

# 港口水资源循环 综合利用技术

李国一 魏燕杰 著



 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

# 港口水资源循环综合利用技术

李国一 魏燕杰 著

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

港口水资源循环综合利用技术 / 李国一, 魏燕杰著  
— 天津: 天津大学出版社, 2016. 12  
ISBN 978-7-5618-5710-6

I. ①港… II. ①李… ②魏… III. ①港口 - 水资源  
利用 - 综合利用 - 研究 IV. ①TV213.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 263895 号

出版发行 天津大学出版社  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647  
网 址 publish.tju.edu.cn  
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 11.75  
字 数 300 千  
版 次 2016 年 12 月第 1 版  
印 次 2016 年 12 月第 1 次  
定 价 38.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 前 言

水资源作为一种重要的自然资源,在近十年来受气候变异、土地覆盖变化、工业化污染、水利工程等自然运动和人类活动的共同影响,发生了复杂且不可逆的变化。其中,引起的水资源短缺、水质污染严重等制约了区域经济和社会的可持续发展。

近年来,中国交通行业发展迅速,交通经济已经成为推动地区经济的重要支柱。而在交通飞速发展的同时,随之产生的水资源保护问题同样引起各级政府和社会各界的密切关注。

随着《全国水资源综合规划》《交通运输节能环保“十三五”发展规划》《资源节约型环境友好型公路水路交通发展政策》《水污染防治行动计划》《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020年)》等政策文件的出台,改善生态环境、实现交通行业节能减排、减少水土流失、促进水资源综合利用、严格控制水资源污染成为有利于可持续发展的国家性战略举措。

水资源综合利用等研究目前主要以城市管网、城市建筑雨水收集、城市中水为对象。对于交通行业重要枢纽——港口的给水管网、雨水收集等相对特殊且独立的系统研究甚少。如何将城市系统的研究成果转移到港口相应的系统,或是重新建立针对港口特性的管网漏损预警及水质保障和雨水智能收集、处理与回用等研究体系,仍有待进一步研究探讨。

在水资源污染控制方面,国内外的研究相对成熟。特别是交通运输部天津水运工程科学研究所(以下简称“天科所”)在水运交通领域,围绕港区高含盐生活污水循环回用处理、港区含油污水循环回用处理、集装箱洗箱废水污染的动态分析与防治等方面作了大量研究工作,并取得了一些显著成果。其中,在港口含油污水的处理方面,天科所依托天津港南疆污水处理中心含油污水处理系统,成功地开发出了一套“强化混凝+水解酸化+MBR”物化与生化相结合的,适合于港口含油污水处理的综合工艺。该工艺较传统工艺节约占地30%以上,降低运行成本20%以上,出水水质优于国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准,可作回用水。回用水每年可为天津港煤码头公司、焦炭码头公司喷淋系统节约自来水30万吨,彻底解决了困扰国内港口的含油污水治理的难题。其所开发的关键技术获得2009年度中国水运行业协会科学技术奖三等奖。另外,针对部分港区生产污水高含盐量、高毒性、高污染的特点,天科所开发出了一套“平流沉淀+生物强化A/O+生物强化MBR”联合处理工艺。其中,生物强化即筛选、富集、培养驯化出具有特异性的耐盐微生物,并投加到生物反应器中用以强化反应器的抗冲击能力,保证其能够正常运行。通过工程实践证明,天科所通过筛选、富集、培养驯化出的耐盐微生物菌群,在进水含盐量小于8 000 mg/L时,可以保证系统稳定运行。本专著即对近年来笔者所在港口水资源循环利用方面取得的成果总结。

本书共分7章。第1章主要论述了水运交通水资源现状及面临的问题。第2章从宏观

角度对解决水资源问题的技术现状、水平和发展趋势进行了分析和评价。第3章重点对区域水资源利用现状、水平进行了调研、总结和分析。第4章在港区水文模型建立与雨水利用潜力分析的基础上,构建了港区雨水集蓄利用的水量水质调控体系及港区雨水利用的基本模式,以期对港区水资源优化调度、港区水务部门日常管理提供基础依据和技术规范建议。第5章对港口水污染防治控制及已有污水处理系统升级改造的创新研发成果进行了总结。第6章对港区污水处理系统二级出水和港区雨水一级出水回用于河湖补水、城市绿化、喷洒道路、工业冷却、生活杂用水及港区特有的煤码头喷淋、洗舱等的可行性及关键技术进行了研究。第7章以有效缓解供水管网无规律“跑、冒、漏”被动管理局面为目标,总结了港区自来水管网配给优化调度及供水管网漏损预警的研究成果。

本书基础材料主要来自于作者承担的交通运输部科技计划项目“内河港口水资源循环利用技术与示范”。在项目研究过程中,得到了交通运输部交通科技管理中心、湖南省交通规划勘察设计院、湖南长沙新港有限责任公司和天津港设施管理服务公司的资助和支持。本书著者为李国一和魏燕杰。另外,参加项目研究工作的还有王建功、周作茂、张传国、刘磊磊、杜伟、陈艳萍、韩冰、樊国华、张荣祥、宋薇、李长东、孙磊、吴培森等。本书也引用了前人的大量研究成果及工程经验总结。在此,对上述单位和个人表示诚挚的感谢。

由于作者理论水平和实践经验有限,书中不足之处和差错在所难免,敬请读者批评指正。

著者

2016年9月

# 目 录

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 第 1 章 绪论 .....                       | (1)   |
| 第 2 章 国内外研究现状与分析 .....               | (2)   |
| 第 3 章 区域水资源利用调研分析 .....              | (5)   |
| 第 4 章 港区雨水的智能收集、处理与回用 .....          | (7)   |
| 4.1 内河港口 SWMM 水文模型建立——以长沙霞凝港为例 ..... | (7)   |
| 4.1.1 SWMM 模型概述 .....                | (7)   |
| 4.1.2 SWMM 模型建立 .....                | (13)  |
| 4.1.3 设计暴雨及降雨数据分析 .....              | (25)  |
| 4.1.4 港区雨水管网模拟 .....                 | (27)  |
| 4.2 内河港口雨水利用潜力分析——以长沙霞凝港为例 .....     | (30)  |
| 4.2.1 长沙霞凝港降雨分布规律 .....              | (30)  |
| 4.2.2 长沙霞凝港降雨收集潜力分析 .....            | (32)  |
| 4.3 港区雨水综合利用基本模式——以长沙霞凝港为例 .....     | (35)  |
| 4.3.1 雨水收集、处理及利用系统 .....             | (36)  |
| 4.3.2 基于 SWMM 的雨水集蓄利用调控体系 .....      | (42)  |
| 4.3.3 长沙霞凝港雨水资源化利用模式 .....           | (45)  |
| 第 5 章 港区已有污水处理系统的升级与改造 .....         | (50)  |
| 5.1 原有污水处理工艺存在的问题分析 .....            | (50)  |
| 5.1.1 原有污水处理概况 .....                 | (50)  |
| 5.1.2 废水水质特征分析 .....                 | (51)  |
| 5.2 内河港区污水处理改造小试试验 .....             | (53)  |
| 5.2.1 混凝工艺处理港区模拟废水的试验研究 .....        | (53)  |
| 5.2.2 Fenton 氧化处理港区模拟废水的试验研究 .....   | (61)  |
| 5.2.3 陶瓷膜处理港口含油废水的试验研究 .....         | (64)  |
| 5.2.4 膜生物反应器(MBR)处理港区模拟废水的试验研究 ..... | (74)  |
| 5.2.5 港口含油废水处理系统 MBR 反应池的优化设计 .....  | (79)  |
| 5.2.6 联用工艺中试规模处理港区模拟废水的试验研究 .....    | (81)  |
| 5.2.7 港口含油污水物化处理单元自动排油控制策略的研究 .....  | (85)  |
| 5.2.8 联用工艺工程示范 .....                 | (95)  |
| 第 6 章 港区中水回用技术 .....                 | (114) |
| 6.1 港区雨水处理回用研究 .....                 | (114) |
| 6.1.1 混凝沉淀工艺 .....                   | (114) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 6.1.2 臭氧-活性炭联用工艺 .....       | (116) |
| 6.1.3 纤维过滤 .....             | (120) |
| 6.2 港区污水处理系统二级出水深度处理研究 ..... | (129) |
| 6.3 港区中水回用的可行性研究 .....       | (131) |
| 6.4 工程示范 .....               | (132) |
| 6.4.1 处理工艺 .....             | (133) |
| 6.4.2 工程设计 .....             | (133) |
| 6.5 经济效益分析 .....             | (138) |
| 第7章 港区自来水管网综合管理方案的建立 .....   | (139) |
| 7.1 港区自来水管网调度监控系统的建立 .....   | (139) |
| 7.1.1 采用的工具和方法 .....         | (139) |
| 7.1.2 自来水管网监控系统的建立 .....     | (144) |
| 7.1.3 自来水管网监控系统的实施与应用 .....  | (149) |
| 7.1.4 存在的问题及分析 .....         | (160) |
| 7.2 港区供水管网漏损监测/预测模型的建立 ..... | (161) |
| 7.2.1 采用的工具和方法 .....         | (162) |
| 7.2.2 多元线性回归预测模型 .....       | (166) |
| 7.2.3 供水管网漏损预测模型 .....       | (166) |
| 7.2.4 总结 .....               | (179) |
| 参考文献 .....                   | (181) |

# 第 1 章 绪论

水资源问题是当今世界各国共同面临的一大难题。我国水资源相对更为短缺,人均水资源量只有世界平均水平的四分之一,被联合国列为世界上 13 个贫水国家之一。

长江是我国第一大河,水资源量占全国的 35%。因此,长江流域水资源在我国国民经济中的地位非常重要。保护好长江水资源和长江流域(包括流经的各个内河港口)生态环境,不仅对长江流域的经济与社会发展有着重要意义,而且对全国的经济与社会发展也具有重要的支撑作用。

湘江是长江水系七大支流之一,发源于广西壮族自治区灵川县海洋山,属丘陵地区河流,上游通过灵渠与广西的漓江、桂江、西江相连。湘江干流全长 844 km,沿途接纳大小支流 1 300 多条,于湘阴县芦林潭入洞庭湖,汇合沅水、资水、澧水等河流,经城陵矶注入长江。湘江流域面积 94 660 km<sup>2</sup>,辐射湘西,是“洞庭四水”中流域面积最大、产水最多的河流。随着社会经济的发展与人口的增加,水量丰沛的长江、湘江流域人均水资源量呈减少之势。加上流域内水资源时空分布不均以及我国西部开发力度的加强、港口建设及水路交通运输业的快速发展、湖南省经济及湘江水运资源的开发,造成水环境污染不断加剧,长江、湘江流域部分地区出现水资源紧缺。长江水利委员会的调查表明,长江、湘江流域有 59 座港口城市存在水源型缺水、工程型缺水和水质型缺水,其中 26 座港口城市缺水较为严重。该情况严重制约了所在地区水运工程的建设及社会经济的可持续发展。

为了更好地解决这一问题,交通运输部天津水运工程科学研究所提出了“内河港口水资源循环综合利用技术与示范”项目,并获得了交通运输部科技计划资金的支持。项目以港口水环境安全与水资源可持续利用为目标,开展港口水质保障及水污染防治控制和水资源循环利用关键技术的创新研发。项目对港区雨水集蓄利用调控体系的构建、适合于港口含油污水和生活污水处理的污水综合处理工艺及中水回用和港区自来水管网综合管理方案的建立等关键技术进行系统性研究,并将污水综合处理及中水回用关键技术进行工程示范;最终形成特有的内河港口水资源综合利用的思路与方法,从而为“资源节约型、环境友好型”港口的建设及湘江流域的可持续发展创造良好的生态环境,并为贯彻国家“节能减排”和“全国水资源综合规划”要求提供有力的技术支持。

## 第2章 国内外研究现状与分析

水资源作为一种重要的自然资源,在近十年来受气候变异、土地覆盖变化、工业化污染、水利工程等自然运动和人类活动的共同影响,发生了复杂且不可逆的变化。其中,引起的水资源短缺和水质污染严重等变化制约了区域经济和社会的可持续发展,引起了国内外科学研究者的高度关注,并在饮用水输水保障、水资源综合利用、水资源污染控制等方面作了大量研究工作,取得了一些显著成效。具体表现在以下方面。

(1) 饮用水输水安全及水质保障方面。华中科技大学的薄宁将分布采集的自来水管网数据,利用通用分组无线业务(General Packet Radio Service, GPRS)进行即时传输,达到对自来水管网进行实时监控的目的。河北工业大学的耿光楠采用了计算机(Computer)技术、通信(Communication)技术、控制(Control)技术和传感(Sensor)技术(简称3C+S技术)对系统运行中的数据和信息进行综合分析,制定实时、高效的调度决策方案。在管网运行状态集中、全面、实时监控的基础上,充分运用现代信息技术手段,通过数据采集与监测控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA),对数据和实时状态进行采集、处理以及突发事件的预测,对供水进行优化调度,实现了管网的智能化控制,保证了管网中饮用水的合理利用。湖南大学的黄茂林以中部某市城西给水管网和一个小区为研究对象,采用供水管网的分区计量区域(District Metering Area, DMA)技术和以降低管网漏损率为目标的阀门安装位置的优化布置,并借助EPANET2.0软件、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)等工具,初步达到了降低城市供水管网漏损率的目的。天津大学的李霞以城市供水管网的漏损定位及控制为核心研究内容建立了基于遗传算法的反向传播(Back Propagation, BP)神经网络状态估计模型,从而根据已有的监测信息推求其他未知的信息,以扩充信息量,使故障定位模型得以广泛应用。

(2) 在水资源综合利用方面,目前的研究主要集中在雨水的收集、处理与回用以及工业用水的回用等。中水及雨水收集再利用技术是解决我国未来水资源短缺的有效方案和战略需要。在日本各大城市已基本普及节水型住宅,即利用净化装置收集浴室等中水用于冲厕所或浇灌绿地,同时积蓄和利用雨水,节水率最高为50%,平均达到36%,而英国WD公司(Water Dynamics Co. Ltd)发明的专利技术SMR,即灰水(Graywater)和雨水(Rainwater)收集再利用技术成功地解决了中水处理技术难题。我国目前中水及雨水再利用技术的应用仍然处在不成熟和起步阶段。但随着清华紫光、西东公司等在该领域的研究开发和国际合作进行中水处理与回用技术开发的逐渐发展,我国中水及雨水回用技术正逐渐与国际先进技术接轨。其中,在雨水的智能化收集与处理过程中需要应用到水质模型。水质模型总体上可以分为确定性模型和不确定性模型。以往国内外水质模型研究主要集中在确定性模型方面,并开发了许多相关的较为成熟的水质模型软件。而不确定性水质模型的研究则相对滞后,仍处于探索阶段。从系统分析的角度看,水环境系统是一个复杂的不确定系统。

因为作为污染物载体的水文过程由于受到自然或人为等因素的影响,是一个不确定性的随机过程;进入水体的污染物的成分与数量也是随着时间、空间变化的不确定量;由于受到水体中物理、化学、生物等随机因素的影响,水体中污染物的扩散、分解、沉降等既遵循着一定的变化规律,又存在着不确定性变异。目前,针对模型结构的不确定性研究主要有随机理论水质模型和黑箱水质模型等。其中,黑箱水质模型中的人工神经网络通过神经元连接而构成自适应非线性动态系统,再通过调整内部权向量去匹配输入与输出的响应,具有良好的鲁棒性、自组织适应性、并行处理、分布存储和高度容错等特性,比较适合于不确定性问题的建模研究。其中,神经网络方法被广泛应用在各种水质模型的研究中。2004年, Maier 利用神经网络模型研究地表源水水质,从而对水厂的投药量进行优化。2006年,王晓玲等使用改进的 BP 神经网络,提高了神经网络的学习和全局搜索能力,并建立了水质综合评价模型。

由以上分析可以发现,饮用水输水保障、水资源综合利用等研究目前主要以城市管网、城市建筑雨水收集、城市中水为对象。对于港口给水管网、港口建筑雨水收集等相对特殊独立的系统研究甚少。如何将城市系统的研究成果转移到内河港口相应的系统,或是重新建立针对内河港口特性的管网漏损预警及水质保障和雨水的智能收集、处理与回用等研究体系,仍有待进一步研究探讨。

水资源优化配置是提高水资源承载力的重要策略。这一策略可以通过工程措施和非工程措施两条途径来实现。工程措施有显见的实物,非工程措施是通过对相关信息的分析和辅助决策而达到优化水资源配置的非工程性方法和手段。基于 GIS(地理信息系统, Geographic Information System)的地下水信息管理系统就是一种重要的优化水资源配置的非工程措施。GIS 是以计算机为基础的综合处理和空间数据分析的系统,是集计算机科学、管理科学、信息科学、空间科学、地学、环境科学等为一体的新兴边缘研究领域。20 世纪 70 年代,美国田纳西流域管理局开始利用 GIS 技术处理和分析各种流域数据,为流域管理和规划提供决策服务,把 GIS 应用于水文学及水资源管理。20 世纪 80 年代后,随着计算机技术的飞速发展,GIS 在水文学及水资源管理领域的发展非常迅速。美国测绘研究会及美国摄影测量与遥感学会在 1986 年年会的 GIS 专题交流中,已有一些 GIS 应用于水文学及水资源管理较有实用价值的系统与理论研究成果。20 世纪 90 年代以来,GIS 应用一直是水资源学科中的一个热点课题。1993 年,在美国亚拉巴马州莫比尔市举行了“地理信息系统和水资源专题讨论会”。1993 年,维也纳国际水文科学协会召开了“地理信息系统在水文学与水资源管理中的应用”专题会议,在地下水研究方面从地下水模型、水质和水资源利用等方面展开讨论。1996 年,召开了 GIS 在水文学及水资源管理中的应用专题国际会议。此外,一些 GIS 软件商还定期召开用户交流会,如美国环境系统研究所公司每年都召开全球及区域性的 GIS 用户交流会,其中把水资源单独作为一个主题。GIS 在与地下水结合的方向上,已经从单纯的数据管理、资源评价,发展到今天的决策支持系统乃至专家系统。基于 GIS 的地下水信息管理系统是指按照系统的观点,综合运用系统科学、管理科学、计算机科学及软件工程等多学科知识,深入描述用户的各种需求,构思、设计比较满意的系统逻辑模型,并且提出适当的计算机软件、硬件配置方案。

在水资源污染控制方面,国内外的研究相对成熟。特别是交通运输部天津水运工程科学研究所(以下简称“天科所”)在港区高含盐生活污水循环回用处理、港区含油污水循环回用处理、集装箱洗箱废水污染的动态分析与防治等方面作了大量研究工作并取得一些显著成果。其中,在港口含油污水的处理方面,天科所依托天津港南疆污水处理中心含油污水处理系统,成功地开发出了一套“强化混凝+水解酸化+MBR”物化与生化相结合的,适合于港口含油污水处理的综合工艺。该工艺较传统工艺节约占地 30% 以上,降低运行成本 20% 以上,出水水质优于国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级标准,可作回用水。回用水每年可为天津港煤码头公司、焦炭码头公司喷淋系统节约自来水 30 万吨,彻底解决了困扰国内港口的含油污水治理的难题。其所开发的关键技术获得 2009 年年度中国水运行业协会科学技术奖三等奖。另外,针对部分港区生产污水高含盐量、高毒性、高污染的特点,天科所开发出了一套“平流沉淀+生物强化 A/O+生物强化 MBR”联合处理工艺。本课题的专题之一是“港区已有污水处理系统的升级与改造”,即结合内河港口的特点对上述关键技术进行更进一步的研究,并考察其在内河港口污水处理系统中推广应用的可行性和实用性。

## 第3章 区域水资源利用调研分析

中国从20世纪70年代以来就开始闹水荒,后来水荒由局部逐渐蔓延至全国,而且形势越来越严重,对农业和国民经济已经带来了严重影响。从人口和水资源分布统计数据可以看出,中国水资源南北分布的差异非常明显。长江流域及其以南地区人口占了中国总人口的54%,但是水资源却占了81%;北方人口占46%,水资源却只占19%。北方资源型缺水日益严重令人忧心;而西南方地区由于不注意污水的处理,把未经处理的污水大量排到天然河道,污染了水体,影响了水资源的有效性,造成有水不能用,形成了水质型缺水的严重状况。其中的西部地区是我国长江、黄河、珠江等主要江河的发源地,是全国生态建设和环境保护的重点。西部地区因历史原因和自然条件的差异,或水少地多,或水多地少,生态环境非常脆弱,洪涝、干旱、地震、滑坡及泥石流等自然灾害发生频繁,人类的生存环境较差,在水资源方面存在的主要问题有以下几点。

### 1. 水资源时空分布不均,调配能力差

西北地区水资源总量为2300多亿立方米,但可利用量不足1200亿立方米,区域分布过于集中,新疆、青海两省区的水资源量约占西北地区水资源总量的2/3,而有的地区严重缺水。西北大部分地区降雨基本特征表现为:大陆季风气候下冬春两季降水少,春末夏初干旱,地表水供水水源严重不足,导致灌溉农业受到干旱的严重威胁。由于汛期雨量集中在6至9月,占全年的60%~90%,天然来水与灌溉用水错位,加上西北地区水资源本来稀缺,因此旱灾历来十分严重,并呈逐年加重趋势。

西南地区的水资源比较丰富,广西、云南、贵州、四川、重庆和西藏等地的面积仅占西部地区的38.1%,而水资源总量却占西部地区水资源总量的83.6%,人均水资源量普遍高于全国。但西南地区山高水深、地形复杂,还有大片岩溶山区,且因时空分布不均,导致水资源利用率低、流失量大,旱灾、水灾交替发生。以四川省为例,其地表径流的60%~70%集中在6至9月或7至10月,且多以暴雨的形式出现,因此往往形成洪涝灾害;而一年中又有5~6个月为枯水期,此时往往又因水量少而导致旱灾发生,甚至出现河流断流现象。这种径流年内分配的不均匀性,对农业灌溉、水力发电、工业用水和航运产生了非常不利的影响。水资源的时空分布和需求不相适应,区域和季节性缺水现象仍非常严重。

### 2. 水土生态环境恶化

西北地区水资源开发利用过程中,由于缺乏统筹规划和综合治理,致使中上游水资源过度开发利用,且社会经济发展用水往往挤占生态系统用水,导致下游河道断流、湖泊干枯、绿洲萎缩、土地沙化。

西南地区山高坡陡、岩体破碎、暴雨集中,导致水力和重力侵蚀强烈,加剧水土流失,“石漠化”严重,在暴雨洪水期往往诱发泥石流以及山体滑坡、崩塌等山地灾害,严重影响当地人民的生产生活。

### 3. 水污染情况严重

西部大部分地区的工业和生活污水以及农业面源污水未经处理直接排入水域,尤其是大中城市附近河段已形成严重岸边污染带,致使江河湖库水质日趋恶化,部分内陆区土地盐碱化仍在继续发展。在废污水排放中,长江流域工业废水和生活污水分别占 75% 和 25% 左右,在流域涉及的 18 个省、市和自治区中,四川、湖北、湖南、江苏、上海和江西 6 省市的废污水排放量占流域总量的 84.6%,是废污水的主要产生地,其中主要污染物为悬浮物、有机物、石油类、挥发酚、氰化物、硫化物、汞、镉、铬、铅、砷等。在 21 个干流城市中,上海排放的废污水量约占 21 个城市排放总量的 30.7%,武汉占 18.1%,南京占 15.8%,重庆占 8.8%,四大城市合计占 73.4%,是长江最主要的污染源。由于污染严重,长江岸边形成许多污染带,在 21 个干流城市中,重庆、岳阳、武汉、南京、镇江、上海 6 市累计形成了近 600 km 的污染带,长度占长江干流污染带总长的 73%。

### 4. 用水浪费现象严重

我国西部地区灌溉是用水大户,而其有效利用率低,大多采用漫灌的办法。灌溉用水定额远远高于实际需要值。另外,工业万元产值用水量或单位 GDP 用水量均很高,浪费严重。

上述情况说明,当前西部地区还存在着水利基础设施薄弱、水资源严重短缺、水土流失严重、水污染加剧、生态环境恶化、缺乏有效的水管理体制、水的利用效率低等突出问题。这些问题既是西部大开发中的瓶颈性制约因素,同时也是西部地区经济和社会可持续发展中需要认真对待和切实加以解决的重大事项。

水资源问题是实现区域发展的重要制约因素。因此,水资源的合理开发、利用、节约、保护和优化配置,应是实施西部大开发战略的极为重要的内容。针对西部的主要内河港口,优化水资源的配置,大力促进节约用水,统筹考虑地表水、地下水、雨水,开发利用污水和微咸水,提高水资源的利用效率,以水资源的可持续利用促进和保障港口经济和社会的可持续发展同样也是重要的课题。

# 第 4 章 港区雨水的智能收集、处理与回用

## 4.1 内河港口 SWMM 水文模型建立——以长沙霞凝港为例

本章研究技术路线如图 4-1 所示。

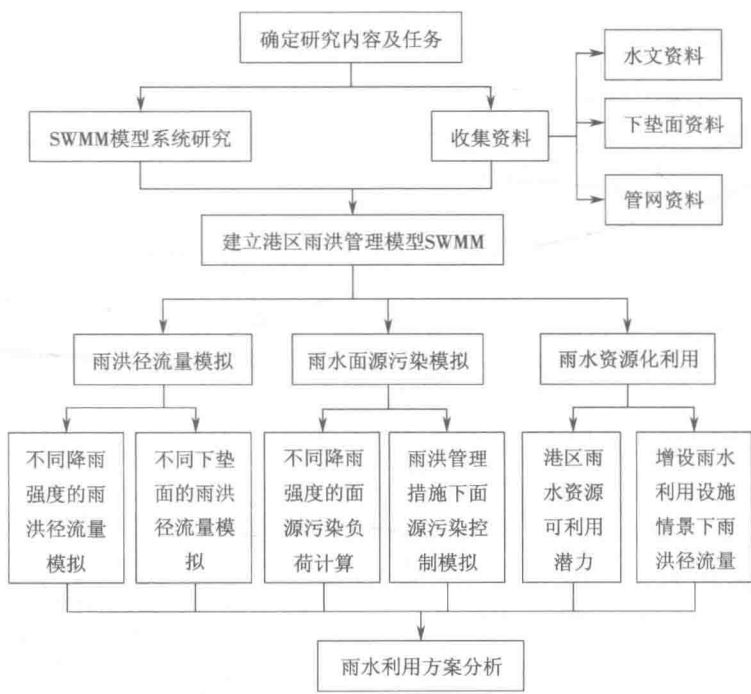


图 4-1 本章研究技术路线图

### 4.1.1 SWMM 模型概述

#### 4.1.1.1 水文模型的选择

SWMM 模型的全称是暴雨洪水管理模型 (Storm Water Management Model, SWMM), 最早是在 1969—1971 年由美国环境保护署资助, 由梅特卡夫 - 埃迪公司、佛罗里达大学、美国水资源公司等联合开发的。该模型是非商业性排水系统模型, 模型源代码对外开放。SWMM 模型经过全世界专业人士几十年来的不断完善, 使其得到广泛使用和认可。该模型能够完成排水系统的水力、水质模型计算, 已被广泛应用于环保、防洪、生态修复、规划等领域。该模型内含水力与水质模块。水力模块可以采用动力波法模拟排水管网在承压状态下的运行状况, 可以有效模拟洪涝过程。水质模块由污染物累积、冲刷和反应子模块组成,

可以实现各种污染物在降水时的演化过程模拟,用户可以根据污染物特性指定模型中污染物变化描述方程。

MIKE 软件是丹麦水资源及水环境研究所的产品。主要的 MIKE 软件有:

- (1) 水资源、海洋模型软件——MIKE11、MIKE21、MIKEBASIN、MIKESHE;
- (2) 水问题模型软件——MIKENET;
- (3) 排水系统模拟软件——MIKEMOUSE。

MOUSE 是模拟排水及污水系统的水文、水力和水质集成工程软件,它集成了地下水系统中的表面流、明渠流、管流、水质和泥沙传输等模型。MOUSE 的典型应用包括合流制下水道溢出研究、生活污水溢出、复杂 RTC 计算和分析,分析和诊断现有雨水和生活污水系统问题。

MIKE 软件包含模块庞大、内容丰富,但在某些方向设置得不够细腻。SWMM 模型是典型的排水管网模型,由产流模型、汇流模型和管网水动力模型组成,能够进行地区雨水的水量和水质模拟计算。SWMM 更适合本专题研究目的,所以本专题拟采用 SWMM 进行区域建模。

#### 4.1.1.2 SWMM 模型计算原理

##### 1. 产流模型

地面产流是指降雨经过损失变成净雨的过程。根据土地的利用状况和地表排水走向,SWMM 模型将一个流域划分成若干个排水小区,根据各排水小区的特性计算各自的径流过程,并通过流量演算方法将各排水小区的出流组合起来。如图 4-2 所示为产流原理图。

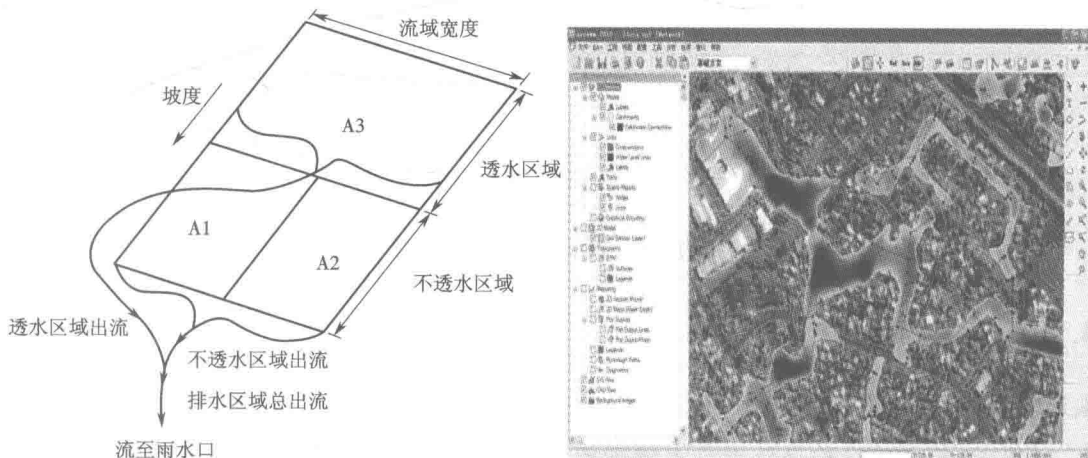


图 4-2 产流原理图

每一排水小区再分为以下三个部分。

(1) 有注蓄量的不透水地表 A1。其出流侧向排入边沟或小下水道,降雨损失主要为注蓄量。其产流量表示为

$$R_2 = P - D \quad (4-1)$$

式中  $R_2$ ——有注蓄量的不透水地表的产水量(mm);

$P$ ——降雨量(mm);

$D$ ——注蓄量(mm)。

(2) 无注蓄量的不透水地表 A2。其暴雨初始就立即产生地表径流,降雨损失为雨期蒸发量。其产流量表示为

$$R_1 = P - E \quad (4-2)$$

式中  $R_1$ ——无注蓄量的不透水地表的产水量(mm);

$P$ ——降雨量(mm);

$E$ ——雨期蒸发量(mm)。

(3) 透水地表 A3。透水地表的降雨损失主要包括注蓄量和下渗量。下渗是指降雨入渗到不饱和土壤的过程。其产流量表示为

$$R_3 = (i - f) \cdot \Delta t \quad (4-3)$$

式中  $R_3$ ——透水地表的产水量(mm);

$i$ ——降雨强度(mm/s);

$f$ ——入渗强度(mm/s);

$\Delta t$ ——降雨时间(s)。

## 2. 下渗模型

在 SWMM 模型中,提供了 Horton 模型、Green-Ampt 模型和 Curve Number 模型三种下渗模型来对透水地表的产流进行计算。三种模型描述的下渗机理各不相同:Horton 模型主要描述下渗率随降雨时间变化的关系,不反映土壤饱和带与未饱和带的下垫面;Green-Ampt 模型则假设土壤层中存在急剧变化的土壤干湿界面,即土壤非饱和带与饱和带界面,充分的降雨入渗将使下垫面经历由不饱和到饱和的变化过程;Curve Number 模型将下渗过程分为土壤未饱和阶段和土壤饱和阶段分别进行计算。

### 1) Horton 模型

Horton 模型是由 R. E. Horton 于 1933 年提出的一个经验模型,它描述了入渗率最大值随时间呈指数级下降至最小值的下渗过程。该模型需要确定研究区域的最大下渗率、最小下渗率、入渗衰减系数、使完全饱和土壤恢复到干旱状态的时间以及最大下渗量等参数。有

$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) e^{-kt} \quad (4-4)$$

式中  $f$ ——下渗率(mm/h);

$f_{\infty}$ ——稳定下渗率(mm/s);

$f_0$ ——初始下渗率(mm/s);

$t$ ——降雨历时(s);

$k$ ——下渗衰减系数。

### 2) Green-Ampt 模型

Green-Ampt 模型是 Green-Ampt 于 1911 年提出的一种物理模型,其物理基础是多孔介质水流的达西定理。该模型的下渗深度方程为

$$F = \frac{K_s S_w (\theta_s - \theta_i)}{i - K_s} \quad (4-5)$$

式中  $\theta_s$ ——饱和时以体积计的水分含量；

$\theta_i$ ——初始时以体积计的水分含量；

$S_w$ ——浸润面土壤的吸水能力；

$i$ ——降雨强度；

$K_s$ ——饱和水力传导率。

### 3) Curve Number 模型

Curve Number 模型根据反映流域特征的综合参数进行入渗计算,反映的是流域下垫面情况和前期土壤含水量状况对降雨产流的影响,而并不反映降雨过程、降雨强度对产流的影响,适合于大流域的产汇流计算。该模型是美国水土保持局提出的一个经验模型,通过计算土壤吸收水分的能力来进行降雨扣损。通过实地观测发现,土壤的蓄水能力与曲线值(CN 值)密切相关。CN 值是根据日降雨量与径流量记录经验确定的,与土壤类型、土地用途、植被和土壤初始饱和度(土壤前期条件)等因素相关。

### 3. 汇流模型

汇流过程是指将各分区净雨汇集到出口控制断面或直接排入河道的过程。地表径流模拟采用非线性水库模型,由连续方程和曼宁方程联立求解。模型需要输入每个排水小区的面积、宽度、坡度、透水地表和不透水地表的曼宁糙率、不透水地表的百分比、无注蓄能力的不透水地表所占的百分比、透水地表和不透水地表的注蓄量。

地表径流由三种类型的地面产生,由非线性水库模型模拟,如图 4-3 所示。

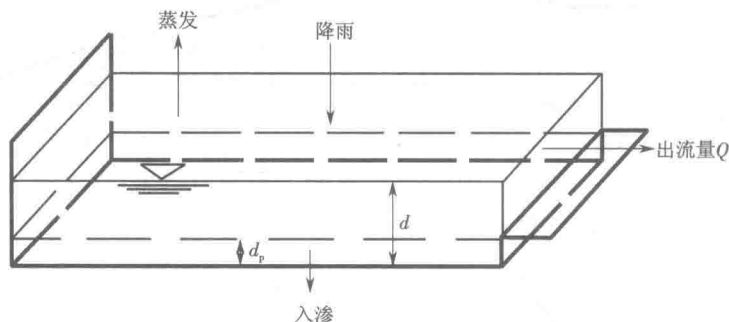


图 4-3 非线性水库模型原理图

对于某一个汇水区,非线性水库模型的连续性方程为

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - Q \quad (4-6)$$

式中  $V$ ——汇水区库容水量( $m^3$ )；

$d$ ——汇水区地表水深( $m$ )；

$A$ ——汇水区面积( $m^2$ )；

$i^*$ ——净降雨强度( $m/s$ )；

$Q$ ——出流量( $m^3/s$ )。