



跨流域调水工程 突发水污染应急调控 关键技术与应用

雷晓辉 权锦 王浩 蒋云钟 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

跨流域调水工程 突发水污染应急调控 关键技术与应用

雷晓辉 权锦 王浩 蒋云钟 等 著



中国水利水电出版社

内 容 提 要

南水北调中线工程可解决河南、河北、北京和天津 4 个省市的水资源短缺问题,供水水质状况直接关系到诸如北京等省缺水城市居民的用水安全。然而当前水源区、总干渠沿线区域存在多类型水质污染风险源,一旦发生水质污染事件,除了可能导致中断输水、生活及生产水资源需求无法满足外,还可能产生难以估量的经济损失。本书针对跨流域调水工程输水距离长、调蓄能力薄弱、供水水质要求高、跨多地域、跨多部门等特点,重点针对跨流域调水工程突发水污染的应急调控关键技术开展研究,并进行应用。研究成果可为南水北调等跨流域输水工程其输水水质保障提供科技支撑作用。

本书读者对象主要为应急管理、突发水污染处置、水资源调度等相关专业的教师和研究生,以及长距离调水工程运行调度与管理领域的技术人员。

图书在版编目 (C I P) 数据

跨流域调水工程突发水污染应急调控关键技术与应用/
雷晓辉等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 5
ISBN 978-7-5170-5476-4

I. ①跨… II. ①雷… III. ①跨流域引水—调水工程
—水污染—突发事件—处理 IV. ①X52

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第131135号

书 名	跨流域调水工程突发水污染应急调控关键技术与应用 KUALIUYU DIAOSHUI GONGCHENG TUFA SHUIWURAN YINGJI TIAOKONG GUANJIAN JISHU YU YINGYONG
作 者	雷晓辉 权锦 王浩 蒋云钟 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 8.5 印张 191 千字
版 次	2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	38.00 元



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



突发事件应急管理（又称危机管理或公共安全管理等）是近年来管理领域中出现的一门新兴学科，是一个综合了运筹学、战略管理、信息技术以及各种专门知识的交叉学科，是针对突发事件的决策优化的研究。

南水北调工程是世界上最大的跨流域调水工程，它具有调水线路长、调水规模大、涉及区域广、参与工程多、供水水质要求较高等特点。南水北调工程是缓解我国北方地区水资源短缺、实现水资源合理配置、保障经济社会可持续发展、全面建设小康社会的重大战略性基础设施。

南水北调工程的任务主要是向供水对象提供城市生活用水和工业用水，供水水质状况直接关系到京津冀苏豫鲁等省缺水城市居民的用水安全。根据国务院批准的《南水北调工程总体规划》，要求中线工程全线输水水质达到国家地表水Ⅱ类水质标准。

南水北调中线一期工程已于 2014 年 12 月 12 日通水，水质安全保障标准高，如何永久保障地表Ⅱ类水质标准是实现工程效益的关键。然而当前总干渠沿线区域存在多类型导致水质不达标风险源，一旦发生水质污染事件，除了直接中断输水，导致水资源需求无法满足外，还可能产生难以估量的经济损失。

所以除了积极组织实施水污染防治规划外，通过应急调控来降低上述风险源对输水水质的影响显得尤为重要，具体体现为：①发生突发性水污染事件时，通过科学的应急调控方式，尽可能控制事件影响范围和影响程度，减轻事件危害程度；②水质达标出现波动临界状态时，通过科学调控在一定程度上提高中线总干渠的水质达标程度；③正常状况下，通过科学调控，在保障干线各分水口门的分水水质满足饮用水水源的安全前提下，实现河库-渠

泵闸群供水水质安全与水量安全等多目标之间的优化协调。

本书针对跨流域调水工程输水距离长、调蓄能力薄弱、供水水质要求高、跨地域跨部门等特点，重点针对跨流域调水工程突发水污染的应急调控关键技术开展研究，并进行应用。

本书各章节撰稿人员为：前言，雷晓辉、秦韬；第1章绪论，雷晓辉、王浩、蒋云钟；第2章突发水污染应急调控技术体系，权锦、雷晓辉、朱杰；第3章输水干渠水力学模拟技术，雷晓辉、郑和震、权锦；第4章突发水污染模拟预测技术，郑和震、雷晓辉、王家彪；第5章突发水污染追踪溯源技术，王家彪、雷晓辉、郑和震；第6章突发水污染闸门应急调控技术，雷晓辉、孔令仲、权锦；第7章突发水污染应急调控指挥系统，权锦、雷晓辉、刘柏君；第8章结论与展望，王浩、雷晓辉、蒋云钟；全书统稿，雷晓辉、权锦、刘柏君。

书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2017年3月

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 应急管理定义	1
1.2 应急管理国内外研究现状	2
1.3 国外大型长距离调水工程应急管理	4
1.4 我国跨流域调水工程应急管理及其存在问题	5
第 2 章 突发水污染应急调控技术体系	6
2.1 突发水污染事件概述	6
2.2 技术研究进展	7
2.3 突发水污染应急调控模式	17
2.4 突发水污染应急调控技术体系	18
2.5 本章小结	21
第 3 章 输水干渠水力学模拟技术	22
3.1 一维明渠水流数值模拟控制方程	22
3.2 边界条件的处理	26
3.3 恒定非均匀流计算初始条件	37
3.4 线性方程求解	37
3.5 应用案例：南水北调中线干渠	39
3.6 本章小结	48
第 4 章 突发水污染模拟预测技术	50
4.1 数值模拟	50
4.2 突发水污染快速预测	61
4.3 应用分析	64

4.4	本章小结	66
第5章	突发水污染追踪溯源技术	67
5.1	突发水污染追踪溯源基本原理	67
5.2	追踪溯源常用方法	68
5.3	耦合概率密度方法	72
5.4	应用分析	75
5.5	本章小结	79
第6章	突发水污染闸门应急调控技术	81
6.1	闸门调控规则	81
6.2	闸门自动控制算法	86
6.3	应用分析	94
6.4	本章小结	103
第7章	突发水污染应急调控指挥系统	104
7.1	服务对象	104
7.2	系统框架	105
7.3	系统功能	105
7.4	实例	108
7.5	本章小结	119
第8章	结论与展望	120
8.1	结论	120
8.2	建议与展望	121
参考文献		123

第 1 章 绪 论

1.1 应急管理定义

应急管理 (Emergency Management), 通常又称作危机管理或灾害管理。应急管理作为一门新兴的学科, 目前还没有一个被普遍接受的定义。下面将试着归纳国内外机构和学者对应急管理的相关定义。

1. 相关机构对应急管理的定义

较具代表性的有美国联邦紧急事态管理局 (FEMA) 的定义: 紧急状态系指任何由总统确定, 需要联邦政府帮助, 加强州政府和地方政府的工作和能力, 以拯救生命、保护财产、保护公共卫生和安全, 或者降低或转移美国国内任何一次灾难的威胁的事件或事故。相应地, 应急管理是组织分析、规划、决策和对可用资源的分配以实施对灾难影响的减除、准备、应对和恢复。其目标是: 拯救生命; 防止伤亡; 保护财产和环境。澳大利亚紧急事态管理署提出了紧急事态风险管理的内涵: 紧急事态风险管理是一个处理因紧急事态事件引起的社区风险的过程。它是识别、分析、评估和治理紧急事态分析的系统性方法。这一过程的 5 个主要行动包括建立背景、识别风险、分析风险、评估风险和治理风险, 它们受到两个保障性行动的支持, 一是通信和咨询, 二是监控和审查, 从而确保其目标的实现。

2. 国内外学者对应急管理的定义

詹姆士·米切尔认为, 应急管理是指, 为应对即将出现或已经出现的灾害而采取的救援措施, 这不仅包括紧急灾害期间的行动, 更重要的是, 还包括灾害发生前的备灾措施和灾害发生后的救灾工作。布朗查德等人认为, 应急管理是一种管理职能, 它致力于创建一个框架, 在此框架内降低社区对灾害的脆弱性, 并得以处置灾难。凭借处置各种灾害和灾难的能力, 应急管理寻求增进安全性, 减轻脆弱性。计雷等认为, 应急管理是在应对突发事件的过程中, 为了降低突发事件的危害, 达到优化决策的目的, 基于对突发事件的原因、过程及后果进行分析, 有效集成社会各方面的相关资源, 对突发事件进行有效预警、控制和处理的过程。万鹏飞认为, 灾害的应急管理由 4 个环节构成, 它们是预防、应对、恢复、减灾。

另外, 国内外学者从危机管理等不同角度进行了研究。菲克 (Fink) 认为, 任何防止危机发生的措施皆为危机管理; 任何为了消弭危机所产生的风险与疑虑, 而使人更能



主宰自身命运的手段或措施,皆可称为危机管理。简言之,“危机管理”就是一种应变准备。张成福指出,所谓的危机管理是一种有组织、有计划、持续动态的管理过程,政府针对潜在的或者当前的危机,在危机发展的不同阶段采取一系列的控制行动,以期有效地预防、处理和消弭危机。这一定义得到了学界较为普遍的认同。肖鹏军认为,公共危机管理应是:政府或其他社会公共组织通过监测、预警、预控、预防、应急处理、评估、恢复等措施,防止可能发生的危机,处理已经发生的危机,以减少损失,甚至将危险转化为机会,保护公民的人身安全和财产,维护社会和国家安全。

这些概念表述各有侧重,不尽相同,但可以归纳为广义和狭义两类。狭义的应急管理仅涵盖应急处置这一个环节,即为了应对突发公共事件而实施的一系列的计划、组织、指挥、协调、控制的过程。其主要任务是及时有效地处置各种突发事件,最大限度地减少突发事件的不良影响。广义的应急管理涵盖突发公共事件的预案管理、风险管理、预警管理、应急处置、恢复重建、应急管理的评价、反馈与改善等一系列环节,是一种对突发公共事件的全过程管理。它是在突发公共事件的爆发前、发生时、消亡后的整个周期内,依照既定的应急预案,通过事前的风险减缓、监测评估、预警、准备;事中科学、及时的决策、指挥、调度和协调,向公众提供紧急救助信息和服务;事后的理赔、恢复重建、评价、反馈与改善等工作,以实现用科学的方法对其加以干预和控制,使其造成的损失降到最小。

1.2 应急管理国内外研究现状

突发事件应急管理是近年来管理领域中出现的一门新兴学科,是一个综合了运筹学、战略管理、信息技术以及各种专门知识的交叉学科,是针对突发事件的决策优化的研究,国内外研究现状如下。

1.2.1 国外突发事件应急管理研究现状

不少发达国家均设立有专门性应急管理机构,统一应对和处置紧急事态。如:美国成立联邦紧急事态管理局;英国新成立的内阁办公室的国内紧急状态秘书处;俄罗斯有联邦安全会议和紧急事务部,等等。

在应急管理的理论模式研究方面,罗伯特·希斯(Robert Heath)构建了危机管理的壳层结构模型。弗朗西斯·J. 玛瑞(Raneis J. Marra)建立了危机公关模型。夏保成等提出了综合应急管理模式。这些模型是对应急管理与其中某个要素之间的关系进行静态的单一分析,缺乏对危机管理全面整体的模式分析。

Rosenthal Uriel、Charles Michael T等构建了灾害风险综合评估的框架体系,包括灾害所对应的风险系统评估后的综合评估,每个系统的评估是在考虑防灾减灾措施下采用信息扩散技术进行的信息处理和评估。

Simosi、Maria、Peter T Allen、Vaughan 就区域环境风险管理问题开展了实证研究。



Thomas D. S. K. 和 S. L. Cutter 等探讨了地理空间信息技术在快速应对“9·11”恐怖袭击这类突发事件中的应用,并作了实证分析。

Harrison C.、M. Haklay 指出环境风险管理的目的是在行动方案效益与其实际或潜在的风险及降低风险的代价间谋求平衡,包括制订风险管理计划和防范措施。

La Porte R 等认为,反生物恐怖包括对生物恐怖的预防、早期发现、及时控制和预后处理,它所需要的主要也是公共卫生和流行病学预防和控制突发性大规模传染病流行的策略和方法。

Lenneal J. Henderson 发展了结合灾害、混沌和应急管理理论的概念特征矩阵,以及组合了 8 个社会部门和 4 个应急阶段的发展中国家应急管理矩阵模式。

David Rooke 介绍环境局是英格兰和威尔士负责减轻洪水风险的主要机构。该局于 2003 年 10 月印发了洪水风险管理策略计划,提出了由防御洪水向洪水管理转变的工作构架。强调必须优先考虑采用 6 项工作措施,即更加富有成效的战略性举措、防范不合理的开发活动、对 160 亿英镑的防洪工程进行终身管理、更好地进行防洪综合管理(从公众水患意识、洪水预警到灾后重建与恢复)、提高沟通效果、改进商业运作的效率和成效等。

1.2.2 国内突发事件应急管理研究现状

就我国情况来看,经过多年坚持不懈的努力,我国针对特定危机的管理部门已经基本建立起来,直接涉及应急管理的主要机构有几十个部门。而针对不同种类的自然灾害,分别有不同的部门负责。在联合国国际减灾十年(1990—2000 年)的号召下,我国于 1989 年成立了“中国国际减灾十年委员会”,标志着我国减灾工作由单一灾种被动的预报救援重建到多灾种主动的综合应急管理的过渡。2000 年“国际减灾十年”结束,“中国国际减灾十年委员会”更名为“中国国际减灾委员会”。2005 年 4 月 2 日,“中国国际减灾委员会”又更名为“国家减灾委员会”,时任国务院副总理回良玉任委员会主任,相关各部部长任副主任。可见,我国对灾害管理的重视程度在不断加大,灾害管理机构的级别在不断提高。

申海玲、程声通提出了环境风险评价的程序,指出故障树分析法是一种行之有效的分析评价技术。

何建邦、田国良主持参与的“八五”国家科技攻关相关研究项目应用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术建立了重大自然灾害监测与评估信息系统,对 1991 年以来发生的洪水、干旱、林火等进行监测与评估。

郭文成、钟敏华和梁粤瑜提出环境风险评价包括源项分析、环境途径、风险评价和风险管理 4 部分。

张成福提出了公共危机管理的全面整合的模式。朱坦、刘茂和赵国敏等认为,城市公共安全规划研究的理论基础是风险理论,并提出建设和建立城市公共安全系统以应对可能的突发事件。

刘铁民等认为,应依据生产安全事故的预期后果、影响范围、事态控制和事件的性



质,实行预备(Ⅰ级)、专业启动(Ⅱ级)和国家启动(Ⅲ级)三级响应机制。

王学军指出政府危机管理体系应该涵盖危机的预警准备、危机的应急反应和危机后的恢复重建3个系统。

史培军、王静爱和周俊华提出了平衡大都市区水灾致灾强度与脆弱性的基本土地利用模式和“政府—企业(社区)—保险公司”相结合的风险管理模式。

刘铁民论述了应用定量风险评价(QRA)对评价、控制低概率重大事故风险的重要意义,提出了在应用QRA评价重大风险时应注意的主要技术问题。

魏臻武等在青海牧区开展了牧区灾害风险管理项目活动,介绍了青南牧区灾害风险管理策略的制定和实施内容。

史培军提出了建立中国综合风险管理体系,构架综合风险管理的“结构—系统”动力学模式,要从横向综合、纵向综合和时空综合3个角度去进行研究。

黄崇福提出了综合风险管理的梯形架构,它从下往上分别由风险意识块、量化分析块和优化决策块构成。在此基础上,周健等分析了我国风险管理机构体系的现状和存在的问题,提出了我国综合风险管理政府机构体系建设和综合风险管理科研机构建设的相关建议。

薛晔等提出了由阶段、灾害风险种类和级别组成的城市灾害综合风险管理的三维模式——阶段矩阵模式。

于春全论述了2008年北京奥运会交通运输系统的开发与建设,指出要完善突发事件应急交通保障预案和紧急车辆调度手段,保证一旦发生意外及时报警,及时启动应急预案,确保应急交通畅通。

吕建波等指出城市公安消防管理部门目前应该解决的是城市消防灭火突发事件应急预案信息系统。

张维平提出突发公共事件社会预警机制的建构要求具有科学的防范性、整体的系统性和操作的实用性。

张继权等指出综合自然灾害风险管理是目前国际上防灾减灾和灾害管理较先进的措施和模式,并据此提出了对我国实施综合自然灾害风险管理的建议。

杨洁、毕军等以环境风险系统的组成及环境风险事件的发生过程为研究基础,讨论了环境风险区划的步骤、指标体系和方法,并进行了相关实证研究。

沈荣华就如何创新城市应急管理模式提出了思路。赵成根在分析了国外大城市危机管理模式的基础上,总结出国外大城市危机管理的主要特点有:①全政府型综合危机管理系统;②全社会型危机管理网络系统;③完善的危机应急系统;④危机反应机制。

1.3 国外大型长距离调水工程应急管理

美国联邦能源管制委员会大坝安全及检查处工程师林祥钦介绍,为避免水坝保安措施的不足及人为的疏失,美国政府开始推动“水坝安全之破坏风险评估”。

C. Y. Cheng等基于模糊综合评价方法建立评价模型,对突发水污染时的应急措施



是否可行进行评价,评价指标是完整性、可操作性、有效性、灵活性、快捷性、合理性6个,并未涉及应急措施实施效果的评价。

Motahareh Saadatpour 等基于模拟仿真结果提出了水库发生不同程度污染后应采取的应急措施。

James P. Dobbins 开发了内河航运事故性污染风险管理的决策支持系统。美国针对突发事件研发联邦应急信息管理系统,将电子邮件系统、计划管理系统、报告系统、GIS 系统以及有毒物质危害模型等相关系统模型进行集成。

1.4 我国跨流域调水工程应急管理及其存在问题

聂艳华在南水北调中线干线工程针对严重突发水污染制定多种应急调控方案并进行模拟时,综合分析比较最大壅高水位、总退水量、渠段水位稳定时间、稳定水位与目标水位差值等参数,得出相对较好的应急控制方案,但并未建立定量评价模型,只是简单的比较。

魏泽彪在南水北调东线小运河针对某一突发水污染工况进行几种应急调控方案模拟,仅以是否能控制污染物浓度来比较分析各方案的调控效果,并未建立定量评价模型,且没有评价水力过程。

闫雅飞针对调水工程管理中未充分考虑水质水量的复杂性、不确定性和动态性等问题,从复杂适应系统视角出发分析调水工程系统特性及应急管理途径,建立了调水工程复杂适应系统概念模型。从调水工程事故孕育期、形成初期、发展阶段和全生命过程4种途径实现对调水工程水质水量安全事故的控制,提出了相应的应急管理对策。

长江水利委员会长江科学院2012年编制的《应急调度措施预案研究(咨询稿)》,以及南水北调中线局在此基础上编制的针对各种突发事件的应急调度预案,为南水北调中线工程应急管理提供指导。

陈翔研究了南水北调中线工程应急响应决策支持系统,可在系统平台上对中线工程可能发生的应急事件进行快速的响应和处置。

我国跨流域调水工程应急管理仍存在以下问题。

(1) 应急管理的基础理论尚不成熟,技术方法也远称不上完善,模型应用缺乏相关实证证据。

(2) 有关调水工程突发水污染事故应急调控预案的研究较少,尚未有针对某一具体突发水污染事故形成相应的应急预案的编制方法。

(3) 目前已开发的应急响应决策支持系统功能单一,尚未形成支持突发水污染应急全流程管理的系统平台。

第 2 章

突发水污染应急调控技术体系

2.1 突发水污染事件概述

突发性水污染事件是指突然发生的，由人为或自然因素引起的，污染物介入河流湖泊等地表及地下水体中，导致水质恶化，影响水资源有效利用，造成经济、社会正常活动受到严重影响，水生态环境受到严重危害的事故。突发性水污染事件具有发生前兆不充分、诱因不明确、难以预料、难以控制、危害紧急、损失严重、处理复杂等特征，短时间内很可能造成水源的污染、停水、工业停产等问题，易对社会的生产生活造成巨大的影响与危害。突发性水污染事件的污染源很多，主要分为以下几类：①工业废水，即企业受治污能力的限制造成的污染事故性排放；②综合污水，即企业生产废水、生活污水以及农业废水违规排放，特大暴雨、泥石流等极端自然状况造成的化学污染物扩散，污染水体；③油类污染，原油在开采、加工、运输过程中意外性事故造成的泄漏；④化学物品，包括生物医药、化工、印刷等产业造成的污染；⑤重金属污染，指采矿、工业生产中排放的污染物中含有铅、汞、镉、钴等重金属造成的污染。

长距离跨流域大型调水工程往往有着工程线路长、涉及区域广、调水规模大、水质要求高、调水目的主要为解决沿线众多大中城市的缺水问题等特点。据不完全统计，全球已建、在建或拟建的大型跨流域调水工程有 160 多项，这些输水工程都成为当地工业、农业、城市和人民生活的命脉。由于调水工程输水线路长，沿线容易发生突发水污染事故。突发水污染具有不确定性与随机性、突发性与阶段性、重大危害性。突发水污染事件对城市供水造成严重威胁，不仅造成重大的经济损失，而且对沿线居民的正常生产生活用水安全造成巨大影响，导致严重的社会公共危机，还对地表水生态系统造成严重破坏。根据《中国环境状况公报》（2005—2014）数据，突发水污染事故一直是我国环境污染事故的主要内容，近年来的重大案例有 2005 年松花江苯污染、2011 年 6 月新安江水污染、2013 年浊漳河苯胺污染等。

以南水北调中线工程为例，调查分析表明，该工程主要有 5 类水污染风险，包括交通事故风险、恶意投毒风险、地表水污染风险、地下水渗透污染风险、大气沉降污染风险：①其总干渠沿线路渠交叉众多，沿线涉及危险化学品的企业共两千多家，危险化学品运输过程中，一旦发生交通事故，可能导致危险化学品进入干渠，交通事故是造成的水污染事件最大的潜在风险源；②其工程线路较长，沿途经过 19 个大中城市，100 多



个县（县级市），恶意投毒行为也是水污染事件潜在风险源之一；③其总干渠沿线穿过数百条大小河流，暴雨形成的洪水可能导致地表污水直接进入总干渠，致使干渠内产生水污染；④总干渠有内排段长达约 403km，内排段地下水能够通过逆止阀门进入总干渠，存在水中污染物通过地下水渗透进入总干渠的环境风险；⑤总干渠沿线存在一定数量的大气污染企业，大气中有毒有害物质有可能通过降水或自然沉降的方式进入总干渠，对总干渠水质存在一定的污染风险。

目前对突发水污染事件的响应，主要包括应急处置和应急调控。应急处置即使用水污染应急处置材料，用吸附法、氧化分解等方法来对水体污染物进行吸附、凝结、收集、净化等处理；应急调控，则是指通过进行工程应急调度，达到减少或阻断上游清水下行、延缓受污染水体扩散、稀释污染以改善水质、截污或引污以便进行处理等目的。

2.2 技术研究进展

2.2.1 河渠水动力模型

Saint Venant 于 19 世纪通过研究建立了圣维南方程，奠定了非恒定流的理论基础。后期水动力数学模型的发展过程大致分为 3 个阶段。

首先是 20 世纪 50—60 年代，水动力数学模型刚刚开始发展，多为关于水流运动规律的基础性研究工作，以一维数学模型的研究为主，简单的二维模型开始出现。1965 年，Ziekiewicz 和 Cheung 将有限元法用于势流问题的解决中。其次是在 20 世纪 70 年代二维模型得到进一步研究和推广，开始了对三维问题的研究。这十年间，莱恩德兹提出了半隐格式，巴特勒发展了一种全隐格式，瓦西里耶夫、普列斯曼、艾布特等也提出了各自的数值方法，丰富了水动力学模拟方面的研究。二维的应用性研究在这个时期也得到相应发展，可以用来解决实际问题。从水动力学的纯理论研究发展到对于泥沙运移、盐水入侵和污染物扩散问题的探讨，扩展了数值模拟的研究方向。然后从 20 世纪 80 年代至今，二维数学模型的研究和应用日趋完善，三维数学模型的研究迅速发展。

2.2.2 河渠水质模型

水质模型是指用于描述水体的水质要素在各种因素作用下随时间和空间的变化关系的数学模型，是水环境污染治理规划决策分析的重要工具。当发生突发性水污染事故后，污染物进入水体后，在迁移扩散过程中受到水流、水温、物理、化学、生物、气候等因素的影响，产生物理、化学、生物等方面的变化，从而引起污染物的稀释和降解。需要使用水质模型来描述水体的水质要素在各种因素作用下随时间和空间的变化关系，从而预测污染物时空变化过程和危害程度。从 1925 年出现的 Streeter Phelps 模型算起，到现在的 90 余年中，水质模型的研究内容与方法不断深化与完善，已出现了包括地表水地下水、非点源、饮用水、空气、多介质、生态等多种水质模型。

河渠中污染物的迁移转化是一种物理的、化学的和生物学的联合过程，相对湖泊水



情形而言, 维向要低。其中物理过程包括: 污染物在水体中随水流的推移, 与水体的混合, 与悬浮颗粒如泥沙颗粒的吸附和解吸, 随着颗粒的沉淀和再悬浮, 随着底泥的输送及其传热、蒸发作用等。其中, 重金属在水体中是以分子、离子、胶体和颗粒态存在, 它随水—悬浮物—底泥而迁移到下游。

河流中水流特性与污染物迁移转化的研究随着人们对环境问题重视程度的增加发展迅速, 从一维到三维、从简单到复杂。

Streeter Phelps 于 1925 年首次建立水质模型, 此后对水质模型的发展大致分为 4 个阶段。首先是 1925—1965 年间开发了较为简单的 BOD-DO 的双线性系统模型, 将河流、河口问题视为一维问题解决。其次是 1965—1970 年间, 计算机开始用于水质模型研究中, 同时科学家也加深了对生化耗氧过程的认识, 使得水质模型向 6 个线性系统发展, 计算方法从一维到二维。接着在 1970—1975 年间, 相互作用的非线性模型系统得到发展, 研究涉及营养物质磷、氮循环系统, 浮游动植物系统等。最后在 1975 年以后, 研究涉及已经有毒物质的相互作用, 空间尺度发展到三维。

一维水质模型包括 S-P 模型, 其修正型 Thomas 模型、Dobbins-Camp 模型、O'Connor 模型, 串联反应器模型, BOD 多河段矩阵模型, BOD-DO 耦合矩阵模型等等。

实际上污染物在水中的迁移转化是一种物理的、化学的和生物学的综合复杂过程, 目前为止已发展出很多综合水质模型: QUAL-I 模型和 QUAL-II 模型, 建立于 20 世纪 70 年代, 是最早的综合水质模型之一。后经多次修改和增强, 相继推出了 QUAL2E 模型、QUAL2EUNCAS 模型及 QUAL2K 模型。QUAL2E 模型适合于混合的枝状河流系统; QUAL2K 模型则把系统分为不相等的河段。WASP 模型, 由 USEPA 开发, 可以模拟一维不稳定流等, 用途广泛。自 20 世纪 80 年代该模型被提出以来, 在国内外已经得到广泛应用。在国内, 逢勇等曾进行了太湖藻类的动态模拟研究; 廖振良等对 WASP 模型进行了二次开发, 建立了苏州河水质模型; 杨家宽等运用 WASP6 模型预测南水北调后襄樊段的水质。CEQUALRIV1 一维水流与水质模拟模型, 由美国陆军工程师水道试验站开发。该模型能够分析非恒定性严重的河川条件, 如电站峰荷变化的尾水, 还能够模拟分支河流系统。MIKE SHE 模型是由 DHI 开发的一个模型系统, 作为多个模型的系统, 它包括降雨-径流变化过程、一个集成的地下水流量模型和与 MIKEII 以及其他 MIKE 模型的联系。此模型系统提供了极好的界面和一个综合的水质变化过程系列。SMS 模型为地表水系统模型, 由美国 Brigham Young 大学图形工程计算机图形实验室开发。与其他模型不同在于它不模拟降雨-径流过程, 它在二维方向模拟河流、河口、海岸。在该系统中的主要包括水动力和泥沙模型 (RMA2、RMA4、SED2D、HIVEL、FEWWMS、WSPRO 等), 仅含有限的水质变化过程。其他还有如 MMS、HEC5Q、GENSCN、OTIS、QUASAR、BLTM、AQUATOX2、FESWMS、SNTMP、SIMUCIV 等国内外较长使用的水质模型。水质模型今后的发展将以 GIS 为平台, 模拟结果趋于动态化、可视化, 污染机理、模型的不确定性研究加强, 参数估值准确度提高。

Demuren 和 Rodi, Jian Ye 和 McCorquodale 应用有限体积法建立了二维水质模型,



模拟了污染物在连续弯道中的扩散规律;Sladkvich 采用有限差分法对 Haifa 湾的污染物排放进行了数值模拟计算,成功建立了污染物扩散输移模型;美国密西西比大学 Zhu Tingting 建立了基于水深平均的二维水动力及水质模型,对浅水牛辄湖进行了模拟。

在我国,水动力学水质模型的研究起步较晚,但在学习、吸收国际先进经验的基础上发展较快,近年来国内学者叶守权等将确定性 BOD-DO 模型中的参数取为概率分布参数、灰色参数和模糊化后,建立了河流水质不确定性数学模型。雒文生等以确定性水质模型为基础,与随机过程模拟方法结合,建立了确定与随机耦合的水质不确定性预测方法,他们还将湍流、温度、生态相互耦合,建立了垂向二维水动力学生态综合模型,并在实际应用中获得比较满意的效果。庄魏对长江预警预报系统进行了研发,根据长江水体二维水流水质模拟的不同需求,针对连续排放点源模型、瞬时排放点源模型、非稳态数值解模型这三种水动力学水质模型,提出了在 GIS 平台下的集成方法,将水质模拟与地理信息系统集成。

2.2.3 明渠运行控制

渠道自动控制起源于 20 世纪 30 年代,起初由法国人研制了许多用于自动控制的水力设备,并提出了水力自动化的控制方法,将其用于实际灌渠运行当中。到 20 世纪 50 年代,美国国家内务部垦务局(U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation)开始有关渠系自动控制项目的研究,形成了一套比较完整的渠系运行控制理论,并开发了一系列实用的渠道自动化控制的算法,对提高渠系的输水效率起到了积极的作用。Liu F 采用显式有限差分的格式实现了罐渠闸前常水位控制,对多个渠池进行数值仿真模拟,结果比较理想。Ruiz Carmona 和 Malaterre 等对已有的研究成果进行分析总结,提出了将非线性的输水系统简化成为线性系统,但还没有在实际中得到应用。

国内渠道输水运行控制的研究开始的较晚,始于 20 世纪 50 年代,虽然发展迅速,但实际应用甚少。20 世纪 80 年代之后,由于国内调水工程的实施和大中型灌区自动运行控制的要求,有些科研单位陆续开展了渠道自动化试行的研究。王念慎等人用现代控制理论构建了常水位和等体积实时控制模型,并进行了模型验证,得出了等水位控制比等体积控制简单,计算速度、精度高等优点。20 世纪 90 年代,王长德运用水力动闸门的控制原理,解决了水利自动闸门运行不稳定问题。之后,王长德又针对闸门过流的过程,在假设闸门能任意速度进行调节,提出了 P+PR 与比威尔控制算法相结合的控制方式,并作了比较。近年来,国内学者尝试用现代控制理论、智能控制理论及模糊控制理论研究渠道运行系统。韩延成凭借对年调度的实践经验和优化控制理论,运用两阶段的输水控制方法对渠道进行数值模拟,结果证明该方法具有响应时间短、闸门调节次数少等优点。目前,许多学者对下游常水位运行方式开展大量的研究。姚雄等提出了流量主动补偿的前馈控制方法并与水位反馈控制相结合来改善闸渠道的响应特性,该模型没有考虑闸门开度变化对上下游渠道的影响,又由于在流量主动补偿阶段,需要各渠段上游流量变化都要超过下游流量变化,致使各渠段上游流量和闸门开度都



有较大的超调,有待进一步的改进。丁志良、王长德等把基于蓄量补偿的前馈控制运用到闸前常水位运行的方式中,并采用PI反馈控制对中线部分渠段进行了仿真模拟,在一定程度上改善了渠道的响应和回复特性。黄会勇、刘子慧等根据渠道初始和稳定时候渠道的流量、水位、渠道的蓄量、渠道水位降幅限制和水位波动限制条件等,制定了基于蓄量补偿的前馈控制策略,该方法涵盖了南水北调中线工程调度运行中可能出现的各种运行工况。

目前,国内对外明渠的水动力学计算有了一些研究基础,但大部分研究集中在改进渠道的控制运行算法上。然而还有许多算法仍旧停留在理论研究阶段,未能运用到实际工程中,对于大规模复杂明渠系统的模拟分析和应用还不成熟,自动控制方式的研究也主要是应用在灌溉工程方面,还不能完全解决大规模调水渠道的整体集中自动控制的问题。另外,与国内外已建成的调水工程相比,南水北调中线工程规模巨大,线路更长,并且可利用的水头有限,沿线中可用于反调节的调蓄工程几乎没有,这些都是当前国内外没有遇到过的问题,其输水的困难程度远远超过目前世界上已建成调水工程。所以,必须从南水北调中线工程总干渠输水安全和稳定性出发,对其展开相应的运行控制的研究。

2.2.4 水质水量快速预测

在水质预测预报模型的研究方面,欧美国家已经达到了很高水平,在国际上处于领先地位。在早期大量的基础研究数据的基础上,国外建立了一系列的水质预测预报模型,目前比较成熟的模型有以下几种。

(1) QUAL系列模型,美国环保局(USEPA)于1970年推出QUAL-I水质综合模型,1973年开发出QUAL-II模型,该模型能被用于研究污染物的瞬时排放对水质的影响,如有关污染源的事故性排放对水质的影响。

(2) BLTM(Branched Lagrangian Transport Model)即分支拉格朗日输移模型,由美国地质调查局(USGS)开发。它没有模拟水动力情况,水动力条件要由其他模型提供。这个模型包括QUAL-II包含所有的水质变化过程,而且是时变的。

(3) OTIS(One-dimensional Transport with Instream Storage)即带有内部调蓄节点的一维输移模型,USGS开发的可用于对河流中溶解物质的输移进行模拟的一维水质模型。模型中的控制方程是对流扩散方程,并综合考虑了暂存、纵向入流、一阶衰减和吸附现象。

(4) WASP模型(Water Quality Analysis Simulation Program,水质分析模拟程序)是美国环保局提出的水质模型系统,可用于对河流、湖泊、河口、水库、海岸等不同环境污染决策系统中分析和预测由于自然和人为污染造成的各种水质状况,可以模拟水文动力学、河流一维不稳定流、湖库和河口三维不稳定流、常规污染物和有毒污染物在水中的迁移转化规律。

(5) QUASAR模型是由英国Whitehead建立的贝德福郡乌斯河水质模型发展而来的,该模型用含参数的一维质量守恒微分方程来描述枝状河流动态传质过程,可模拟的