



“十一五”国家重点图书出版规划项目

黄河流域

水资源及其演变规律研究

王 浩 贾仰文 王建华 著
秦大庸 周祖昊 严登华



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
“十一五”国家重点图书出版规划项目

黄河流域

水资源及其演变规律研究

王 浩 贾仰文 王建华 著
秦大庸 周祖昊 严登华

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是国家重点基础研究发展计划(973)项目课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”提出的三大创新性的成果总结。在研究大规模人类活动改变天然水循环的大气、地表、土壤和地下各个过程的基础上,综合分析现代环境下流域水资源对不同类型人类活动的非线性响应机理,提出了黄河流域水资源评价的系列成果。以流域水循环为各项过程统一的基础平台,以各项人类活动影响为着眼点,以流域水资源评价为主线,在提出符合流域水循环模式和流域水资源评价方法的基础上,构建了分布式二元模型;并以此为工具,提出了黄河流域水资源评价的系列成果;分析其中的演变规律,以揭示人类活动对流域水资源演化影响的内在机理;最后以评价结果为基础,提出了流域水资源调控方案,包括合理配置方案和承载能力研究。

本书可供水文水资源、水利规划、环境保护、资源开发和管理等相关领域的政府工作人员、科研工作者、高等院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河流域水资源及其演变规律研究 / 王浩等著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-024055-2

I. 黄… II. 王… III. 黄河流域—水资源—研究 IV. TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 021434 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 / 责任校对: 刘小梅

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

*

2010 年 9 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2010 年 9 月第一次印刷 印张: 19 1/4 插页: 7

印数: 1—1 500 字数: 500 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

在我国经济社会发展进程中，黄河流域始终占有十分重要的地位，流域的兴利与减灾是关系国计民生的大事。黄河的基本特点可以简要概括为：水少沙多、水沙异源；上宽下窄、地上行洪；资源丰富、水患制约。目前黄河存在三大突出问题，即洪水威胁加剧、水资源短缺严重、生态环境恶化，三大问题之间存在很强的内在联系，其相互影响的共同基础是流域水循环，其核心是“水少”。20 世纪 80 年代以来，人类活动的加剧加速了黄河流域水资源演变，例如，河道外取用水量的增加影响了河流正常生态功能的发挥，排污超出了河流自净能力导致了中下游水质劣变，等等。在科学认识“自然-人工”双重驱动力作用下的流域水循环系统演化规律的基础上，科学评价并合理调配流域水资源，是实现流域水资源可持续利用的重要保障。为此，国家重点基础研究发展计划（973）项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”专门设立了“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”课题，以期在理论与模式创新的基础上，提出人类活动影响下的流域水资源演化量化成果，以及水资源合理配置与调控方案，为黄河流域水资源的科学调控和高效利用奠定科学基础。

大规模的现代黄河流域水循环和水资源研究始于 20 世纪 50 年代，80 年代以来，随着黄河流域三大水问题日趋严重，基础层面和应用层面的研究不断加深，国家也围绕黄河水资源合理开发利用和水沙调控设立了重大科技攻关与重大自然科学基金等项目，而黄河独特的水沙条件也使得黄河一直是国际相关研究的热点和焦点。总结现有研究成果，尚存在五个方面的不足：一是对黄河历史研究与现状研究的衔接不够；二是对人为与自然双重因素作用下的黄河现代演变模式研究不够；三是对黄河主要水问题之间的共同科学基础注意不够；四是对黄河水循环与相关演变进程产生失衡的临界条件研究不够；五是对流域与河道进行整体调控的理论方法缺乏研究。

本书在系统总结和深入分析人类活动对流域水循环过程系统影响的基础上，提出了“自然-人工”二元驱动力作用下的流域水资源演变认知模式；在该理论认知模式指导下，构建了能够全面描述流域天然主循环和人工侧支水循环耦合过程的水资源二元演化模型；以此作为基本的模拟工具，

进行了黄河流域全口径层次化水资源动态评价；进而在流域水资源评价的系统平台上，抓住影响流域水资源演变的两大人类活动，以流域水资源二元演化模型为“数字实验机”，定量分析了各项人类活动对黄河流域水资源演变的影响；然后通过流域水资源的历史系列仿真评价和未来演变情景评价，系统分析了人类活动影响下的黄河流域水资源演变规律；最后基于层次化评价结果，进行了流域水资源合理配置，并提出了分区水资源承载能力。基于上述研究，本书主要有三大原创性科学和应用贡献，即黄河流域水资源的层次化评价、流域水资源二元演化模型与人类活动影响下的流域水资源演变规律研究。具体来说，在自主创新的二元模式理论的指导下，原创性地提出了全口径的水资源层次化评价方法，并以耦合的二元演化模型为工具，实现了超大流域水资源评价，首次系统地揭示了人类活动影响下的黄河流域水资源演变规律，对黄河流域未来水资源演变情势进行了定量模拟。所构建的分布式流域二元耦合模型，可灵活地实现分离式或耦合式的模拟，从而分别得出天然状态和人工干扰状态的水资源评价结果，可以通过在不同下垫面状态间的切换，评价出历史系列的实际水资源量、任一时间断面的“还原”天然水资源量（包括“还现”天然水资源量和“还未来”的天然水资源量），从而实现流域水资源的动态评价和情景评价，为流域水资源规划与调控提供全面的科学基础。

全书共分十一章。第一章简要介绍了黄河流域的概况与规划的实际需求，在分析水资源现状及其开发利用中存在问题的基础上，提出黄河流域治理开发目标及规划的需求，由王浩、王建华、胡晓寒撰写。第二章介绍了流域二元水资源演变模式，分析了人类活动对流域水循环的影响及其次生效应，提出了流域二元水循环模式及基于二元水循环过程的模拟和水资源调控方法，由王浩、秦大庸、王建华撰写。第三章原创性地提出了水资源评价层次化口径与计算方法，对水资源的内涵加以辨析，提出了水资源的评价准则及不同口径水资源量的评价方法，并建立了水质水量联合评价方法，由王浩、王建华、牛存稳撰写。第四章研究了流域二元信息的采集与加工，从基础信息的分类、子流域划分及编码、流域水循环要素的遥感反演、流域降水及相关气象要素的时空展布、流域下垫面要素信息的综合处理，到流域社会经济要素信息空间化和流域社会经济用水的时空展布，都给出了详细的方法，由周祖昊、王建华、江东、严登华、罗翔宇、贾仰文撰写。第五章构建了流域二元水循环空间信息平台，以实现海量多源异构信息的统一管理，由王建华、赵勇、江东、胡晓寒撰写。第六章建立了分布式水资源二元演化模型，详细阐述了模型的基本构架、参数估算与模型验证的具体过程，由贾仰文、周祖昊撰写。第七章将层次化全口径的评

价方法应用于黄河流域, 得出了流域的狭义水资源评价、广义水资源评价、国民经济可利用量和水质水量的联合评价, 由王浩、贾仰文、秦大庸、王建华、仇亚琴、牛存稳、井涌撰写。第八章针对黄河流域独特的地理位置和水资源开发利用特点, 研究百年尺度黄河流域水文演变规律和近 50 年水资源系统的驱动因子演变情势, 用基于二元模拟的方法对水资源演变加以分析和预测, 定量计算了人类活动的水资源演变效应, 由贾仰文、周祖昊、仇亚琴、李丽娟、许士国、严登华、杨贵羽撰写。第九章以流域二元水循环为基础, 以维护水资源的全属性功能为准则, 在现状缺水分析和未来供需预测的基础上, 提出了黄河流域水资源合理配置的方案及特殊情景下的水安全保障应急对策, 由秦大庸、李海红、王明娜撰写。第十章对黄河流域的水资源承载能力加以研究, 构建了水资源承载能力模型和承载能力表征指标体系, 得出了黄河流域的水资源最大允许开发规模和对区域社会经济的可持续支撑能力, 由秦大庸、李海红、秦长海撰写。第十一章从理论方法、模型工具、数据基础、评价结果、演变规律、人工影响和调控方案七个方面总结和概括了书中提出的创新性成果与基本结论, 并对研究前沿和热点问题进行了前瞻性讨论, 由王浩、王建华撰写。全书由王浩、秦大庸、王建华统稿, 所附图表由周祖昊、严登华、仇亚琴和杨贵羽等整编。

本书主要是基于著者完成的 973 项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”(G1999043602)的相关研究成果。科学技术部对该项成果的验收结论为“优秀”, 水利部鉴定为“达到国际领先水平”, 国内外同行专家也给予了高度评价, 成果获得 2006 年度国家科技进步奖二等奖和 2005 年度大禹水利科学技术一等奖。

本书写作和出版得到了国家科学技术学术著作出版基金委员会、国家自然科学基金委员会、科学技术部和水利部的大力支持, 在此一并表示衷心的感谢。同时需要说明的是, 由于现代变化环境下的超大流域水循环模拟和水资源评价问题的复杂性, 以及作者水平和时间的限制, 书中肯定会存在不妥甚至是错误之处, 恳请广大读者批评指正。

2010 年 6 月

目 录

前言

第一章 黄河流域概况与规划实践需求分析	1
第一节 流域概况与特点分析	1
一、流域概况	1
二、基本特点分析	2
第二节 流域水资源及其开发利用概况与主要问题	3
一、流域水资源及其开发利用概况	3
二、来水和供用水变化分析	6
三、水资源及其开发利用中存在的问题	7
第三节 黄河流域治理开发目标及规划实践需求	8
一、现代黄河治理开发的目标	8
二、黄河治理与水资源开发的关键	9
三、水资源合理开发利用的实践需求	11
第二章 流域二元水资源演变模式	12
第一节 人类活动对流域水循环的影响及其次生效应	12
一、流域水循环系统及其划分	12
二、人类活动对流域水循环系统影响的分类	13
三、人类活动作用下的流域水循环效应	17
第二节 流域二元水循环的模拟与调控	19
一、二元模式的提出与水循环系统演进	19
二、流域二元水循环过程模拟的实现	20
三、基于二元模式的水资源调控	22
第三章 水资源评价层次化口径与计算方法	24
第一节 国内外水资源评价内容与方法	24
一、水资源评价的内容	24
二、我国现行水资源评价模式与方法	25
三、我国水资源评价中存在的主要问题	28

四、本次水资源评价方法与国内外现行方法对比	30
第二节 流域水循环过程的通量和存量	30
一、通量和存量的概念界定	31
二、通量和存量的转化关系	32
三、通量和存量对于水资源评价的意义	33
第三节 水资源评价准则及其层次化口径	35
一、水资源的内涵辨析	35
二、评价的基本准则及其层次化评价口径	36
第四节 不同口径水资源量的评价方法	40
一、广义水资源评价	40
二、土壤水资源评价	46
三、狭义水资源评价	47
四、国民经济可利用量评价	48
第五节 水质水量联合评价方法	50
一、研究现状	50
二、评价目标	52
三、评价方法	52
四、方法特点	55
第四章 流域二元信息的采集与加工	56
第一节 基础信息分类与采集	56
一、信息分类	56
二、采集信息描述	57
第二节 包含拓扑信息的子流域划分及其编码	61
一、模拟河网的提取	61
二、流域编码	63
三、子流域的再划分	66
第三节 流域水循环要素的遥感反演	66
一、遥感信息源	66
二、面雨量的遥感反演	67
三、流域蒸散发的遥感反演	71
第四节 流域降水及相关气象要素的时空展布	75
一、流域降水的时空展布	75
二、相关气象要素的空间展布	83
第五节 流域下垫面要素信息的综合处理	85
一、土壤与水文地质	85
二、植被	86
三、土地利用	87

四、水土保持信息	90
五、水利工程	90
第六节 流域社会经济要素信息空间化	91
一、社会经济信息空间化的意义	91
二、黄河流域人口空间化	92
三、GDP 数据空间化	95
第七节 流域社会经济用水的时空展布	97
一、基础准备	97
二、生活用水的时空展布	99
三、工业用水的时空展布	99
四、农业用水的时空展布	99
第五章 流域二元水循环空间信息平台建设	104
第一节 二元信息平台的总体结构与设计	104
一、概述	104
二、平台的分析与设计	105
三、平台开发与运行环境	108
第二节 平台主要功能模块分析	109
一、数据管理	109
二、信息加工和参数提取	111
三、空间分析与数据挖掘工具集	112
四、模型管理与应用	113
五、成果输出	114
六、系统安全	115
第三节 平台建设的关键技术与特色	116
一、数据资源层	117
二、业务应用层: GIS 平台	118
三、模型库与模型库管理系统	119
第六章 水资源二元演化模型构建	120
第一节 概述	120
第二节 研究现状分析与建模思路	120
一、分布式流域水文模型	120
二、陆面过程模型	124
三、二元模型建模思路	124
第三节 分布式水循环模型	125
一、模型简介与模型结构	125
二、水循环与能量过程模拟方法	128

三、模拟步骤及 GIS 技术的应用	138
四、模型流程图及模块说明	139
第四节 水资源二元演化模型的耦合模拟	141
一、耦合模拟思路	141
二、历史系列的二元耦合模拟	141
三、未来情景下的二元耦合模拟	142
第五节 参数估算与模型验证	143
一、参数估算	143
二、模型验证	148
第六节 小结	151
第七章 流域水资源全口径层次化评价	153
第一节 降水结构解析	153
一、系列降水量	153
二、降水的资源结构解析	153
第二节 狭义水资源评价	154
一、片水资源评价	155
二、断面水资源评价	156
第三节 广义水资源评价	157
一、有效蒸发计算	157
二、广义水资源评价	159
第四节 国民经济可利用量评价	160
一、河道内基本生态环境需水量	161
二、河道外难控制利用洪水下泄量	165
三、国民经济可利用量	167
第五节 水量水质联合评价	169
一、污染源调查与水质状况	169
二、改进代表河长法对黄河水质评价	171
三、水量水质联合评价	172
第八章 黄河流域水资源演变规律分析	176
第一节 百年尺度的黄河流域水文演变规律	176
一、水文丰枯变化频率分析	176
二、旱涝演化规律分析	179
三、太阳黑子对年径流影响分析	181
四、基于温室效应的流域降水变化情景分析	184
第二节 1956 ~ 2000 年水资源系统的驱动因子演变分析	188
一、20 世纪 90 年代干旱期的降水系统分析	188

二、水面蒸发演变	191
三、供用水变化规律分析	193
四、下垫面演变	198
第三节 基于二元模型的水资源演变分析	200
一、水资源历史演变规律分析	200
二、未来水资源演变预测	202
第四节 各项人类活动的水资源演变效应定量计算	204
一、人工取用水对于流域水资源演变影响	204
二、下垫面变化对于流域水资源演变影响	207
第五节 小结	208
第九章 黄河流域水资源合理配置	209
第一节 水资源合理配置的决策机制及过程方法	209
一、国内外研究现状	209
二、四大内在决策机制	211
三、配置原则与供需平衡方法	212
第二节 流域水资源系统分析与配置模型构建	215
一、水资源系统分析与概化	215
二、合理配置模型构建	217
三、分区与水平年	224
第三节 现状缺水分析和未来供需预测	224
一、水资源开发利用评价	224
二、现状缺水计算	227
三、社会经济指标预测	231
四、节水分析与需水预测	235
五、可供水量预测	240
第四节 供需平衡分析与水资源调配及保障	243
一、水资源供需平衡分析	243
二、基于南水北调工程的水资源调配分析	245
三、特殊情景下的水安全保障应急对策	247
第十章 黄河流域水资源承载能力研究	248
第一节 水资源承载能力的基础理论研究	248
一、水资源承载能力研究概述	248
二、水资源承载系统分析	251
三、水资源承载能力的基本研究内容	253
四、水资源承载能力的主要研究方法	254
第二节 水资源承载能力表征指标	257

一、承载能力的影响因子与层次化表征	257
二、水资源承载能力表征指标体系构建	258
三、历史及现状指标值评价	260
第三节 黄河流域水资源承载能力	261
一、承载能力模型构建	261
二、黄河流域水资源供需平衡计算	268
三、分项指标计算	269
四、承载能力计算结果与分析	273
第四节 黄河流域发展对策	274
一、严格控制人口增长	274
二、加大宣传力度，提高节水意识	274
三、增强节水和开源	275
四、建立合理的水价机制	275
五、完善水权制度，建立水资源统一管理机制	275
第十一章 主要成果与基本结论	277
一、理论方法	277
二、模型工具	278
三、数据基础	279
四、评价结果	279
五、演变规律	280
六、人工影响	281
七、调控方案	282
八、创新总结	282
参考文献	284

彩图

第一章 黄河流域概况与规划实践需求分析

第一节 流域概况与特点分析

一、流域概况

黄河史称“四渎之宗”，是我国第二大河，不仅孕育了中华民族 5000 年的悠久文明，而且在我国现代社会经济发展中占有十分重要的地位。这是因为一方面黄河流域在地域上承东启西，且疆域辽阔、人口众多、资源丰富，另一方面黄河水旱灾害、泥沙问题又十分严重。黄河治理的好坏直接影响着社会经济进步的进程，因此，黄河流域的发展和治理直接关系我国的发展与稳定。

（一）自然地理概况

黄河自西向东，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东九省（自治区），注入渤海，全长 5464km，其中河源到托克托河段为上游，托克托到桃花峪河段为中游，桃花峪以下为下游。全流域位于 $96^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$ ， $32^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$ ，流域总面积为 $794\,712\text{km}^2$ ，其中鄂尔多斯闭流区面积为 $42\,269\text{km}^2$ 。黄河流域位置见彩图 1。

黄河流域的地形自西向东呈由高到低的三大巨型阶梯：第一阶梯为青海高原，海拔超过 4000m；第二阶梯大致以太行山为东界，包括河套平原、鄂尔多斯高原、黄土高原和渭汾盆地等大型地貌单元，海拔 1000 ~ 2000m；第三阶梯自太行山、邙山往东直到海滨，是黄河冲积大平原区，海拔一般低于 100m。三大地形阶梯对于黄河流域的气候和自然景观格局有着决定性作用。

黄河流域横跨南温带、中温带和高原气候区 3 个气候带，年日照时数为 1900 ~ 3400h，上游平均气温为 $-4.0 \sim 9.3^{\circ}\text{C}$ ，中游平均气温为 $9.4 \sim 14.6^{\circ}\text{C}$ ，下游平均气温为 14.2°C 。20 世纪以来，受温室效应影响，流域有增温趋势。黄河流域有集水面积超过 1000km^2 的入黄支流 76 条，其中上游 43 条，中游 30 条，下游 3 条，最大支流为渭河。流域河网密度不均，中游黄土高原区河网密度较高，最高达到 $3.89\text{km}/\text{km}^2$ ，为水土流失提供了顺畅的通道。

（二）社会经济概况

截至 2006 年底，黄河流域总人口为 1.15 亿，占全国总人口的 8.8%，其中城镇人口为 0.46 亿，城镇化率为 39.9%。2006 年黄河流域国内生产总值（GDP）为 13 798 亿元，占全国 GDP 的 7.0% 左右，人均 GDP 为 12 044 元，比全国人均 GDP 低 21.0% 左右。2006 年黄河流域第一产业、第二产业和第三产业的增加值分别为 1226 亿元、