

“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

基于ET的水资源与 水环境综合规划

王 浩 周祖吴 秦大庸 桑学锋 等 著



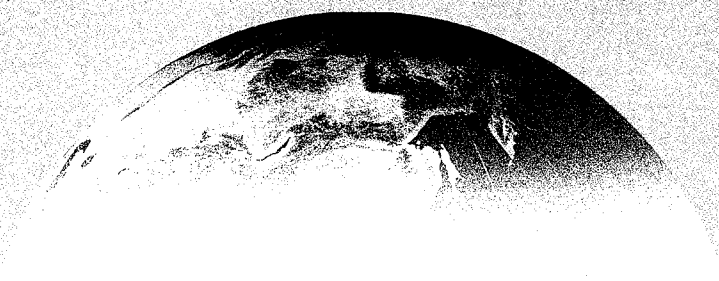
科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

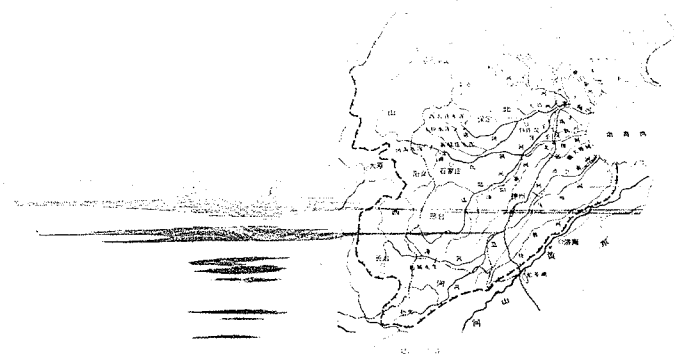


海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

基于ET的水资源与 水环境综合规划



王 浩 周祖昊 秦大庸 桑学锋 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

基于 ET 的水资源与水环境综合规划方法是面向资源型缺水地区水资源与水环境管理重大实践需求的一种新型规划方法。本书系统阐述了该方法的理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路、规划模型构建以及实践应用。研究成果极大地丰富了区域水资源与水环境综合规划的理论方法体系,反映了本学科领域的先进水平,可为资源型缺水地区水资源与水环境规划和管理提供有力支撑,对同类缺水地区具有普遍的推广与借鉴意义。

本书可供水资源、环境、生态、农业等相关专业科研、规划和管理人员使用,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 ET 的水资源与水环境综合规划 / 王浩等著. —北京: 科学出版社, 2013. 6

(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 978-7-03-037990-0

I. 基… II. 王… III. ①水资源-水利规划-研究 ②水环境-环境规划-研究 IV. ①TV212 ②X32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 136134 号

责任编辑: 李 敏 张 震 / 责任校对: 桂伟利

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

*

2013 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 12 插页: 2

字数: 500 000

定价: 88.00 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

传统水资源管理中的节水更多地体现为取水量的节约，而从区域资源量的角度分析，其节水作用未必如想象中的大。而以“ET 管理”为核心的水资源管理，将通常意义上定义的植被蒸腾、土壤及水体的蒸发，扩展到包括社会水循环中人类生产、生活过程产生的蒸发，即节水指的是蒸散发量（ET）的减少，这才是对流域/区域水资源量的“真实”节约。基于 ET 的水资源管理的实质是对传统水资源管理的需求侧进行更深层次的调控和管理，也是对水循环中水资源消耗过程的一种管理，而在此基础上进行污染物入河调控和管理则更具有科学性和合理性。因此，针对水资源短缺日益严重的现状，立足于水循环二元演化内在机理，进行以水资源消耗为核心的水资源与水环境管理不仅必要而且非常迫切。

课题组提出的以水资源消耗为核心的水资源与水环境管理理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路，是对传统水资源与水环境规划方法新的发展；建立的高强度人类活动地区水资源与水环境综合模拟体系，实现了人工水循环与自然水循环耦合模拟、地表水和地下水耦合模拟、水量和水质耦合模拟，为水资源与水环境综合规划和管理提供了可靠的量化工具；提出的包括 ET 总量、地表水取水总量、地下水取水总量、国民经济用水总量、生态环境用水总量、污染排放总量以及入海（出境）水量在内的七大总量控制指标体系，则为流域/区域水资源与水环境综合管理提供了有力的抓手。

该研究成果在海河流域多个地区得到了应用，充分体现了成果的科学性、合理性、前瞻性和可操作性。成果不仅对水资源与水环境学科领域的理论方法和技术创新具有重要的价值，也对资源型缺水地区的水资源与水环境管理实践具有普遍而重要的指导意义。

中国工程院院士

2013 年 3 月

前 言

海河流域是我国政治中心、文化中心和经济发达地区,具有地理区位优势、自然资源丰富、陆海空交通发达、工业基础和科技实力雄厚、拥有骨干城市群五大优势,是我国经济较为发达同时蕴藏着巨大发展潜力的地区。近年来,环渤海经济区综合实力显著增强,随着对外开放进一步扩大,第二产业、第三产业发展加快,该区域已成为中国北方经济发展的“引擎”,被经济界誉为继珠江三角洲、长江三角洲之后的我国经济第三个“增长极”。

与重要的战略地位不匹配的是,海河流域是我国水资源最为紧缺的地区,水资源、水环境问题十分突出。在全国七大流域中,海河流域的人均、亩均水资源量均最低。与此同时,海河流域污水排放量不断增加,河湖水体和地下水污染严重,对渤海湾海域的环境造成严重威胁。近年来,尽管流域内节水和治污力度加大,但在强人类活动与气候变化的双重影响下,海河流域水资源供需矛盾日益凸显,水质劣化、湿地萎缩、地下水位下降等生态环境问题进一步加剧。为妥善处理流域开发治理面临的新问题,迫切需要从新的视角去研究和破解。

为了综合解决海河流域的水资源与水环境问题,使海河流域的水资源与水环境综合管理水平获得真正提高和重大进步,在水利部公益性行业专项经费项目“气候变化对我国水安全的影响及对策研究”(200801001)、国家973计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(2006CB403400)、水利部和财政部专项“我国节水型社会建设理论技术体系及其实践应用研究”(水综节水[2006]50号)、国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水循环模拟与调控”(51021006)、世界银行GEF项目“天津市水资源与水环境综合管理规划制定”(TJSHZ505)、国家自然科学基金项目“基于广义ET的水资源调配机理与模型研究”(51009149)、中国水利水电科学研究院科研专项“水资源开发利用控制红线确定及指标体系建立”(ZJ1224)的支持下,中国水利水电科学研究院基于ET管理和水资源与水环境综合管理的理念,以天津市为研究区,以六个专题研究和三个县级规划为支撑,编制了天津市的水资源与水环境综合管理规划,提出了天津市水资源与水环境综合管理指标和管理措施。

本研究从理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路等方面系统地、原创性地提出了基于ET的水资源与水环境综合规划方法;基于ET控制理念和二元水循环理

论, 将 AWB 模型 (水资源与污染负荷配置)、SWAT 模型和 MODFLOW 模型耦合起来, 创新性地建立了高强度人类活动地区水资源与水环境综合模拟体系, 实现人工水循环与自然水循环耦合模拟、地表水和地下水耦合模拟、水量和水质耦合模拟; 首次面向资源型缺水地区水资源与水环境综合管理的重大实践需求, 开创性地提出了以耗水量控制为核心的区域水资源整体调控的七大总量控制指标体系。本研究成果创新性强, 规划成果科学、合理、可操作性强, 既可为天津市水资源与水环境综合管理提供有力支撑, 对于资源型缺水地区又具有普遍的推广与借鉴意义。2010 年 11 月本项目通过水利部国际合作与科技司组织的科技成果鉴定, 认为项目成果“达到国际领先水平”; 2010 年 12 月项目成果荣获中国水利水电科学研究科技应用一等奖; 2011 年 5 月规划获得天津市发展和改革委员会批复实施; 2011 年 10 月成果荣获大禹水利科学技术奖三等奖。

本书是上述成果的深化、凝练和总结, 共分为 8 章: 第 1 章总结了水资源规划发展的历程、存在问题及发展趋势, 由魏怀斌、王浩、周祖昊、苟思、朱厚华撰写; 第 2 章介绍了基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论方法与模型, 由王浩、周祖昊、桑学锋、秦大庸撰写; 第 3 章介绍了研究区的基本概况、规划目标及任务, 由杨贵羽、张俊娥、葛怀凤撰写; 第 4 章构建了研究区水循环与水环境耦合模型平台, 由桑学锋、周祖昊、魏怀斌、葛怀凤撰写; 第 5 章分析了规划方案, 由桑学锋、杨贵羽、王明娜、张瑞美、葛怀凤、褚俊英撰写; 第 6 章对规划方案进行了评价和优选, 由桑学锋、秦大庸、张瑞美、魏怀斌撰写; 第 7 章提出了基于 ET 的水资源与水环境综合管理目标和措施, 由褚俊英、杨贵羽、朱厚华、魏怀斌撰写; 第 8 章总结了项目主要成果与结论, 由周祖昊、张瑞美撰写。全书由王浩、周祖昊、桑学锋、秦大庸统稿并校核。

在本书成书的过程中, 胡鹏、张楠、尹吉国、李扬、俞煊、陈强、孙少晨、曹铮、贺华翔、崔小红、蔡静雅等做了部分辅助工作, 贾仰文、裴源生、王建华、刘家宏、李海红、牛存稳、杨志勇、邵薇薇、刘扬等提供了十分有益的建议, 道格拉斯·奥森 (Douglas Olson)、蒋礼平、韩振中、刘斌、周年生、严晔端、李万庆、秦保平、沈大军、刘盛彬等专家提供了大量技术指导, 天津市水利局闫学军、何云雅、魏素清、邢荣和环境保护局张淑英、侯晓珉、孙韧、卢学强等领导为本研究做了大量的协调和支持工作, 天津市水利勘测设计院、天津市水利科学研究院、天津市水文水资源勘测管理中心、天津市环境保护科学研究院、天津市环境保护开发中心、天津市环境监测中心等单位给本研究提供了有力的技术支持, 在此一并表示感谢! 同时感谢所有参考文献的作者!

受时间和水平的局限, 书中难免有挂一漏万和错误悖谬之处, 敬请广大读者批评指正。

2013 年 3 月

目 录

总序
序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源规划研究进展	1
1.1.1 水资源规划的国外研究进展	1
1.1.2 水资源规划的国内研究进展	3
1.2 水资源规划发展历程	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 发展历程	6
1.3 存在的问题及发展趋势	10
1.3.1 存在的问题	10
1.3.2 发展趋势	11
第 2 章 基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论方法与模型	12
2.1 基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论	12
2.1.1 理论内涵	12
2.1.2 调控机制	14
2.1.3 规划原则	15
2.1.4 规划目标	16
2.2 基于 ET 的水资源与水环境综合规划决策方法	17
2.2.1 水资源决策特点	17
2.2.2 决策方法和思路	18
2.2.3 目标 ET 计算方法	20
2.2.4 方案设置方法	21
2.2.5 情景模拟方法	22
2.2.6 方案评价方法	25
2.3 基于 ET 的水资源与水环境综合规划模型	27

2.3.1	目标函数	27
2.3.2	水量水质计算方程	27
2.3.3	约束条件	29
2.3.4	模型功能特点	31
第3章	天津市基本情况、规划目标及任务	33
3.1	天津市概况	33
3.2	基线调查	35
3.2.1	经济社会基线调查	35
3.2.2	水资源量基线调查	37
3.2.3	供用水及耗水情况基线调查	41
3.2.4	生态环境基线调查	46
3.2.5	水资源与水环境管理现状	53
3.2.6	水资源与水环境存在问题	55
3.3	规划目标、任务及依据	57
3.3.1	规划目标	57
3.3.2	规划任务	57
3.3.3	规划依据	58
3.3.4	规划水平年	61
3.4	技术路线	61
第4章	天津市水循环与水环境耦合模型平台	63
4.1	平台结构	63
4.2	模拟原理	63
4.2.1	子模型耦合关系	63
4.2.2	“地表-地下”水循环耦合模拟	64
4.2.3	“自然-社会”二元水循环耦合模拟	64
4.2.4	水量水质耦合模拟	65
4.3	平台构建	66
4.3.1	AWB 模型构建	66
4.3.2	SWAT 模型构建	67
4.3.3	MODFLOW 模型构建	76
4.4	模型校验	81
4.4.1	地表水水量、水质模拟与校验	81
4.4.2	地下水模拟与校验	84

4.4.3 ET 模拟与校验	87
第 5 章 规划方案分析与设置	89
5.1 水资源利用方案	89
5.1.1 地表水	89
5.1.2 地下水	90
5.1.3 再生水	91
5.1.4 海水	95
5.1.5 微咸水	95
5.1.6 雨水	96
5.2 国民经济节水方案	97
5.2.1 经济社会发展预测	97
5.2.2 国民经济节水方案分析	103
5.3 水生态修复方案	106
5.3.1 天津市水生态总体规划目标	106
5.3.2 河道内生态用水方案	107
5.3.3 河道外生态用水方案	110
5.3.4 入海水量控制方案	117
5.4 水污染控制方案	118
5.4.1 天津市水功能区划及其环境规划目标	118
5.4.2 污染物预测	119
5.4.3 水污染控制方案	122
5.5 方案设置	128
5.5.1 主要因子	128
5.5.2 方案设置说明	130
第 6 章 规划方案评价与优选	133
6.1 指标评价	133
6.1.1 资源指标评价	133
6.1.2 生态指标评价	136
6.1.3 环境指标评价	139
6.1.4 社会指标评价	140
6.1.5 经济指标评价	142
6.2 方案优选	143
6.2.1 2010 水平年方案优选	145

6.2.2	2020 水平年方案优选	145
6.3	水资源与水环境综合分析	146
6.3.1	供水分析	146
6.3.2	用水分析	148
6.3.3	ET 控制分析	149
6.3.4	水生态分析	150
6.3.5	水环境分析	151
6.4	各水平年之间的比较	152
6.4.1	水资源分析	152
6.4.2	ET 分析	152
6.4.3	生态环境分析	152
6.4.4	经济社会分析	153
第 7 章	管理目标和措施	154
7.1	管理目标	154
7.1.1	总体目标	154
7.1.2	具体指标	154
7.2	管理措施	159
7.2.1	推进地表水总量控制, 实现区域地表水优化配置	160
7.2.2	强化地下水总量控制, 实现地下水采补平衡	161
7.2.3	实施 ET 管理与国民经济用水总量控制, 促进“真实节水”	162
7.2.4	保障生态用水总量, 实现水生态良好发展	164
7.2.5	加强入海总量控制, 促进近海生态健康发展	165
7.2.6	建立排污总量控制和环境倒逼机制, 满足水功能区要求	165
7.2.7	保障措施	168
第 8 章	成果、结论与展望	171
8.1	主要成果	171
8.1.1	研究成果	171
8.1.2	创新点	172
8.2	结论	172
8.3	展望	174
参考文献		176

第 1 章 | 绪 论

随着人们对水资源规划认识的不断深入和科学的进步,水资源规划从最开始仅针对水资源系统的较为单一的规划逐步发展为考虑“经济社会-资源-生态-环境”复杂系统的综合规划,其规划理论和规划方法也在不断拓展和深入中。本章综述了国内外水资源规划的研究进展,归纳了水资源规划的对象、目标、理念不断拓展的发展脉络,总结了“就水论水”的水资源规划、基于宏观经济的水资源规划、面向生态的水资源规划、广义水资源规划、基于 ET (耗水) 的水资源规划以及水资源与水环境综合规划 6 种模式的发展历程,讨论了目前存在的主要问题与发展趋势。

1.1 水资源规划研究进展

1.1.1 水资源规划的国外研究进展

水资源规划主要是对流域或区域水利综合规划中关于水资源多种功能的协调、为适应各类用水需要的水量科学分配、水的供需分析及解决途径、水体污染的防治规划等方面的总体安排。水资源规划的历史伴随人类文明的发展。据历史记载,公元前 3500 年的古埃及已有全世界历史最悠久的水资源规划。

(1) 早期的水资源规划

早期的水资源规划主要是理论和方法的雏形,主要有:

1) 水位资料记录。最初出现在古埃及,工程师在尼罗河利用水位测量标尺来观察河流的水位情况并记下详细的流量资料。如果尼罗河水位比较危险,工程师会立刻通知人们尽快迁移到安全的地方。

2) 流量测定。从水位资料记录到流量测定经过了漫长时期。1 世纪初一个埃及人最先提出“同在一个横断面上的水流速度是相同的”假定。可不幸的是直到 16 世纪,埃及水文学的奠基人 Benedeto Castelli (1577 ~ 1644 年) 才重新发现这个定理,奠定了水资源规划的基础。

3) 相关方程。18 世纪数学领域学者发现了许多数学公式,其中对水文水资源有重要意义的公式有:皮托 (Pitot) 公式,可用来计算流体力学的数据;伯努利 (Bernoulli) 能量方程,准确地描述了能量守恒的基本原理;欧拉 (Euler) 在伯努利方程中添加了一个能量组成的重要概念,使得该方程更加完美,成为欧拉运动方程的重要组成部分。

(2) 近代水资源规划与实践

随着人们知识领域的进步与突破,17 世纪和 18 世纪发展出了专门研究水资源科学和