

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

山西省水生态系统 保护与修复研究

刘家宏 王浩 秦大庸 尹婧 等著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

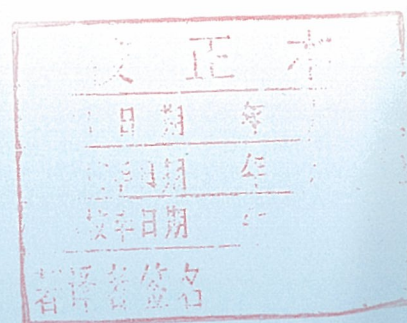
山西省水生态系统 保护与修复研究

刘家宏 王浩 秦大庸 尹婧 等著



科学出版社

北京



内 容 简 介

本书系统地总结了山西省水生态系统保护与修复科研及实践中的主要成果。建立了同等考虑“自然-社会”二元因子的水生态系统分区理论,揭示了植被覆盖与水循环相互作用的机理,提出了水生态系统修复的价值评价理论与方法;针对不同类型区域提出了5项水生态保护与修复的关键技术,解决了我国北方严重缺水地区典型水生态系统的修复模式、调控阈值和维持途径等技术问题;开展了清水复流工程、泉域保护、盆地地下水超采治理、矿井水和煤矸石综合利用等技术示范。

本书可供大专院校和科研单位及从事水资源管理、水生态修复设计的专家学者、研究生及技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

山西省水生态系统保护与修复研究 / 刘家宏等著. —北京: 科学出版社, 2014. 1

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-038054-8

I. 山… II. 刘… III. 水环境-生态系统-环境保护-研究-山西省
IV. X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 136070 号

责任编辑: 李 敏 张 震 / 责任校对: 宣 慧

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

• *

2014 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 16 1/4 插页: 2

字数: 500 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础,也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何,都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题;为解决水资源问题开展的各类水事活动,本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下,受人类活动和气候变化的综合作用与影响,流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变,致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律,寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径,是解决复杂水资源问题的科学基础,也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响,中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一,其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末,流域内人口稠密、生产发达,经济社会需水模数居全国前列,流域水资源衰减问题十分突出,不同行业用水竞争激烈,环境容量与排污量矛盾尖锐,水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式,揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律,从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑,2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(编号:2006CB403400)。项目下设8个课题,力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论,认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理,构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统,揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律,继而在科学评价流域资源利用效率的基础上,提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式,为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础,增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关,项目取得了6方面的主要成果:一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理;二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

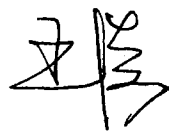
的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在2010年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域973计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步奖一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河973计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011年10月10日

序

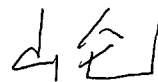
山西省是我国重要的能源化工基地，在国家能源战略安全中占有重要地位，但由于地处北方缺水地区，其生态环境脆弱。在能源开发和经济社会发展过程中，山西省付出了较为沉重的生态环境代价，突出表现在河道断流、地下水超采、水质污染以及岩溶大泉干涸等方面，不仅严重影响了山西省社会经济的可持续发展，甚至危及了京津唐地区的能源安全和北京市水资源安全，因此，最大限度地保护与修复退化的水生态系统已刻不容缓。2006年3月，温家宝总理视察山西省时指出“山西最大的制约因素在水”，2007年3月21日，山西省政府通过《关于加强水利建设实施兴水战略的决定》。作为“兴水战略”的重要组成部分，山西省水利厅组织开展了“山西省水生态系统保护与修复规划”的编制，并通过了水利部的审查批复，被列为全国水生态系统保护与修复的第一个省级试点。“山西省水生态系统保护与修复研究”立足基础研究，面向水生态系统的保护和修复实践，在理论创新、关键技术攻关和示范工程方案设计等方面为山西省级水生态保护修复试点提供了系统的技术支撑。

全面、系统的省级水生态保护与修复研究，在世界各国尚无先例。国外水生态系统的修复主要是局部地区或关键点的修复，例如，河流重要河段的修复、加油站（或垃圾填埋场）周边地下水质的保护与修复等，相应的技术要点也比较孤立，缺乏系统性保护与修复技术体系。目前国内已经开展了十几个城市的水生态系统保护与修复试点，针对的主要是城市生态水网，问题相对单一，对综合技术集成的要求不高。山西省水生态系统受人类活动干扰程度深、问题复杂，涵盖了我国北方缺水地区水生态保护与修复的主要内容。本项研究及示范是我国首次投入巨资，开展此类工作，其内容之广泛、技术难度之高、工作量之大，在国内外同类研究中都是少有的。其研究成果对支撑我国水生态保护与修复实践，推动学科发展具有重要意义。

该书面向山西省资源型经济转型和生态环境保护的重大需求，以山西省水生态系统的突出问题为导向，将技术原创与现有技术的再开发有机结合，研究了我国北方严重缺水地区的生态系统评价理论，形成了水生态系统分区理论、植被覆盖与水循环相互作用机理、水生态系统服务价值理论3项原创性理论成果；针对河流廊道、退化湿地、岩溶泉域、采

煤区、水土流失区 5 种典型水生态系统，研究了各自相应的修复模式、调控阈值和维持途径等技术难题，形成了 5 项水生态保护与修复关键技术的集成创新成果。在上述科学认知和关键技术研究成果的基础上，抓住山西省汾河断流、岩溶大泉破坏、地下水超采、采煤排水污染及水源地水质不达标等突出的水生态问题，在全省范围内开展了 6 项技术示范，具体包括：汾河清水复流工程、娘子关泉域保护、汾河流域地下水超采区治理、古交矿区矿坑水与煤矸石综合利用、水土流失区生态保护与修复，以及水污染治理与水源地保护。在示范区实现了汾河清水复流、娘子关泉水出流稳定且水质明显改善、太原盆地地下水位止降回升、古交矿坑水综合利用及水源地水质达标率明显提升等一系列示范效果，取得了显著的生态和社会经济效益。该书系统地建立了适合我国北方严重缺水和资源型经济区的水生态系统保护与修复的理论和技術体系，为践行科学发展观、构筑生态文明提供了重要的理论基础和技术借鉴。

中国工程院院士



2013 年 5 月

前 言

山西省为保障国家的能源安全和京津唐地区的电力供应作出了重大贡献。20 世纪 80 年代以来,山西省进入了一个较长的枯水期,水资源量持续偏少。1956~2000 年系列山西省全省多年平均水资源总量为 123.8 亿 m^3 。1980~2000 年系列山西省全省水资源总量降为 109.3 亿 m^3 ,其中最小年份(1996 年)仅为 79.4 亿 m^3 。水资源的连续偏枯,加之人类活动影响带来了一系列生态环境问题。

开展山西省的水生态系统保护与修复工作已迫在眉睫,山西省省委、省政府历任领导都十分重视。2007 年 6 月 15 日,山西省政府领导在北京就有关于山西省“兴水战略”全局的几个重要问题与水利部陈雷部长、矫勇副部长进行了座谈,提出希望水利部将山西省列为全国水生态系统保护与修复试点省份。根据水利部和山西省政府领导的指示,山西省水利厅将编制《山西省水生态系统保护与修复规划》作为 2008~2009 年的重要任务。为提高规划的科学性和可操作性,山西省水利厅委托中国水利水电科学研究院等单位开展“山西省水生态系统保护与修复研究”工作,负责基础理论创新、关键技术攻关和示范工程方案设计,为山西省水生态保护与修复及其示范工程建设提供系统的技术支撑。2011 年 6 月,经过深入的调研和严格的技术审查,水利部最终批复山西省成为第 12 个水生态系统保护与修复试点,同时也是唯一一个省级试点。

本书系统地汇集了山西省水生态系统保护与修复科研和实践中取得的主要成果,共分 9 章,主要包括四个部分:第 1~2 章为第一部分,概述项目基本情况、研究区基本情况和国内外研究进展;第 3~7 章为第二部分,叙述水生态系统分析与评价基础、水生态系统保护与修复指标体系、典型水生态系统保护与修复技术及应用、面向生态的河流水资源配置,以及水生态系统修复的价值评价技术;第 8 章为第三部分,介绍水生态系统保护与修复的 6 类示范工程及相应的保障措施和政策建议;第 9 章为第四部分,对研究成果和示范效益进行总结,并对未来的研究内容进行展望。

本书是在国家自然科学基金面上项目“城市高强度耗水的机理与模型研究”(51279208)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”(2006CB403401)、国家自然科学基金创新群体研究基金“流域水循环模拟与调控”

(51021066)、青年科学基金项目“中国干旱半干旱地区植被与水循环相互作用机理研究”(51109222)以及国家自然科学基金重点项目“社会水循环系统演化机制与过程模拟研究”(40830637)共同资助下,由中国水利水电科学研究院等3个单位的研究人员共同撰写完成。分章撰写人员如下:第1章刘家宏、王浩和秦大庸;第2章邵薇薇、刘家宏和陈向东;第3章秦大庸、邵薇薇和刘淼;第4章尹婧、苟思和侯卓;第5章褚俊英、尹婧和葛怀凤;第6章桑学锋、刘家宏和秦大庸;第7章褚俊英、杨朝晖和李玮;第8章刘家宏、尹婧和李玮;第9章王浩、刘家宏和秦大庸。

限于写作水平和时间,书中难免存在不足之处,敬请广大读者不吝批评指教。

作 者

2013年5月于北京

目 录

总序

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 项目概况	1
1.1.1 立项背景	1
1.1.2 技术路线	1
1.1.3 研究过程	2
1.1.4 成果与效果	4
1.2 山西省水生态系统概况	5
1.2.1 自然地理	5
1.2.2 社会经济	5
1.2.3 水生态系统	6
1.2.4 面临的主要问题	8
第2章 国内外研究现状与述评	12
2.1 生态修复研究现状	12
2.1.1 国外研究现状	14
2.1.2 国内研究现状	16
2.2 植被与水循环相互作用研究进展	19
2.2.1 覆被变化对流域水循环的影响	19
2.2.2 植被变化对降水量的影响	20
2.2.3 土壤水分对植被的影响	22
2.3 水生态系统理论研究进展	23
2.3.1 生态分区	25
2.3.2 水文分区	29
2.3.3 生态水文分区	32
2.3.4 区划方法	34

2.4 山西省水生态系统保护与修复研究现状	35
第3章 水生态系统分析与评价基础	38
3.1 水生态系统分区理论	38
3.1.1 分区指标体系	38
3.1.2 主要指标数据及分区评价	39
3.1.3 山西省水生态系统分区	50
3.2 植被与流域水循环相互作用机理	55
3.3 山西省水生态系统总体评价	62
3.3.1 坡面生态系统	62
3.3.2 河流廊道生态系统	67
3.3.3 地下水系统	68
3.3.4 煤炭开采区	79
3.3.5 饮水水源地	82
第4章 水生态系统保护与修复指标体系	83
4.1 河流廊道系统保护与修复指标	83
4.1.1 河流廊道生态保护与修复目标	83
4.1.2 河流廊道生态保护与修复指标体系	83
4.2 地下水系统保护与修复指标	85
4.2.1 地下水生态保护与修复目标	86
4.2.2 地下水生态保护与修复指标体系	86
4.3 采煤区生态保护与修复指标	86
4.3.1 采煤区生态保护与修复目标	87
4.3.2 采煤区生态保护与修复指标体系	87
4.4 水土流失区生态保护与修复指标	89
4.4.1 晋西黄土高原区生态保护与修复目标	89
4.4.2 晋西黄土高原区生态保护与修复指标体系	89
4.5 饮水安全保障指标	91
4.5.1 饮水安全目标	91
4.5.2 饮水安全指标体系	92
第5章 典型水生态系统保护与修复技术及应用	93
5.1 河流廊道修复技术及应用	93
5.1.1 河道整治与修复技术及应用	93

5.1.2 入河污染物控制技术及应用	97
5.1.3 生态水量调控技术及应用	103
5.2 地下水系统保护与修复技术及应用	106
5.2.1 地下水控采技术及应用	106
5.2.2 岩溶泉域保护技术及应用	112
5.2.3 地下水水位监测技术及应用	117
5.3 采煤区水生态保护与修复技术及应用	118
5.3.1 矿井水综合利用技术及应用	118
5.3.2 矸石山生态修复技术及应用	121
5.4 水土流失区生态保护与修复技术及应用	124
5.4.1 坡耕地退耕还林还草技术及应用	124
5.4.2 基于数字流域模型的淤地坝规划技术	130
5.4.3 水土流失治理对粮食安全的影响及对策	133
5.5 饮水安全保障技术及应用	135
5.5.1 水质问题解决方案	135
5.5.2 水量问题及饮水保证率问题及解决方案	136
第6章 面向生态的河流水资源配置理论方法及应用	139
6.1 面向生态的河流水资源配置理论与方法	139
6.1.1 面向生态的河流水资源配置理论	139
6.1.2 面向生态的河流水资源配置方法	141
6.1.3 面向生态的河流水资源配置特点	141
6.2 面向生态的河流水资源配置模型构建	142
6.2.1 目标函数	143
6.2.2 约束条件	143
6.2.3 模型主要计算模块	145
6.2.4 模型水量平衡计算	146
6.2.5 配置模型运行策略	147
6.3 山西省河流生态系统用水配置	149
6.3.1 研究分区	149
6.3.2 主要河道断面控制	151
6.3.3 规划水平年河道供水分析	153
6.3.4 规划水平年需水分析	155
6.3.5 水生态系统方案设置	170
6.3.6 河道生态供水配置及分析	172

6.3.7 各水平年方案总结	189
第7章 水生态系统修复的价值评价技术	195
7.1 水生态系统修复价值评价的理论框架	195
7.2 水生态系统修复的价值评价技术	196
7.2.1 重点河流廊道	196
7.2.2 地下水系统	202
7.2.3 煤炭开采区	204
7.2.4 水土流失区	205
7.2.5 饮水安全	206
7.3 山西省水生态系统修复的价值评价结果	207
7.3.1 重点河流廊道	207
7.3.2 地下水系统	210
7.3.3 煤炭开采区	210
7.3.4 水土流失区	210
7.3.5 城乡饮水区	211
7.3.6 价值总量	211
第8章 水生态系统保护与修复示范	213
8.1 汾河清水复流工程	213
8.1.1 水源涵养与生态修复	213
8.1.2 源头雷鸣寺泉域保护	214
8.1.3 滨河湿地修复	215
8.1.4 汾河河道疏浚及岸坡整治	215
8.2 娘子关泉域保护	217
8.2.1 泉源区非点源污染控制	217
8.2.2 工业污染源控制	217
8.2.3 泉口景区建设	218
8.2.4 泉源水土保持绿化工程	218
8.3 汾河流域地下水超采区治理	218
8.3.1 汾河流域地下水超采分布	218
8.3.2 汾河流域节水型社会建设	218
8.3.3 汾河流域地下水关井压采	219
8.3.4 汾河流域地表水替代水源网络	220
8.4 采煤区水生态保护与修复	221

8.4.1 古交煤矿矿坑水综合利用	222
8.4.2 煤矸石综合利用	223
8.4.3 采煤区生态复垦	223
8.5 水土流失区生态保护与修复	224
8.5.1 坡耕地退耕还林还草	224
8.5.2 淤地坝建设	225
8.5.3 小流域水土保持生态修复	225
8.5.4 荒滩整治与坡改梯	225
8.6 水污染治理与水源地保护	226
8.6.1 滹沱河上游综合整治工程	226
8.6.2 漳河生态环境综合治理	227
8.6.3 神头泉水源地保护	227
8.6.4 郭庄泉水源地保护	229
8.7 保障措施	231
8.7.1 法律法规保障	231
8.7.2 制度保障	231
8.7.3 工程与技术保障	232
8.7.4 资金保障	232
8.7.5 社会保障	233
8.8 相关政策建议	233
8.8.1 积极推动地方水生态系统保护法规出台	233
8.8.2 完善并落实各项水生态系统保护制度	233
8.8.3 加强水生态系统保护工程和技术建设	234
8.8.4 确保水生态系统保护资金支持	234
8.8.5 加大社会宣传力度	235
第9章 基本结论与展望	236
9.1 基本结论	236
9.2 主要创新点	237
9.3 研究展望	238
参考文献	240

第 1 章 | 绪 论

1.1 项目概况

1.1.1 立项背景

《中华人民共和国水法》(以下简称《水法》)第四、三十、四十条等都明确提出了保护水资源与水生态系统的要求。开展水生态系统保护与修复工作是贯彻落实《水法》,实现人与自然和谐相处的重要内容,是各级水行政主管部门的重要职责。2004 年水利部下发了《关于水生态系统保护与修复的若干意见》(水资源[2004]316 号),正式启动了水生态系统保护与修复工作。2005 年水利部水资源司又下发了《关于开展水生态系统保护和修复试点工作的指导意见》(以下简称《指导意见》),明确提出“试点应按照国家(流域)级试点、省级和市级试点分层次进行”。2007 年 6 月,山西省政府领导提出希望水利部将山西省列为全国水生态系统保护与修复试点省份。水利部陈雷部长提出山西省可以先开展水生态系统保护和修复规划及相关关键技术研究,把试点方案拿出来,出台一些政策,水利部将山西省作为全国的试点给予支持。根据水利部和山西省政府领导的指示,山西省水利厅委托中国水利水电科学研究院和山西省水资源研究所联合开展“山西省水生态系统保护与修复研究”工作,并在此基础上编制了《山西省水生态系统保护与修复规划》及试点实施方案。

截至 2011 年,山西省是第一个申报水生态系统保护与修复试点的省份。此前,水利部已在全国 11 个城市开展了水生态系统保护与修复试点,全省范围内的试点还没有展开。2010 年 9 月 28 日,《山西省水生态系统保护与修复试点实施方案》已通过水利部组织的审查,山西省被列为第一个省级试点。

2010 年 12 月 13 日,国务院正式批准“山西省国家资源型经济转型发展综合配套改革试验区”建设,要求山西省在改革试验中一定要正确处理好产业发展和生态环境保护的关系,逐步偿还环境和生态欠账。这既是山西省水生态系统保护与修复工作的一项重大成果,同时也给本项目的研究成果提供了广阔的应用空间。

1.1.2 技术路线

山西省的山川地貌大体可分为三大部分:西北部为黄土高原,东南部为华北土石山区,中间为比较平坦的汾河谷地,山谷之中泉水分布。20 世纪 80 年代以来,随着人类活