

“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

(第二版)

曾维华 吴波 杨志峰 刘静玲 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

(第二版)

曾维华 吴波 杨志峰 刘静玲 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/区域水代谢系统的系统分析入手,阐述水代谢与水再生之间的关系,以及水代谢结果对水环境承载力的影响;通过对水代谢系统驱动因素的识别、系统问题的模拟和分析,以及针对具体问题可实施的措施进行优选分析,建立了一套用于研究水代谢系统的方法体系;进一步地,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教材,以及从事相关领域研究的学者的参考书。

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. —2 版. —北京:科学出版社,2015. 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 978-7-03-044928-3

I. 水… II. 曾… III. 水循环—研究 IV. P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 125770 号

责任编辑:李 敏 张 菊 / 责任校对:郑金红

责任印制:肖 兴 / 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>

北京中科印刷有限公司 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

2015 年 6 月第 二 版 印张:18 1/4 插页:4

2015 年 6 月第一次印刷 字数:800 000

定价:168.00 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》(第二版)

主要撰写人员

曾维华 吴 波 杨志峰 刘静玲 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

第二版序

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；以此为基础，深入开展水资源合理、高效开发利用与优化调控研究，越来越受到人们的重视。从“九五”开始，到“十一五”这15年中，这种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，我国学者提出了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、社会发展和环境保护又面临一个新的飞跃，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，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，真正达到节水和“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），利用水的循环性、代谢性与再生性的功能，使水在整个代谢过程中提高其再生能力，进而提高水环境承载力，实现水资源的可持续利用与保护的最终目标。

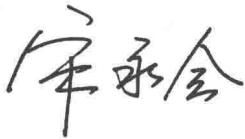
《水代谢、水再生与水环境承载力》一书采用系统的视角，从理论到实践应用，建立了一整套针对水系统中的水循环、水代谢、水再生与水环境承载力之间相互关系的理论与方法体系，并成功将其所建立的理论与方法应用于实践，达到国内的先进水平。该书作者在水资源持续利用与水环境保护领域有良好的研究基础，早在20世纪90年代，该书作者就提出了水的自然循环与社会循环概念，建立了水质与水量双相调控及水的自然循环与社

会循环双相调控方法体系，为日后该领域的研究奠定了良好的基础。在这以后的 20 年中，该书作者在 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”与 973 计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”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，取得了大量研究成果，视角独特，极具深度。

在第一版研究的基础上，第二版在理论研究中详细分析了水代谢理论的内涵、组成和研究对象，并以系统思想为指导，以系统科学理论与系统工程方法为工具，采用多种研究方法建立了一套针对水代谢系统问题识别、问题模拟分析与问题解决的方法体系，为进行流域/区域水代谢系统的研究提供了坚实的理论基础与科学的方法支撑。在案例部分，该书作者选取比较复杂的昆明市水系作为案例进行研究，不仅为全面、系统地了解实际问题提供了重要依据，也为促进昆明市水体再生、提高其水环境承载力的具体措施的制定与实施提供了参考。

总而言之，全书以其深厚的环境系统科学造诣，将环境系统研究的理论与丰富实践融会贯通化为一体，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，这是难能可贵的。我相信，它的出版发行必将推动我国的水资源持续利用与保护研究，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



2014 年 12 月 1 日

第二版前言

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做出了重要贡献；但是，长期以来水却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而导致的水资源短缺、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量大幅减少或遭严重的污染，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，水危机已成为社会经济发展的瓶颈。

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问题；另外，水环境污染也是造成水资源危机的重要问题。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。首先，应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，应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，水代谢、水再生与水环境承载力是流域/区域水系运转过程的重要组成部分

分，可以从不同角度反映水的运动规律、发生的各种变化及参与的过程；同时，水代谢过程与水再生、水循环相互关联、相互影响。水环境承载力是流域/区域水系统的重要属性特征，是水系对外表现的主要功能之一，用以表征水系承载人类生产与生活用水、排污活动强度的阈值。它的大小取决于水代谢过程与水再生性能；通过改善水代谢过程，可维持持续健康的水代谢，促进水体提高其再生性能，在确保水系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，以系统科学理论与系统工程方法为工具，系统分析水代谢、水再生与水循环之间的关系，以及其对水环境承载力的影响。本版在第一版内容的基础上，重点对水代谢理论及水代谢系统的研究方法进行详细的论述和研究，着重分析伴随着水循环，水在代谢过程中存在的水量和水质的各种变化，及这些变化包含的各种有利和不利部分。在水代谢过程中有利的部分促进水再生，可提高水环境承载力，进一步促使水循环过程朝健康的方向发展。因此，分析水代谢系统的整个代谢过程，研究系统面临的问题，是从水量和水质两个方面更为全面地反映出流域/区域的水问题，并提出有效的破解对策和相应措施的关键依据。具体研究内容如下。

采用基于 PLS 的结构模型方法建立驱动因素分析模型，识别出主要影响城市水代谢的驱动因素并得到各因素的作用效果。

构建基于水足迹理论的评价模型，并设立评价指标约束值，初步分析系统的整体代谢效果。评价模型分别从水质补充和水量补充两个方面进行考虑。选取四类污染物进行各产业污染物和生活污染物对应的灰水足迹核算，并以其中的最大值作为最终结果用于评价水质补充模型。同时，将灰水足迹理论运用到城市水代谢系统内部各种水质变化过程的量化研究中，并针对它们的不同特点，建立不同的量化公式并核算出量化结果。

分析城市水代谢系统边界代谢研究的核算原理，并核算系统边界的水代谢通量。构建评价模型，研究系统在与外界的相互作用下是否受到影响。以投入产出法核算输入、输出水代谢通量中需计算的虚拟水值，得到了系统边界的水代谢通量结果。将该结果与所需的其他指标值代入研究影响情况的评价模型中，分析与外界相互作用下系统对其自身是否带来影响。

采用生态网络分析方法，从城市水代谢系统的水量和水质两个方面，分析水代谢系统内部节点间的作用方式和系统的协作性。通过建立系统内部水量变化的网络结构模型和水质变化的网络结构模型，采用生态网络分析方法中的通量分析，研究代谢路径数量和连通性的变化关系，以此确定两个网络结构模型中每个节点对系统的“贡献”；另外，基于网络分析方法中的利用分析原理，根据矩阵中正负号的分布、数量比值来确定参与水量和水

质变化的各节点间的生态关系和共生状况。

建立昆明市水代谢系统综合模拟研究模型,预测基准年状况下,未来昆明市的人口和经济发展,以及用水和排污情况。该综合模型采用 SD 模型作为操作平台,将人口-经济、水消耗和污染负荷、水供给、污水处理模型和受纳水体模型耦合在一起,作为该综合模型下的子模型进行模拟研究。基于该综合模型的特点,可以在灵敏性分析时将各种措施作为参数,通过变化这些参数,得到对人口和经济发展、用水和排污的作用效果。

应用地统计学原理,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,以泾河流域为例进行水平衡模拟,包括降水、蒸发、土壤水蓄水、地下水蓄水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。

对影响到城市水资源社会再生能力的因子进行分组,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和最小值换算而得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的基础上,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;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 11 章,第 1 章由曾维华、吴波、杨志峰完成,第 2 章由曾维华、吴波、杨志峰、刘静玲完成,第 3 章由曾维华、吴波完成,第 4 章由曾维华、吴波完成,第 5 章由曾维华、吴波完成,第 6 章由曾维华、吴波完成,第 7 章由曾维华、吴波完成,第 8 章由孙强、曾维华、杨志峰、李春晖完成,第 9 章由祝捷、曾维华、杨志峰、张永军完成,第 10 章由柴莹、曾维华、刘静玲完成,第 11 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水体污染控制与治理科技重大专项(水专项)“滇池流域水污染控制环境经济政策综合示范”(2011ZX07102)、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”(G19990436)和“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(G1999043605)三个课题研究成果进行综合提炼整合的基础上完成的,并受到这三个课题与“十一五”水专项课题(项目号:2008ZX07633-05-06 与 2009ZX07212-002)

资助。本书是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，并通过与环境学院沈珍瑶教授等其他 973 计划、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 研究团队的学术交流，使学术思想的火花得到启发和升华。课题研究过程中还得到了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、黄河水利委员会与海河水利委员会等科研机构与管理部门的大力支持，在此一并表示衷心感谢！

本书涉及环境科学、水文学、水资源学和生态学等诸多学科的相互交叉与渗透，密切结合本领域研究的科学前沿和热点问题，可作为高校中环境科学及水文与水资源学等专业的研究生参考书，也可作为流域各类环境和非环境专业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提供决策依据。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

2014 年 12 月 2 日于北京师范大学

第二版改动说明

本书第二版在第一版内容的基础上，重点对水代谢理论与研究方法进行系统的论述和研究，着重分析伴随着水循环，水在代谢过程中水量和水质的各种变化，以及这些变化的各种有利和不利作用。在水代谢过程中有利的作用促进水再生，可提高水环境承载力，进一步促使水循环过程朝健康的方向发展。因此，分析水代谢系统的整个代谢过程，研究系统面临的问题，可从水量和水质两个方面更为全面地反映流域/区域的水问题，进一步提出更有效的破解对策和措施。鉴于此，本书第二版内容增加了对水代谢系统较详细的研究方法的论述和案例分析的内容。

目 录

总序	
第二版序	
第二版前言	
第二版改动说明	
第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关研究综述	2
1.2.1 水代谢的研究进展	2
1.2.2 水再生的研究进展	5
1.2.3 水环境承载力研究进展	7
1.3 本书的内容框架	9
第2章 水代谢、水再生与水环境承载力概述	12
2.1 水代谢、水再生及水环境承载力之间的关系	12
2.2 水代谢系统的内涵、组成与研究对象	13
2.2.1 水代谢系统的内涵	14
2.2.2 水代谢系统组成及其边界分析	15
2.2.3 城市水代谢系统的研究对象	16
2.3 水再生系统组成、特征与功能	18
2.3.1 水再生系统的组成	19
2.3.2 水再生系统基本特征	20
2.3.3 水再生系统功能	21
2.4 水环境承载力的概念辨析及其特征	21
2.4.1 环境、资源与生态概念及其间关系的界定	21
2.4.2 水环境承载力	22
2.4.3 水环境承载力的主要特征	24
2.5 水代谢、水再生和水环境承载力的理论基石	25
2.5.1 城市水体的可持续发展观	25
2.5.2 城市水代谢系统健康运行与水体可持续利用的关系	27
2.5.3 基于循环经济理论的城市水代谢系统健康运行的理论依据	28
2.6 水代谢的驱动因素研究	29
2.6.1 对水代谢影响的自然驱动因素	29

2.6.2 对水代谢影响的人类活动驱动因素	33
第3章 基于 PLS 结构模型的城市水代谢系统的驱动因素分析——以昆明市为例	35
3.1 基于 PLS 结构模型的驱动因素作用效果评价方法	35
3.2 城市水代谢系统驱动因素的 PLS 结构模型	38
3.2.1 假设模型的构建	38
3.2.2 样本选择与处理方法	39
3.3 研究区域昆明市概况	40
3.3.1 总体概况	40
3.3.2 社会经济发展概况	41
3.3.3 水资源概况	41
3.3.4 水环境状况	46
3.4 基于 PLS 结构模型的案例数据分析	53
3.4.1 数据来源	53
3.4.2 模型检验与结果	54
第4章 基于水足迹的城市水代谢系统整体代谢效果评价——以昆明市为例	58
4.1 基于虚拟水与水足迹的代谢效果评价方法	58
4.2 综合水质和水量的城市水代谢系统代谢效果评价	60
4.2.1 简介	60
4.2.2 基于水足迹的评价方法中的相关概念	61
4.2.3 评价城市水代谢系统整体代谢效果的评价方法	61
4.3 城市水代谢系统中各种水质变化过程的量化	62
4.3.1 城市水代谢系统中存在的各种水质变化过程	62
4.3.2 基于 GWF 的城市水代谢系统中水质变化过程的量化	64
4.4 昆明市水代谢系统的整体代谢效果评价	66
4.4.1 基于 GWF 量化各水质变化过程量化结果	66
4.4.2 昆明市水代谢系统整体代谢效果评价	70
第5章 基于虚拟水的城市水代谢系统边界与代谢功能研究——以昆明市为例	73
5.1 城市水代谢系统边界与代谢功能的逻辑关系分析	73
5.1.1 城市水代谢系统边界与代谢功能的分析思路	73
5.1.2 城市水代谢系统边界与代谢功能的逻辑关系分析	73
5.2 城市水代谢系统边界水代谢通量核算原理及评估指标的建立	75
5.2.1 系统边界的水代谢通量核算原理	75
5.2.2 构建系统边界代谢影响评价指标	76
5.2.3 城市水代谢系统边界、水代谢通量核算的数据准备——虚拟水的计算	77
5.3 昆明市水代谢系统边界与代谢功能研究	79
5.3.1 边界代谢研究所需指标核算	79
5.3.2 昆明市水代谢系统边界的代谢影响分析结果	81

第 6 章 基于 ENA 的城市水代谢系统内部结构分析与评价——以昆明市为例	83
6.1 用以描述系统内部结构的生态网络分析方法	83
6.2 基于 EWA 的城市水代谢系统内部结构分析	85
6.2.1 水代谢系统中参与水量变化过程的各节点间的作用关系	85
6.2.2 水代谢系统中参与水质变化过程的各节点间的作用关系	86
6.2.3 研究城市水代谢系统内部结构的生态网络分析方法	88
6.3 昆明市水代谢系统内部结构分析	89
6.3.1 基于水量变化的昆明市水代谢系统内部结构分析	89
6.3.2 基于水质变化的昆明市水代谢系统内部结构分析	99
第 7 章 城市水代谢系统模拟仿真与措施优化设计——以昆明市为例	110
7.1 城市水代谢系统模拟仿真模型	110
7.1.1 城市水代谢系统模拟仿真模型研究进展	110
7.1.2 系统动力学方法	111
7.2 SD 与水环境质量耦合模型概述	112
7.2.1 模型中包含的独立模块	112
7.2.2 模型耦合	115
7.3 昆明市水代谢系统模拟仿真模型的建立	116
7.3.1 输入参数	116
7.3.2 参数率定	118
7.3.3 模型检验	118
7.4 昆明市水代谢系统驱动力分析及有效措施设计	119
7.4.1 昆明市水代谢系统主要驱动因素的发展趋势	120
7.4.2 昆明市水代谢系统健康运行措施的优化设计	121
7.5 未来发展情景对昆明市水代谢系统的影响预测	124
7.5.1 基准情景分析	124
7.5.2 不确定性讨论	126
7.6 各种措施对昆明市水代谢系统的作用效果及措施优选	126
7.6.1 各种措施对昆明市水代谢系统的作用效果	126
7.6.2 基于多目标分析方法的措施优选	130
第 8 章 基于 GIS 的流域水资源自然再生能力评价——以泾河流域为例	133
8.1 相关研究进展	133
8.1.1 水资源评价研究	133
8.1.2 水量转化规律和水平衡模型研究	134
8.1.3 地统计学在环境和水资源领域的应用研究	135
8.2 流域水资源自然再生能力评价方法	136
8.2.1 水资源自然可再生能力综合评价方法	136
8.2.2 水资源自然可再生能力单指标评价方法	136

8.2.3 基于 GRID 的流域水资源自然可再生能力评价方法	138
8.3 基于 GIS 的流域水量平衡模拟	139
8.3.1 模型输入	140
8.3.2 模型系统集成及模型参数率定	142
8.4 案例研究	143
8.4.1 泾河流域概况	143
8.4.2 泾河流域水资源自然再生能力影响要素分析	147
8.4.3 流域水平衡模拟	154
8.4.4 泾河流域水资源自然再生能力评价	159
第 9 章 城市水资源社会再生能力评价——以黄河流域主要城市为例	162
9.1 相关研究进展	162
9.1.1 城市水资源评价的研究现状与进展	162
9.1.2 常用评价方法	164
9.2 城市水资源社会再生系统分析及其功能	165
9.2.1 城市水资源社会再生系统分析	165
9.2.2 城市水资源社会再生系统的功能表征	167
9.3 城市水资源社会再生能力评价指标体系	167
9.3.1 指标体系的构建	167
9.3.2 各指标解释	169
9.3.3 综合评价指标	170
9.4 城市水资源社会再生能力评价方法概述	171
9.4.1 评价方法的选择	171
9.4.2 人工神经网络方法简介	172
9.4.3 基于人工神经元网络评价模型	174
9.4.4 评价标准的建立	175
9.4.5 基于 MATLAB 城市水资源社会再生能力评价模型	176
9.4.6 基于灰色关联的城市水资源社会再生能力评价方法	178
9.5 案例研究	179
9.5.1 黄河流域概况	179
9.5.2 数据预处理	180
9.5.3 2000 年黄河流域主要城市水资源社会再生能力评价	186
9.5.4 水资源再生效率动态评价	194
9.5.5 基于 WebGIS 城市水资源社会再生能力评价信息发布	198
第 10 章 基于城市水代谢的水环境承载力动态调控——以北京市通州区为例	206
10.1 水环境承载力量化方法的相关研究进展及方法选择	206
10.1.1 水环境承载力量化方法的相关研究进展	206
10.1.2 确定量化方法	208