



祁连山生态系统保护修复 理论与技术

冯 起 等 著



科学出版社

祁连山生态系统保护修复 理论与技术

冯 起 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以祁连山河源山地为核心研究区,在前人大量工作和研究的基础上,结合多年实地调查和观测,进行了大量统计、分析和论证,阐述了祁连山从山区至山前脆弱带的水源涵养功能监测与增贮潜力评估的方法、理论、模型与技术,以及祁连山北坡的本本植物群落分类及空间分布,并且通过对祁连山地高山、中山带植物功能性状和群落结构对坡向响应的研究,开展祁连山水源涵养林生态系统保育工程示范、山区天然草地生态系统恢复与保护技术集成示范及生态效益评估。本书旨在为加快祁连山绿色屏障中脆弱性生态系统恢复与维护提供理论和技术指导、推介相关的模式与示范。

本书可供祁连山绿屏生态保护、祁连山水源涵养林、天然草地和山前脆弱带退化生态系统修复与维护、生态水文、资源、环境、生态等专业领域的科研人员,高等院校师生以及生产、管理及决策部门工作人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

祁连山生态系统保护修复理论与技术 / 冯起等著. —北京: 科学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-03-060014-1

I. ①祁… II. ①冯… III. 祁连山-生态环境-环境保护-研究
IV. ①X321.244

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 284641 号

责任编辑: 杨向萍 亢列梅 徐世钊 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京画中华印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 25 插页: 10

字数: 593 000

定价: 238.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《祁连山生态系统保护修复理论与技术》编委会

主 编：冯 起

副主编：吕一河 徐先英 马玉寿 刘贤德 赵 明 常宗强

编 委（按汉语拼音排序）：

曹建军 常宗强 冯 起 高前兆 郭 瑞 贺访印

霍 红 贾 冰 李宝锋 李广宇 李若麟 李宗省

刘 蔚 刘 文 刘贤德 吕一河 马玉寿 秦燕燕

司建华 苏永红 席海洋 徐先英 张成琦 赵 明

朱 猛

前 言

祁连山在我国生态文明建设中具有重要战略地位,是我国极其重要的冰冻圈水源涵养生态功能区和生态安全的绿色屏障,是丝绸之路经济带生态环境建设的重要区域,不仅保障着区域生态安全,还在维护区域生态平衡、保障河径流补给、维持区域可持续发展等方面发挥着十分重要的作用。祁连山及包括高山冰雪带在内的河源山地的生态保护和治理,直接关系到我国西部经济社会的可持续发展,对促进西部地区民族团结、边疆稳固和繁荣发展尤为重要。祁连山生态环境具有生态系统单一性、高敏感性、高脆弱性、难恢复性等特征。近几十年,受全球气候环境变化和人类活动的影响,山地生态环境已发生严重退化:高寒山区冰川物质亏损,退缩加剧,多年冻土持续退化,活动层不断增厚,地下冰剧烈消融;中高山区森林生态系统脆弱,林分质量下降,草场超载严重,草地退化,水土流失加剧;前山带人类活动增多,荒漠化、沙化呈蔓延趋势;整个河源山区水资源涵养调蓄能力减弱,减洪滞洪功能下降。区域生态景观格局总体呈现出农田向草地推进、牧区向森林推进、雪线向山峰推进的态势。这种生态环境的退化趋势直接导致区域生态系统恶性循环,而且随着区域人口的进一步增长和经济社会的不断发展,人类活动对生态环境的扰动将会愈加剧烈,如不及时对祁连山生态环境加以修复和保护,未来的退化局势将难以遏制。

因此,本书以祁连山河源山地绿色屏障为核心研究区,针对高寒至中低山区存在的生态环境保护问题,衔接国家实施生态综合治理重大工程项目中迫切需要解决的关键技术难题,开展山地退化的水源涵养林、草地和山前脆弱带生态治理技术与示范,建设试验示范基地,提出祁连山绿色屏障生态恢复与治理的技术与模式,为有效遏制生态环境退化,提高水源涵养区生态系统的稳定,确保区域水资源和生态安全提供科技支撑,也为实现“丝绸之路经济带”生态改善、经济发展、以人为本的和谐社会建设的综合目标,提供重要的科技保障。

全书分8章。第1章系统回顾国内外山地水源涵养功能研究进展、生态系统恢复技术研究进展和祁连山地区生态环境治理工程与技术进展,确定了全书聚焦的主要科学技术问题。第2章针对祁连山山区特殊的地理区位和关键的生态功能,系统评估了生态系统的动态变化过程及相应的水源涵养功能的时空变异,研发了水源涵养功能的天地一体化监测技术、评价指标体系,建立了水源涵养功能监测与评估的技术体系。第3章以祁连山乔木群落和灌木群落为研究对象,确定了影响植物群落物种组成和丰富度变异的解释变量,阐明了研究区不同植物群落空间分布格局的驱动机制。第4章通过运用生态化学计量学方法,探讨了祁连山植物适应不同环境的性状和生存策略差异性,认识了山地坡向梯度下植物群落结构及叶片功能性状特征。第5章探究了祁连山水源涵养林土壤特性及降水入渗机制,开展了水源涵养林植被空间结构优化,提出了山区水源涵养林生态保育模式。

第6章针对祁连山山区水源涵养区退化草地植被恢复和草地生态畜牧业发展中存在的关键技术进行重点示范研究,提出了适应祁连山的退化草地修复技术模式。第7章通过对祁连山浅山区小流域水量平衡研究和生态系统水分平衡规律认知,开展浅山区造林、林草结构优化和水土保持等技术试验示范,提出了水土保持综合防御模式,为山前脆弱生态系统保护提供了技术支撑。第8章对生态恢复理论和实践指导下集成的祁连山生态系统保护修复技术做了简单归纳和总结。

本书由冯起、常宗强、席海洋等编写提纲,冯起、高前兆负责全书统稿工作,冯起、司建华负责最后定稿。具体分工为:前言(冯起、李宗省),第1章(吕一河、刘贤德、冯起),第2章(吕一河、刘贤德),第3章(霍红、苏永红、冯起),第4章(秦燕燕、冯起、曹建军),第5章(徐先英、贺访印、赵明、刘贤德、李广宇),第6章(马玉寿),第7章(冯起、常宗强、席海洋),第8章(冯起、高前兆)。同时,参与本书文字和图表整理工作的人员还有:朱猛、张成琦、司建华、刘文、刘蔚、李若麟、李宝锋、贾冰、郭瑞。

本书是在国家科技支撑计划项目“祁连山地区生态治理技术研究及示范”(2012BAC08B00)、国家重点研发计划项目“西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用”(2017YFC0404300)、祁连山生态环境研究中心、甘肃省重大专项“祁连山涵养水源生态系统与水文过程相互作用及其对气候变化的适应研究”(18JR4RA002)、甘肃省重点项目“黑河流域土地沙漠化与生态修复跨境研究”(17YF1WA168)的共同资助下完成的,对这些项目的资助表示感谢!

本书是在系统总结几十年来有关祁连山生态保护的技术与原理的基础上,结合作者多年来在祁连山生态屏障方面的研究实践凝练而成的专著,旨在寻求综合性、多层面开展保护和建设的途径,全方位探索祁连山生态环境恢复和保护的可持续发展示范模式。

本书聚焦祁连山生态系统修复问题,对已有祁连山退化生态系统恢复技术的成功组合与创新熟化,具有良好的推广应用前景,也具有较高的社会价值。希望本书有助于祁连山绿色生态屏障生态保护与建设,并以此探索脆弱的山地生态奥秘。

本书综合性强、涉及学科多、覆盖面广,有许多科学和技术问题需要进一步研究和探讨。限于时间及作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 山地生态研究现状与发展趋势	1
1.1 水源涵养功能研究进展	1
1.2 生态系统管理研究进展	1
1.3 我国生态系统恢复技术研究进展	2
1.4 生态系统恢复工程研究进展	3
1.5 内陆河上游山地生态环境治理工程与技术进展	4
第 2 章 河源山区水源涵养功能监测与增贮潜力评估	6
2.1 水源涵养与水文调节的概念与评估方法	6
2.1.1 水源涵养与水文调节的概念	6
2.1.2 水源涵养与水文调节评估方法	7
2.1.3 水源涵养与水文调节协同关系	8
2.2 水源涵养功能系统观测与分析	9
2.2.1 河川径流变化分析	9
2.2.2 苔藓枯落物与土壤水热、特性及蒸发分析	19
2.2.3 林冠截留与土壤水热的关系分析	23
2.2.4 植被与土壤水和径流的关系	29
2.3 水源涵养相关生态参量遥感动态监测	33
2.3.1 土地覆盖动态监测	33
2.3.2 植被覆盖度动态监测	36
2.3.3 地上生物量动态监测	39
2.3.4 蒸散遥感动态监测	42
2.3.5 土壤水分动态监测	45
2.3.6 小流域生态参量与径流关系分析	47
2.4 水源涵养区相关参量的模拟	51
2.4.1 水文参数变化规律	52
2.4.2 水源涵养功能对气候变化的响应	54
2.4.3 水源涵养功能对土地利用变化的响应	57
参考文献	61
第 3 章 内陆河上游山地木本植物群落及空间分布	64
3.1 研究进展	64
3.1.1 生态位概念的提出和发展	64

3.1.2	物种共存的解释	64
3.1.3	群落构建的生态学理论	65
3.1.4	群落分布的空间尺度	66
3.1.5	空间变量的构建	68
3.1.6	植物群落分类和排序	68
3.1.7	影响植物群落物种组成及多样性的环境因素	72
3.2	木本植物群落数量分类及群落林下植被分析	74
3.2.1	物种累积曲线	75
3.2.2	不同木本植物群落聚类分析	75
3.2.3	植物群落林下植被物种组成差异比较	79
3.3	木本植物群落物种组成的影响因素及分布格局	82
3.3.1	分析与排序	82
3.3.2	植物群落地形变量及环境变量	83
3.3.3	环境因子对乔木群落物种组成的影响	87
3.3.4	环境因子对灌木群落物种组成的影响	89
3.4	木本植物群落物种丰富度的影响因素及分布格局	92
3.5	不同变量对植物群落物种组成和丰富度的影响	97
	参考文献	100
第4章	祁连山植物功能性状和群落结构对坡向的响应	113
4.1	植物功能性状和群落结构研究进展	113
4.1.1	植物功能性状研究进展	114
4.1.2	生态化学计量特征研究进展	115
4.1.3	坡向梯度上植被的研究进展	118
4.1.4	祁连山山地植被的研究进展	119
4.2	植物叶片功能性状研究	120
4.2.1	不同坡向功能性状属性值变化	123
4.2.2	不同坡向稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 特征	123
4.2.3	不同坡向 C_3 植物叶性状变化	124
4.2.4	不同坡向叶片功能性状分析	127
4.2.5	不同坡向叶性状与环境因子的关系	127
4.2.6	不同坡向植物生存策略	130
4.3	不同坡向优势植物叶片氮磷化学计量特征	132
4.3.1	植物叶片养分含量与化学计量总体特征	132
4.3.2	不同坡向植物叶片 C、N、P 元素化学计量特征	135
4.3.3	坡向对土壤 C、N、P 元素及其比值的影响	137
4.3.4	南-北坡梯度土壤的化学计量特征变化	139
4.3.5	植物叶片化学计量特征与土壤因子关系	142
4.3.6	不同坡向植物群落 N、P 养分限制因子判断	146

4.4 不同坡向植物群落结构变化	147
4.4.1 植物群落物种组成特征变化	148
4.4.2 环境因子特征变化	149
4.4.3 植物群落重要值变化	150
4.4.4 群落相似性指数特征	153
4.4.5 植物群落聚类分析	154
4.4.6 物种多样性、盖度和生物量变化特征	155
4.4.7 土壤养分特征	156
4.4.8 土壤质地特征	157
4.4.9 影响群落结构限制因子的确定	157
参考文献	160
第5章 水源涵养林生态系统保育工程	169
5.1 祁连山水源涵养林特征退化现状	170
5.1.1 祁连山水源涵养林特征	170
5.1.2 祁连山山区灌木群落特征	178
5.1.3 水源涵养林退化现状	183
5.2 水源涵养林林木引种及快速繁育工程	185
5.2.1 祁连山水源涵养林树种引种及适应性	185
5.2.2 云杉属树种的抗逆性测定	186
5.2.3 祁连山水源涵养林造林树种筛选	190
5.2.4 祁连山水源涵养林树种快速繁育技术研究	192
5.3 退化水源涵养林地生态修复与建植技术	200
5.3.1 祁连山东段退化水源涵养林生态修复模式	200
5.3.2 祁连山东段退化水源涵养林地生态修复技术	200
5.4 水源涵养林植被空间配置与结构优化技术	204
5.4.1 祁连山中段水源涵养林植被空间配置与结构优化技术	204
5.4.2 祁连山东段水源涵养林林分结构优化配置	206
5.5 不同配置模式森林生态系统恢复特征	212
5.5.1 不同模式森林生态系统植被恢复特征	212
5.5.2 不同程度恢复森林生态系统主要环境因子	216
5.5.3 不同程度恢复森林生态系统的土壤理化性质特性	222
5.6 祁连山水源涵养林生态恢复技术	228
5.6.1 退化生态系统封育恢复技术	228
5.6.2 退化水源林生态系统人工修复技术	229
5.7 祁连山中段北坡水源涵养林保育	230
5.7.1 退化水源涵养林生态系统封育	230
5.7.2 退化水源涵养林生态系统人工修复	231
参考文献	232

第6章 祁连山天然草地生态系统恢复与保护技术	233
6.1 祁连山草地土壤特性及降水入渗	233
6.1.1 试验区的植被组成	233
6.1.2 试验区的水文特征	236
6.1.3 土壤水分入渗分析	256
6.1.4 入渗模型拟合	275
6.1.5 土壤水分入渗率空间分布特征	287
6.2 祁连山天然草地保护技术	290
6.2.1 天然草地鼠害综合防控技术集成模式	290
6.2.2 害鼠控制区和对照区的植物群落组成	293
6.2.3 控制害鼠对天然草地上植物量的影响	295
6.2.4 祁连山地区草地害鼠种群数量控制模式	296
6.3 毒杂草草地综合防控技术集成	302
6.3.1 草地植被物种多样性	304
6.3.2 不同浓度狼毒净对狼毒生长状况的影响	304
6.3.3 狼毒净对狼毒的防治效果分析	305
6.4 天然草地合理利用技术集成模式	306
6.4.1 不同利用强度下草地植被与土壤特征	306
6.4.2 退化草甸植被群落多样性指数的变化	307
6.4.3 退化草甸植被群落生物量变化	316
6.4.4 退化草甸土壤理化性质的变化	317
6.5 退化草地修复技术集成模式	321
6.5.1 参试牧草基本生长特征	323
6.5.2 参试牧草形态学特征	327
6.5.3 参试牧草生产性能及评价	329
6.5.4 参试牧草品质	333
6.6 轻度退化草地改良施肥技术集成模式	336
6.6.1 不同施氮量对草地植被高度的影响	336
6.6.2 不同施氮量对草地各功能群高度的影响	337
6.6.3 不同施氮量对草地多样性及生物量的影响	337
6.6.4 不同施氮量对草地植被植物量的影响	338
6.6.5 不同施氮量对土壤养分的影响	339
6.7 中度退化草地免耕补播技术	341
6.7.1 补播对草地植物的影响	341
6.7.2 补播对草地植物量、土壤容重和水分的影响	342
6.7.3 补播对草地土壤化学性质的影响	343
6.8 重度退化草地植被重建技术	344
6.8.1 人工草地对草地植物优势度的影响	344

6.8.2 人工草地对草地群落多样性的影响	344
6.8.3 人工草地对土壤化学性质的影响	346
6.9 祁连山退化草地恢复技术效应	347
6.9.1 祁连山地区草地综合防控技术集成	347
6.9.2 祁连山区退化草地恢复技术	348
6.9.3 鼠害防治技术要点	350
参考文献	350
第7章 祁连山山前脆弱带生态修复与水土保持技术	354
7.1 研究进展	354
7.2 植被和土壤特征	356
7.2.1 植物群落特征	356
7.2.2 土壤含水量及容重变化特征	359
7.2.3 土壤盐分特征	360
7.2.4 土壤养分特征	362
7.3 乡土物种种子培育与繁殖技术	365
7.3.1 种子采集及育苗试验	365
7.3.2 扦插育苗试验	366
7.4 农田退耕地生态恢复技术	369
7.4.1 退耕地土壤物理性质的变化	369
7.4.2 土壤有机碳组分的变化	371
7.4.3 退耕地土壤可溶性有机碳变化	372
7.5 浅山区造林技术模式	373
7.5.1 栽植方法对苗木成活率的影响	373
7.5.2 座根水量对造林成活率的影响	373
7.5.3 土壤含水量对苗木成活率的影响	374
7.6 水土保持技术试验研究	374
7.6.1 径流场植被特征分析	375
7.6.2 不同植被盖度对产、汇流的影响	377
7.6.3 水土流失泥沙含量的影响因素分析	377
7.7 祁连山水土保持技术集成	379
参考文献	380
第8章 集成技术纲要	383
彩图	

第1章 山地生态研究现状与发展趋势

1.1 水源涵养功能研究进展

我国是一个水资源相对短缺的国家，因而针对水源涵养功能的研究在国内一直颇受重视。当前，国内对于水源涵养功能的研究可以大体概括成几大类：①针对具体生态系统类型或其重要组分的水源涵养功能监测与评估。例如，对大兴安岭樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能的研究、祁连山水源涵养林枯枝落叶层的生态水文功能的监测与评估等。②对大型植被系统（如森林）水源涵养功能从概念界定到静态和动态评估方法的研究。③对重要水源涵养功能区水源涵养功能的系统评估。例如，对我国东北东部山区、长江上游、东部森林样带、西北山地（六盘山、大青山）等水源涵养功能的单项或综合评估。

国际上没有水源涵养的概念，而是关注具体的生态水文功能，如储水量（water storage 或 water retention capacity）、产水量（water yield）、水文调节（water regulation）等。例如，安第斯山河源区小流域尺度上土地利用和土壤水文调节作用的研究、地中海山区径流过程的时空变异研究、美国弗吉尼亚州两个森林小流域地表水和其中硫酸盐滞留时间和流量过程的对比研究、美国爱达荷州山区融雪环境下土壤储水量对河流产流量影响的监测与模拟、欧洲当前和未来冰川容量变化对中尺度流域径流影响的情景分析与模拟、阿巴拉契亚南部山区硬木混交林商业采伐对流域水文和水质的长期影响评估、波兰南部自然和人文因子对喀尔巴阡山脉低山丘陵区水循环的影响、委内瑞拉圣多明戈流域土地利用与储水量关系的研究等。

综合国内外水源生态与储水涵养功能的相关研究可以看出：①从空间尺度上看，当前的研究仍然以生态系统到小流域等小尺度的监测与评价为主；②方法上注重定位观测和野外调查与实验；③区域尺度的研究开始关注气候变化、土地利用和经济社会因素的影响，综合模拟也有了一定发展；④跨尺度、多种方法和手段综合集成的研究还很薄弱，是未来研究的重要突破方向。

1.2 生态系统管理研究进展

生态系统管理作为一种新的管理资源环境的整体论方法，通过调节生态系统内部结构与功能及系统内外的输入与输出，发展与保护生态并举，目的是实现一个地区（或生态系统）的长期可持续性，即生态系统健康。恢复生态学研究生态系统退化的原因、退化生态系统恢复与重建的技术与方法、生态学过程与机理，其目的也是通过一定的生物或工程措施，对生态系统施加一定的影响，实现生态系统的可持续发展。可以看出，生

态系统管理与生态恢复概念既有一致性,也有差异性。一致性是都要对生态系统进行不同程度的调控,目的都是生态系统的健康与可持续发展。差异性在于二者的着重点不同,生态系统管理着重于对生态系统的管理,范围较为宽泛,包含演化、退化、恢复等生态系统过程和结构、功能的调控;而生态恢复仅针对退化生态系统,在把握退化机理的基础上,通过生物、工程的措施,使生态系统演化由退化状态向健康状态演替。1975年,在美国召开了“受损生态系统的恢复”国际研讨会,强调要开展生态恢复技术措施研究。1980年,Cairns主编的《受损生态系统的恢复过程》一书阐述了受损生态修复过程中主要生态学理论和应用问题。1985年成立的国际恢复生态学会,标志着恢复生态学学科的形成。1997年,著名刊物 *Science* 连续刊载了7篇关于生态恢复的论文。2001年召开的国际恢复生态学大会,其主题是“跨越边界的生态恢复”。近几十年来,世界各国对退化生态与环境修复技术进行了大量的研究和实践,涉及草场恢复,矿山、水体和水土流失等环境恢复和治理工程,水体恢复等研究和示范。我国从20世纪50年代开始进行山地退化生态系统的长期定位观测试验和综合整治研究,在实践上已形成大批小流域生态恢复的成功案例。我国关于退化生态系统恢复与重建的研究侧重于退化生态系统形成原因、解决对策、恢复与重建技术方法、物种筛选及恢复与重建过程中的生态效应等方面,形成了以生态演替理论和生物多样性恢复为核心,注重生态过程的恢复生态学研究特色。

1.3 我国生态系统恢复技术研究进展

我国是世界上生态系统退化类型最多、退化最严重的国家之一,早在20世纪50年代就开始了退化环境的长期定位观测试验和综合整治工作。50年代末,华南地区退化坡地开展了荒山绿化、植被恢复;70年代,“三北”地区实施了防护林工程建设;80年代,开展了长江中上游地区(包括岷江上游)的防护林工程建设、水土流失工程治理等一系列生态恢复工程;80年代末,在农牧交错区、风蚀水蚀交错区、干旱荒漠区、丘陵山地、干热河谷和湿地等进行了大量退化或脆弱生态环境及其恢复重建方面的工作;90年代,开始沿海防护建设研究,提出了许多切实可行的生态恢复与重建技术与模式,先后发表和出版了大量有关生态系统退化和人工恢复重建的论文和论著。而高寒地区的水文过程和水源涵养能力、潜力的定量化评估、科学合理恢复措施和保持等方面的研究相对薄弱。

退化生态系统恢复最主要的内容是植被恢复。目前,我国已在退化生态系统类型、退化原因、程度、机理、诊断,以及退化生态系统恢复重建的机理、模式和技术上做了大量研究。在生态系统层次上有森林、草地、农田、水体、湿地等方面的研究和实践,也有如干旱、半干旱、荒漠化及水土流失等地带性退化生态系统及恢复的工程、技术、机理研究。特别是土地退化及恢复研究,其包括土地沙漠化及整治、水土流失治理、盐渍化土地改良、采矿废弃地复垦等。经过60多年的研究实践和积累,取得了丰富的经验,创造了许多先进、实用技术。河西走廊的旱生乔、灌、草植物相结合的综合生态恢复技术,新疆的窄林带小网格农田防护林营造技术等都处于国际领先水平。科学家正致

力于探索西北干旱区生物综合治理的新模式,利用草、灌、乔木相配合的新方法营造结构优良、增肥效果好的防护生态系统,形成了一大批新技术与模式。例如,农牧交错带农业综合发展和生态恢复重建技术体系与模式,半干旱黄土丘陵区退化生态系统恢复模式与技术体系,三江源区退化草地生态系统恢复与生态畜牧业发展技术,石羊河上游山地退化生态系统恢复重建技术,准噶尔盆地南缘荒漠化生态系统恢复与重建技术,科尔沁沙地退化草地植被恢复重建技术,草原合理利用和草原畜牧业合理发展技术,荒漠河岸林、退化荒漠草场等的更新与恢复技术,绿洲高效节水农业开发技术,河源区天然植被的保护、恢复和利用技术,干旱区有重要经济价值的资源植物经营技术及其产业化开发技术(如沙地柏、沙棘、沙柳、甘草、肉苁蓉、麻黄、沙冬青、苦豆子等的人工种植与药用开发),西北地区家用经济实用太阳能、风能高效开发利用技术,城市工程建设所形成的各种裸地植被恢复技术等。

1.4 生态系统恢复工程研究进展

退化生态系统恢复与重建,决非单一控制就能达到目的,必须从生态系统整体出发,采取综合性措施才可能实现。退化生态系统类型多样,引起退化的干扰体系各不相同,退化程度各异。恢复与重建工作首先要消除或控制引起退化的干扰体,在国家或大区域尺度上做到这一点显然很困难。山地是一个整体系统,系统内森林、草地、农田等系统相互联系、相互制约。历史的教训和当前人地矛盾的现实表明一个道理,人工植物群落重建必须同时考虑生态学和经济学原则,以及人类经济发展的愿望和环境治理的现实,兼顾生态和经济效益。从国内正反两方面的经验可以得出,符合我国的恢复与重建目标应该是生态与经济结合且达到具有一定的结构、功能相互协调的良性循环、高效和谐的山地生态系统。生态系统既能改善环境,扭转系统退化,提高系统整体功能,又能使生态经济持续发展,同步解决山地环境的治理与区域社会经济发展中存在的问题。

20世纪80年代初期开始,德国、瑞士、奥地利等国开展“近自然河流治理”项目,30多年来取得了斐然成效,积累了丰富的经验。这些国家制定的生态治理方案,既注重发挥生态系统的整体功能,又注重在三维空间内植物分布、动物迁徙和生态过程中相互制约与相互影响的作用及作为生态景观和基因库的作用。同一时期,科学家和工程师对生态恢复工程开展了一些科学示范工程研究,较为著名的有英国的戈尔(Gole)河和思凯姆(Skeme)河等科学示范工程。以流域为单元的整体生态恢复,是90年代提出的命题。美国已经按照这种思路进行了部分河流恢复规划,未来20年美国将恢复60万平方公里的河流或溪流流域,已经按流域整体性开展的大型河流生态恢复工程实例有上密西西比河、伊利诺伊河和凯斯密河。

我国先后实施的长白山生物多样性保护与自然生态恢复技术试验示范、粤东南低山丘陵区植被快速恢复与生态农业技术集成与示范、黄河三角洲退化湿地生态恢复技术与模式研究等生态系统保护和生态恢复技术集成研究,在生物多样性保护和健全自然生态恢复技术体系方面取得了显著成效,也为内陆河山区生态系统保护和生态恢复技术提供了范例。

1.5 内陆河上游山地生态环境治理工程与技术进展

内陆河上游山地的研究始于 20 世纪 30 年代,集中于地理学、植物学和动物学等领域,延伸至地质地貌、土壤、气象等方面,代表成果以陈宗器《西北之地理环境与科学考察》(1930)、刘慎谔《中国北部及西部植物地理概论》(1934)、周映昌《中国西部天然林初步研究》(1930)、《中国和蒙古的哺乳动物》(1940)、郝景盛《甘肃西南之森林》(1942)等为主,对促进和推动中国植物生态学和动物学研究及祁连山科学研究起到积极的作用。1949 年后,党和政府十分重视祁连山林业的发展,先后对西北地区的自然地理、地质地貌、水文、气象、土壤、野生动物、植被等开展了大规模的科学考察和研究;50~60 年代中期,中国科学院兰州冰川冻土研究所、中国科学院青海甘肃综合考察队等对祁连山野生动物、植物及其生态、自然地理、地质地貌、水文、土壤、气象等自然科学领域展开了较深入系统的研究,主要成果有《甘肃疏勒河下游植被概况》(1957)、《河西走廊的自然景观》(1958)、《柴达木盆地托拉海河西地区的自然景观》(1963)、《祁连山国营托勒牧场植被的分布与演替》(1963)、《祁连山的气压系统》(1963)、《河西走廊综合自然区划》(1964)、《试论甘肃省河西地区的草场类型及其利用问题》(1965)和《甘肃祁连山东段一些高山植物形态、生态特征的观察》(1966)等,考察和研究内容更为广阔,取得了大量的基础性成果。70 年代末,甘肃省祁连山水源涵养林研究所成立,林业科学研究有计划、有步骤地全面开展;在许多大专院校、科研院所的积极参与下,以寒温性针叶林为主要对象、森林水文效益和造林为主要内容的科学研究取得丰硕成果,并积累了森林气象、水文、土壤和生物生产力等方面的资料,为祁连山林区的森林经营管理和林业的发展提供了科学依据和实践经验。90 年代以来,《青海云杉》《甘肃脊椎动物志》《甘肃河西地区维管植物检索表》《祁连山药用植物志》等著作相继出版,为祁连山山区生物多样性研究奠定了坚实的基础。

围绕祁连山水源涵养保护与生态环境综合治理,20 世纪 80 年代初期至 90 年代中期,由中国科学院兰州冰川冻土研究所组织兰州大学、兰州沙漠研究所、甘肃省水利水电工程局等 200 多人,开展对祁连山冰川变化及冰雪水源利用调查,编写了《祁连山冰川变化及其利用》(1985);中国科学院西北生态环境资源研究院集成水资源的开发利用与生态环境保护的综合技术体系,完成了《河西地区水土资源及其合理开发利用》的报告,编写了《石羊河流域水资源及其合理利用、环境变化及整治途径》的报告;20 世纪 90 年代,进行了“河西走廊经济发展与环境整治的综合研究”,出版了《中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流》。2000 年以来,中国科学院实施知识创新重大工程项目“黑河流域水-生态-经济系统综合管理试验示范研究”,形成了流域生态恢复和重建试验-示范-推广体系。

在国家层面上启动的 973 项目、科技攻关计划、国家自然科学基金项目和中国科学院知识创新工程等数十个项目,涉及山地水源涵养保护与生态综合治理方面的科技计划,包括“祁连山水源涵养林恢复技术研究”“祁连山空中云水资源开发利用研究”“祁连山水源涵养技术试验示范”“森林火灾生态环境监测分析系统及应用技术引

进”“恢复和保护祁连山生态环境基础设施建设项目”及“中国西部环境和生态科学重大研究计划”等项目,为开展山区水源涵养保护与生态综合治理积累了大量的资料和技术成果。

围绕祁连山区生态保护和生态环境综合治理,开展了“祁连山自然保护区天保工程封山育林工程建设”“黑河流域近期治理规划”“石羊河流域重点治理规划”等工程建设项目。青海省完成了“高寒草地退化生态系统综合整治技术研究”“青海湖流域生态和环境治理技术集成与试验示范”“三江源区适宜性草-畜产业发展关键技术集成与示范”“青藏高原生态系统对环境变化的响应”“我国关键地区全球变化的生态安全机制与调控”“青海湖地区社会经济总体发展战略研究”“青海省山川秀美科技行动战略研究”“青海湖环境规划研究”“江河源主要生态区生态恢复研究与示范”“江河源区的生态环境变化及其综合保护研究”“三江源区生态补偿”“黑河上游高寒草甸水土保持型生态建设试验示范”等国家与地方重大科技项目,为祁连山水源涵养生态系统的恢复与重建提供重要的技术支撑。

有关生态修复的弹性理论认为,陆地生态系统对环境变化有一种忍耐性即为弹性,像弹簧一样,当受损仍在可以复原的限度内,只要解除压力即可恢复到原位。祁连山生态系统在这方面的研究不多。祁连山的生态系统基本属于天然降水满足植被生长的水源涵养林或草地,比较稳定,但受过度放牧、砍伐、开矿、修路等影响较大或地表植被人为破坏严重是主要压力,再遭遇气候变化暖干扰的不利组合,退化加快,生态系统某些方面受损,有的还很严峻。例如,有些草地出现沙化,毁林开垦地表裸露。但是,祁连山的植被生态系统退化仍是可恢复的。恢复生态学的理论基础是生态演替,其实质是群落演替,首先排除干扰,顺应自然规律,即使退化为严重等级,只要解除干扰或保护起来,仍可以复原。但自然状态恢复较缓慢,需要改善环境系统,若加以人工辅助或科技促进,恢复可加快,并可更新或优化;一旦毁坏原生系统,就需要重建,并遵循植被演替规律,才能达到修复和更新的目标。

由于从高山向浅山人类活动压力和干扰影响逐步加大,系统受损也随之加重,生态系统恢复也需要区别考虑。①减压:生态系统恢复的减压应有所侧重,从高寒区禁止人类活动,至中高山封育保护,辅以补植管护保育、逐步恢复,中低山重点修复,逐步加重辅助措施,借助科技手段或局部重新建植,保持生态平衡;②涵养:山地植被的水源涵养功能是河流上游生态系统的基本功能特性,也是为人类提供的重要生态服务,中下游对其有很大需求,可为中下游区域提供绿色和水资源等公共产品,也是生态恢复要达到的主要目标;③添绿:增加绿色植被是主题,从寒漠至林草带,再到山前脆弱带,植被结构层次要合理,而且植物种类适合、抗性强,维护生物多样性;④固土:土壤是植被的根基,植被根系可以固土、促进土壤发育、涵养水分与土壤营养物质,防治水土流失、防御洪水灾害,也为生态系统、微生物和动植物提供生存条件;⑤维稳:维护植被生态系统稳定,不仅可以抵御自然灾害、应对气候变化及抵御自然界各种干扰,而且可为高山冰川积雪庇护提供屏障,成为生态安全、水塔安全的保障;当然植被生态系统还可以发挥储碳、固氮、解毒、释放新鲜氧气等多种功能。

第2章 河源山区水源涵养功能监测与增贮潜力评估

2.1 水源涵养与水文调节的概念与评估方法

2.1.1 水源涵养与水文调节的概念

随着联合国千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA) 成果的发布^[1-5], 生态系统服务成为 21 世纪生态学研究的一大热点领域^[6]。MA 将生态系统服务分为四大类, 包括支持服务、调节服务、产品提供服务和文化服务。而生态系统的水文服务大致隶属于调节服务 (如水量、水质调节) 和产品提供服务 (如淡水供给)。在人口增长、城市化和经济发展对水资源需求不断提高及气候变化影响的背景下, 生态系统的水文服务对于人类社会发展和维持生态安全的作用日益显现, 甚至变成稀缺资源而必须加以重点保护和管理。当前国内外研究主要集中在生态系统水量调节服务相关的概念, 即水源涵养和水文调节。祁连山良性的山地生态系统, 位于河流上游, 可以维持其水文过程、维护降水与温度、储蓄和保持水分、生成与维护土壤过程、发挥储碳固氮释氧抑毒等生态功能。以此可持续地为人类提供水文调节、涵养水源与供水、绿色生物、水土保持、气候调节、大气干扰与系统环境波动等抑制、营养物质循环等服务; 为我国西北提供抗御自然灾害、繁荣丝路文明的服务, 为人类提供永恒的绿色屏障、稳定水源、物质生产、生物多样性、高山冰雪、山水景观和天然氧吧等丰富多样的休闲游憩场所。

现代汉语中通常对涵养有两种解释: 其一为能控制情绪的修养功夫, 其二为蓄积并保持。生态系统的水源涵养 (water retention 或 water storage) 可以表述为: 在一定时间和空间范围内, 生态系统保持水分的过程和能力。水源涵养概念蕴含了几个关键要素, 包括时空尺度、形成机理和定量表达。那么, 要清晰刻画生态系统的水源涵养就需要进一步明确生态系统的类型和空间范围 (包括水平的和垂直边界), 核算的时间 (瞬时、分钟、小时、天、旬、月、季、年等), 水源涵养的形成过程及定量评估方法。因此, 水源涵养是生态系统在一定的时空范围和条件下, 将水分保持在系统内的过程和能力, 在多种因素的作用下 (如生态系统类型、地形、海拔、土壤、气象等) 具有复杂性和动态性特征。

生态系统的水文调节 (water regulation) 服务可理解为: 生态系统对自然界中水的各种运动变化所发挥的作用, 表现为通过生态系统对水的利用、过滤等影响和作用以后, 水在时间、空间、数量等方面发生变化的现象和过程。因此, 生态系统的水文调节服务就是生态系统对水的运动变化施加这些影响和作用的过程和能力, 具体可以通过水在时间、空间、数量等方面发生变化的幅度来表征。可见, 水文调节与水源涵养相比, 所表