

机群环境下水环境 并行数值模拟系统

太湖流域管理局水文局（信息中心）

主 编 林荷娟 左一鸣

副主编 金 科 姜桂花



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

机群环境下水环境 并行数值模拟系统

主 编 林荷娟 左一鸣

副主编 金 科 姜桂花



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是讲述一维、二维环境水动力学数值模型算法并行化实现的学术专著。为实现一维、二维环境水动力学数值模型并行化改造,针对需要解决的技术问题,本书分别从基于ESRI公司的ArcEngine组件为基础ArcGIS平台搭建,自行维护机群调度系统功能架构设计、动态负载均衡任务调度系统的实现,基于FDM和FVM的一维和二维水动力学数值模型并行算法改进等方面展开研究,并将研究成果应用于“上海浦东新区调水改善水环境”和“镇江内江水流数值模拟”项目。

本书可供高等院校和科研单位从事环境流体力学、环境水力学研究和教学的科研人员,水环境污染模拟与评价的专业人员以及对并行计算感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

机群环境下水环境并行数值模拟系统 / 林荷娟, 左一鸣主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019. 1
ISBN 978-7-5170-7080-1

I. ①机… II. ①林… ②左… III. ①水动力学—数值模拟 IV. ①TV131.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第245148号

审图号: GS (2018) 5072 号

书 名	机群环境下水环境并行数值模拟系统 JIQUN HUANJING XIA SHUIHUANJING BINGXING SHUZH MONI XITONG
作 者	主 编 林荷娟 左一鸣 副主编 金 科 姜桂花
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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 5.5印张 130千字
版 次	2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	58.00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

FOREWORD



随着社会经济的高速发展,“水多,水少,水脏”等问题已经引起了全社会的广泛重视,实现水资源可持续利用,已成为努力改善人类生存和经济社会条件的关键因素。当前,太湖流域水环境污染问题已日益严重,为改善水环境,通过调水来解决水脏问题是一种行之有效的手段,如引江济太、南水北调、博斯腾湖调水及黑河调水等都是意义重大的调水工程。

为了确定调水水量与河网内水质之间的关系,需要根据河网水体特征及其水文、水质同步监测资料,采用数值计算方法,建立河网水力水质数学模型。当前,对于河道水量、水质模拟,为了减小数值计算误差,需要将计算网格划分得很细。同时由于河道、流域规模一般都比较大,对于比较大的计算域进行模拟需要布置的网格节点也比较多。如果网格节点过多,计算工作量将成倍甚至成指数级增长,对于计算机的计算速度要求比较高。

近几年来,随着计算机运算速度的大幅提高及网络技术的成熟,高性能互联网的拓扑结构和处理器之间的距离已不再是影响并行机系统性能的关键因素,为利用计算机组建并行计算集群提供了高性价比条件,目前计算机集群正逐步成为并行编程的主要平台。

针对以上需求,研制了基于 ArcEngine 组件的并行水动力数值模拟系统,并在此研究的基础上编写了本书。本书是讲述一维、二维环境水动力学数值模型算法并行化实现的学术专著,共分 4 章。第 1 章介绍太湖流域概况及模型发展历程,在综合分析国内外非点源污染模型的基础上,提出模型与 GIS 结合和模型并行化计算的必要性和可行性。第 2 章进行水环境信息管理系统的架构设计,实现对客户端计算机的动态管理,负载信息的自动收集,并采用蚂蚁算法对计算任务进行调度,实现机群动态负载平衡。第 3 章应用计算数学、流体力学及环境水力学以及计算机通信的基本理论与方法,结合太湖流域浦

东新区改善水环境调控模拟，对平原河网的水量、水质特性进行一维耦合数值模拟，采用 FDM 算法、主从型编程模型，提取算法中的并行性，研发并行一维水量水质模型。第 4 章应用守恒的二维非恒定流浅水方程组描述水流流动，并用二维对流-扩散方程描述污染物的输运扩散；应用有限体积法及黎曼近似解对耦合方程组进行数值求解，从而模拟水体的水流过程和相应的污染物输运扩散过程；分析串行算法求解流程提取并行成分，采用任务 SPMD 型并行编程模型，将求解区域网格分成若干部分，对每部分进行单独求解。

由于已有的成果和作者水平有限，本书不足与错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2018 年 7 月

目录



CONTENTS

前言

第1章 太湖流域概况	1
1.1 流域概况	1
1.2 太湖流域模型	8
1.3 国内外研究进展	10
1.4 主要研究内容及技术路线	23
第2章 ArcGIS 平台水环境分析系统设计	26
2.1 系统总体设计	26
2.2 并行平台搭建	31
2.3 一维水量水质数值系统功能	36
2.4 二维水量水质数值系统功能	39
第3章 感潮河网一维并行水量水质数值模型研制	44
3.1 感潮河网水动力模型的建立	44
3.2 河网水质模型的建立	52
3.3 并行模型研制	55
3.4 算例——太湖流域上海浦东新区调水改善水环境数值模拟	58
第4章 二维并行水量水质数值模型研制	65
4.1 水环境数值模型建立	65
4.2 并行模型研制	73
4.3 算例——镇江内江水流数值模拟研究	75
参考文献	81

太湖流域概况

太湖古称震泽，又名五湖，是我国东部最大的湖泊，也是我国第三大淡水湖。太湖流域依托长江三角洲良好的区位优势，自然条件优越，风光秀美，物产丰富，河网密集，交通便利，自古以来就是闻名遐迩的“鱼米之乡”，有“上有天堂，下有苏杭”“赋出于天下，江南居十九”之美誉。

1.1 流域概况

1.1.1 自然概况

1. 地理位置

太湖流域地处长江三角洲南翼，北抵长江，东临东海，南滨钱塘江，西以天目山、茅山等山区为界。流域面积 36895km^2 ，行政区划分属江苏、浙江、上海和安徽三省一市，其中江苏省 19399km^2 ，占 52.6%；浙江省 12095km^2 ，占 32.8%；上海市 5176km^2 ，占 14.0%；安徽省 225km^2 ，占 0.6%。

2. 地形地貌

太湖流域地形特点为周边高、中间低，西部高、东部低，呈碟状。流域西部为山丘区，属天目山及茅山山区，面积 7338km^2 ，约占总面积的 20%，山区高程一般为 $200.00\sim 500.00\text{m}$ ，丘陵高程一般为 $12.00\sim 32.00\text{m}$ ；中间为平原河网和以太湖为中心的湖泊洼地，北、东、南三边受长江口和杭州湾泥沙堆积影响，地势相对较高，形成碟边，平原面积为 29557km^2 ，中部平原区高程一般在 5.00m 以下，沿江滨海高亢平原地面高程为 $5.00\sim 12.00\text{m}$ ，太湖湖底平均高程约 1.00m 。太湖流域地形地貌见图 1.1。

3. 河湖水系

太湖流域河网如织，湖泊星罗棋布，是我国著名的平原河网区。流域总水面面积 5551km^2 ，水面率 15%；河道总长约 12 万 km ，河道密度达 $3.3\text{km}/\text{km}^2$ 。流域水系以太湖为中心，分上游和下游水系。上游水系主要包括苕溪水系、南河水系及洮湖水系等；下游主要为平原河网水系，包括东部黄浦江水系、北部沿长江水系和南部沿杭州湾水系；京杭运河穿越流域腹地及下游诸水系，是流域内重要的内河航道。流域湖泊以太湖为中心，形成西部洮溇湖群、东部淀泖湖群和北部阳澄湖群。流域内面积大于 10km^2 的湖泊有 9 个，分别为太湖、溇湖、阳澄湖、洮湖、淀山湖、澄湖、昆承湖、元荡、独墅湖。太湖是

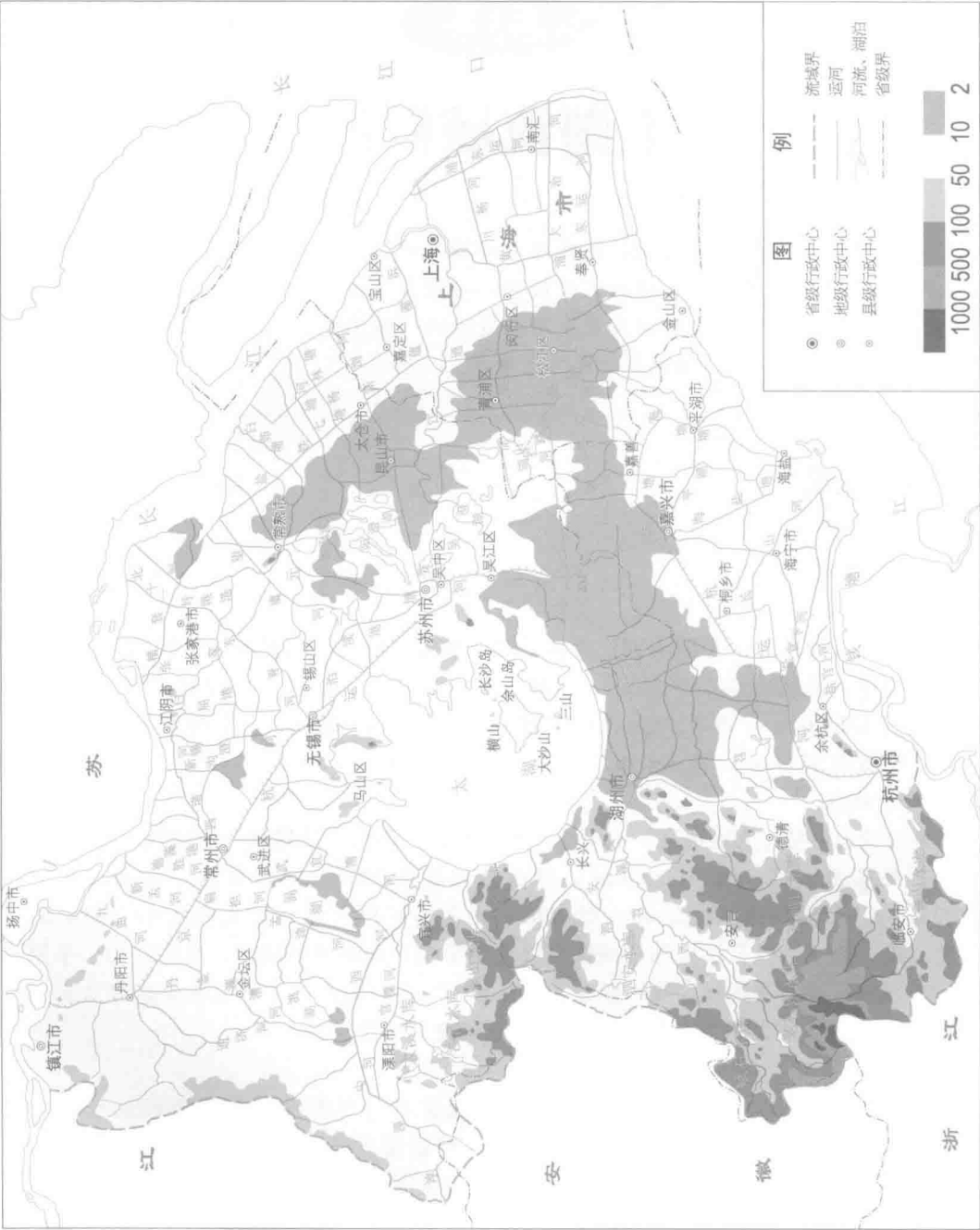


图 1.1 太湖流域地形地貌图

流域内最大的湖泊, 水面积 2338km^2 , 多年平均年蓄水量 44.3亿 m^3 , 也是流域防洪减灾和水资源的调蓄中心。

4. 水文气象

太湖流域属亚热带季风气候区, 呈现冬季干冷、夏季湿热、四季分明、降雨丰沛和台风频繁等气候特点, 多年平均气温为 $15\sim 17^\circ\text{C}$, 年日照时数为 $1870\sim 2225\text{h}$ 。流域多年平均年降水量为 1177mm , 年内降水不均, 其中约 60% 集中在 5—9 月的汛期; 多年平均水面年蒸发量为 822mm ; 多年平均天然年径流量为 160亿 m^3 , 多年平均年径流系数为 0.37 。太湖流域沿长江和杭州湾口门引排水受东海潮汐影响, 东海潮汐为正规半日潮, 一日有两次高潮和低潮, 月内阴历初三和十八前后为大潮, 初八和二十三前后为小潮。

1.1.2 经济社会状况

太湖流域是我国经济最发达、大中城市最密集的地区之一。流域内分布有特大城市上海、杭州, 大中城市苏州、无锡、常州、嘉兴、湖州以及迅速发展的众多小城市和建制镇, 已形成等级齐全、群体结构日趋合理的城镇体系, 城镇化率达 78% , 是长江三角洲的核心地区, 地理和战略优势突出。

流域内工业技术基础雄厚, 产业门类配套齐全, 资源加工能力强, 技术水平、管理水平和综合经济效益均处于全国领先水平。汽车、冶金钢铁、石油化工、机械电子、轻纺、医药、食品等在全国占有重要地位; 高新技术产业发展迅猛, 沪宁杭高科技产业群和信息产业带已形成, 上海浦东新区、虹桥开发区、杭州高新技术开发区、昆山经济开发区、苏州—无锡—常州火炬带等一批国家级经济技术开发区、保税区和地方性开发区的建设和发展增强了城市综合实力。流域内金融、保险、房地产、通信、信息服务、运输、现代物流等第三产业发展迅速, 在流域 GDP 中的比重稳步提高。流域内农业生产广泛采用新技术, 集约化程度不断提高, 农村经济改革和产业结构调整成效显著, 乡镇已进入了城市化快速发展时期。

太湖流域交通发达, 沪宁、沪杭铁路贯穿全流域, 宣杭铁路连接皖南, 京沪高速、沪宁城际铁路已开工建设; 沪宁、沪杭、沿江、苏嘉杭、苏申浙皖、京沪等高速公路构筑了流域快速交通网络; 流域紧靠长江“黄金水道”, 京杭运河贯穿南北, 沟通长江和钱塘江航运, 苏申内港线、苏申外港线、杭申线、长湖申、乍嘉苏线、六平申线等重要航线构成了内联三省(直辖市)、外通长江、钱塘江的内河航运网络格局, 通航里程达 1.6万 km ; 上海港、大小洋山深水港、张家港、太仓港、乍浦港、长江深水航道形成面向国内外、分工专业、快速发达的集疏运体系; 电力、通信等基础设施完备, 为流域经济社会发展创造了良好的环境。

截至 2016 年年底, 太湖流域总人口为 6028 万人, 占全国总人口的 4.4% ; GDP 为 72779 亿元, 占全国 GDP 的 9.8% ; 人均 GDP 为 12.1 万元, 是我国人均 GDP 的 2.2 倍。

1.1.3 水资源与洪涝灾害

太湖流域多年平均水资源总量为 176.0亿 m^3 , 其中地表水资源量为 160.1亿 m^3 , 地下水资源量为 53.1亿 m^3 , 地表水资源和地下水资源的重复计算量为 37.2亿 m^3 。流域多年平均本地地表水可利用量为 64.1亿 m^3 。长期以来, 长江是太湖流域的重要补给水源和

排水方向,多年平均年引长江水量 60.8 亿 m^3 ,年排长江水量 39.7 亿 m^3 。近年来,流域引江规模加大,引江水量趋增。

流域水资源普遍受到不同程度的污染。2016 年,流域 6264km 评价河长全年期水质达到或优于Ⅲ类的河长 1764km,占总评价河长的 28.2%,未达到Ⅲ类水标准的项目为氨氮、总磷、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、化学需氧量和石油类等。参评的 377 个水功能区全年期水质达标个数为 158 个,达标率 41.9%;太湖流域参评水功能区中河流达标河长 2189km,达标率 49.5%;湖泊达标面积 268 km^2 ,达标率 9.1%;水库达标蓄水量 4.5 亿 m^3 ,达标率 67.6%。按照水功能区限制纳污红线主要控制项目高锰酸盐指数、氨氮两项指标进行达标评价,全年期水功能区水质达标个数为 239 个,达标率 63.4%。省界河流监测断面共 34 个,50.0%的断面达到或优于Ⅲ类水;太湖全湖平均水质高锰酸盐指数为Ⅲ类,氨氮为Ⅰ类,总磷为Ⅳ类,总氮为Ⅴ类,若总氮参评,则全年期太湖水域水质均未达到Ⅲ类水,劣于Ⅴ类水体达到 73.9%;若总氮不参评,全年期太湖东部沿岸区水质为Ⅲ类,占全湖面积的 11.5%,Ⅳ类水体占 71.8%,Ⅴ类水体占 13.8%。全年期太湖中度富营养化面积为 80.9%,轻度富营养化面积为 19.1%。

自 20 世纪 90 年代以来,太湖几乎每年都暴发不同程度的蓝藻,暴发范围从梅梁湖等北部湖区扩大到竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区,甚至湖心区;暴发时间从 4 个月(6—9 月)延长到 8 个月(4—11 月),冬季仍有蓝藻存在。2016 年,太湖蓝藻水华最大面积为 936.4 km^2 ,发生在 7 月 17 日,其次为发生在 11 月 2 日的 879.8 km^2 。

梅雨和台风暴雨是造成流域洪涝灾害的主要原因。受平原地势低洼、坡降小和潮汐顶托等影响,流域排水速度慢、时间短、难度大,太湖水位易涨难消,流域洪涝灾害频繁。20 世纪以来,共发生 5 次流域性大洪水,分别发生于 1931 年、1954 年、1991 年、1999 年和 2016 年。1999 年太湖水位最高达 4.97m,流域受淹农田 1031 万亩,受灾人口达 746 万人,当年直接经济损失达 141.3 亿元。

1.1.4 流域治理与管理状况

太湖流域依水而起、因水而兴,流域兴衰与水息息相关,流域发展始终贯穿着治水的主线。流域经济社会发展要求和流域独特的自然禀赋决定了流域水利发展要适应支撑经济社会的发展,经济社会的发展又为水利发展提供了强大的动力。

1. 流域治理

新中国成立以来,太湖流域开展了大规模的水利建设,修建水库,开挖和疏浚河道,兴修、加固河湖堤防和海塘,在平原洼地修建圩堤和闸、泵,一定程度上提高了防洪、除涝、挡潮、供水、抗旱、水环境整治能力。

1991 年太湖大水后,国务院决定进一步治理太湖,根据《太湖流域综合治理总体规划方案》(以下简称《总体规划方案》)和国务院治淮治太第四次会议精神,太湖流域开展了望虞河、太浦河、环湖大堤、杭嘉湖南排、湖西引排、武澄锡引排、东西苕溪防洪、杭嘉湖北排通道、红旗塘、扩大拦路港泖河及斜塘、黄浦江上游干流防洪工程等 11 项骨干工程建设。依托上述治太工程,太湖流域已初步形成北向长江引排、东向黄浦江供排、南排杭州湾并且充分利用太湖调蓄的防洪与水资源调控工程体系,在防御 1995 年、1996 年、1998 年流域常遇洪水和 1999 年、2016 年流域特大洪水中发挥了重要作用。2002 年

以来,利用治太工程实施以望虞河为骨干引水河道的“引江济太”水资源调度,截至2016年年底从望虞河累计调引长江水277亿 m^3 ,入太湖126亿 m^3 ,增供了水资源量,改善了水环境,成功缓解了2003年、2004年、2011年流域严重旱情和2007年太湖蓝藻暴发引起的无锡市供水危机。

流域内各省(直辖市)在江堤海塘、水源地建设、水库除险加固、河道整治、圩区建设、水土流失治理等方面也取得了显著成效。流域内已建、在建大中型水库23座,总库容约17.3亿 m^3 ,为拦蓄上游洪水,保障地区防洪安全、供水安全发挥了重要的作用。上海市已基本形成海塘、江堤、区域除涝和市区排水“四道防线”的格局,已建设青草沙、金泽水源湖等水源地并投入运用;杭州、苏州、无锡、常州、嘉兴、湖州等城市已基本达到国家规定的防洪标准,对中小洪水可以有效控制,总体防洪减灾能力明显增强。

2007年太湖蓝藻暴发引发无锡市供水危机后,流域水环境综合治理工作得到空前重视,力度前所未有。国务院批复了《太湖流域水环境综合治理总体方案》(以下简称《总体方案》),建立了太湖流域水环境综合治理省部际联席会议制度,江苏省、浙江省、上海市(以下简称“两省一市”)人民政府和国家有关部委正根据《总体方案》加快推进饮用水安全、工业点源污染治理、城镇污水处理和垃圾处置、面源污染治理、提高水环境容量(纳污能力)引排工程等方面建设任务,治理工作已取得初步成效。流域机构和流域内两省一市水行政主管部门正全力组织开展提高水环境容量的引排通道工程、引江济太、节水减排、水质监测、蓝藻打捞、底泥疏浚、河网整治等水环境综合治理水利工作。

2. 流域管理

在不断完善流域水利工程体系的同时,流域机构和两省一市各级水行政主管部门积极践行可持续发展治水思路,按照习近平提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路,强化依法管理,创新工作思路,不断提升流域综合管理水平。

推进体制机制改革创新,加强水法规和规划体系建设。积极探索建立权威、高效、协调的流域管理和行政区域管理相结合的流域管理体制,初步提出了管理体制改革的试点实施方案;上海、苏州等城市实现水务一体化管理。已完成的《太湖流域防洪规划》《太湖流域水资源综合规划》《太湖流域水环境综合治理总体方案》等专业、专项规划构成了流域水利规划体系的骨干框架。《太湖流域管理条例》已于2011年11月1日正式施行,开创了我国流域性综合立法的先河。流域内各省(直辖市)也相继颁布实施了相关水法规,编制了有关水利规划,为流域水资源的合理开发、有效保护与综合管理提供了依据和保障。

突发水事矛盾应急机制和风险管理能力不断提升。两省一市均制订了防洪防台预案和应急供水预案,应对突发事件能力得到提高;流域各省(直辖市)签订了《太湖流域省际边界水事活动规约》,积极探索建立流域省际边界水事纠纷预防和调处机制,推进水事纠纷预警机制和应急预案建设。

流域调度与建设管理水平不断提高,水利信息化建设成效明显。完善引江济太长效运行机制,依据洪水调度和资源调度相结合、区域调度和流域调度相结合、水量调度和水质调度相结合的原则,增加流域水资源有效供给,调活流域水体,促进水体有序流动,改善流域水环境。积极探索治太一期工程管理运行机制,各省(直辖市)不断推进水利投融资、水利工程建设与管理等方面的改革。水利信息采集、传输网络、数据中心等信息化基

基础设施初具规模,防汛指挥系统、水资源监控系统等业务应用系统进一步提高了流域综合管理、治理水平和应对突发事件的能力,通过电子政务、水利网站、信息公开等显著提高了水利公共服务能力。

1.1.5 经济社会发展态势

以太湖流域为核心的长江三角洲地区是我国综合实力最强的区域,根据国务院批准的《关于进一步推进长江三角洲地区改革开放和经济社会发展的指导意见》,长江三角洲地区将建设成为“亚太地区重要的国际门户、全球重要的先进制造业基地、具有较强国际竞争力的世界级城市群”。作为长三角经济的核心区位与发展引擎,太湖流域经济社会发展对于长三角乃至中国经济的腾飞有着举足轻重的作用。

在国家宏观战略规划和一系列政策推动下,太湖流域将发展成为中国经济主要增长和现代化的先导区,成为优势制造业、城镇化、区域一体化的高地,以及制度与机制的创新基地。流域各省(直辖市)提出了率先实现全面建成小康社会、率先实现现代化的目标。上海将继续发挥龙头作用,加快国际经济、金融、贸易和航运中心建设,带动沪宁和沪杭沿线发展带、沿江开发带、沿杭州湾产业带、沿海发展带、宁湖(湖州)杭发展带、沿太湖生态服务带的建设与发展。水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,是重要的生态与环境的控制性要素。水利作为国民经济和社会发展的基础,在全面建设小康社会和现代化中肩负着十分重要的职责。随着人口增长、区域一体化快速发展、城乡人民生活水平和生活质量的不断提高,水利要为全面建设小康社会提供坚实的支撑和保障。

(1) 要保障供水安全。随着城镇化的进展,人口由农村向城镇迁移,公众生活质量的提高对供水安全提出了更高的要求,需要通过水资源的合理配置,提供水质合格的生活水量,并满足经济快速增长对供水总量、供水结构和供水保证率的需求。

(2) 要保障防洪安全。在城市化进程中,人口和财富将进一步向城市集聚,洪涝灾害可能造成的潜在经济损失和风险程度也将同步增长,社会和公众需要更高标准的、更有效的防洪安全保障。

(3) 要保障生态安全,改善河湖水质,满足保护和维持河湖生态系统的用水需要、回补地下水及城市生态用水等方面的需求。

(4) 经济快速增长时期也是经济、社会、资源、环境发展之间矛盾交织、激烈的时期,统筹经济社会发展不断扩大的需求与有限的水资源、水环境承载能力的关系,要求切实转变水利发展模式,协调各类涉水开发行为与河湖健康的关系,约束经济社会活动对水的侵害,推动经济增长方式的转变,促进经济社会发展步入科学发展的轨道。

1.1.6 主要水资源问题和对策

太湖流域的水资源问题主要表现为流域水资源时空分布差异较大,水资源总量相对不足,水污染比较严重,这些问题已经明显制约了流域社会经济的可持续发展,亟需有效的解决措施。

1. 主要水资源问题

太湖流域水资源的时空分布变异性大,与人口、生产力、资源的匹配状况不够理想。

太湖流域属亚热带季风气候区,多年平均年降水量为 1177mm,流域降水量的年内分布不均,连续 4 个月最大降水大多出现在 6—9 月,其次是 5—8 月。降水量也存在着年季差异,最大年降水量出现在 1954 年,为 1630mm;最少年降水量出现在 1978 年,为 692mm。降水还存在着空间分布的差异,总的来说,西部大于东部,南部大于北部。径流的年内分配与降水相对应,春季、夏季大,冬季小。

太湖流域多年平均水资源总量为 176 亿 m^3 ,人均约 450 m^3 。由于受到流域降水年内不均的影响,太湖周边地区往往出现用水困难的问题。遇到大旱之年,流域供水缺口将会更大,大旱年 1971 年 ($P=94\%$),流域水资源量仅为 102 亿 m^3 ,特大干旱年 1978 年 ($P=98\%$) 水资源量仅为 42 亿 m^3 。目前太湖流域主要依靠长江、钱塘江引水补充和水资源重复利用满足用水需要,未来经济和社会的发展将对水资源供需产生更大压力。

2. 主要水环境问题

近几年来中央和地方政府加大了流域水污染防治的力度,但是由于太湖流域水污染防治工作的艰巨性和复杂性,太湖流域水体水质总体上尚未出现明显好转,湖泊富营养化在整体上也并没有得到根本性的改善,蓝藻暴发依然存在。

2016 年太湖流域省界水体 34 个监测断面中,50% 水体不同程度受到污染,其中Ⅳ类水占 35.3%,Ⅴ类水占 5.9%,劣于Ⅴ类水占 8.8%,主要超标项目为化学需氧量、五日生化需氧量、总磷、溶解氧和氨氮。若总氮不参评,太湖全年期 88.5% 水域受到不同程度的污染,其中Ⅳ类水占 71.8%、Ⅴ类水占 13.8%、劣于Ⅴ类水占 2.9%,主要超标项目为总磷、五日生化需氧量、高锰酸盐指数和化学需氧量;若总氮参评,太湖全年期 100% 水域受到不同程度的污染,其中Ⅳ类水占 19.1%、Ⅴ类水占 7.0%、劣于Ⅴ类水占 73.9%。太湖全年期 80.9% 为中营养水平,19.1% 为轻营养水平。总体上,太湖流域水污染问题仍然十分严重,已经严重制约了流域和地区经济社会的可持续发展。

3. 主要对策及分析

太湖流域水资源不足和水污染严重的问题是互相联系的,水资源不足使得环境用水被挤占,水体环境容量相应不足,污染物排放量超过水体的自净能力,而水污染造成的水质型缺水又加剧了水资源的不足。从太湖流域水量与水质问题密切联系的特点考虑,引水对于解决两方面的问题都具有重要作用。解决太湖流域水资源供需矛盾突出的问题,须充分发挥背靠长江的优势,通过引长江水来满足流域对水资源的需求,同时引水也是提高水体环境容量、改善水质的有效途径。

自长江引水是目前解决太湖流域水资源供需矛盾的主要措施之一,多年来,在太湖流域沿长江一线兴建了许多引排工程,以使水多时向长江排泄流域洪涝水,水少时则从长江引水入太湖流域。目前太湖流域由长江、钱塘江直接供水约 30 亿 m^3 ,一般从长江、钱塘江引入河湖的水约 90 亿 m^3 ,引水填补了很大一部分水资源供需的缺口。

太湖流域的水污染问题受到政府的高度重视,被列为我国需要重点治理的“三河三湖”之一,加强三条红线管理,采取治污、节水、引水、清淤、生态修复、蓝藻打捞等综合措施对太湖水污染进行综合治理,已初见成效。

1.2 太湖流域模型

1.2.1 发展历程

太湖流域河湖相通，相邻行政区间入河污染物相互影响，极易引起水事矛盾，近几年，流域水污染突发事件频发，并对河湖型水源地供水安全构成了严重威胁；流域与区域水资源调度目标 and 需求不完全协调一致，区域往往根据本地水资源情况及用水需求进行调度；由于流域平原河网水系的特殊性，水流缓慢，需要通过持续长时间调度，才能逐步实现水资源和水环境调度目标。因此，需要在加强流域水量水质监测的基础上，提高水资源保护和预警能力，研发太湖流域数值模型。现有的太湖流域模型研制大致可分为以下三个阶段：

第一阶段为20世纪90年代初期。太湖局根据洪水预报及调度管理等需要，组织河海大学、水利部南京水利水文自动化研究所等单位研制了降雨径流模型、河网水量模型。该阶段流域数值模型以模拟流域降雨径流及河网水流运动情势等水文水动力计算为主，重点解决洪水预报及流域防洪规划中洪水安排、规划方案论证等问题。

第二阶段为20世纪90年代中后期至2001年。太湖局根据流域水资源及水环境管理需求，在河网水量模型的基础上，与荷兰Delft水力学所合作研制了Delwaq水质模型，与丹麦水力学所、日本JICA等单位合作研究了太湖富营养化模型框架，在此基础上，发展了太湖二维水质模拟。该阶段流域数值模型在水文水动力计算的基础上，扩展了水质分析功能，形成了流域河网水量水质模型框架，初步实现了流域水资源保护规划中纳污能力计算、方案效果分析等功能。

第三阶段为2002年至今。太湖流域管理局（以下简称太湖局）在开展引江济太、洪水预报、突发水污染事件预测预报以及《太湖流域防洪规划》、《太湖流域水资源综合规划》和《太湖流域综合规划》等流域大型规划编制中，对原有模型进行了耦合及改进，并根据流域治理与管理的新需求形成了基于地理信息系统的太湖流域河网水量水质数值模型，实现了大型平原河网地区河道一维和太湖二维、水量与水质的耦合计算，为引江济太联合调度、应对突发水污染事件以及水资源综合规划中量质并重的水资源配置方案、流域纳污能力核算、流域污染物排放浓度论证等工作提供了技术支撑。

经过20多年的研制和不断完善，太湖流域数值模拟水平不断提高，流域数值模型日趋成熟，在论证水环境综合治理考核目标、核定流域水环境容量、比选工程及调度方案、评估措施效益等工作中发挥了重要作用。一是为流域水环境综合治理提供技术支撑。2007年，在《太湖流域环境综合治理总体方案》编制过程中，太湖局采用该模型分析论证了流域水环境治理近远期目标，核算了流域水环境综合治理区水功能区纳污能力及太湖允许入湖污染负荷量，分析了引排通道工程改善水环境的效果，成果均已纳入《太湖流域环境综合治理总体方案》。二是为流域规划编制及前期论证提供技术支撑。2002—2008年，在《太湖流域水资源综合规划》编制过程中，太湖局采用流域水量水质模型开展了量质并重的水资源供需计算分析工作，完成了水资源供需平衡分析、河道内外水资源配置格局分

析、流域性重要河湖水资源配置方案论证及流域水功能区纳污能力核算、规划实施效果评价等分析论证工作。2009—2011年,在《太湖流域水资源综合规划》编制过程中,太湖局采用流域水量水质模型复核分析了流域防洪工程布局、水资源配置方案、水功能区纳污能力等;综合提出了流域综合治理重点工程及调度,并对规划工程效果进行了分析评价。三是为流域调度管理及科研提供技术支撑。2010—2011年,太湖局在《太湖流域洪水与水量调度方案》编制过程中,采用流域水量水质模型优化了太湖防洪控制水位、引水限制水位等关键调度指标。2010—2012年,在太湖流域水量分配管理中,太湖局根据太湖流域水流往复不定、区域间水量交换频繁、河道内外用水与河网紧密联系等特点应用流域水量水质模型开展了现状工况及规划工况河道内外水量分配和重要河湖水量分配方案模拟分析,提出了流域水量分配方案和主要调度意见,为落实最严格水资源管理制度奠定了基础。

1.2.2 存在的技术问题

当前,对于河道水流和水质预测,为了减小数值计算误差,需要将计算网格划分得很细。同时,由于河道流域规模一般都比较小,对于比较大的计算域进行模拟需要布置的网格节点也比较多。如果网格节点过多,计算工作量将成倍甚至成指数增长,对于计算机的计算速度要求比较高。为了追求计算能力的提高,从元器件到工艺,从大型高性能计算机到个人PC机,硬件的性能一直在高速发展着,但是同时由于受计算机元器件物理性能的限制,单机速度的提高也是极其有限的。

现阶段,计算机系统结构的改进主要围绕着并行处理技术展开。高性能并行计算机的出现和发展使得大型科学与工程计算,特别是高维复杂问题的计算成为可能。当前高性能并行计算技术水平已经成为一个国家经济和科技实力的综合体现,为此一些国家都制定了相应的战略规划,其中最为著名的就是美国的“高性能计算和通信”(High Performance Computing and Communication, HPCC)和“加速战略计算创新”(Accelerated Strategic Computing Initiative, ASCI)^[1]。我国在“863”高科技研究发展计划和国家“973”基础研究计划重大项目中也对应项目,并设立有专门的国家高性能计算基金。并且近几年来,随着计算机运算速度大幅提高,价格低廉,同时局域网技术已十分成熟,高性能互联网的拓扑结构和处理器之间的距离已不再是影响并行机系统性能的关键因素,为利用计算机组建并行计算集群提供了高性价比条件,从而被各阶层用户所接受,正逐步成为并行编程的主要平台^[2]。

并行计算所要解决的问题通常包括大量的复杂计算和数据通信与处理,此类需求主要有如下几种:

- (1) 计算密集(Compute Intensive)型应用,如大型科学与工程计算与数值模拟。
- (2) 数据密集(Date Intensive)型应用,如数字图书馆、数据仓库、数据挖掘和计算可视化等。
- (3) 网络密集(Network Intensive)型应用,如协同工作、遥控和远程医疗诊断等。

对于河道二维水动力及水质模拟属于计算密集应用问题,有限体积模型网格经常达到几万甚至几百万。但是采用单个PC机需要的时间长,内存容量易受限制。一般模型运行是在设定工况的条件下进行,运行过程中基本资料不能修改。在率定计算中,是

在计算完成后整合计算结果,通过与实测资料的对比,进行修改参数。参数一旦修改,再进行计算,如此往复,但一些大的计算模型运行一次就需要几天甚至几周时间,这样就给模型的率定带来了巨大的困难,从而使得分析人员不得不减小计算规模,将网格划分更粗,但这样将导致计算结果可靠性降低。如黄河下游计算区域从花园口至利津,长约660km,若含滩区及滞洪区,则计算区域面积达4000km²左右。按主槽、滩地平均单元边长50m计算,网格量达160万个以上,即使采用显格式计算方法,单机计算下游洪水的演进过程,所需时间也远大于天然洪水的实际传播时间。也就是说,针对黄河下游的大区域平面一维计算,从洪水预报的角度来讲,单机计算是没有意义的。并行计算系统的大容量、高速度已经逐步成为多传质、大尺度、多维模型研究和应用的“助推器”。太湖流域是平原河网地区,如果用二维水力模型进行模拟,也存在同样的问题。

众所周知,水动力模型计算所需要的参数是众多的。如每条河道的大断面资料、河道编号、首末节点号、糙率等。传统的数值模型是将这些数据存储于文本文件中,文件每行每个数据对应一个参数。此文件一般人是看不懂的,因为里面只有一大堆的数据,也不知道每个数据的具体含义。因此,通常需要专业人员才能对此文件进行编辑,而且由于没有数据检验功能,如果输错参数,计算结果全部无用,耗时耗力。出于传统数值模型的众多缺陷,当前国外的商业模型已将模型与GIS紧密结合在一起,可以通过系统界面方便地进行参数设置,计算结果也能直观地在地图上显示出来,大大提高了模型的易用性。

1.2.3 研究目标

当前环境水力学数值模拟差分求解格式可以分为显格式、隐格式、显隐交替格式等。本书以一维、二维水动力水质数值模拟为例,分别根据显格式、隐格式求解特点,探索各自并行求解思路及方法,为提高数值模拟计算速度提供技术支持。同时,将模型与ArcGIS紧密结合,构建太湖流域水环境数值模拟系统,为模拟不同情景下太湖流域水环境状况提供计算工具,并可通过系统直观表达计算结果。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 并行平台应用现状

1. 并行计算与并行计算体系结构

并行计算(Parallel Computing),就是在并行计算机上所做的计算,通常也可称高性能计算(High Performance Computing)或超级计算(Super Computing),是将一项大的数据处理与数值计算任务(或任务的局部)分裂成为多个可相互独立、同时进行的子任务,并通过对这些子任务相互协调的运行和实现,从而达到快速、高效求解给定问题的处理方法^[3]。随着计算机和计算方法的飞速发展,几乎所有的学科都走向了定量化和精确化,从而产生了一系列诸如计算物理、计算化学、计算生物学、计算地质学等计算类科学,逐渐形成了一门计算性的学科分支,即计算科学。如今,计算科学已经成为继理论科

学及实验科学之后的第三门科学。计算科学的理论和方法,作为新的研究手段和新的设计与制造技术的理论基础,正推动着当代科学与技术向纵深发展。通常,针对计算科学中的复杂问题,传统的单机模式往往在完成时间和运行效果上无能为力,而并行计算则被认为是解决此类问题的唯一可行途径。

(1) 并行计算机的发展历程。并行计算机的发展可分为4个阶段^[4]:

1) 同步并行计算技术的预研期,并行机的研究大多属于概念性的范畴(1972年以前)。

2) 同步并行计算实践期,异步并行计算预研期(20世纪70年代)。1974年CDC STAR-100向量机在美国的Lawrence Livermore国家实验室投入使用;1976年Cray研究公司推出的向量式并行处理机在Los Alamos实验室运转。1976年后,控制数据公司的STAR-100改进为Cyber205,Cray-1改进为Cray-1s,并投入批量生产。一批功能强大的并行机相继投入使用,使并行机的研究从初期就呈现出一副欣欣向荣的局面。

3) 同步并行计算成熟期,异步并行计算实践期(20世纪80年代)。各种规模的巨型机、超立体机和脉动机迅速问世,并相继投入使用。例如,日立公司的S-820/80巨型机、Intel公司的Ipsc簇超立体机、H. T. Kung研制的Warp脉动阵列机。

4) 异步并行计算技术成熟期(20世纪90年代以后)。NEC研制出第一台日本生产的超级并行向量处理机SX-3,其每台机器含有4个处理器,每个处理器含有4条数据流水线,共有4G内存。

(2) 并行计算机结构。大型并行机系统的结构模型一般可分为6类:单指令多数据流机SIMD(Single-Instruction Multiple-Data);并行向量处理机PVP(Parallel Vector Processor);大规模并行处理机MPP(Massively Parallel Processor);对称多处理机SMP(Symmetric Multi Processor);分布共享存储多处理机DSM(Distributed Shared Memory);工作站机群COW(Cluster of Workstation)。

1) SIMD:这种结构并行系统中,处理机同步执行相同的指令流,不同的数据流。

2) PVP:系统由专门设计的高带宽网络及定制的处理器组成,一般采用共享存储方式。

3) MPP:大型计算机系统,处理节点采用商品微处理器,采用分布式存储方式及专门设计的高带宽、低延迟网络。

4) SMP:与MPP不同的是采用共享式存储方式,每个处理机可等同地访问共享存储器和I/O设备。

5) DSM:通过网路互联分布在各节点中的局部存储器,从而形成一个共享的存储器。

6) COW:是近年来发展势头很好的一种体系结构。这类机型的技术起点比较低,用户甚至可以自己将一些服务器或微机通过以太网连接起来,配以相应的管理、通信软件来搭建Cluster。但是如果构造高性能、结构合理并具有好的RAS特性的Cluster却不是一件容易的事情。它使用的是常见的硬件设备,像普通PC、以太网卡和集线器,很少使用特别定制的硬件和特殊的设备。国内外几乎所有的计算机厂商都有自己的Cluster集群产品,如IBM的Cluster1350、联想的深腾系列及曙光的天潮系列等。Cluster系统通