪些树木可应用于北京地区的河流生态修复？哪些树种能够形成不定根？哪些是适宜当地水文地貌条件和快速发展的先锋树种？其次是施工的问题，哪些土壤生物工程措施适用于北京地区河流护岸的施工？在当地气候条件、水情、地质和土壤学情况下，如何进行土壤生物工程施工和维护？

0.3 研究内容与技术路线

0.3.1 研究目标

针对目前退化河流生态系统恢复的需求和北京地区河流治理中亟待解决的关键问题，从生态系统结构决定功能的原理出发，在北京地区开展土壤生物工程措施试验。通过对植物生长特征的监测调查、不同植物材料的固土力学机理以及土壤生物工程环境效应的研究，探讨适宜于北

京地区河岸带土壤生物工程施的植物材料，以及土壤生物工程技术在北京地区的适宜性。研究结果为土壤生物工程的设计、施工和管理提供必要的理论依据，为我国北方地区河岸带生态修复提供理论依据和技术支持。

0.3.2 研究内容

本研究主要围绕以下内容展开：

(1) 适宜退化河岸带土壤生物工程措施生态修复植物材料研究

对试验点各种植物材料生长特征和根系生长特征进行定点观测，分析不同植物材料的差异性和显著性，筛选适宜于土壤生物工程施的植物材料。

通过植物柔韧性的分析，从力学角度出发判断植物应用于土壤生物工程河岸生态修复的适宜性。

(2) 植物材料固土力学机理研究

对不同植物材料进行现场抗拉试验，比较不同植物的固土能力，并建立植物生态因子和最大拉力之间的相关关系，探讨各项因子对拉力的贡献。

(3) 土壤生物工程技术适宜性分析

通过对三处河岸生态修复示范区六种土壤生物工程技术措施下不同的植物枝条和根系生长效果的监测研究，探讨土壤生物工程在北京地区开展的可行性。

(4) 土壤生物工程环境效应分析

在土壤生物工程示范区，通过降雨模拟试验探讨不同土壤生物工程配置模式防止岸坡侵蚀的效果。

通过护岸区温湿度的监测，探讨了生态护岸对温湿度和人体舒适度的影响。

基于目前河流生态修复工程实践中面临的新问题，从防洪的角度出发，分析土壤生物工程治理措施对河流水文的影响，为土壤生物工程的设计、施工和管理提供必要的理论依据。

0.3.3 研究方法与技术路线

课题的研究方法及技术路线如图 0-1 所示。

(1) 植物适宜性研究

为探讨和比较不同植物在当地环境下的生长特征，从而判断其在北京地区土壤生物施工中的适应性，在白浮供试区、怀九河、雁栖河与琉璃河供试区对完工后不同时期的植物新生枝条高度和基径进行调查，成活率的调查均在最后一期进行。

(2) 根系分布特征研究

在白浮苗圃，为了探讨不同植物根系在坡面分布特征的不同，采用

水冲法对白浮供试区五种扦插植物进行现场挖掘；在三个土壤生物工程示范区，采用现场挖掘法对不同土壤生物工程技术的植物的根系进行调查研究。

(3) 固土机理研究

采用现场抗拉试验来对不同植物进行实验，通过最大抗拉力来判断根系的固土能力，通过最大抗拉力和植物生长的生态特征因子进行回归分析来探讨各因子对固土能力的贡献。在白浮供试区对五种扦插植物采用垂直抗拉实验，比较它们在完工 5 个月后的固土能力。对怀九河河岸带自然生长的旱柳采用垂直抗拉和水平抗拉实验，来探讨旱柳的固土能力和抵抗洪水的能力。对 4 年生金丝柳扦插植物进行垂直抗拉和水平抗拉实验，探讨金丝柳的固土能力和抵抗洪水的能力。

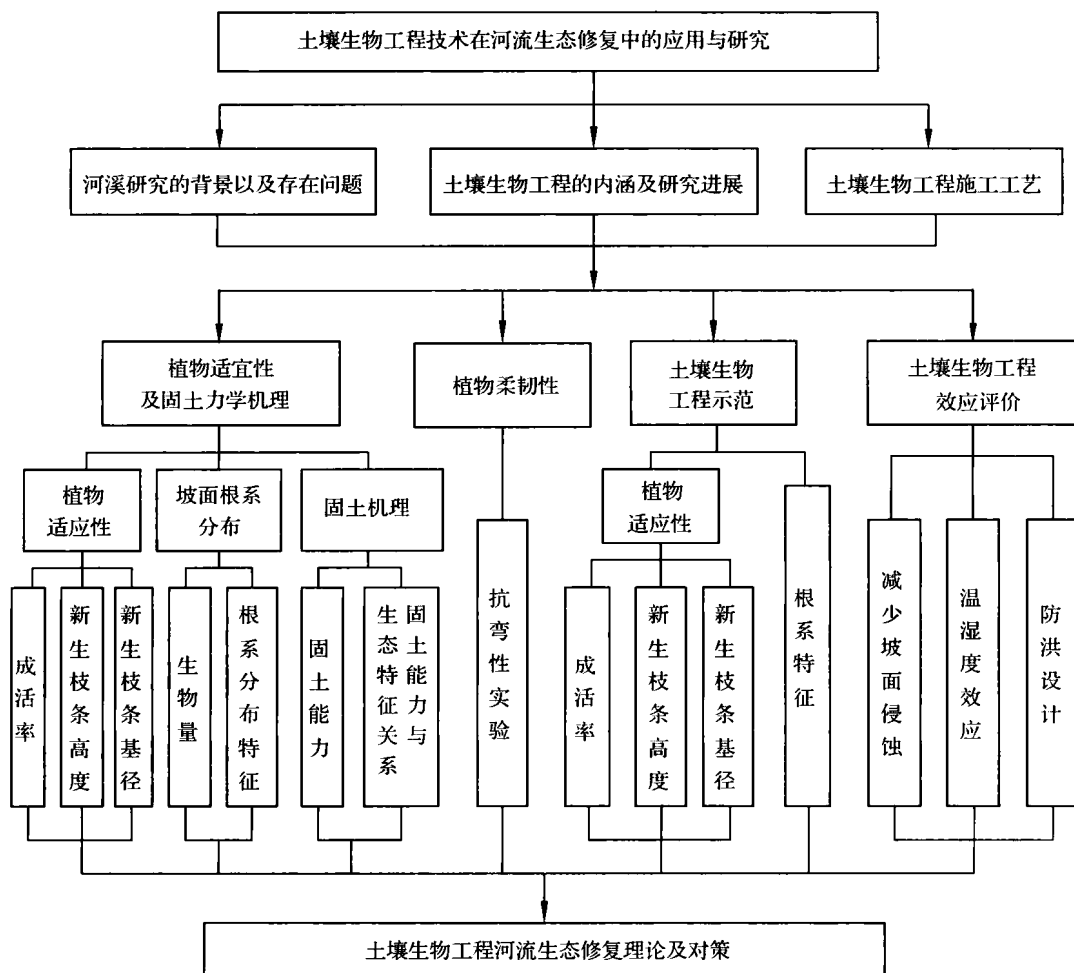


图 0-1 研究技术路线图

(4) 枝条柔韧性研究

利用电子万能试验机对“1~1.5cm”、“1.5~2cm”、“2~2.5cm”和“2.5~3cm”四个径级的金丝柳、旱柳、紫穗槐和荆条开展三点抗弯实验。

(5) 土壤生物工程水土保持效果研究

在琉璃河供试区，对扦插、梢捆、灌丛垫、埋根四种技术措施进行人工降雨试验，来探讨不同土壤生物工程技术措施对岸坡径流延缓和减少泥沙的效果。在怀九河供试区，对篱墙和扦插联合措施进行人工降雨试验，探讨这种措施对延缓岸坡径流和减少泥沙的效果。

(6) 温湿度效应

利用 WSD-1 温湿度感应仪对两种土壤生物工程生态护岸进行一周的监测。分析不同监测点温湿度的变化，并计算各测点的人体舒适度。

(7) 土壤生物工程水文模拟

此部分实验在奥地利维也纳丽森河完成。利用 HEC-RAS 软件对三种河道治理情况下百年一遇河流洪水位及洪水安全进行模拟，为我国的土壤生物工程施工工作提供理论指导。



第 1 章

河流生态系统及健康评价

河流是人类活动最密集的地方，也是野生动植物集中分布的地段（吴兆录等，2001）。由于其特殊的地理位置和多样的功能，河流生态系统已成为各行业如布设城镇、工业发展、物种保护等争夺的对象。国际上早在 20 世纪 50 年代末就开始将河流看作一个生态系统加以研究（陈吉泉，1996）。河流生态修复必须建立在对河流生态系统的正确认识上，本章主要对河流生态系统以及河流健康评价等进行简要介绍。

1.1 河流生态系统

河流是一个线性系统，河流生态系统从源头延伸到河口，包括河岸带、河道和河岸相关的地下水、洪泛区、湿地、河口以及依靠淡水输入的近海环境。

河流生态系统是一个开放式系统，它与周围其他生态系统之间存在着频繁的物流、能流以及信息流交换。其中与陆地生态系统的相互作用最为显著，水体中很多生物的物质和能量源都来自于陆地生态系统。如河流中许多初生物以碎屑为食，其食物来源于由陆地植被冲入或落入的有机物质。护岸以及河堤绿化带将水生与陆生生态系统两者紧密地联系起来，它是河流生态系统与陆地生态系统进行物质、能量、信息交换的一个重要过渡带，成为两者之间相互作用的重要纽带和桥梁（汪洋等，