

“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

水代谢、水再生与 水环境承载力

曾维华 杨志峰 刘静玲 吴波 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

水代谢、水再生与 水环境承载力

曾维华 杨志峰 刘静玲 吴波等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对水科学与环境科学等学科前沿和热点问题,从流域/区域水系统入手,分析水循环、水代谢与水再生之间的关系,及其对水环境承载力的影响;从水的自然代谢与社会代谢及二元水循环角度,研究水的自然与社会再生机理,建立基于水循环、水代谢的水再生与水环境承载力理论与方法体系;进一步将所建立的理论与方法应用于实际案例研究;力求通过调节水循环与水代谢过程,提高水资源再生能力与水环境承载力,实现流域/区域水资源可持续利用的最终目标。

本书可作为高等院校水科学与环境科学等专业的研究生以及从事相关领域研究者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水代谢、水再生与水环境承载力/曾维华等著.——北京:科学出版社,2012

(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 978-7-03-034186-0

I. 水… II. 曾… III. ①水代谢-研究-中国②废水综合利用-研究-中国③水环境-环境承载力-研究-中国 IV. ①Q493.7②X703③X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第082615号

责任编辑:李 敏 张 震/责任校对:宋玲玲

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

*

2012年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年5月第一次印刷 印张:12 3/4 插页:3

字数:300 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水代谢、水再生与水环境承载力》

主要撰写人员

曾维华 杨志峰 刘静玲 吴 波 孙 强

祝 捷 柴 莹 李春晖 张永军

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

随着社会经济的飞速发展，水资源供需矛盾和水环境污染问题日趋严重。从系统科学理论的角度出发，综合考虑流域/区域水系统的全局利益，有效利用水系统中循环、代谢与再生的能力，提高水环境承载力，深入开展水资源合理、高效开发利用与优化调控的研究，越来越受到人们的重视。从“九五”开始，到“十一五”这15年中，基于系统科学理论的水资源合理利用研究得到了长足发展，取得了大量研究成果。

在我国很多地区，大规模的水资源开发利用改变了水系统中的水循环与水代谢过程，致使这些地区的水环境污染与水资源紧缺问题日趋突出，水环境承载力降低，严重制约该地区社会经济的持续发展。在此背景下，我国学者提出基于二元水循环模式和生态的水资源配置方法，平衡协调区域发展模式、生态系统质量、水资源利用格局三者之间的关系，最终为实现“人水和谐”的目标提供科学依据。同时，考虑这一时期节水型社会建设的需求，广大环保工作者重视污水处理、中水回用等再生性水资源利用，使水资源的有效利用能力得到提高。到了“十一五”期间，基于流域水循环和水量水质双控的水资源整体配置更加注重水资源的可持续利用和保护。

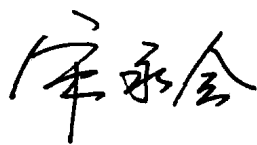
“十二五”期间，我国经济、社会 and 环境保护又会面临一个新的飞跃，随之而来的高强度人类活动的影响和可利用水资源的减少，将会使水资源的供需矛盾更加突出。实现社会经济的可持续发展，水资源的有效、持续利用，真正实现节水和节能减排目标，需要结合国家发展战略和社会需求，全面分析水资源开发利用过程中整个水系统中各因素（子系统）之间的相互关系，协调好自然因素（子系统）与人为因素（子系统），利用水循环、水代谢与水再生的功能，提高水环境承载力，实现水资源的可持续利用与保护的最终目标。

《水代谢、水再生与水环境承载力》一书采用系统论的观点，从理论到实践应用，建立了一整套针对水系统中的水循环、水代谢、水再生与水环境承载力之间相互关系的理论与方法体系，并成功将其应用于实践，达到了国内先进水平。该书作者在水资源持续利用与水环境保护领域有良好的研究基础，早在20世纪90年代，该书作者就提出水的自然循环与社会循环的概念，建立了水质与水量双向调控以及水的自然循环与社会循环双向调控

的方法体系，为日后该领域的研究奠定了良好的基础。在此后 20 年中，作者在“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”973 计划项目与“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”973 计划项目的支持下，对流域水循环、水资源自然与社会再生能力的影响因子、基本概念、评价指标体系与评价方法，以及水代谢与水环境承载力的基本概念、动态仿真方法进行系统研究，取得了大量的研究成果，彰显了作者独特的研究视角与深度。

全书分为理论方法篇与案例研究篇两个部分。在理论方法篇中，重点分析了水循环、水代谢与水再生的理论，并以系统思想为指导，系统科学理论与系统工程方法为工具，在阐述水环境、水资源与水生态之间的关系的的基础上，系统分析水循环、水代谢与水再生之间的关系，及其对水环境承载力的影响。从水自然代谢与社会代谢以及二元水循环角度，系统分析研究水的自然再生与社会再生机理，建立基于水循环、水代谢的水再生理论与方法体系，为进行流域/区域的水系统的研究提供坚实的理论基础与科学的方法支撑。在案例部分，作者结合多个实际案例，包括模拟泾河流域水量平衡对泾河流域水资源自然可再生能力进行分析评价；从绝对再生量和相对再生效率两个方面分析评价黄河流域主要城市的水资源社会再生能力；以海河流域典型城市区域通州区为例进行的基于城市水代谢的水环境承载力系统动态仿真。总而言之，全书以其深厚的环境系统科学造诣与对环境系统研究的丰富实践，融会贯通化为一体，又着眼于这个学科领域的基础性与实用性，求实创新，图文并茂，深入浅出，是难能可贵的。我相信，这本书的出版发行必将推动我国水资源持续利用与保护的研究，进而促进我国水资源保护事业的发展。

中国环境科学研究院水环境研究所所长、研究员



2012 年 3 月 20 日

前 言

从古至今，水是人类赖以生存的宝贵资源，它为人类的繁衍生息和社会的文明进步作出重要贡献；但是，长期以来水没有得到人类应有的珍惜和善待。人们对水的过度开采、滥用与对水环境质的破坏，打破了水循环平衡，导致水代谢过程紊乱，水资源再生能力降低，水环境承载力下降，水生态系统健康难以维系。

人口增加、经济增长和用水不当导致的水资源短缺、水质污染和水环境恶化，不仅制约了经济与社会的发展，还严重威胁着人类的健康与生存。目前全球一半左右的河流流量大幅减少或遭到严重的污染，世界上 80 个国家的占全球 40% 的人口严重缺水。如果这一趋势得不到遏制，今后 30 年内全球 55% 以上的人口将面临水荒。

我国是水资源紧缺的国家，人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4，且分布极不均匀。同时，我国水环境污染也十分严重，全国江河除源头外，都受到不同程度的污染，绝大多数城市下游河段都沦为 V 类或劣 V 类水体。全国 660 多座城市中有 400 多座缺水，水危机已成为制约社会、经济发展的因素。

造成水危机的主要原因是水资源的不合理使用与水环境污染。工业、农业生产过多使用新鲜水，再生水生产与使用潜力有待挖掘；由此导致人们的生活用水紧缺，特别是北方干旱与半干旱地区，大量开采、使用天然水体，加剧了水荒和地面下沉等。面对水短缺与水污染的严峻危机，人类应该反思其水资源开发、利用活动，探索出缓解水危机、恢复水生态、确保水资源可持续利用的有效途径。

自然界的水资源是有限的，并处于不断的循环、代谢与再生过程之中。水循环包括水的自然循环与社会循环，人类生活与生产活动（水的社会循环）应该服从水资源自然循环的规律，并与之相协调。水的社会循环只有纳入其自然循环之中，并与之协调一致，才能确保水资源的高效持续利用。

首先，通过优化调整水的代谢过程，特别是社会代谢过程（具体包括节水与污水深度处理、再生回用等），维持水资源持续健康的社会循环与自然循环。其次，通过水资源社会循环与自然循环双向调控（包括水质水量联合调度等），使水的自然循环与社会循环的每个环节健康高效运行；不断提高水资源的社会与自然再生能力，在有限的水环境承载力

约束下,实现流域/区域水资源与水环境持续健康发展。

由此可见,水循环、水代谢、水再生与水环境承载力是流域/区域水系统运转过程的重要组成部分,可以从不同角度反映水系统各子系统之间的关系及其运动规律;同时,水循环、水代谢与水再生过程相互关联、相互影响、相辅相成。水环境承载力是流域/区域水系统的重要属性特征,是水系统对外表现的主要功能之一,用以表征水系统承载人类生产与生活用水、排污活动强度的阈值。水环境承载力的大小取决于水循环、水代谢与水再生过程;通过改善水代谢过程,可维持持续的水循环与健康的水代谢,在确保水系统健康持续发展的同时,提高水环境承载力。

本书针对世界范围内的水危机问题,从流域/区域水系统的系统分析入手,以系统思想为指导,系统科学理论与系统工程方法为工具,在阐述水环境、水资源与水生态之间关系的基础上,系统分析水循环、水代谢与水再生之间的关系,及其对水环境承载力的影响。

通过分析比较传统水代谢系统与新型水代谢系统,论证了通过“双向调控”建立新型水代谢系统,使城市水代谢系统进入良性循环的具体对策。从水自然代谢与社会代谢以及二元水循环角度,系统分析研究水的自然再生与社会再生机理,建立基于水循环、水代谢的水再生理论与方法体系。

应用地理统计学原理,利用普通 Kriging 方法对水资源自然可再生能力的主要影响因子——降水和蒸发的空间变异规律进行分析。利用基于 GIS 的水量平衡模型,对泾河流域进行水平衡模拟,包括降水、蒸发、土壤水蓄水、地下水蓄水以及网格内形成的径流总量等水文循环因子。在泾河流域水量平衡模拟的基础上,根据模拟结果计算水资源自然更新率,对泾河流域 1996 年水资源自然可再生能力进行分析评价。

对城市水资源社会再生能力的影响因子进行分组,在实践层面,从绝对再生量和相对再生效率两个方面分析评价各个城市的水资源社会再生能力。在评价过程中,选用人工神经网络的方法,对由各项指标的全国最大值、最小值换算而得出的等级标准数据进行训练,当网络获得足够经验后对各城市水资源社会再生能力进行评价。利用 WebGIS 建立黄河流域主要城市水资源社会再生能力评价信息发布系统,将评价结果通过互联网进行发布。

在城市水代谢系统反馈回路分析基础上,将水质水量综合表征方法及人口和经济规模表征方法相结合,建立一套科学合理的水环境承载力量化方法;在此基础上,用水质水量调整因子来表示水环境承载力对城市水代谢的约束;并构建基于城市水代谢的水环境承载力系统动态仿真模型。以海河流域典型城市区域通州区为例对理论与模型进行验证。

全书包括 9 章,第 1 章由杨志峰、曾维华、吴波完成,第 2 章由曾维华、杨志峰、吴

波、刘静玲完成,第3章由孙强、曾维华、杨志峰、李春晖完成,第4章由祝捷、曾维华、杨志峰完成,第5章由柴莹、曾维华、吴波、刘静玲完成,第6章由孙强、曾维华、杨志峰完成,第7章由祝捷、曾维华、杨志峰、张永军完成,第8章由柴莹、曾维华、刘静玲完成,第9章由曾维华、吴波完成。全书由曾维华教授与吴波博士统稿,杨志峰教授与刘静玲教授校稿。

本书是作者在对所参与的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G1999043605)与“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(2006CB403403)两个课题研究成果进行综合提炼整合基础上完成的,受到这两个课题与“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项课题(项目号:2008ZX07633-05-06与2009ZX07212-002)资助。本书是我们研究团队集体智慧的结晶,同时还得益于北京师范大学环境学院求实创新的学术氛围,团队成员的学术交流使本团队学术思想的“火花”得到启发和升华。研究过程中还得到首席科学家刘昌明院士与王浩院士,以及中国水利水电科学研究院、水利部黄河水利委员会与水利部海河水利委员会等科研机构与管理部門的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

本书在环境科学、水文学、水资源学和生态学等诸多学科相互交叉与渗透基础上,结合水环境系统领域研究的科学前沿和热点问题,可作为高等院校环境科学及水文与水资源学等专业的研究生参考书,也可用于研究流域各类环境和非环境问题的技术与管理人员的培训教材。希望我们的研究成果能够推动流域/区域水环境管理系统的研究,提升流域/区域水环境管理的总体水平,引起社会各界对流域/区域水科学管理和水资源有效利用中亟待解决的科学问题的关注和探索,为流域/区域水系统的科学管理决策提供依据。由于本书著者水平有限,书中不当之处还请读者批评指正。

曾维华

于北京师范大学

2012年1月16日

目 录

总序
序
前言

理论方法篇

第 1 章 绪论	3
1.1 研究背景与意义	3
1.2 水循环、水代谢与水再生研究进展	4
1.2.1 水循环的研究进展	4
1.2.2 水代谢的研究进展	7
1.2.3 水再生的研究进展	9
1.3 水环境承载力研究进展	11
1.4 总结与展望	14
1.5 全书结构	14
第 2 章 水代谢、水再生与水环境承载力概述	17
2.1 水系统组成与功能	17
2.1.1 水系统的概念	17
2.1.2 水系统的组成与属性特征	18
2.1.3 水系统功能	21
2.1.4 水系统分类	22
2.1.5 水循环、水代谢与水再生及水环境承载力之间的关系	22
2.2 水循环系统组成与功能	23
2.2.1 水循环系统辨识	24
2.2.2 水循环系统功能	31
2.3 水代谢系统组成与功能	31
2.3.1 水代谢系统辨识	32
2.3.2 水代谢系统功能	35
2.4 水再生系统组成与功能	35
2.4.1 水再生系统辨识	35

2.4.2	水再生系统功能	37
2.5	水循环、水代谢与水再生的影响因素分析	37
2.5.1	自然影响因素分析	37
2.5.2	社会影响因素分析	41
2.5.3	流域水资源的影响因子识别	42
2.6	水环境承载力及其特征	45
2.6.1	环境、资源与生态概念及其间关系的界定	45
2.6.2	水环境承载力	46
2.6.3	水环境承载力的主要特征	49
第3章	基于GIS的流域水资源自然再生能力评价	50
3.1	相关研究进展	50
3.1.1	水资源评价研究	50
3.1.2	水量转化规律和水平衡模型研究	51
3.1.3	地统计学在环境和水资源领域的应用研究	52
3.2	基于GIS的流域水资源自然再生能力评价方法	53
3.2.1	水资源自然可再生能力综合评价方法	53
3.2.2	水资源自然可再生能力单指标评价方法	53
3.2.3	基于GRID的流域水资源自然可再生能力评价方法	55
3.3	流域水量平衡模型	56
3.4	模型输入	57
3.5	模型系统集成及模型参数率定	59
第4章	城市水资源社会再生能力评价	61
4.1	相关研究进展	61
4.1.1	城市水资源评价的研究现状与进展	61
4.1.2	常用的评价方法	63
4.2	城市水资源社会再生系统分析及其功能	65
4.2.1	城市水资源社会再生系统分析	65
4.2.2	城市水资源社会再生系统的功能表征	66
4.3	城市水资源社会再生能力评价指标体系	67
4.3.1	指标体系的构建	67
4.3.2	各指标解释	68
4.3.3	综合评价指标	70
4.4	城市水资源社会再生能力评价方法概述	70
4.4.1	评价方法的选择	70
4.4.2	人工神经网络方法简介	71

4.4.3	基于人工神经网络评价模型	74
4.4.4	评价标准的建立	75
4.4.5	基于 MATLAB 城市水资源社会再生能力评价模型	75
4.4.6	基于灰色关联的城市水资源社会再生能力评价方法	77
第 5 章	基于城市水代谢的水环境承载力动态调控	79
5.1	水环境承载力量化方法的相关研究进展及方法选择	79
5.1.1	水环境承载力量化方法的相关研究进展	79
5.1.2	确定量化方法	81
5.2	基于城市水代谢提高水环境承载力的方案设计	83
5.2.1	水环境承载力的双向调控	83
5.2.2	传统城市水代谢下提高水环境承载力的对策	84
5.2.3	新型城市水代谢下提高水环境承载力的方案设计	85
5.3	系统动力学建模	85
5.4	城市水代谢系统反馈回路分析	87
5.5	城市水代谢动态仿真模型	90
5.5.1	变量和参数的选择	90
5.5.2	水代谢动态仿真模型结构设计	90
5.5.3	模型中方程式的建立	90
5.5.4	模型参数选择	91
5.6	基于城市水代谢的城市水环境承载力动态调控模型	91

案例研究篇

第 6 章	泾河流域水资源自然再生能力评价	97
6.1	泾河流域概况	97
6.1.1	自然环境	97
6.1.2	水资源概况	100
6.2	泾河流域水资源自然再生能力影响要素分析	101
6.2.1	泾河流域降水空间变异分析	101
6.2.2	泾河流域蒸散量的计算和分析	107
6.3	流域水平衡模拟	109
6.3.1	模型输入数据预处理	109
6.3.2	模型系统集成	109
6.3.3	模型参数分析调整	109
6.3.4	径流模拟结果分析	110
6.3.5	模拟数据输出结果	111

6.4	泾河流域水资源自然再生能力评价	112
6.4.1	评价数据整理	112
6.4.2	模型计算结果	112
6.4.3	结果分析	113
第7章	黄河流域主要城市水资源社会再生能力评价	115
7.1	黄河流域概况	115
7.2	数据预处理	116
7.2.1	数据收集整理	116
7.2.2	评价标准样本数据	119
7.3	2000年黄河流域主要城市水资源社会再生能力评价	121
7.3.1	水资源再生量评价	121
7.3.2	水资源再生效率评价	123
7.3.3	黄河流域主要城市水资源社会再生能力综合评价	125
7.4	水资源再生效率动态评价	128
7.4.1	数据收集	128
7.4.2	评价结果及其分析	130
7.5	基于 WebGIS 城市水资源社会再生能力评价信息发布	132
7.5.1	信息发布系统的技术方案	132
7.5.2	信息发布系统的实现	136
第8章	基于城市水代谢的北京市通州区水环境承载力动态调控	140
8.1	研究区概况	140
8.1.1	人口和经济概况	140
8.1.2	水量和水质情况	141
8.1.3	规划目标	142
8.2	模型参数来源	142
8.2.1	通州区统计数据	142
8.2.2	通州区相关规划	143
8.2.3	相关标准	143
8.3	通州区水环境承载力情景设计	143
8.3.1	基本约束条件设计	143
8.3.2	传统城市不可持续水代谢情景设计	144
8.3.3	新型城市可持续水代谢情景设计	149
8.4	情景模拟结果	153
8.4.1	传统城市不可持续水代谢情景	153
8.4.2	新型城市可持续水代谢情景	155

8.4.3 与规划目标的比较	156
8.5 模型灵敏度分析	156
8.5.1 参数的变化对目标值产生的影响	157
8.5.2 基本约束条件的变化对目标值产生的影响	158
第9章 结论与建议	160
9.1 结论	160
9.2 建议	162
参考文献	164
附录1 专家咨询表	171
附录2 模型变量和参数列表	175
附录3 模型结构图	177
附录4 模型公式	182
彩插	

理论方法篇
