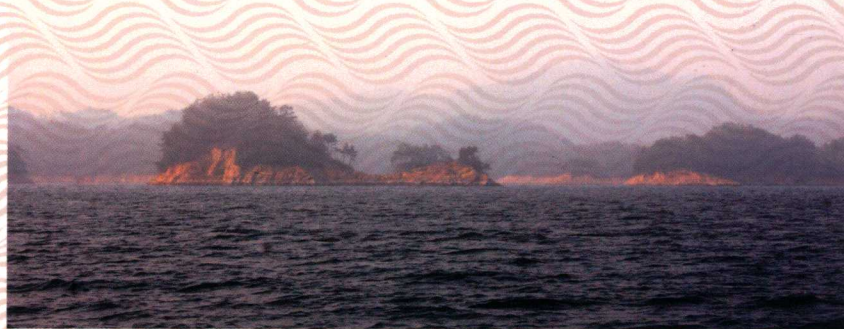




流域水质水量联合调控 理论与应用

王浩 周祖昊 贾仰文 等/著



Theory, Technology and Applications of
Integrated Water Quality and
Quantity Regulation in River Basins



科学出版社

流域水质水量联合调控理论 技术与应用

王 浩 周祖昊 贾仰文 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以松花江流域为对象,研究通过水质水量联合调控的方式,改善松花江流域的水环境状况,并提高应对突发污染事件的能力。核心研究内容包括松花江流域面向水质安全的水循环监测体系研究、松花江水质水量耦合模拟模型开发、松花江流域基于水功能区的水质水量总量控制方案、松花江农田面源污染水质水量联合调控示范、松花江干流水库群面向突发性水污染事件的联合调度系统开发。提出了流域水质水量联合调控的水污染防治新思路,从流域着眼,从水循环过程和污染迁移转化过程着手,采用水质水量联合调控的方式,对水循环过程和污染迁移转化过程进行双重调控,形成一整套从流域整体到局部区域、从源头到末端、从水量到水质全程调控的污染防治技术方法体系。

本书既可作为科研单位和大专院校的专家学者及研究生的参考书,也可从事水环境保护、水资源管理和水资源调度等领域的管理、技术人员提供借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域水质水量联合调控理论与应用 / 王浩等著. —北京:科学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-03-055409-3

I. ①流… II. ①王… III. ①流域-水资源管理-研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 282151 号

责任编辑:王 倩 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张:22 1/4

字数:521 000

定价:268.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

改善水环境是全球共同面临的重大课题。《联合国世界水发展报告 2015》(The United Nations World Water Development Report 2015)指出,由于缺少足够的污水处理设施,世界上发展中国家 90% 以上的污水未经处理直接排放到河流、湖泊或海洋中,带来严重的环境与健康问题。美国等发达国家有 40% 的河流流域被加工废料、金属、肥料和杀虫剂污染。我国的水环境质量不容乐观,2014 年全国各大流域河流水质劣于Ⅲ类的国控断面数接近总数的 29%,海河、辽河、淮河三大流域尤为突出,河流水质劣于Ⅲ类的国控断面数占到总数的 40%~60%。

为了实现我国经济社会又好又快的发展,缓解资源和环境的瓶颈制约,根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》,国家设立了“水体污染控制与治理”科技重大专项,旨在为我国水体污染控制与治理提供强有力的科技支撑。该专项按照“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的环境科技指导方针,从理论创新、体制创新、机制创新和集成创新出发,立足我国水污染控制和治理关键科技问题的解决与突破,遵循集中力量解决主要矛盾的原则,选择典型流域开展水污染控制与水环境保护的综合示范。

松花江流域位于我国东北地区北部,行政区划包含黑龙江省全部和吉林省大部、内蒙古自治区和辽宁省一部分,是我国重工业城市的集中地、重要农牧业生产基地,很多国际级和国家级的重点湿地位于该流域。受区域快速经济发展的影响,松花江流域污染比较严重,已经威胁到流域内的人饮水安全、供水安全、河流湿地的生态安全及国际界河的安全。随着东北工业能源基地和农牧业生产基地建设的逐步实施和城市化进程的加快,松花江所面临的城市点源污染和农村面源污染的压力将会更大,如果不采取有效的措施,将对国家振兴东北宏伟战略的实施、“四基地一区”的建设及国际关系产生不利影响。因此,松花江作为高风险污染源较多、跨国界、跨省界污染的河流,被“水体污染控制与治理”科技重大专项选为水污染防治技术示范区。

流域作为河流水系的集水区,是具有水文过程和环境生态功能的连续体,流域水环境演变的本质是流域水循环及其伴生环境过程的综合体现,流域水循环及其伴生环境过程失衡会导致流域水环境问题。一方面,由于污染排放量越来越大,超过水体本身的自净能力;另一方面,经济社会用水量越来越大,引起河道水环境容量越来越小。两个方面共同作用,引起水体中污染物的浓度过高,导致河流环境生态功能失衡。因此,水污染治理应从流域而非区域着眼,从水循环和污染迁移转化的全过程着手,水质水量双管齐下,研究提出科学合理的解决办法。

本书研究基于流域水质水量联合调控的水污染防控新思路,以松花江流域为研究区,

针对常态和突发污染控制,按照“监测体系—耦合模拟—总量控制—典型调控—目标响应”的科学逻辑,研究构建流域水质水量联合调控技术体系,并开展示范建设。核心研究包括五个方面的内容:①松花江流域面向水质安全的水循环监测体系研究;②松花江水质水量耦合模拟模型开发;③松花江流域基于水功能区的水质水量总量控制方案;④松花江农田面源污染水质水量联合调控示范;⑤松花江干流水库群面向突发性水污染事件的联合调度系统开发。

经过多个单位联合攻关,研究取得了丰硕的成果。针对松花江流域水质安全保障面临的关键问题,基于二元水循环理论,制定了松花江流域基于“自然—社会”二元水循环的水质监测方案和干流水污染事故应急监测方案;以水循环及其伴生水环境过程为基础,构建了适合寒区大尺度流域的分布式水质水量耦合模拟模型与干流河道水质水量动力学模型;在模型体系支撑下,将陆域减排和水功能区达标相结合,将控制取用水和控制入河污染相结合,将污水排放总量与排放标准相结合,开发了基于水功能区的流域水质水量总量控制技术;通过在吉林省前郭灌区开展的研究和大型示范工程建设,提出了从源头到末端一体化的农田面源污染综合调控技术;针对松花江干流突发性水污染事件,基于干流水动力学水质模型,构建了松花江干流面向突发性水污染事件的水库群联合调度模型,开发了决策支持系统和三维展示平台,综合形成了支撑流域水环境常规和应急管理的水质水量联合调控技术体系。

本书研究具有三个方面的特点:一是水量与水质相结合,各项研究均从水循环和污染迁移、转化两大过程着手,形成了包括“联合监测—耦合模拟—双总量控制—节水减污—应急调度”的流域水质水量联合调控成套技术体系;二是技术研究与工程示范相结合,既针对松花江流域水质水量联合调控开展面上研究,又针对流域内突出的农田面源污染问题开展示范工程建设并对成果进行推广;三是常规与应急相结合,既提出了支撑水环境常规管理的总量控制和污染削减的指标和手段,又开发了面向突发性水污染事件的水库群应急调度决策支持系统,并在相关管理部门安装运行。

参加本次研究的单位有中国水利水电科学研究院、松辽流域水资源保护局、水利部松辽水利委员会水文局、吉林省水利科学研究院、武汉大学、西安理工大学、中国科学院东北地理与农业生态研究所、黑龙江省水文局、吉林省迅达水文水资源勘测设计有限责任公司、中国农业科学院农田灌溉研究所、武汉市长江创业环境工程有限责任公司、北京中科信息技术有限公司、北京大学、吉林大学、东华大学、华北电力大学。

全书主要由王浩、周祖昊、贾仰文统稿,各章主要撰写人员如下。第一章,王浩、周祖昊、贾仰文、游进军、牛存稳、肖伟华、胡鹏、王康、柴福鑫、褚俊英;第二章,周祖昊、游进军、褚俊英、胡鹏、严子奇、张萍、杨波、陈晓群、刘俊;第三章,李青山、汤洁、白焱、佟守正、李环、续衍雪、赵慧媛、武保志、张萍、仇宝瑞;第四章,周祖昊、胡鹏、肖伟华、牛存稳、贾仰文、王康、付有形、王孟、洪梅、贺华翔、刘佳嘉、李金明、李佳、曹小磊;第五章,游进军、褚俊英、贾仰文、牛存稳、魏娜、李天宏、薛小妮、刘扬、杨波、陈晓群、朱厚华、刘俊;第六章,董建伟、王康、张寄阳、张晓辉、柳建设、张天翼、梁煦枫、陈永明、王姝、沈楠、谷小溪、隋媛媛、周璐、仇宝瑞;第七

章，谢新民、柴福鑫、肖伟华、韩俊山、王志璋、李建勋、贺华翔、李维乾、杨朝晖；第八章，范晓娜、杨广云、游进军、牛存稳、褚俊英、柴福鑫、王康、杨波、张萍；第九章，王浩、周祖昊、贾仰文、胡鹏、游进军、褚俊英、肖伟华、董建伟、王康、杨帆、李志毅、刘俊秋。由于篇幅有限，参加研究的其他人员和研究生不能一一列出，在此表示歉意！

在项目研究和本书编写过程中，得到环境保护部“水体污染控制与治理”科技重大专项办公室、水专项松花江项目办公室、水利部松辽水利委员会、吉林省环境保护厅、吉林省水利厅、黑龙江省环境保护厅、黑龙江省水利厅等单位 and 部门的大力支持，得到茆智、杨志峰、倪晋仁、王金南、邵益生、王子健、王业耀、王金南、周怀东、尹改、夏青、许振成、彭文启、富国、李和跃和梁冬梅等专家的悉心指导，得到研究单位领导、同事和研究生的大力支持，在此一并表示感谢！本书的出版得到国家“水体污染控制与治理”科技重大专项课题（2008ZX07207-006，2012ZX07201-006）的资助，得到中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室的支持，特此表示感谢！

受时间和水平限制，本书难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正！

流域水质水量联合调控是水污染防治的新思路，该理念和方法已经在松花江流域和其他流域水环境综合治理中得到实践应用。但是，由于该理论提出的时间不长，理论和技术体系有待在实践过程中不断完善，恳请专家学者多提宝贵意见！

目 录

第一章 概述	1
第一节 研究背景和意义	1
第二节 研究进展	4
第三节 流域水质水量联合调控理论基础	23
第四节 研究思路	29
第二章 松花江流域水污染防治重大实践需求	32
第一节 重大实践需求	32
第二节 流域概况	34
第三节 社会经济状况	37
第四节 水资源及其开发利用状况	38
第五节 水污染及治理情况	42
第六节 水污染治理面临的问题	48
第三章 基于二元水循环的流域水质监测技术	51
第一节 松花江流域二元水循环状况	51
第二节 水循环水质监测体系状况分析	65
第三节 水循环水质监测站网优化设计	71
第四节 小结	84
第四章 流域水质水量耦合模拟技术	86
第一节 水污染迁移、转化机理试验研究	86
第二节 松花江流域分布式二元水循环模型	97
第三节 流域水质模型	121
第四节 松花江干流水质水量动力学模型	131
第五节 小结	142
第五章 基于水功能区的流域水质水量总量控制技术	144
第一节 流域水质水量总量调控模型	144
第二节 需水预测及污染预测	154
第三节 流域水质水量总量控制方案	159
第四节 水质水量总量控制方案效果评估	189
第五节 小结	194
第六章 农田面源污染水质水量联合调控技术及工程示范	197
第一节 松花江流域农田面源污染分析	197

第二节	典型示范灌区概况	202
第三节	调控模式研究	206
第四节	示范工程建设	218
第五节	松花江流域农田面源污染调控效果预测	228
第六节	小结	232
第七章	松花江干流水库群面向突发性水污染事件应急调度技术及决策支持系统	234
第一节	突发性水污染事件剖析	234
第二节	松花江水污染风险识别与调控措施	238
第三节	松花江突发性水污染事件应急分级与应急措施	241
第四节	松花江干流水库群应对突发性水污染事件联合调度模型	245
第五节	松花江水污染应急调度情景分析	272
第六节	松花江干流水库群联合调度预案	282
第七节	松花江干流水库群联合调度决策支持系统	294
第八节	小结	302
第八章	流域水质水量联合管理机制	304
第一节	基于二元水循环的流域水质监测共享机制	304
第二节	基于水功能区的水质水量总量管理机制	309
第三节	农田面源污染水质水量联合管理机制	313
第四节	污染突发事件应急机制	316
第九章	总结与展望	322
第一节	主要成果	322
第二节	结论与建议	329
第三节	展望	331
参考文献		335

| 第一章 | 概 述

第一节 研究背景和意义

当前，随着世界人口的增加，工业和农业的发展，全世界每年有约 4000 亿 m^3 的污水排入江河湖海水体，世界范围内水环境形势十分严峻。《联合国世界水发展报告 2015》(The United Nations World Water Development Report 2015) 指出，由于缺少足够的污水处理设施，世界上发展中国家 90% 以上的污水未经处理直接排放到河流、湖泊或海洋中，带来严重的环境与健康问题；流经亚洲城市的河流很多已被污染；美国等发达国家有 40% 的河流流域被加工废料、金属、肥料和杀虫剂污染。

尽管世界各国在获得清洁水源方面取得了进步，但在改善给排水卫生条件方面的进展不足，影响了水体环境质量的改善。世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 2013 年调查数据显示，全世界有约 11% 的人口不能获得安全的饮用水，有约 40% 的人口无法拥有良好的卫生设施。污水处理的不足导致污废水排入水体从而影响了人类的生存环境，并导致水相关疾病的发生。例如，腹泻病每年已严重伤害到 76 万儿童的健康。

此外，欧洲环境署 (European Environment Agency, EEA) 2015 年出版了《欧洲水环境现状与展望 2015 年报告》(The European Environment State and Outlook 2015)，认为尽管欧洲的水体质量有所改善，但水体的营养物污染问题依然严重，特别是高强度的农业生产区，以非点源形式进入水体的氮污染物强度很大，从而导致持续的水体富营养化问题。

从国际水污染治理的历程看，发达国家在水污染治理方面走了“先污染、后治理”的道路，付出了沉重的代价。为了应对水环境污染问题，各国分别采取了不同的行动。例如，美国 1972 年颁布《清洁水法》，实施了最大日负荷总量 (total maximum daily loads, TMDL) 计划，即为满足特定的水质标准，计算水体能够接纳的某种污染物的最大负荷量，综合考虑水体的自然背景、点源和非点源的污染负荷强度及安全边际 (margin of safety, MOS) 将总污染负荷在各种污染源之间进行分配^①，在此基础上通过最佳污染控制技术削减污染负荷，达到清洁水体的根本目标。美国 TMDL 计划的实施推动了水体水环境目标的实现，但缺少对流量改变和天然栖息地改变等因素的考虑，无法进行水生态完整意义上的

^① 美国国家环境保护局 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 已提供了 19 种分配方法 (如等比例分配和等单位处理费用分配等)。

修复,这也是其未来发展的主要方向。

欧盟自1973年制定了环境行动计划,此后经历了从单一化到一体化的发展过程。2000年颁布了《欧盟水框架指令》(*The EU Water Framework Directive*)(2000/60/EC),共有26个条文和11个附件,要求其成员国采用统一的水管理框架,按照指令的要求或为实现指令所规定的水质目标,采用最新的环境保护技术对污染源进行治理。该框架指令第16条要求采用综合的水污染防控措施,并区分一般污染物和重点污染物,采取不同程度的控制顺序,涉及的水体不仅包括内河和地下水域,还包括沿海和潮水;第17条还要求采取特别措施来对待地下水污染^①。该框架指令还注重水生态保护目标,综合考虑水文条件和水生植物等特点,开展水生态功能的保护、修复或恢复,实现水生态完整性目标及水资源的可持续利用。

水质水量变化带来的生态系统影响日益得到国际关注。例如,联合国2005年发布的《千年生态系统评估报告》(*Millennium Ecosystem Assessment*),由95个国家、1360名专家经过4年,耗资2400万美元完成。其开始关注生态系统服务功能(包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等方面)和生态系统变化对人类福祉的影响(如安全、高质量生活的物质需求,健康、良好的社会关系和选择与行动的自由等)。在对过去生态系统定量评估基础上(包括人类社会从江河、湖泊中取用水的增加),识别了主要驱动力,并提出了扭转生态系统退化趋势的主要措施。

中国当前面临着严峻的水资源与水环境问题,突出表现在如下方面:①流域水环境质量不容乐观。在河流水质方面,2014年劣于Ⅲ类的国控断面数接近总数的29%。海河、辽河、淮河三大流域尤为突出,劣于Ⅲ类的断面占40%~60%。在湖泊水库水质方面,劣于Ⅲ类的断面数占总数的比例为38.7%,尤其以太湖、滇池和巢湖最为严重,湖泊水库富营养化状态占24.6%。在地下水质量方面,61.5%的监测点处在较差和极差水平。地下水污染正从点状、条带状向面上扩散,由局部向区域扩散,由浅层向深层渗透,由城市向周边蔓延。流域水污染形式与组分更加复杂多样,呈现结构型、压缩型与复合型特征。重金属、持久性有机污染物污染不容忽视,带来严重的环境影响和人体健康危害。②流域水生态系统结构失衡且功能受损。流域上下游区域之间的无序竞争用水,往往导致水资源过度利用和生态用水的长期挤占,造成生态功能下降和生态系统结构失衡。③流域资源型、竞争性缺水与浪费现象并存。根据《全国水资源综合规划》,当前我国现状多年平均河道外缺水量为404亿m³,缺水率为6.3%,挤占河道内生态环境用水量为132亿m³,其中,黄河、淮河、海河、辽河水资源一级区缺水量占66%。全国平均单方水GDP产出仅为世界平均水平的1/3,灌溉水有效利用系数仅为0.4~0.5,低于发达国家水平(0.7~0.8);一般工业用水重复利用率在60%左右,低于发达国家水平(85%)。④流域突发性水污染事件频发,影响甚大。由自然灾害、机械故障、人为因素及其他不确定性因素引发固定或移动的潜在污染源偏离正常运行状况而突然排放的污染物,经过各种途径进入水体,导致

① 欧盟2006年专门还出台了《新地下水指令》(2006/118/EC),对地下水污染的监测、防治或限制污染物进入水体的措施及地下水状况和趋势评价等进行了规定,使得地下水污染防治的立法更为规范。

突发性水污染事件。统计表明,2006~2011年我国发生179起重大突发性水污染事件。2012年以来发生了包括广西龙江镉污染、山西长治苯胺泄漏和黄浦江上游死猪漂浮等事件,造成了巨大经济损失,也给社会安定和生态环境带来影响。

长期以来我国的流域水资源管理注重工程的、单一部门的、单一要素的、以行政手段为主的管理,近些年来尽管我国在流域水资源管理方面取得了一定进展,但从根本上还缺少系统化和高效的流域水环境和水资源管理体系设计,表现在如下方面:①过程分割,忽视流域内水污染的全过程控制;②以末端治理为主的排放标准控制不能满足水体环境质量的要求;③强调点源,忽视非点源污染的治理;④流域水资源管理体制失效;⑤流域水计量、监测与信息化系统不完善、资金投入不够及缺乏公众参与。2015年4月,我国《水污染防治行动计划》的颁布具有开创性意义,成为当前一段时期我国政府在水环境保护方面的行动计划纲领,其将水量和水质紧密结合,实行水环境的系统治理的突出特色,为我国水环境治理指明了新的方向。

流域作为水系的集水区,是具有水文过程和环境生态功能的连续体,流域水环境演变的本质是流域水循环及其伴随过程的综合体现。流域水资源与水环境要素密切关联、相互作用、不可分割,主要体现在如下方面:①污染物的降解与输移受流域降水、产流、用水和排水等水循环过程的影响,流域污染物产生、输移与各类用户的耗水过程密切相关,工业化、城市化和农业生产过程中的污废水以点源和非点源形式大量排入水域,造成湖泊萎缩、河流断流与水环境恶化。②水资源量与水质动态关联。流域水资源的短缺降低流域水环境容量,会加重流域水环境恶化。河湖等地表水的长期过度使用,导致地表水体中有害物质浓度提高;长期过度抽取地下水将破坏水质。如果流域发生水质劣变,被污染的水将无法用来饮用和生产,导致可用于某一特定用途的水量明显减少,从而加剧水资源短缺的矛盾。③节水与污染措施效果兼收。各种途径的节水在缓解用水紧张状况的同时,也会减少对环境的污染;而水环境污染的治理也会增加可用水量,从而缓解水资源的供需矛盾。只有从流域水质与水量耦合机理出发,实现对水质与水量双要素的系统调控,才能从根本上确保流域水资源与社会经济可持续发展,以及水环境与水生态系统的良性发展。

水量和水质对社会经济发展具有决定性作用,缺水和干旱、水环境质量的下降都将给人类健康和水生态系统带来危害,从而威胁社会经济的发展。当前,中国已进入水环境治理的敏感时期,为从根本上改变我国水资源紧缺与水环境恶化的严峻状况,传统的以污水处理厂建设为核心的水污染防治模式亟待转型,实行流域尺度的水质水量联合调控尤为重要,系统地实现工程和非工程措施的统筹、陆域和水域的统筹、常态和应急态的统筹及源头减排、过程控制与末端治理的统筹,已成为中国水环境治理的重点方向和难点所在。因此,研究流域水质水量联合调控的基本理论、关键技术并开展应用,具有十分重要的理论与现实意义。该研究对推动水环境、水文水资源及水生态等多学科的交叉融合,推动行业的技术进步,实现水环境治理的根本性变革具有重要的学术价值。

第二节 研究进展

一、流域水质水量耦合模拟

开展流域水质水量联合调控的前提条件，是在流域水循环及其伴生环境过程机理研究的基础上，弄清流域各个环节水和污染物的物质通量。这一项工作需要在水质水量耦合模拟工具的支持下完成。水质水量耦合模拟分为流域和河道两个层面。流域水质水量耦合模拟包括流域水循环过程模拟和流域水循环伴生的流域水质模拟，河道水质水量耦合模拟包括河道水动力学模拟和河道水动力学水质模拟。考虑研究区域的特殊性，本节还介绍了冰封期河道水质水量耦合模拟情况。

（一）流域水质水量耦合模拟

流域水质水量耦合模拟分流域水循环过程模拟和流域水循环伴生的流域水质模拟两个部分。

1. 流域水循环过程模拟

流域水循环过程模拟主要通过水文模型实现。水文模型是水文科学研究的重要工具，也是研究的热点和难点之一。随着人类活动影响的加剧，变化环境下的流域二元水循环模拟与调控已成为现代水文水资源与地球科学研究的核心命题和前沿领域。社会水循环模拟面临着比自然水循环更多的难点（如与水有关的社会经济数据的空间化及其描述方法和社会水循环基本单元之间的相互作用机制等）。同时，如何在不同类型社会水循环单元机理研究的基础上，通过精细的过程模拟，实现各单元之间的“无缝”耦合，需要加强模型数理描述和现代信息技术应用的引进和研发。

有关流域水文模型，已有大量文献进行全面综述，本书仅对社会水循环及“自然-社会”二元水循环模拟的发展情况进行梳理。1999年，王浩等在国家重点基础研究发展规划（973）项目“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”文本中，首次提出了“自然-社会”二元水循环模式，开始了系统研究，并在后续的国家科技攻关计划、国家科技支撑计划和973项目等的研究中，研发了由分布式水循环模拟模型和集总式水资源调配模型耦合而成的二元水循环系统模拟模型，形成了系统的“自然-社会”二元水循环理论。贾仰文等（2003）在充分阐述二元水循环理论的前提下，提出了二元水循环模型，该模型由分布式流域水循环（water and energy transfer process, WEP）模型、水资源合理配置（rules-based objected-oriented water allocation simulation, ROWAS）模型和多目标决策分析（decision analysis for multi-objective system, DAMOS）模型耦合而成，并在海河流域得到了较好的验证。

2. 流域水质模拟

流域水质模拟在水量模拟的基础上完成。随着流域水环境的恶化及环境保护意识的加

强,在流域水循环模型的基础上,逐步发展了对流域水循环伴生的污染物迁移、转化过程的模拟,流域水质模型逐渐发展起来,并被广泛用于污染物输移扩散的模拟及预测方面,为流域水环境规划和管理提供科学依据。国内外相关研究主要从环境学角度着手(如进行面源污染物预测和水体水质演化模拟),未能就水循环演变对区域水环境的影响贡献进行定量分析。需要指出的是,社会水循环是污染物产生的重要原动力和路径,研究社会水循环演变的产污效应将是区域污染综合治理的重要基础。

流域水质模型从“陆域-河道”两大范围入手,描述污染物的“产生—入河—转化”等过程,是污染物陆域模型与河道水质模型的结合,针对不同社会经济发展状况、污水处理水平和农业发展特点等条件下的流域水质进行描述。比较典型的流域水质模型包括 HSPF 模型、CatchMODS 模型和 SWAT 模型等,这些模型都能对流域水循环过程进行模拟。

需要特别指出的是 SWAT 模型。该模型结构合理、运算效率高、研究具有针对性,从而成为最具优势的非点源污染模型之一。郝芳华等(2006)总结了非点源污染模型的理论方法,形成了基于 SWAT 模型的人河系数法求解入河污染物量的体系。李丹等(2008)将 SWAT 模型与 QUAL2E 模型耦合,探讨了河道水质模型对流域面源模型模拟结果的影响,并分析了该影响与流域水文情势的关系。SWAT 模型在我国图们江、海河流域、潘家口水库流域和新丰江流域等地均有应用。

(二) 河道水质水量耦合模拟

河道水质水量耦合模拟模型可分为零维、一维、二维、三维,分别来描写水质变化的时空特性。尽管实际水质问题都是三维结构,但水质模型维数的选择主要取决于模型应用的目的和条件。一般在规划、设计和研究中,常采用稳态河流水质水量模型预测一定设计条件下的水质变化情况;而动态水动力水质模型常用于模拟暴雨径流和污染事故等瞬时变化情况的水质过程。

1. 河道水动力模拟

目前,关于河道水量模型及其求解方法已有较多研究,根据现有相关文献研究成果(吴寿红,1985;韩龙喜等,1994;李义天,1997;侯玉等,1999;白玉川等,2000;徐小明等,2001;卢士强和徐祖信,2003)主要可归纳为以下三种类型,即组合单元解法、混合模型求解法和圣维南方程组解法。其中,对圣维南方程组解法的研究较多。

组合单元解法由法国水力学专家 Jean 于 1975 年提出,我国也有研究者采用此方法进行河网地区的水力模拟。此方法的基本思想是:首先,将河网地区水力特性相似、水位变幅不大的水体概化成单元;其次,取单元中心的水位为代表水位,采用谢才公式模拟单元之间的流量交换,根据水量守恒建立每一单元微分形式的水量守恒方程,离散并得到以单元水位为自变量的代数方程,辅以边界条件即可求得各单元水位和单元之间的流量。组合单元解法对河道进行简单概化,以单元为计算单位,计算相对简单,但模拟精度较低,仅适用于大尺度水域的水力模拟。

混合模型求解法是将河网水域区分为骨干河道和成片水域两类,对骨干河道采用圣维南方程组解法,对成片水域采用组合单元解法将其划分为单元,再引入当量河宽的概念,

把成片水域的调蓄作用概化为骨干河道的滩地，结合圣维南方程组解法一并计算。

圣维南方程组解法是以法国学者圣维南在 1871 年建立的圣维南方程组（连续方程和动量方程）来描述水体在河渠中的运动过程。该方法基于水体运动的物理规律推导，能够比较真实客观地反映运动特点。国内很多学者都对其有深刻的研究。

2. 河道水质模拟

近年来，水质模型的研究已经从点源污染模型转向面源污染模型，从一般的水质模型转向综合生态水质模型，并考虑有毒化合物及河流泥沙问题。

国外应用较多的有 QUAL-Ⅱ 模型、CE-QUAL-RIV1 模型、WASP 模型和 MIKE11 模型等。QUAL-Ⅱ 模型是由 USEPA 开发的一维稳态模型，用来模拟分支河网的富营养化过程，研究的水质状态变量包括水温、细菌、氮化合物、磷化合物、溶解氧（DO）、生化需氧量（BOD）、藻类及可以由用户自定义的一种可溶解物质和三种不溶解物质。CE-QUAL-RIV1 模型由美国陆军工程兵团开发，用来模拟分支河网的水流量与水质变化，具有处理变化大的流量和不同水质元素的能力，其研究的水质状态变量包括水温、细菌、氮化合物、磷化合物、DO、BOD、藻类和金属等。WASP 模型是由 USEPA 开发的水质模拟分析计算程序，能模拟两个底泥层和两个水体层，因此，实际上是计算一维、二维、三维的模型。其通过 EUTRO 和 TOXI 两个模块，研究的水质状态变量包括水温、盐度、细菌、氮化合物、磷化合物、DO、BOD、藻类、硅土、底泥、示踪剂、杀虫剂、有机物及用户自定义的物质。丹麦水力研究所的 MIKE11 模型利用 Abbott 六点隐式差分格式求解一维圣维南方程组，求解时将河道离散成水位、流量相间的计算点。

国内在河网水质模型方面做了很多研究工作。徐贵泉等（1996）开发了感潮河网水量、水质统一的 Hwqnow 模型，并用于为改善上海浦东新区河网水环境而进行的调水方案研究中，取得了良好的效果。廖振良等（2002）对上海苏州河建立了水系水动力水质模型。清华大学结合确定性模型与不确定性分析的优点，以不确定性分析为框架，结合圣维南方程组及连续混合反应池（continuously stirred tank reactor, CSTR）模型，开发了一维动态环状河网水质模型，有效解决了环状河网水文条件复杂和监测数据稀缺的问题，并应用于温州市温瑞塘河流域综合整治规划中。对珠江三角洲河网地区，关于一维、二维、三维水质模型在稳定性、收敛性及模拟精度方面的研究已取得重大进展。例如，曾凡棠和黄水祥（2000）在潮汐河网随机水质模型方面开展了探索性的研究工作，并取得了具有一定应用价值的成果。丁训静等（1998，2003）将荷兰 Delft 水力研究所研制的 Delwaq 水质模型应用于太湖流域，通过对太湖流域的水质模拟研究，进行了模型参数的率定、验证和灵敏度分析，得到了适合太湖流域平原河网的水质模型及参数，模型计算值与实测值拟合较好。

李锦秀等（2002）建立了三峡水库整体一维水质模型，该模型包含了十余个水质要素变量，采用双扫描方法来求解水动力和水质方程，为模拟预测三峡水库建成以后库区不同江段平均水质变化趋势提供技术支持，但对环状的复杂河网而言，双扫描法则失去了优势并受到限制。彭虹等（2002）采用有限体积法建立了一维河流综合该模型，该模型包含 8 种水质变量，并考虑变量之间的反应，仅用于单一河道，对汉江部分河段进行了模拟。褚

君达和徐惠慈(1992)、韩龙喜和陆冬(2004)采用类似河网水动力三级联解的方法建立了河网水质模型。金忠青和韩龙喜(1998)运用组合单元解法建立了一种适用于大尺度河网的、新的平原河网水质方法。吴挺峰等(2006)应用河网三级联解法建立了总磷的水流和水质模型,并考虑河网概化密度对河网水量水质模型的影响。

(三) 冰封期河道水质水量耦合模拟

冰封期是河流表层或者全部水体处于冰封状态下的一段特殊时期,冬季冰封的现象常见于寒区河流。近年来,我国冰封期河道水量水质模型的研究逐渐丰富,国内多数研究以冰凌预报和冰封期输水为主要研究目的,且水量方面的研究多于水质方面的研究。

1. 冰封期河道水动力学模拟

国际上对冰封期河流水动力学要素的研究主要集中在河流冰盖、冰塞的形成和演变机理方面。Jasek(2003)和She等(2007)对加拿大阿萨斯卡河冰塞的形成和演变过程进行监测,开发了River I-D模型,在冰河形成与消融模拟功能上具有通用性。Massie等(2002)根据多年实测资料,利用神经网络法预测了Oil City冰塞的形成和演变过程,研究了如何确定神经网络的输入向量,探讨了下游发生冰塞的解决方法。Shen和Liu(2003)通过Shokotsu River水文监测数据及河流水力和几何特征,研究了1995年春季Shokotsu River冰塞溃决的原因。Shen等(2000)开发了河流表面冰体运移及冰塞形成的动态二维模型,水动力学模型采用欧拉有限元方法计算,该模型假设河流表面冰层的移动是一个连续的过程,利用模型模拟了美国密西西比河密苏里州河段冰塞的发展。Beltaos和Burrell(2006)根据加拿大数条河流的实测水文资料,分析了冰塞溃决过程中冰面下水流温度变化,研究表明,一般情况下,水的温度变化与下游距离呈负指数关系。Prowse(2001)研究了气候变化对加拿大西部Peace River冰塞的影响,预测了未来几十年的冰塞变化趋势,模拟结果表明,未来结冰时间将减少2~4周,冰盖厚度会变得更薄,发生严重冰堵塞导致洪水的频率将减少。Voevodin和Grankina(2008)开发了一种研究在不同盐度条件下冰的发展过程的动态数学模型,模型考虑了积雪和冰冻温度因素的影响。Zdorovenova(2009)对俄罗斯西北部Vendyurskoe水域水冰和水沙边界热量传递过程进行了研究,研究结果表明,冬季底部冰层热量释放导致冰层表面处(0.1~0.5 m)温度不断升高。Hammerschmidt(2002)利用瞬态热线法及瞬态热带法研究了冰和水的导热系数和热扩散率。

我国在冰封期河道水动力学模拟方面的研究主要集中于以下三个方面。

(1) 冰期河流水文特征及封冻河道水力要素分析。早在1958年,就有学者(水文工作通讯,1958)研究了冰期水位观测及流量测量的方法,并运用该方法对冰期水位及流量等水文要素进行测量;此后,魏良琰(2002)详细分析了河道断面在不完全封冻和完全封冻条件下的水力要素特征,提出了冰盖流综合糙率的一般计算公式,通过试验验证表明,计算的综合糙率与实测值非常吻合。茅泽育等(2002)应用半经验紊流理论,分析了冰封期河道水力要素之间的关系,并推导了关系表达式,研究了根据河道断面流速场分布情况推算河床及冰盖糙率的计算方法。王军等(2007)对有冰层覆盖的河道水力计算进行了研

究,提出了冰塞段水位计算的定性表达式。

(2) 利用数学模型对河冰动态发展过程进行数值模拟。杨开林等(2002)在借鉴国外模型的基础上,模拟了冬季松花江流域白山河段十年间冰塞的形成及发展过程,结果表明,其提出的新发展模型模拟效果很好。茅泽育等(2003)应用河流动力学和热力学等原理,建立了冰塞形成及演变发展的冰水耦合的综合动态数学模型,并利用黄河河曲段原型实测资料进行了验证,模型能较好地模拟河道封冻过程中冰塞体的发展演变过程。朱芮芮等(2008)根据冰塞形成发展机理,利用水力学和热力学基本原理建立河冰形成演变的数学模型,研究了无定河流域下游段丁家沟至白家川的每年春季河流水位、封河日期和开河日期,模拟结果较为理想。郭新蕾等(2011)以南水北调中线工程冬季输水为例,根据实测和设计资料,采用自主开发的大型长距离调水工程冬季输水冰情数值模拟平台,分析了冰情数学模型中单一参数(冰期冰盖糙率、大气与冰盖的热交换系数)的不确定性对冰期冰盖形成、发展、消融和水位及流量等要素的影响,并计算给出了一般规律。

(3) 冰期输水及冰凌预报。穆祥鹏等(2013)根据传热学理论对加设保温盖板后的渠道水体失温过程进行理论分析,并在此基础上建立了设置保温盖板的一维渠道冰期输水数学模型,对加设保温盖板的冰期输水过程进行了模拟,提出了切实可行的冬季输水方案。刘孟凯等(2013)通过分析渠系融冰期的水力响应特性,从渠系运行安全(水位波动幅度和波动速率较小)角度提出了渠系融冰期安全输水模式,基于冰情预报建立了渠系融冰期自动化控制管理模型。郭新蕾等(2011)将冰情发展模型与树状明渠系统复杂内边界条件下的渠道非恒定流模型进行集成耦合,开发了大型长距离调水工程冬季输水冰情数值模拟平台,并针对长距离明渠-闸门-泵站系统冬季反向输水可能出现的冰问题,以南水北调来水调入密云水库调蓄工程为研究对象,将该平台升级,研究结果对决策管理部门在冰期制定北京市多水源联合调度方案具有参考意义。

2. 冰封期河道水质模拟

国内外对冰封期水质模型的研究相对较少,Prowse(2001)综述了河流中的冰在成冰、冻结和破冰等过程中所产生的水文、地形、水质效应。我国对冰封期水质模型的研究始于20世纪80年代初。我国开展的对寒区河流冰封期的水质监测与试验研究,为构建冰封期河道水质模型,并对其进行机理研究奠定了试验与数据基础。刘广民等(2008)在冬季室外自然气候条件下进行硝基苯水样冰冻试验,并且对松花江达连河断面主河道冰层中硝基苯含量进行分层检测。站培荣和卢晏生(1989)调研了1987年12月和1988年1月松花江哈尔滨段冰封期制糖废水污染区微生物及水质情况,结果表明,监测江段真菌大量滋生,溶解氧迅速减少,水节霉和囊轴霉为优势种群。芦晏生(1985)调查了1981年2~3月松花江哈尔滨—通河江段冰封期污染程度与浮游生物的生长状况。苏惠波(1990)研究了嫩江冰封期水质自净能力规律,并初步建立了嫩江冰封期水质响应模型,模拟了COD、BOD₅和NH₃-N等有机物在河流中的降解过程,模型基本能够反映嫩江冰封期水质的变化规律。王宪恩等(2003)分析了冰层冻结对COD的削减作用,构建了耦合沉淀作用、生物降解及冰层冻结的河流COD削减模型。郑秋红等(2006)构建了冰封期河流中污染物损耗估算模型,探讨了冰封期内河流COD的损耗方式,结果表明,该时期的损耗

方式以沉淀和冰冻作用为主,而生物降解作用则相对较弱。殷启军(2013)构建了冰封期水质模型,耦合了热动力学模型、水动力学模型和水质模型,以硝基苯为例,模拟了成冰过程对河流水质的影响。孙少晨等(2011)建立了松花江干流非汛期及冰封期水动力水质耦合模型,研究了冰期西流松花江干流水质问题,模拟了2005年硝基苯水污染事件,并提出了面向突发性污染事件的水库群应急调度机制。

(四) 现有研究不足与发展趋势

从已有的研究来看,流域水质模型和河道水质模型经过了上百年的发展,已经取得了长足的进步,在流域水环境规划、水资源保护和突发污染事故处理等方面发挥了重要的作用,从现有研究不足和发展趋势方面看,主要认识如下:

(1) 数据是制约水质模拟的关键因素,未来研究中加强水质监测仍将是最重要的努力方向,特别是对非点源污染的全过程监测尤为重要。水污染迁移、转化过程极其复杂,影响因素众多,虽然发达国家的水质监测已经做了大量工作,但距离准确刻画水污染过程尚有差距,发展中国家则差距更大。

(2) 水质模型是根据排入水体的污染物分析预测未来水质状况的一种手段,好的模型应尽可能全面准确地反映污染物的迁移、转化规律。对污染物在流域和水体中的迁移、转化过程认识越深刻,建立的模型将越准确,预测精度和可靠程度将越高,进一步深入刻画污染物随水流运动的迁移、转化过程是未来的发展方向。

(3) 一个好的水质模型需要水文学、水力学、化学、生物化学、水质、数学及计算机等方面的专家通力合作,采用遥感解译、地理信息系统(geographic information system, GIS)、大数据和云计算等现代化手段有助于增强水质模拟功能和提高模拟精度。

(4) 当前国内外相关研究主要从环境学角度着手(如进行面源污染物预测和水体水质演化模拟),未能就水循环演变对区域水环境影响贡献进行定量分析。社会水循环是污染物产生的重要原动力和路径,研究社会水循环演变的产污效应将是区域污染综合治理的重要基础。

(5) 我国对水环境问题的研究在改革开放之后才逐渐兴起,区域上主要集中于南方河网地区,对北方地区,尤其是对寒区流域的研究不多。随着东北地区水环境污染形势日益严峻,其区域性、大尺度和复杂化的特点越来越明显。这些实际问题的出现,需要运用数学与水环境基础知识来解决,加强冰封期水量与水质耦合模拟研究越来越重要。

二、流域水质水量联合调控

(一) 问题的提出

水资源短缺是制约经济社会可持续发展的重要因素之一,缺水在很大程度上是由水资源得不到科学分配和合理利用导致,因此,加强水资源的管理调控是提高水资源利用效率的重要方向。水量调控管理是一个逐渐发展的过程,从最初的水量调控为主,再到水量模