

中国西部环境和生态科学研究丛书

中国西部 典型内陆河 生态-水文研究

程国栋 肖洪浪 陈亚宁 等 编著

中國西部 典型內陸河 生態—水文研究

張維理 周成強 張學平 等 編著

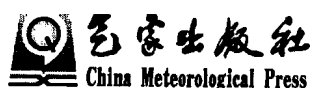


本书由国家自然科学基金委员会“中国西部环境和生态科学”重大研究计划资助

“中国西部环境和生态科学”研究丛书

中国西部典型内陆河生态—水文研究

程国栋 肖洪浪 陈亚宁 等 编著



内 容 简 介

本书为国家自然科学基金委员会西部计划支持的项目群的阶段成果之一,是以我国西北部地区的黑河流域和塔里木河流域为单元的、多尺度的生态—水文科学的理论和案例研究,主要包括基于观测试验模拟的流域生态—水文过程研究、流域生态系统水循环与水平衡(资源)、人类活动与流域生态—水文系统相互作用、流域生态系统服务功能、生态安全与生态系统健康及流域生态—水文研究亟待解决的科学问题等,以求深入探讨以流域为单元,多尺度、综合研讨水文、生态、经济的科学问题,寻求流域水效益的提高。

本书可供从事水文学、环境科学、生态学等专业的科研和管理人员,以及相关专业高等院校的师生及科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西部典型内陆河生态—水文研究/程国栋编著. —北京:气象出版社,2010.9

(中国西部环境和生态科学研究丛书)

ISBN 978-7-5029-5046-0

I. ①中… II. ①程… III. ①流域-生态学:水文学-研究-西北地区 IV. ①X321.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 178665 号

Zhongguo Xibu Dianxing Neiluhe Shengtai-Shuiwen Yanjiu

中国西部典型内陆河生态—水文研究

程国栋 肖洪浪 陈亚宁 等 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:简学东 李太宇

封面设计:燕 彤

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:860 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版

印 数:1~1500

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:33.75

印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价:100.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

西部大开发战略,是中国政府在世纪之交做出的重大决策。旨在推动经济结构的战略性调整,促进地区经济协调发展。是实施区域发展总体战略的重要组成部分。然而,人类基本生存环境恶劣和生态脆弱是西部发展的重要制约因素;矿产资源、化石能源和水土资源的不合理利用,加剧了水资源的短缺和生态的破坏;环境质量的退化和自然灾害的加重构成了对重大基础设施的威胁。因此,切实加强生态环境保护和建设,是推进西部开发重要而紧迫的任务,也是实施这一战略的基础。

西部的环境和生态问题,根源在于陆地表层环境的脆弱性。然而,西部陆地表层过程的许多基本科学问题尚不清楚。例如,西部现代的环境状况,哪些是自然因素造成的?哪些是人为因素导致的?尘暴中的粉尘到底是从哪里来的?关系到西北地区命脉的冰雪资源在气候变化影响下将如何演化?西北干旱区和西南岩溶(喀斯特)地区的水循环过程遵循什么样的规律?如何科学评估西部水资源的数量、质量以及生态系统在其中的作用?在干旱半干旱地区,什么样的植被覆盖模式既有利于生态又不会对人类水资源的需求构成严重制约?在西南地区的复杂地质背景下,如何在提高工程设施稳定性的同时保护环境和生态?对于这些问题的圆满回答,依赖于对构成陆地表层环境核心的土壤—植被—大气系统基本过程及其演变背景的科学探索。而限制这一探索继续深入的原因,主要是围绕主攻科学目标的多学科交叉和综合不够充分。首先,该领域的科学进展越来越多地依赖于长期持续的地面和空间遥感的观测数据,这是靠单个科学家和个别项目难以完成和支撑的。其次,该领域的研究对象比较复杂,研究工作的深入越来越依赖于综合集成和跨学科协同攻关。特别是,该领域许多学科虽然有着相近的研究对象,但往往出现学科背景不同的科学家之间难以沟通和对话的情形,问题主要在于各学科侧重的时间或空间尺度存在较大的差异。为了有效地动员起解决西部环境和生态重大科学问题所需的广泛的人才和技术,国家自然科学基金委员会于2001年启动了“中国西部环境和生态科学”重大研究计划(简称“西部计划”),组织实施围绕西部环境和生态建设的基础性、战略性和前瞻性的基础研究项目。旨在以“重大研究计划”的顶层设计来保证科学目标的统一性和研究、观测工作的持续性;鼓励科学家围绕总体科学目标与核心科学问题从不同角度开展高水平的探索,以保证科学探索的综合性和原始创新性;并以重大研究计划中项目设置的灵活性来鼓励竞争。

实施重大研究计划是完善科学基金制的一项举措,其战略意图是为了提高我国解决重大科学问题的能力,围绕一个明确的科学研究方向,为多学科的交叉和不同学术思想的碰撞提供研究平台。坚持在顶层设计下的自由申请,针对核心科学问题,整合集成具有不同学科背景、不同学术思想和不同层次的科研项目,形成具有统一目标的项目群,提高基础研究的源头创新能力。

相对于项目模式,重大研究计划的最大优势在于:(1)不断深化顶层设计,突出重大科学问题,引导不同学科、不同领域的科学家围绕同一目标协同研究;(2)不断引进新的队伍,以促进不同学术思想相互碰撞,激励创新;(3)一个较长时间的持续支持、不断优化又相对稳定的队伍以及长期连续的科学积累。

“西部计划”的宗旨在于,通过对围绕中国西部环境和生态建设的基础性、战略性和前瞻性科学探索的组织和支持,推动地球系统科学的发展,并为西部地区环境和生态管理服务。

该计划的总体思路,是以陆地表层系统的物理、化学、生物、人文过程及其相互作用为主要研究对象,以各种时间和空间尺度上物质和能量传输过程的耦合与嵌套,以及这些过程在人类干预下从自然状态偏离的机理为核心,以中国西部特殊地理环境为“区域操作平台”,资助、协调和集成相关领域的研究项目,从而提高我国解决西部环境、生态和可持续发展中重大科学问题的能力。

该计划的目标,试图回答三大基本科学问题:(1)西部的现代环境格局是如何形成的?(2)如何区分西部环境和生态的演化中自然和人文因素的作用?(3)在全球变化的背景下,西部环境和生态今后的发展趋势如何?在此基础上为西部环境和生态管理决策提供科学依据。围绕这些科学问题,西部计划从“西部环境系统的演化及未来趋势”、“水循环过程与水资源可持续利用”、“生态系统过程与调控”和“主要人类活动方式与环境”四大研究主题,分年度发布项目申请指南。通过“上下结合”的立项模式,前后共资助了64个研究项目。

经过近十年的努力,已经形成了围绕西部环境和生态领域重大科学问题开展交叉协同研究的平台,获取了大量的第一手数据,构建了科研数据共享平台,取得了丰硕的科研成果。特别是围绕以下四个综合性主题,形成了集成性的研究成果:(1)中国西部环境系统演化;(2)黄土高原生态环境效应;(3)内陆河流域水循环;(4)人类活动与环境相互作用。作为“西部计划”科研成果的总结,本丛书只收录了这四个综合集成主题的部分研究成果。其他成果已广泛发表于国内外学术期刊上。

作为国家自然科学基金委员会资助的资源环境领域中第一个重大研究计划,“西部计划”不仅培育了一支致力于中国西部环境和生态科学研究队伍,取得了丰硕的科研成果,也探索出了与这一新型科研组织形式相适应的管理模式。这要感谢“西部计划”的科学指导与评估专家组,他们是:孙鸿烈、陈宜瑜、周秀

骥、程国栋、袁道先、任继周、田均良、童庆禧、蒋有绪、张宗祜、李秀彬。也要感谢“西部计划”的协调组和秘书组成员,包括:马福臣、柴育成、冷疏影、王爽等。在“西部计划”的实施规划制订过程中,黄鼎成、宋长青、王会军、李晓波、郭正堂、姚玉鹏等作出了突出的贡献。在此,谨向他们表示诚挚的谢意!

程国栋

国家自然科学基金委员会地球科学部主任

2010年8月

前 言

自 20 世纪后半叶以来,由水资源短缺所引发的生产、生活和生态等问题引起了国际社会的高度重视,在世界个别水资源严重短缺的国家和地区,甚至演化成国家之间或地区之间的冲突。为此,各国政府和科学界积极开展区域水文过程及其资源环境效应研究,为合理规划和利用水资源提供科学依据。近年来,随着涉水问题影响面的扩大和水科学研究的不断深入,研究的重点逐渐转向以流域为单元的生态—水文过程研究,旨在为流域环境综合管理奠定更为坚实的科学基础。

20 世纪末水文学与生态学的交叉和综合确立了生态水文学的诞生,进入 21 世纪,生态水文学主要研究水文循环和生态系统的相互作用,探索生态系统模式、多样性、结构和功能的水文学机理;认识非生物环境中的生物学过程;构建水文学和生态学之间的知识桥梁。针对全球水问题和生态问题寻求流域尺度的解决方案,生态水文学成为集成流域管理的重要工具。

在我国西北干旱区,水是生命和经济活动之源;有水就是绿洲,无水便成荒漠。西北地区每个内陆河流域都是一个山区与平原、绿洲与荒漠、地表水与地下水相互转换的独立单元,可持续地运行该单元的根本是流域内水生态经济的协调发展。我国的内陆河集中分布在西北干旱区和青藏高原,行政上分属新疆、内蒙古、甘肃、青海、西藏、宁夏、陕西等省区,占国土面积的 34.7%,仅有全国 5% 的水资源,塔里木河、黑河分别是我国第一和第二大内陆河。我国的内陆河地区也是中亚内陆区的重要组成部分,锡尔河、阿姆河等世界著名内陆河分布在中亚干旱内陆区。

我国内陆河地区具有高山盆地相间分布的格局。从南到北有著名的昆仑山、祁连山、天山、阿尔泰山等高大山系,均以东西走向为主,主峰海拔多在 5000 m 以上;其间分布着柴达木盆地、塔里木盆地、河西走廊、阿拉善高平原、准噶尔盆地等。各大山系海拔 4000 m 以上为高寒荒漠和多年积雪带,其下至海拔 2000 m 左右依次为高山草甸—草原带、中山森林—草原带和荒漠—草原带,2000 m 以下多为荒漠景观。分布于高大山系间的盆地、平原、残丘多属戈壁、沙漠等景观。

众多的内陆河均发源于这些名山大川,高山草甸、草原、寒漠带是主要的产流区,中山森林—草原带径流贡献较小,因此,在山区随流长的增加径流不断增大,而浅山区只有暴雨过程可能产流,出山后随流长的增加径流量逐渐减小,消

逝于大漠戈壁之中。由于我国内陆河地区多在温带和高寒区,以西风气流为主,季风为辅;山区冬半年储水于山,夏半年汇流出山。

在我国内陆河地区,汉代便开始了大规模的灌溉农业开发,一些灌溉方式、农作技术沿袭至今。随着近百年来大规模的灌溉农业快速扩展,传统生产方式下水资源捉襟见肘。目前在所有较大的河流出口均建起了调蓄水库,有的河流库容已经超过年径流量。为此,生产、生活、生态水之争,上、中、下游分水的矛盾日益激化,河川断流,湖泊干涸,沙尘暴、沙漠化等严重地影响区域稳定和发展。诸多内陆河流域已经成为国家水、生态重点工程区。

国家自然科学基金委员会结合国家西部大开发的战略举措启动了“中国西部环境和生态科学研究计划”,开展中国西部环境和生态建设的基础性、战略性和前瞻性科学问题研究,推动相关学科的发展,为西部地区的环境和生态建设及管理决策提供科学依据。《中国西部典型内陆河生态—水文研究》是该计划支持的“黑河流域生态—水文过程研究集成(90702001)”、“塔里木河下游生态安全与生态需水量研究”(90502004)”等项目群在我国塔里木河和黑河两大内陆河的部分研究成果的集成,同时也是中国科学院西部行动计划“黑河流域水循环与水资源管理研究(KZCX2-XB2-04)”和“塔里木河下游绿色走廊保护恢复与沙漠化防治试验示范(KZCX1-08-03)”成果的集中体现。

相关项目执行和书稿撰写过程中得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室、中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室、甘肃省水文局、西北师范大学等单位的大力支持和协作,在此表示衷心感谢!

全书由程国栋、肖洪浪、陈亚宁组织撰稿和定稿,肖洪浪、肖生春负责全书统稿;全书按流域分成上、下两篇,共14章。上篇:黑河流域由8章组成;第1章和第2章主要研讨了黑河流域水、土、生态系统的特征与格局;第3章至第6章是基于野外长期观测试验的能水循环、生态水文过程的研究集成;第7章和第8章总结了黑河流域水环境变化的生态效应及其生态修复的试验研究。下篇:塔里木河流域由5章组成;第9章和第10章概述了塔里木河流域的自然和社会概况并介绍了流域6大类生态系统;第11章至第13章先后讨论了塔里木河流域生态服务功能,评估了流域生态健康,并立足于生态安全探讨了生态水问题;第14章概要了流域科学近年来的发展与趋势。各章主要撰稿人如下:

第1章:肖洪浪,肖生春,程国栋,王芳;

第2章:蓝永超,胡兴林,赵良菊,杨秋;

第3章:高艳红,程国栋;

第4章:陈仁生,康尔泗,阳勇,金博文;

第5章:吉喜斌,赵文智;

第6章:司建华,席海洋,冯起;

第7章:肖生春,任娟,王勇,杨永刚;

第8章:赵成璋,司建华,焦亮,张小由;

第9~10章:傅爱红,李卫红,黄湘;

第11~13章:陈亚宁,黄湘,傅爱红,叶朝霞;

第14章:肖洪浪,程国栋。

此外,周茂先、杨秋、王芳、侯兰功、杨永刚、任娟、尹力负责对书稿字句、格式、单位等进行了最后的检查。

尽管我们在内陆河流域水资源管理和生态恢复领域进行了多年的探索,但因其综合性强、涉及学科多,以及覆盖决策、科研、管理等范畴;加之我国干旱区流域尺度的生态、经济、社会综合研究仍然处于起步和发展阶段,还有不少科学和实践问题需要进一步研究和探索;编写组科学审慎地几易其稿,但错误和疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编者

2009年12月

目 录

序 前言

上 篇

第 1 章 黑河流域概述	(3)
1.1 黑河流域水资源及其利用	(3)
1.2 黑河流域土地类型及其利用	(6)
1.2.1 流域自然条件与土地分异	(6)
1.2.2 流域土地分类	(7)
1.2.3 土地类型的一般特征及其内部分异	(8)
1.3 黑河流域生态系统及其特征	(12)
1.3.1 祁连山地系统	(12)
1.3.2 绿洲系统	(18)
1.3.3 荒漠系统	(23)
第 2 章 黑河流域水系统	(28)
2.1 黑河流域水系与水文地质概况	(28)
2.1.1 祁连山区	(29)
2.1.2 北山地区	(30)
2.1.3 走廊平原区	(30)
2.2 黑河干流水系与径流预测	(31)
2.2.1 上游出山径流的变化	(31)
2.2.2 黑河干流出山径流的预测	(36)
2.2.3 黑河干流出山径流对气候变化的响应	(42)
2.3 黑河中游地下水系统	(44)
2.3.1 平原区地下水分带	(44)
2.3.2 中游地表水、地下水转化	(46)
2.3.3 地下水平衡	(48)
2.3.4 黑河中游盆地水资源转化模型	(50)
2.4 黑河流域水循环的同位素初步研究	(54)
2.4.1 黑河上游不同水体的联系	(55)
2.4.2 $\delta^{18}\text{O}$ 表明黑河流域不同水体转化	(62)

2.4.3	放射性同位素 T 及 ^{14}C 揭示黑河流域地下水的更新速度的揭示	(64)
2.5	巴丹吉林沙漠地下水来源研究	(67)
2.5.1	巴丹吉林沙漠地下水与其周围水体的关系研究	(67)
2.5.2	巴丹吉林沙漠地下水与降水的关系研究	(69)
2.5.3	巴丹吉林沙漠地下水来源及形成条件探讨	(71)
2.5.4	结论	(73)
第3章	黑河流域生态—水文系统的地气过程	(74)
3.1	陆面水文过程与大气过程相互作用	(74)
3.1.1	陆面过程模式	(74)
3.1.2	方案设计	(79)
3.2	分布式基础数据制备	(81)
3.2.1	地形高程	(81)
3.2.2	土地利用类型分布	(83)
3.2.3	植被覆盖度分布	(84)
3.2.4	土壤质地类型分布	(86)
3.2.5	土壤特征参数修正	(88)
3.2.6	模拟方案设计	(89)
3.2.7	模拟结果分析	(90)
3.3	荒漠、绿洲系统与大气过程的相互作用	(90)
3.4	大尺度资料转换	(93)
3.4.1	资料选取	(94)
3.4.2	降尺度转换方案	(95)
3.4.3	主要结论	(95)
3.5	地面蒸散的大气遥感估算	(96)
3.5.1	资料介绍	(96)
3.5.2	计算方法	(96)
3.5.3	计算个例及其验证	(97)
3.5.4	讨论	(99)
第4章	祁连山生态系统能水循环和水平衡	(100)
4.1	高山寒漠带能水循环观测与模拟	(100)
4.1.1	数据和方法	(100)
4.1.2	模型验证	(101)
4.1.3	水热传输过程初步解析	(101)
4.1.4	高山寒漠带蒸散、凝结和水文效应	(105)
4.2	高山草甸冻土区能水循环观测与模拟	(107)
4.2.1	数据和模型	(107)
4.2.2	模型验证	(108)
4.2.3	水热传输	(110)
4.2.4	能水平衡	(111)

4.2.5 小结	(113)
4.3 山区植被变化及其控制因素	(114)
4.4 高山草甸生态—水文功能	(116)
4.5 森林草原能水平衡及水源涵养	(121)
4.5.1 山地青海云杉林的气候、水文和生态功能	(122)
4.5.2 高山草原试验点水热平衡	(125)
4.6 山区径流形成过程及水量平衡	(126)
第5章 黑河中游人工绿洲生态—水文过程观测与模拟	(131)
5.1 绿洲农田环境要素特征分析	(131)
5.1.1 太阳辐射	(131)
5.1.2 气温、气湿与气压	(134)
5.1.3 土壤温度与湿度	(137)
5.1.4 二氧化碳浓度	(139)
5.1.5 风速与风向	(140)
5.2 绿洲灌溉农田土壤—植被—大气系统水热传输过程观测与模拟	(144)
5.2.1 绿洲土壤—植被—大气系统水热传输过程模型构建	(145)
5.2.2 模型验证	(145)
5.2.3 模拟结果与讨论	(148)
5.2.4 中游绿洲农田作物生长季水量平衡	(151)
5.3 中游绿洲农田防护林树木耗水与尺度转换	(152)
5.3.1 二白杨林木耗水规律	(153)
5.3.2 沙枣林木耗水规律	(155)
5.3.3 梭梭林木耗水规律	(157)
5.3.4 树木耗水规律尺度转换	(159)
5.4 中游草地能水平衡观测与模拟	(161)
5.4.1 草地生态系统水热传输过程观测试验	(161)
5.4.2 草地热量传输过程的季节与日变化	(162)
5.4.3 草地蒸散过程估算	(164)
第6章 黑河下游天然绿洲生态—水文过程	(166)
6.1 天然植被多尺度蒸散耗水过程	(166)
6.1.1 枝叶尺度	(166)
6.1.2 单株尺度	(170)
6.1.3 林分尺度	(176)
6.1.4 区域尺度	(180)
6.2 荒漠绿洲天然植被对水文过程的响应	(182)
6.2.1 地下水位变动对荒漠绿洲植被的影响	(182)
6.2.2 荒漠绿洲临界地下水位推求	(192)
6.2.3 荒漠绿洲植被生长与土壤水分、盐分的关系	(194)
6.2.4 荒漠绿洲水分调控的生态响应	(195)

6.3 地下水运动模拟及生态环境演变预测	(212)
6.3.1 地下水运动模拟	(212)
6.3.2 地下水模型的生态预测	(225)
第7章 人类活动与流域生态—水文系统相互作用	(230)
7.1 黑河流域水环境演变及其驱动机制研究	(230)
7.1.1 流域上游咸水环境研究——气候变化影响	(231)
7.1.2 中游平原区用水环境研究——人类活动影响	(235)
7.1.3 下游水咸环境研究——人类活动与气候变化双重影响	(237)
7.1.4 流域水环境演变驱动机制研究	(242)
7.2 历史时期水环境演变与水平衡估算	(243)
7.2.1 黑河流域中游历史时期的人口和耕地面积统计与估算	(244)
7.2.2 黑河流域上游水资源量与中游利用量概算	(244)
7.2.3 黑河下游尾间湖泊水域与水量估算	(245)
7.2.4 历史时期黑河流域下游水环境演变驱动分析	(246)
7.3 流域中下游水资源利用与环境效应	(248)
7.3.1 近50年来黑河流域水资源变化时空特征	(248)
7.3.2 近50年来黑河流域区域耗水特征	(249)
7.3.3 近50年来黑河流域水问题阶段特征	(250)
7.4 居延海恢复及其生态服务价值评估	(253)
7.4.1 黑河分水的水量调度特征及居延海湖水域变化	(253)
7.4.2 生态系统服务价值评估方法	(254)
7.5 绿洲社会经济系统水循环过程及其水资源效应	(257)
7.5.1 社会经济系统水循环过程研究	(257)
7.5.2 社会经济系统水循环的水资源效应	(264)
7.5.3 社会经济系统水循环调控模拟	(268)
第8章 黑河流域生态修复试验研究	(281)
8.1 祁连山生态修复试验研究	(281)
8.1.1 祁连山毒杂草型退化草地生态修复研究	(281)
8.1.2 祁连山退耕地生态修复研究	(302)
8.1.3 祁连山退化林地生态修复试验研究	(308)
8.2 下游河岸林系统保育及其环境效应	(319)
8.2.1 河岸胡杨林更新复壮	(319)
8.2.2 绿洲边缘梭梭林补建	(322)
8.2.3 荒漠绿洲草地改良与生态经济型草库仑建设	(324)
8.2.4 河岸林保育对策	(325)

下 篇

第9章 塔里木河流域概况	(329)
---------------------------	--------------

9.1	地理位置	(329)
9.2	地形地貌	(329)
9.3	气象特征	(330)
9.4	水文水资源	(331)
9.5	土壤概况	(331)
9.6	植被概况	(332)
9.7	社会经济概况	(332)
第 10 章	塔里木河流域生态系统类型	(334)
10.1	森林生态系统	(334)
10.2	草地生态系统	(335)
10.3	农田生态系统	(335)
10.4	水域生态系统	(336)
10.5	湿地生态系统	(336)
10.6	难利用地	(337)
10.7	生态系统类型景观格局	(337)
第 11 章	塔里木河流域生态系统服务功能	(339)
11.1	生态系统服务功能与价值研究	(339)
11.1.1	国内外研究进展与评述	(339)
11.1.2	生态系统服务功能与评价模型	(344)
11.1.3	生态系统服务功能研究的主要问题	(356)
11.1.4	绿色 GDP 核算方法	(358)
11.2	流域生态系统服务功能	(360)
11.2.1	气体调节	(360)
11.2.2	气候调节	(360)
11.2.3	水分调节	(361)
11.2.4	土壤形成与保护	(361)
11.2.5	废物处理	(361)
11.2.6	生物多样性保护	(362)
11.2.7	食物和原材料生产	(362)
11.2.8	娱乐文化价值	(362)
11.3	流域生态系统服务功能评价	(363)
11.3.1	塔里木河农田生态系统食物生产价值单价确定	(363)
11.3.2	塔里木河干流生态系统生态服务单价订正	(364)
11.3.3	塔里木河干流生态系统服务功能的价值现状	(366)
11.3.4	塔里木河干流土地利用变化状况	(369)
11.3.5	塔里木河干流生态系统服务功能价值的时空变化特点	(373)
11.4	生态恢复工程的既得经济效益	(379)
11.5	塔里木河生态系统服务价值与绿色 GDP 核算	(381)
11.5.1	传统 GDP 简析	(381)

11.5.2	现行 GDP 的修正——绿色 GDP 应运而生	(382)
11.5.3	绿色 GDP 的核算	(383)
11.5.4	生态系统服务价值与绿色 GDP 核算	(383)
11.5.5	塔里木河干流绿色 GDP 核算	(383)
11.6	生态系统服务功能与可持续发展	(385)
11.7	结果与讨论	(387)
第 12 章	塔里木河流域生态安全与生态系统健康	(391)
12.1	流域生态安全与健康评价理论基础	(391)
12.1.1	流域生态安全理论基础	(391)
12.1.2	流域生态系统健康的理论与方法	(396)
12.2	流域生态系统健康评价	(401)
12.2.1	指标体系分析法及其应用	(402)
12.2.2	层次分析法及其应用	(406)
12.2.3	基于 PSR 模型的生态系统健康评价	(420)
12.2.4	基于活化能—结构活化能—生态缓冲量的流域生态系统健康评价	(432)
12.2.5	小结	(440)
12.3	流域生态安全评价	(441)
12.3.1	生态安全问题	(441)
12.3.2	流域生态安全分析	(442)
12.3.3	基于层次分析法的流域生态安全评价	(449)
12.3.4	基于属性识别模型的流域生态安全评价	(455)
12.3.5	基于生态足迹的流域生态安全评价	(458)
12.4	流域生态安全体系的构想	(462)
12.4.1	流域生态安全组织管理系统	(462)
12.4.2	流域生态安全规划、决策与建设管理系统	(462)
12.4.3	流域生态安全法律与政策配套系统	(462)
12.4.4	流域生态安全管理信息系统	(463)
12.4.5	流域监测、预警、监督和评估系统	(463)
12.4.6	流域生态安全资金保证系统	(463)
12.5	改善流域生态安全问题的建议	(464)
12.5.1	建立科学合理的生态补偿机制	(464)
12.5.2	建立完善的流域生态安全评价标准体系	(464)
12.5.3	保护流域森林资源,加强生物防治措施与水利设施建设,防治水土流失	(464)
12.5.4	加快农业生产结构调整,发展生态农业	(464)
12.5.5	加强水资源管理,严格控制水污染	(465)
12.5.6	强化生态安全意识,建立公众积极参与机制	(465)
12.6	流域生态安全发展模式与恢复措施	(465)
12.6.1	生态安全发展模式	(465)

12.6.2 生态恢复措施	(466)
12.7 结论与展望	(469)
12.7.1 主要结论	(469)
12.7.2 有待进一步研究的问题	(470)
第13章 维系塔里木河流域生态安全的生态需水量估算	(472)
13.1 区域生态需水估算方法研究	(473)
13.2 生态安全与生态需水量研究的关键问题	(473)
13.3 研究区概况	(475)
13.4 四源流天然植被生态需水量	(476)
13.5 基于不同保护目标的干流生态需水量	(477)
13.5.1 定额法	(477)
13.5.2 潜水蒸发法	(478)
13.5.3 地下水储量变化法	(480)
13.6 下游天然植被最低生态需水量	(481)
13.6.1 数学方法	(481)
13.6.2 地下水与天然植被的关系	(482)
13.6.3 土壤水与天然植被的关系	(485)
13.6.4 植被面积与模型参数的确定	(485)
13.6.5 生态需水量	(486)
13.7 下游天然植被适宜生态需水量	(487)
13.7.1 河道耗水规律研究	(487)
13.7.2 生态输水影响范围	(489)
第14章 国内外流域科学发展、现状与趋势	(492)
14.1 基本认识与理解	(492)
14.2 流域科学的发展过程	(492)
14.3 流域科学的最新进展和发展趋势	(493)
14.4 流域科学的应用前景	(494)
主要参考文献	(495)