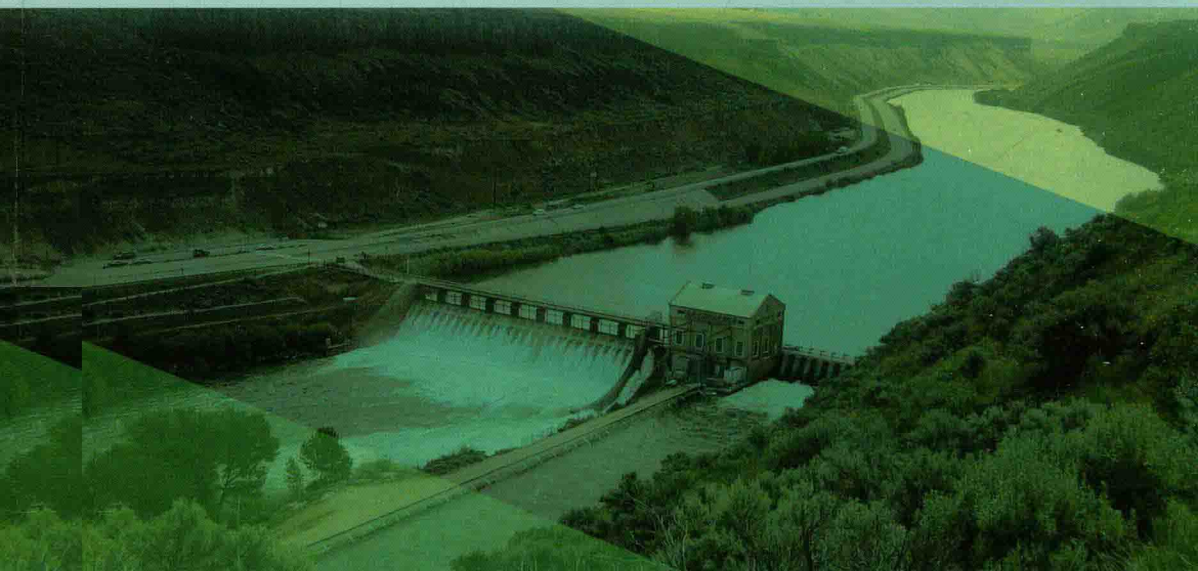


水电工程扰动区植被 生态修复技术研究

许文年 夏 栋 赵冰琴 著
夏振尧 刘大翔 周明涛



科学出版社

水电工程扰动区植被 生态修复技术研究

许文年 夏 栋 赵冰琴 著
夏振尧 刘大翔 周明涛

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍水电工程扰动区植被生态修复技术,主要阐述了水电工程施工对区域环境的影响及植被生态修复理论、植被生态修复技术研究进展等。本书以向家坝水电工程为研究对象,全面系统地介绍了水电工程扰动区植被生态修复的程序:立地条件调查、生态修复规划、物种筛选与配置、生境构筑模式及生态修复植被群落与土壤化学生物特征监测与评价。在此基础上,提出了植被生态修复效益评价方法,对典型样地的植被生态修复效果进行了评价、调控和再评价。

本书可供从事边坡生态防护、生态修复工程及水电工程设计、规划、管理相关科研人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电工程扰动区植被生态修复技术研究/许文年等著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053681-5

I. ①水… II. ①许… III. ①水利水电工程—扰动—植被—生态恢复—研究 IV. ①TV②X171.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第129992号

责任编辑:范运年/责任校对:桂伟利

责任印制:张倩/封面设计:铭轩堂

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:325 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国水电工程建设具有广阔的发展前景，尤其是一些大型水电站的兴建，保证了区域能源可持续发展，促进了地区社会经济全面发展。但在工程建设过程中，工程施工、工程建库蓄水和移民安置活动等不可避免地改变地表结构、破坏植被，使一些原有动植物栖息地消失，在一定程度上导致了工程扰动区内出现植物群落结构破坏、生物多样性降低、水土保持功能丧失等一系列的生态环境问题，严重影响工程所在地及周边的环境、景观及可持续发展，成为制约水电工程建设的重要因素。如何在保护生态环境的基础上实现水电工程的有序开发，将是未来较长一段时间水电工程相关领域关注的重点课题。

20 世纪 80 年代以来，党和国家就把“保护环境”作为基本国策，大力推进生态环境保护。特别是党的十八大以来，党中央高度重视生态文明建设，把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，努力建设美丽中国。2016 年 1 月，习近平总书记提出，长江经济带发展必须坚持生态优先、绿色发展，把生态环境保护放在优先地位，共抓大保护，不搞大开发。作为清洁能源的重要组成部分，水电的持续开发利用已成全球共识。2016 年 2 月，陈雷部长在水利部国家能源局协同推进水利和能源发展重点工作座谈会提出，坚持绿色发展，加快水能资源开发利用是我国推进水利和能源发展重点工作之一。

水利水电工程施工扰动中形成的开挖边坡较难恢复，施工过程对区域内生态环境产生的扰动和破坏也是后期扰动的起因，对施工扰动中开挖边坡的生态修复是水电工程扰动区生态修复的核心所在，大量的研究也集中在这一部分。基于这些原因，“开发建设严重扰动区植被快速营造模式与技术”和“不同类型区生态自我恢复的生物学基础与促进恢复技术”被列为全国水土保持科技发展规划中的关键技术。“水利水电工程岩质陡边坡生境构筑与植被恢复技术”正是根据全国水土保持科技发展规划，针对水利水电能源资源开发过程中形成的岩质陡边坡这类开发建设严重扰动区而研发形成的技术成果，也是本书中所要重点阐述的内容。

2005 年以来，本研究团队以植被混凝土生态防护技术为基础，依托“十一五”、“十二五”国家科技支撑计划和国家自然科学基金等项目，结合在向家坝等 38 座大中型水电工程的生态修复应用，多学科交叉融合，系统研究水电工程扰动陡边坡生境构筑与基材活化、物种筛选与群落构建、生态评价与调控，创立了陡边坡生态修复技术体系，实现了陡边坡工程加固与生态防护的一体化。面对当前水

电工程扰动区生态修复的重要挑战，我们凝练前期技术研究当中的科学问题，明确后期的发展目标和发展方向，总结编著了本书。书中所述也是一家之言，以期抛砖引玉，激发更多的本领域科学家的科研创造能力，带来更多更好的新型水电工程扰动区生态修复技术。

本书共 9 章：第 1 章总结了水电工程施工对区域环境的影响以及开展水电工程扰动区植被生态修复的意义，重点介绍了向家坝水电工程概况；第 2 章从物种选配原理、肥料学理论及植被群落调控原理等方面阐述了植被生态修复的理论基础；第 3 章总结了植被生态修复技术发展历程；第 4 章对向家坝水电工程扰动区进行了植被生态修复规划；第 5 章从植被生态修复物种筛选与配置出发，介绍了先锋物种筛选方法和物种配置模式；第 6 章针对水电工程扰动区不同生境条件，提出了相应生境构筑技术和生境构筑模式；第 7 章至第 9 章重点关注水电工程扰动区生态修复后植被群落和土壤化学生物特征监测与评价，提出了植被生态修复效益评价方法，建立了植被生态修复工程评价指标体系，并以向家坝水电工程扰动区典型样地为例，对其进行了植被生态修复效益评价、调控和再评价。

本书中的研究工作和实验得到了陈芳清教授、王建柱教授、马树清教高、丁瑜教授、刘刚教授、贾国梅教授和孙超、曾旭、侯燕梅、许阳、赵娟、祝顺波、熊诗源、牛海波、赵自超、陈静、吴彬等硕士研究生的大力支持；杨悦舒、杨森、杜祥运、李铭怡、刘黎明、薛海龙、高家祯、张伦、姚小月、李博、张琳瑶、夏露、张恒、李纪滕、熊峰、童标、秦建坤、刘琦、潘婵娟、程虎等硕士研究生也做了大量工作，在此一并表示衷心感谢。

本书的出版得到了三峡大学土木与建筑学院土木工程学科的大力支持，同时得到了国家自然科学基金重点项目“复杂条件下库岸边坡变形破坏机理及防护（51439003）”、国家自然科学基金“植被混凝土生态防护工程岩面—基材—植被养分循环研究（51678348）”及湖北省科技计划重点项目“边坡生态防护持续性限制克服的关键技术研究（2016CFA085）”等项目的共同资助。

水电工程扰动区植被生态修复技术涉及恢复生态学、岩土力学、水土保持学、基础生态学、生态工程学、土壤学、植物学和数理统计学等多学科领域。由于作者知识水平和研究时间的限制，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请各位专家、学者、同行及对本书感兴趣的读者批评指正。

作 者

2016 年 12 月于宜昌

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水电工程施工对区域环境的影响	2
1.1.1 气候气象	2
1.1.2 环境地质	3
1.1.3 土壤环境	3
1.1.4 土地利用方式	4
1.1.5 陆生动物	4
1.1.6 陆生植被	5
1.2 水电工程扰动区植被生态修复意义	5
1.2.1 改善扰动区水文环境	5
1.2.2 改善扰动区土壤性质	6
1.2.3 增加扰动区生物多样性	6
1.2.4 提高扰动区边坡稳定性	7
1.3 向家坝水电工程概况	8
1.3.1 土壤	8
1.3.2 气候	10
1.3.3 水分	10
1.3.4 植被	14
1.3.5 地质	15
第 2 章 植被生态修复理论	18
2.1 植被生态修复基本原理	18
2.2 物种选配原理	20
2.2.1 物种筛选原则	20
2.2.2 物种配置原则	22
2.2.3 植被群落设计原理	24
2.3 肥料学理论	25
2.3.1 植物所需的基本营养元素	25
2.3.2 土壤微生物	27
2.3.3 肥料使用的基本原理	28
2.3.4 肥力评价	30

2.4 植被群落调控原理	30
2.4.1 自然调控	31
2.4.2 人工调控	31
第3章 植被生态修复技术发展历程	39
3.1 植被生态修复技术	39
3.1.1 国外研究进展	39
3.1.2 国内研究进展	41
3.2 基材特性	42
3.3 水保效应	43
3.4 护坡效应	44
3.5 生态效应	46
3.5.1 植被群落演替特征	46
3.5.2 土壤养分变化规律	48
3.6 植被生态修复技术发展趋势	49
3.6.1 工程防护与植被防护的有机结合	49
3.6.2 景观效果设计	50
3.6.3 植被护坡的区域性	50
3.6.4 优势植被群落品种选育及组合应用	50
3.6.5 岩质边坡植被生态修复工程原理的定量化研究及深入	51
3.6.6 岩质边坡植被生态修复工程效果评价及预测信息系统开发	51
第4章 水电工程扰动区植被生态修复规划	52
4.1 环境因子分析	53
4.2 生态环境监测	55
4.2.1 水体监测	55
4.2.2 大气监测	57
4.2.3 噪声监测	58
4.2.4 植被监测	59
4.2.5 监测结果	60
4.3 生态环境评价	61
4.3.1 数据预处理	61
4.3.2 评价指标权重确定	62
4.3.3 评价结果	63
4.4 植被生态修复目标	67
4.4.1 修复区划	67
4.4.2 区域目标	68
第5章 水电工程扰动区物种筛选与配置	70

5.1	物种选配步骤	70
5.2	先锋物种筛选	71
5.2.1	先锋物种介绍	72
5.2.2	先锋物种生态特性	78
5.2.3	筛选结果	103
5.3	物种配置模式	104
第 6 章	水电工程扰动区生境构筑	105
6.1	生境条件分析	105
6.2	生境构筑方式	106
6.3	生境构筑常用技术	108
6.3.1	植被混凝土生态防护技术	109
6.3.2	防冲刷基材生态护坡技术	114
6.3.3	口型坑生境构筑方法	115
6.3.4	植生袋灌木生境构筑方法	117
6.3.5	厚层基材喷播技术	119
6.3.6	客土喷播技术	121
6.3.7	覆土植生技术	122
6.3.8	框格梁填土护坡技术	124
6.4	生境构筑模式	126
6.4.1	岩质边坡的生境构筑	126
6.4.2	土质边坡的生境构筑	127
6.4.3	堆积边坡的生境构筑	128
6.4.4	工程防护与生态防护一体化模式	128
第 7 章	生态修复植被群落监测与评价	131
7.1	植被群落监测	131
7.1.1	样地选择	131
7.1.2	植被群落调查	132
7.1.3	植被群落计算指标及测度方法	132
7.1.4	植被群落监测结果	136
7.2	优势种群分析	142
7.2.1	研究对象	142
7.2.2	计算指标及测度方法	142
7.2.3	优势种群分析结果	145
7.3	修复植被群落稳定性评价	154
7.3.1	研究方法	154
7.3.2	研究结果	156

第 8 章 生态修复土壤化学生物特征监测与评价	161
8.1 土壤养分指标监测	163
8.1.1 养分指标	163
8.1.2 土壤养分监测结果	164
8.1.3 土壤肥力综合评价	171
8.2 土壤酶活性指标监测	174
8.2.1 酶活性指标	174
8.2.2 土壤酶活性监测结果	175
8.2.3 土壤酶活性评价	180
8.3 土壤养分指标与酶活性相关性分析	181
第 9 章 植被修复效益评价与调控	185
9.1 植被修复效益评价方法	185
9.1.1 常用评价方法简介	186
9.1.2 层次分析法基本原理及基本步骤	187
9.2 植被修复工程评价指标体系	189
9.2.1 指标选取原则	189
9.2.2 评价指标	190
9.2.3 指标权重	192
9.2.4 评价对象数据值	192
9.2.5 指标上下限	194
9.3 评价与生态调控实例	194
9.3.1 框格梁填土护坡技术样地	194
9.3.2 覆土植生技术样地	196
9.3.3 植被混凝土生态防护技术样地	197
9.3.4 厚层基材喷播技术样地	199
9.3.5 调控成效	200
参考文献	202
附录 I 向家坝水电工程扰动区植被生态修复边坡不同时期群落物种组成及重要值	211
附录 II 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范	218
附录 A 基本资料调查内容及记录格式	234
附录 B 施工分项验收单	238
附录 C 主要材料检验内容及记录格式	241
附录 D 植被混凝土检验内容及记录格式	246

第1章 绪 论

随着社会的发展和生活水平的不断提高,人类对能源的需求也持续增长,能源短缺成为大部分国家社会和经济发展的瓶颈,而水电能源作为清洁和可再生的能源,是煤炭、石油等矿物质能源较好的替代品。

“十一五”以来,越来越多的水电站建成投产,尤其是一些大型水电站的兴建,保证了区域能源可持续发展,促进了地区社会经济全面发展。但随时间的推移,水电工程对生态环境的负面影响逐渐暴露。水电工程的主要生态环境问题有:工程施工、移民安置期间因平整、占压、开挖、新开耕地和改田改土等活动对地表植被造成破坏和引起新的水土流失;工程建库蓄水淹没一定数量的原有植被,使一些动植物栖息地消失;一些工程还可能会涉及自然保护区、风景名胜区和水源保护区等生态敏感区等。我国水电工程建设具有广阔的发展前景,但水电工程对生态环境的影响亦将成为制约水电工程建设的重要因素。如何在保护生态环境的基础上实现水电工程的有序开发,将是未来较长一段时间内水电工程相关领域关注的重点课题。

水电工程建设过程中,大规模的工程活动破坏地表结构和生态系统的空间连续性,对周围的环境产生干扰与影响,使植被大量破坏,次生裸地伴随出现,导致生物多样性降低、水源涵养能力下降、水土保持功能降低、水质恶化、气候改变和地质灾害频发等一系列问题,生态系统的生态功能发生根本性改变,产生这类问题的区域被称为水电工程扰动区。水电工程施工阶段和使用阶段对生态环境造成的影响不同,这种不同不仅体现在扰动时效上,也体现在扰动范围上。

水电工程施工阶段大量的工程作业及伴随产生的噪声、扬尘、废水及施工垃圾等,会对施工场地及附近区域造成影响,称为施工扰动。施工扰动具有短时性,一旦工程竣工,这种扰动就会停止,故又称为暂时性扰动。水电工程建成后对坝区所在地的水文、地质、气候、水体和生物带来影响,称为后期扰动。后期扰动的扰动范围往往会涉及坝区所在的整个地区,这种扰动具有长期性和持续性,故又称为持续性扰动。噪声、扬尘等施工扰动随工程竣工而停止,施工过程中采取相应的施工现场环境保护措施。施工扰动中形成的开挖边坡较难恢复,施工过程对区域内生态环境产生的扰动和破坏也是后期扰动的起因,对施工扰动中开挖边坡的生态修复是水电工程扰动区生态修复的核心所在,大量的研究也集中在这一部分的生态修复上。

本书所述水电工程扰动区植被生态修复技术研究也是针对施工扰动中开挖边坡。以向家坝水电工程扰动区为研究对象,以恢复生态学原理与技术为指导,采用岩土力学、水土保持学、基础生态学、生态工程学、土壤学、植物学和数理统

计学等多学科交叉的研究方法,通过实地调查与资料分析,我们对向家坝水电工程扰动区进行植被生态修复规划,筛选出植被生态修复适宜物种及其配置模式;针对不同工程扰动区特点,因地制宜选择合适的植被生态修复技术;通过长期的植被群落和土壤化学生物特征监测,对植被生态修复工程群落稳定性和土壤肥力进行评价;利用植被修复工程评价指标体系,对植被修复效益开展定量化评价,继而开展有针对性的人工调控,以实现植被生态修复可持续发展。

1.1 水电工程施工对区域环境的影响

水电工程施工对工程区域环境影响和破坏不可避免。水电工程扰动区陆生生态所受到的主要负面影响体现在以下几方面(曹永强等,2005):施工、移民安置期间道路开通、大坝修建的基底清理和土石方采掘、新开耕地、改田改土等人为活动占用和损毁自然植被及土地碾压占用引起水土流失;清除植被、工程建库蓄水造成生物资源和生物群落的淹没损失,库岸浸没区由原来的陆生生态环境向水生生态环境的转变;工程的建设及运营破坏草地、林地,使植物资源量减少;同时,工程建设不仅破坏原有边坡植被,还会改变坡地的地形与结构,形成大量新的边坡,使得坡地稳定性下降,水土流失加剧。根据《环境影响评价技术导则水利水电工程》(HJ/T88-2003),水电工程对区域环境的影响一般从气候气象、环境地质、土壤环境、土地利用方式、陆生动物和陆生植被等方面进行评价。

1.1.1 气候气象

一般情况下,地区性气候状况受大气环流所控制,但水电工程的修建使原先的陆地变成了水体或湿地,局部地表空气变得较湿润,对局部小气候会产生一定影响,主要表现在对气温、降雨、风和雾等气象因子的影响。

1. 气温和湿度

水库对库区气温有一定影响,但影响范围不大。当水库建成后,库区水面面积明显扩大,与大气间的能量交换方式和强度均发生变化,库区年平均气温略有升高,逆温天气将减少。同时库区建成蓄水后,由于水面面积扩大,附近地区空气的湿度也随之有所增加,水体对附近陆地湿度的影响随离水体距离的增大而减小。

2. 蒸发和降水量

水库建成蓄水后,太阳的照射使蒸发量有所增加,相应的降雨量也有所增加。对于半干旱地区,水汽是降水的主要因子,而水库水体能为空气提供大量的水汽因子,因而水库有增加降水的效应。由于水库建造方式的不同,对该地区的降雨

分布的影响有很大不同；一般来说，地势高的迎风面降雨增加，而背风面降雨则减少。降雨时间的分布也会改变；对于南方大型水库，夏季水面温度低于气温，气层稳定，大气对流减弱，降雨量减少；但冬季水面较暖，大气对流作用增强，降雨量增加。一般来说，水库库容越大，对区域小气候的影响越大。

3. 风速

水库建成蓄水后，由水库建成前的地面障碍物变成平滑的水面，当风吹过，所受摩擦减小，相应的风速增加。对于建在河谷处的水库来说，水库蓄水后水位升高，使河底变宽，河谷宽深比增大。当风向与河谷走向接近平行时，风速比建库前有所减弱；当风向与河谷交角较大时，风速比建库前增加。这对改善农作物生长和居民的通风条件是有利的，但风速过大时，通航和周围建筑物会受到不利影响。

4. 降雾天数和无霜期

水库建成后，水库的热效应使气温的日较差变小，极端高温和极端低温减少，年无霜期变长，霜冻减少，强度减弱。在大面积水库水体附近，地面和水面上空的水汽丰富，相对湿度大，易造成雾的生成。但如果水面风速加大，没有冷却过程出现，气温达不到冷却温度，也不易成雾。

1.1.2 环境地质

大型水电工程建设过程中，若规划不当可能破坏当地地质条件的稳定性，库区蓄水后可能会有发生一系列地质灾害的风险，包括地震、坍塌、滑坡等(曹永强等，2005)。产生这些地质灾害的主要原因在于水库蓄水后增加了地壳应力，水逐渐渗入地底断层中，导致断层之间的润滑程度增加，其中空隙水压力也随之增加；空隙水压力的增加又会促进断层裂隙的增加，破坏岩体的整体性和稳定性；而水库蓄水后水位逐渐升高，岸坡岩层、土体的抗剪强度降低，导致不稳定岩体容易剥落，造成塌方、滑坡等灾害；同时，水库建成后随着使用时间的增加，底部和四周可能会逐渐产生渗漏，造成周围的水文条件发生改变；若水库为污水库或尾水库，则渗漏易造成周围地区和地下水体的污染。

水电工程规划实施后，水位涨落频繁使河岸带土地受到频繁干扰。尤其河岸边稀树灌木草丛植被较多，这种植被类型本身处于不稳定的演替状态，易产生生态脆弱带，可能诱发或加剧重力侵蚀，并进一步诱发地质灾害。

1.1.3 土壤环境

土壤是植物生长的基础。他提供了植物生长所必需的水分和营养，是生态系统中物质与能量交换的重要场所。在水电工程施工期间，可能引起土壤结构、性

质以及土壤中水、气、热、生物种群与活动的变化。水电工程对土壤影响可分为有利和不利两个方面。

有利的方面是通过筑坝建库、疏通水道等措施,可以保护农田免受淹没、冲刷等灾害,也可利用水库对农田进行适量灌溉,补充土壤水分和改善土壤养分,使农作物获得良好的生长环境。另一方面,水库也可以改善当地的小气候和水文条件,改变区域水循环,防止土壤遭到侵蚀和不良冲刷。建库筑坝过程中,通过等高截流、控制内外河水位和地下水位、明沟和暗管排水、抽排、井排以及控制灌溉引水等措施使水循环功能增强,可以排除土壤中对植物生长发育有害的多余水分,使植物根系生长环境更为健康,更能广泛地吸收土壤中的养分;同时促进土壤养分分解,改良土壤结构和肥力等特征,促进植被更好生长,使植被的固土护坡效能增强,减少表土冲蚀。

但是在工程建设过程中,运输车辆等大型机械对地表的碾压、施工开挖、地表清理及施工占地等活动,使土壤的自然富集过程受阻,对土壤的结构、肥力及物理性质等将产生一定的影响。大范围的开挖将使植被等自然生态系统遭到破坏,水土保持能力降低,地表土壤和岩体结构疏松,地表径流形态发生改变,土地可蚀性增强,引起水土流失;弃土弃渣场若不合理安置也将引起新的水土流失。工程运行期对土壤环境的影响主要为工程永久占地对土壤的占压。

水库淹没使淹没区域土壤水分条件变化,从而影响土壤的演化过程,对土壤环境造成影响(熊芸, 2005)。水库蓄水后会造成库区土地浸没、沼泽化和盐碱化。在浸没区,土壤中的通气条件差,造成土壤中的微生物活动减少,肥力下降,影响作物的生长。地表水位上升引起地下水位上升,过分湿润致使植物根系衰败,呼吸困难。库岸渗漏补给地下水经毛细管作用升至地表,在强烈蒸发作用下使水中盐分浓集于地表,造成盐碱化,土壤溶液渗透压过高,可引起植物生理干旱。

1.1.4 土地利用方式

水电工程的施工过程中,工程占地、淹没和移民安置等工程活动必然对土地利用方式、格局和性质产生影响,其中影响最大的为工程占地。一般将水电工程占地分为永久性占地和临时性占地两种类型。永久占地包括枢纽区、上水库淹没区和施工道路占地,临时占地主要有石料场、施工道路、施工生产生活区和弃渣场占地。水电工程施工占用耕地、林地、草地及未利用地,使工程区原有土地利用结构发生变化,生态系统服务功能损失,如多样性、保持水土、为其他野生动植物提供栖息环境,以及为当地居民提供林副产品等功能(陈晓年等, 2010)。

1.1.5 陆生动物

对陆生动物而言,水库建成后蓄水会淹没其原有的生活环境栖息地,施工活

动如表土开挖、施工占地等也会直接破坏动物的栖息地,导致动物取食环境恶化,生存空间减小。同时施工期间的机械、爆破等噪声会惊扰动物,水库的大面积水域也会导致周边湿度升高,破坏了栖息于此区域的鸟、兽等动物的生活环境(王英,2007)。扰动区内动物将被迫外迁,寻找新的栖息场所,使动物群落的结构发生变化,对区内动物生存、繁衍产生负面影响,进而有可能导致某些动物的灭绝。

但是对于部分水电工程来说,由于其环境的特殊性,水电工程对陆生部分动物的影响可能并不大,开发后形成的人工水面和丰富的水生饵料反而会吸引更多的水禽来此栖息越冬。虽然施工期噪声可能对一些动物活动产生轻微影响,但不影响它们的栖息地,建设结束后,这些影响也随之消失。所以水电工程施工前,充分了解区域内动物的种类、分布、习性等,进行合理施工布置和强度控制,可有效减轻水电工程施工对区域内陆生动物的扰动。

1.1.6 陆生植被

水电工程建设过程中,运输车辆对地表的碾压、施工开挖、地表清理及施工占地等活动对植被的影响主要体现在植被类型、植被数量、生物量、植被的可恢复性及生态系统等方面。工程的建设会占用周边的林地、草地或耕地,砍伐树木或淹没植被,使扰动区植被类型和数量大幅降低。水库蓄水直接淹没陆地,产生长期不可逆影响,陆生植被生长环境消失,物种数量锐减,植物的群落结构必将改变(黄海涛,2014)。同时,水库蓄水导致水体面积增加,会改变库区气候、土壤环境等,会使区域内植被类型、分布范围发生变化,有可能导致某些植物的消失或增加,特别是,库岸的增加会使耐短期渍水特性的物种在数量上有所增加。

1.2 水电工程扰动区植被生态修复意义

水电工程扰动区的植被重建是对水电工程扰动区生态的有效补偿手段。植被作为生态系统的重要组成部分,是水电工程扰动区生态系统中物质循环与能量流动的中枢,其好坏直接影响区域生态系统的稳定程度和发展方向。通过对水电工程扰动区进行植被生态修复,在工程扰动区构建出一个具有自生长能力的功能系统具有重要意义,可达到改善扰动区水文环境和土壤性质、维持生物多样性和稳固边坡的目的。

1.2.1 改善扰动区水文环境

植被水文效益是植被生态系统的重要功能。由于植被的截留、拦蓄作用,植被不仅可以涵养水源、保持水土,而且还可以减少地表径流、变地表水为地下水,也可以消洪补枯,使降雨在土壤中以潜流的形式汇入河道,形成稳定而平缓的水

资源,满足工农业生产的需要(温仲明等,2005)。植被通过根系吸水和气孔蒸腾对水文过程直接作用,同时也通过其垂直方向的冠层结构和水平方向的群落分布对降雨、下渗、坡面产汇流以及蒸发过程产生间接影响,形成了植被对水文过程的复杂作用(杨大文等,2010)。根系的存在使土壤中大孔隙增多,土壤渗透量增大,有效吸持雨水;枯落物层的覆盖可以减少林地土壤水分蒸发,从而增加土壤水分贮存量;有林地的产流量、径流深和径流系数都低于无林地,产沙量也明显低于无林地(杨新兵等,2007)。对于高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环的影响研究表明,植被覆盖度与土壤水分之间具有显著的相关关系,草地的水源涵养功能明显。植被能够通过根系的水力重分布机制传输土壤水,从而改变表层土壤水分和深层土壤水分的分布,并影响水文过程(王根绪等,2003)。林草植被也能显著减少流域内洪水量、径流和输沙量(冉大川等,2014)。

1.2.2 改善扰动区土壤性质

土壤是生态系统的重要组成要素,是动植物生长和生存的载体和物质基础。在水电工程扰动区植被生态修复的整个植被群落演替过程中,土壤的发展是随植被演替发展的一个连续过程,趋向于与顶极群落相适应的平衡。植被生态修复对水电工程扰动区的土壤性质的影响主要体现在土壤物理性质、化学性质和生物性质三个方面,植被生态修复可有效改善扰动区土壤环境,促进扰动区土壤生态系统的恢复。大量的研究表明(张全发等,1990;谢宝平等,2000;张俊华等,2003;余海龙等,2007),坡面植被经过一定时期的演替,表层土壤容重减小、孔隙度增加,土壤内水稳定团聚体总量增加,土壤养分含量提高,土壤微生物增加、酶活性提高。具体表现为在植被群落演替的前期阶段,以土壤性质的内因动态演替为主,土壤的性质对植被变化产生影响,同时也因植被的变化而发生改变。植物群落与土壤间的彼此影响具有相互促进的作用,是植被群落演替的动力。这种作用发展到一定程度时,土壤与植物群落都受气候的限制,即达到顶级群落阶段,而顶级群落则是生态平衡的标志。由此可见,植被生态修复可有效改善扰动区土壤环境,促进扰动区土壤生态系统的恢复。

1.2.3 增加扰动区生物多样性

植被生态修复是水电工程扰动区生态系统修复的第一步,而生态系统修复的目的就在于恢复或重建某个区域的植物和动物群落,从而保持生态系统的持续性功能,所以植被生态修复对于扰动区生物多样性的恢复具有重要作用。

植被生态修复过程中物种多样性的动态特征变化反映了植被的恢复程度,是生态系统中生物多样性的基础,原因就在于物种多样性可以为其他的生物提供多样化食物来源和时空上异质的生态位等。群落物种多样性水平可由多样性指数、

丰富度指数、均匀度指数及优势度指数反映出来(王占军等, 2005)。植被修复群落动态与多样性关系密切, 随植被演替进展, 群落物种组成与物种多样性总体增加, 群落生态优势度下降, 而均匀度增加, 群落渐趋稳定(阳小成, 2008; 魏黎, 2010)。不同植被恢复模式, 群落物种多样性存在差异(张健, 2010)。人工建植群落的物种多样性好于自然恢复, 且人工灌丛植被恢复模式要优于人工乔木林植被恢复模式。这可能与人工植被对生态环境的改造有关, 他提高了群落生境质量, 对群落多样性的丰富起到了促进作用。

植被生态修复对扰动区生物多样性的影响还表现在对土壤微生物多样性的促进上。土壤微生物在植物凋落物的降解、养分循环与平衡、土壤理化性质的改善中起着重要作用; 同时, 土壤微生物群落对环境变化极为敏感, 在土壤质量演变过程中可以作为灵敏的反映指标, 较早地预测土壤有机物的变化。土壤微生物多样性主要包括物种多样性、基因多样性和功能多样性。随退化植被的恢复, 土壤细菌、真菌、放线菌数量及微生物总数均呈上升趋势, 植被恢复有利于土壤生物循环和生物富集作用, 对微生物物种多样性有重要作用(魏媛等, 2010)。植被恢复大大改变了土壤微生物功能群的组成, 增加了微生物群落功能多样性(夏北成, 1998; 李伟华等, 2007)。Grayston(2001)的研究发现, 植物群落可以显著地改善土壤中微生物群落的分解能力。

1.2.4 提高扰动区边坡稳定性

边坡上没有植被存在时, 抗滑力主要由土壤黏结力和滑动时产生的摩擦力组成; 但是有植被存在时, 除以上抗滑力以外, 根系的存在使土壤抗剪力增加, 同时由于根系本身抗拉力的存在, 增加了坡体的稳定系数。随着根系数量的增加, 边坡稳定系数提高(封金财, 2005; 周群华 2007)。植物根系提高扰动区边坡稳定性主要表现为如下三种方式: ①网络作用: 根系交织穿插形成根系网络, 较小结构的土块连接成较大土块, 在水流作用下, 土块不易解体分散; ②护挡作用: 部分外露根系, 对上面冲来的土块起一定的阻挡缓冲作用; ③牵引作用: 根系四周紧密附着一些土粒, 即使根系在水体中飘动, 土粒在根系的牵引作用也不易被带走。

植物根系根据形态不同, 分为侧根、垂直根和须根, 木本植物通过侧根和须根缠绕加固土壤形成紧密层, 垂直根锚固土壤增加抗滑阻力(Fransesco et al., 1999)。乔灌植物侧根和须根以及草本植物根系的固土机理与加筋土的作用机理有相似之处(孙立达等, 1995)。植物根系可视为柔性加筋材料, 与土体共同受力、协调变形。根系在土体中的存在, 能大幅提高土体黏聚力, 内摩擦角也相应有一定的提高, 土体的力学性质在根系加筋作用下得到改良。大量的研究证明根系与土壤的相互作用对于提高坡面土体的抗剪强度具有重要意义(Kassiff, 1968; Waldron, 1977, 1981; 解明曙, 1990; 王可均等, 1998; Ekanayake, 1999; 赵

志明等, 2006; 李绍才等, 2006b; 肖盛燮等, 2006; 李国荣等, 2007)。

由于植物根系的长度限制, 其对边坡稳定性的提高存在局限性, 只限于根系分布界限以内。虽然某些植被的根系可深达几米甚至几十米, 但绝大多数植物根系的分布深度为 1~3m, 而对土体固持作用的最大密集分布层在 60cm 以内, 一些浅层根系分布土层为 40cm 以内(王礼先, 1990)。徐则民等(2005)认为由于大多数植物根系都分布在地表 1.5m 深度以内, 其对土体的加固深度有限, 远小于深层滑坡的滑面埋深, 因此植被在深层滑坡防治方面的作用是有限的, 仅限于浅层边坡的防护。鉴于深层滑坡预测的难度及工程措施的可靠性, 经济环保的植被生态修复仍不失为边坡防护的最佳选择之一。

1.3 向家坝水电工程概况

向家坝水电站坝址右岸位于云南省水富县, 左岸位于四川省宜宾县境内, 库区涉及云南省水富、绥江、永善和四川省宜宾、屏山、雷波共 6 个县。坝址下距宜宾市区 33km, 下离水富县 2.5km, 与宜昌、武汉的直线距离分别为 700km 和 980km。向家坝水电站坝址控制流域面积 45.88 万 km^2 , 占金沙江流域面积的 97%, 水库正常蓄水位 380m, 相应库容 49.77 亿 m^3 , 为季调节水库。

向家坝水电站与溪洛渡、白鹤滩和乌东德一起, 自下而上构成金沙江下游江段梯级开发, 是实施国家“西电东送”战略的骨干电源点。向家坝水电站为特大型水电工程, 装机容量 6000MW, 在考虑上游有锦屏 I 级、二滩、溪洛渡水电站调节作用时, 保证出力 2009MW, 多年平均年发电量 307.47 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。随着上游干支流梯级水电站水库的相继开发, 保证出力和年发电量将进一步增加, 其发电效益巨大, 可有效缓解华中、华东地区能源短缺的局面, 大大减轻煤炭运输压力 and 环境保护治理的压力。同时, 向家坝水电站还具有显著的航运、拦沙、灌溉、防洪和梯级反调节等综合效益, 符合国家实施西部大开发战略和东西部共同发展方针。本节将从向家坝工程所在地土壤、气候、水分、生物和地质等方面, 对向家坝水电工程概况进行介绍(中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 2005; 2006)。

1.3.1 土壤

向家坝水电站工程所在区土壤共有 6 个土类、14 个亚类、34 个土属。6 个土类为黄壤、红壤、紫色土、潮土、水稻土、石灰土。土壤的垂直地带性分布特点明显, 海拔由低至高, 大致分为红壤—黄壤—黄棕壤—棕壤, 紫色土、水稻土在不同高程镶嵌分布。各类土壤土层普遍较薄, 一般厚度在 30cm 内, 且土壤的质地粗糙, 石碴子或石骨子土的面积大、分布广, 土壤的有机质含量普遍偏低。