

太湖生态动力学 模型研究

李一平 唐春燕 罗 缙 王 华 逢 勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

太湖生态动力学 模型研究

李一平 唐春燕 罗 缙 王 华 逢 勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对目前太湖富营养化特征以及数值模拟的关键难点,基于太湖实际情况,将野外实测资料、物理实验和数值模拟相结合,对湖流、波浪、悬浮物、水质、藻类等影响太湖生态环境的驱动因子进行深入研究,耦合各个影响因子,建立太湖水生态动力学模型,为太湖富营养化治理和健康水生态系统重建提供了科学依据。

本书可供环境科学与工程、水文学与水资源、环境水利学等学科的科研人员和相关专业的研究生,以及水利部门、环境保护部门、城市建设管理部门等技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖生态动力学模型研究 / 李一平等著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5170-2312-8

I. ①太… II. ①李… III. ①太湖—生态学—研究
IV. ①P942.530.78

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第192443号

书 名	太湖生态动力学模型研究
作 者	李一平 唐春燕 罗缙 王华 逢勇 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 (发行部)
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13.25印张 252千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

太湖是我国第三大淡水湖泊，具有蓄洪、供水、灌溉、航运、旅游等多方面功能，是流域的重要供水水源地，不仅担负着无锡、苏州、锡山、吴县、吴江、长兴、宜兴、武进等市的城乡供水，还通过太浦河向上海供水并改善黄浦江上游的水质，其供水服务范围超过 2000 万人，占太湖流域总人口的 55% 以上。然而，随着经济的发展，太湖面临着严重的湖泊富营养化问题。为了控制太湖水体污染，缓解湖泊富营养化进程，必须对太湖富营养化的产生机理，蓝藻可能暴发的时间和影响程度等进行模拟与预判，必须对正在采用的或拟采用的污染控制措施在太湖水生态环境的改善效益方面进行综合评估，而建立高精度水生态动力学模型是完成上述任务的重要工具和手段。

本书深入研究了光照、水温、水动力、悬浮物、水质、透明度等因子对太湖富营养化的影响机理，建立了各个因子的数学模型并进行有机耦合，建立了太湖水生态动力学模型，主要研究成果有：①利用实测太湖波流场数据，分析湖流和波浪相互作用和相互影响效果，耦合波浪模型和湖流模型，建立考虑太湖波流综合作用的水动力模型，并对水动力模型参数及主要外部输入条件进行不确定性和敏感性分析；②建立太湖悬浮物模型，在悬浮物模型中综合考虑波浪和湖流对底泥起悬的影响，并将底床附近底泥的起悬量和沉降量分开处理，引入底泥起悬条件，动态模拟波流作用下悬浮物浓度的变化规律；③基于湖流、波浪、悬浮物、水质、藻类等因子实验观测数据，耦合各影响因子，建立太湖水生态动力学模型；④研究引江济太调水工程对太湖富营养化的改善效果，包括风场和调水流量对太湖环境效益改善的贡献，基于多目标函数，研究最佳调水路线组合和最佳调水流量。

全书共分为7章，第1章为太湖水生态动力学模型研究概况；第2章为太湖湖流观测与模拟；第3章为太湖波浪观测与模拟；第4章为太湖悬浮物及透明度观测与模拟；第5章为太湖水质及富营养化特征与模拟研究；第6章为太湖湖体水环境容量计算；第7章为引江济太调水工程对太湖富营养化改善效果研究。

本书主要撰写人员为李一平、唐春燕、罗缙、王华和逢勇。第1章由李一平、唐春燕、万榆、李梦迪撰写；第2章由李一平、王华、王莹撰写；第3章由李一平、罗缙、滑磊、赵坤撰写；第4章由李一平、逢勇、邱利撰写；第5章由李一平、杜薇、薛偲琦、李梦迪撰写；第6章由逢勇、范丽丽、胡开明、章双双撰写；第7章由李一平、唐春燕、郝文彬、王静雨撰写。

本书旨在促进和提高浅水湖泊富营养化以及水生态动力学模型等领域的研究深度与水平，主要面向水利、环境保护等部门的工作人员，环境科学、环境水力学以及生态学等相关专业的科研人员及研究生。

本书出版获得国家自然科学基金（51379061）、江苏省自然科学基金（BK2013137010）及国家水专项〔太湖流域（江苏）控制单元水质目标管理与水污染物排放许可证实施，2012ZX07506-002〕共同资助，在写作过程中，广泛听取了众多专家、学者和管理人员的宝贵建议。同时，中国水利水电出版社为本书的出版给予了很多帮助，付出了辛勤的劳动，在此一并表示最诚挚的感谢。

由于时间及对该领域研究认识水平有限，书中可能存在一些不足与错误之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2014年5月

目 录

前 言

第 1 章 太湖生态动力学模型研究概况	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 主要研究内容	13
第 2 章 太湖湖流观测与模拟	15
2.1 太湖湖流观测	15
2.2 太湖湖流模型参数和外部输入条件不确定性与敏感性分析	21
2.3 太湖湖流模拟研究	39
2.4 本章小结	45
第 3 章 太湖波浪观测与模拟	47
3.1 太湖波浪观测	47
3.2 太湖波浪数值模拟	54
3.3 本章小结	71
第 4 章 太湖悬浮物及透明度观测与模拟	72
4.1 太湖悬浮物和透明度观测资料分析	72
4.2 波流共同作用下太湖悬浮物模拟研究	79
4.3 太湖透明度影响因子分析	92
4.4 方法一：太湖透明度模拟研究	97
4.5 方法二：基于生物—光学的水体透明度模型	105
4.6 两种太湖水体透明度计算模型结果比较	108
4.7 基于生物—光学的水体透明度模型应用——太湖典型沉水植物 恢复潜力分析（以夏季为例）	109
4.8 本章小结	112
第 5 章 太湖水质及富营养化特征与模拟研究	114
5.1 太湖水质特征	115
5.2 太湖水质模拟研究	129

5.3	多元线性回归模型	141
5.4	太湖藻类生长的人工神经网络模拟	144
5.5	太湖富营养化生态学模型研究	149
5.6	本章小结	157
第6章	太湖湖体水环境容量计算	160
6.1	太湖水环境容量计算方法	160
6.2	太湖设计水文条件选取	161
6.3	太湖水环境功能区划分	164
6.4	本章小结	174
第7章	引江济太调水工程对太湖富营养化改善效果研究	175
7.1	引江济太工程概况	176
7.2	引江济太效果评估方法	177
7.3	引江济太工程对太湖富营养化改善效果评估	179
7.4	引江济太工程对太湖富营养化改善效果讨论	187
7.5	本章小结	190
	参考文献	192

第 1 章 太湖水生态动力学模型研究概况

1.1 研究目的及意义

太湖是我国第三大淡水湖泊,随着经济的高速发展,大量污水的汇入和对湖泊的不合理利用,如围湖造田、高密度的围网养鱼、过度捕捞水生生物资源等,使得湖泊多样性锐减,原有的生态结构和功能受到破坏,生态系统逐步退化,水体自净能力下降,水体及底泥中污染物及营养盐含量增高,太湖水质日趋恶化,出现了严重的富营养化现象,影响了湖区的经济发展和人民的生活水平^[1]。为了控制太湖富营养化,获取稳定、健康的水生态系统,必须控制太湖藻类生长,对藻类生长的条件、生长环境等进行深入研究。由于藻类生长受光照、水温、水动力、悬浮物、水质、透明度等诸多因子的影响,所以必须在对各影响因子深入研究的基础上,进行其相互作用、相互影响的耦合研究。本书在实测资料的基础上,综合考虑光照、水温、水动力、悬浮物、水质、透明度等影响因子的变化特征和迁移机理,建立了太湖湖流和波浪综合影响的水动力模型;并在此基础上,建立了水动力作用下太湖悬浮物、透明度、水质、富营养化迁移传输模型,计算了太湖各功能分区的水环境容量;另外通过建立太湖水动力模型,研究了引江济太工程对太湖富营养化改善的效果,以期对太湖生态修复和富营养化治理提供技术支持。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 湖泊水动力学研究回顾

湖泊水动力学是湖泊科学的一个重要组成部分,其主要动力过程——湖流、波浪等对大气、水土界面的物质交换和水体中各物质、能量的传输及转化过程有着直接影响,是水环境研究的基础。但由于湖泊波浪、湖流等要素在时间、空间上同步,长系列及高分辨率资料的获取难度很大,特别是湖流受风场的影响很大,其量级又低,观测十分困难,并且湖泊水深一般都较浅,在水体垂直方向动力混合作用十分强烈,所有这些都加大了湖泊水动力学研究的

难度^[2]。

湖泊水动力学的研究方法有野外观测、物理模型模拟及数值模型模拟等。前两种方法因受人力、物力、观测手段等的限制,很难系统地开展研究或在短时间内得出合理的结论,而数值模型模拟方法随着计算机技术及计算数学的发展,精细而全面地模拟水体运动过程已能够实现,再加上其耗资少,不受时间限制等优点,越来越受到重视。因此,发展一个能够适用于湖泊水动力学的通用数值模型以推动湖泊环境学和水生生态学研究的深化,是一个重要的课题。目前,常见的湖泊水动力数学模型可分为三大类,即整层积分的二维模型、多层模型和三维模型。整层积分模型适用于垂直混合强烈,不存在明显密度分层的浅水湖泊,如 Hutter^[3]的康斯坦思湖环流模型;多层模型中水体被分成若干层次,在每一层对方程进行积分,将三维问题转化为若干个二维问题进行求解,如 Simons^[4]的大面积湖泊环流模型;三维模型适用于一些三维水流研究,如逢勇等(1994)^[5]研究的地形因子对太湖环流影响的模型,朱永春等(1998)^[6]建立的太湖梅梁湾三维水动力模型和藻类飘移模型。

1.2.1.1 湖流研究综述

湖流是最重要的动力学指标之一,它决定着各类物质如泥沙、污染物质和各种营养元素在湖泊中的输移和扩散。其平流作用及涡动传输使得各类物质在水平空间重新分布,而垂直对流则使得各类物质在垂直方向上分布趋向一致。根据湖流形成的动力机理,通常将湖流划分为风生流、吞吐流(倾斜流)及密度流。在绝大多数水体中,密度流的流速量级较前两者小得多。如在太湖,由于其湖盆浅平,出入河浜港汊众多,主要出湖河流均建闸控制,除汛期外湖泊的吞吐流和密度流都较弱,风生流是形成太湖湖流的主要机制。

最早从事完整的湖泊水动力数值模拟的是 Simons (1973)^[4],他建立了二维安大略湖冬季环流的数值模型,讨论了地球自转、非线性加速项、侧边界条件、底部地形、动量的侧边界扩散及不同底摩擦的特点,而且还简单地谈及三维流体力学方程的构型,Onnish 和 Imasato (1979)^[7],Endon (1986)^[8]使用水动力模型和验证手段对日本琵琶湖进行了系统而深入的研究,基本弄清了琵琶湖各种水动力过程的特征及形成机制,为保护琵琶湖的生态环境提供了依据。Cheng (1970)^[9]建立了北美洲伊利湖的风生环流模型,Baucer 和 Graf (1979)^[10]建立了欧洲 Geneva 湖的模型,Walter (1979)^[11]建立了北美洲伊利湖和安大略湖的水动力模型,这些模型对深入研究湖体内部诸要素的相互关系是非常有意义的。Murthy 等 (1986)^[12]设计了一种嵌套网格系统,模拟了北美洲安大略湖尼亚加拉河河口羽状扩散的动力和传输,系统中有粗、中、细 3 种网格,分别用于整个安大略湖、河口附近区域及河口,这种系统较好地处理了大小尺度的协调,节约了大量计算时间,具有很大适用性。Casulli 于 1990

年在第八届国际水动力学计算大会上,对二维浅水湖泊水动力学差分计算方法进行了总结,讨论了各方法的优缺点。Hutter^[13]在1991年对水动力方程组在不同湖泊适用范围进行了探讨。近年来,湖泊水动力数值模型的研究又有了长足的进展,澳大利亚水科学中心利用海洋水动力模型开展了日本琵琶湖的水动力研究,Kresimit Zic (1993)^[14]建立了日本琵琶湖三维斜压水动力数值模型,详细模拟了湖泊环流结构及内波,但使用的风资料是湖中某一点的,不能代表湖中实际风场。为了克服模态分裂法和ADI法的不足,意大利学者Vincenzo Casulli^[15-18]发展了半隐半显差分方法,抛弃了模态分裂法,直接对原始标量的控制方程进行离散,然后用半隐式技术求解。Standy和Llyod (1995)^[19]将Casulli的半隐半显差分格式推广至求解 σ 坐标下的三维浅水方程,弥补了固定分层带来的在近表面和近底部分辨率不高的缺点。为了建立更完善的三维水动力学方程,Stansby (1997)^[20]进一步将K-epsilon湍流模型纳入其三维模型,在差分离散时采用了有限体积法,成功地模拟了岛屿绕流的尾涡演变。随着计算机及其软件的快速发展,湖流模型在可视化方面也有很大进步,最有代表性的就是丹麦水力研究所的DHI软件。E. Kock^[21]曾对丹麦Odense海湾进行了三维模型系统的研究,建立了水动力模型和富营养化模型,成功模拟了水位、流场以及叶绿素、溶解氧、底栖大型植物、藻类的生物量。另外,以普林斯顿大学Mellor教授为首的海洋动力环境数值模拟小组从20世纪80年代开始一直致力于从事三维实质模拟的开发与应用研究,其代表软件为POM (Princeton Ocean Model)。该模型在垂直方向采用 σ 坐标系,在水平方向采用正交曲线坐标系及Arakawa C差分网格^[22-29]。POM采用模态分离法,将带自由面的三维流动问题分成表面波的传播问题(外模态)和内波的传播问题(内模态)以提高效率,目前这一模型已得到广泛的应用。

20世纪80年代后,我国学者在湖泊水动力学方面的研究也取得了较大的进步。吴坚(1986)^[30]在国内首次设计了整层积分的二维浅水湖泊水动力模型,采用不规则网格有限差分法,具有能确切地拟合湖岸、河口、湖底地形及岛屿的功能,将模型应用于太湖得到了太湖风生流、风涌增减水等很有意义的结果。王谦谦(1987)^[31]用二维差分模型模拟了定常风作用下太湖风生流的各种特征,将太湖形成的稳定流场分为3种类型:反时针环流型(南风、西南风、西风),顺时针环流型(北风、东北风、东风),插花型(东南风、西北风)。姜加虎(1991)^[32]用一个二维分层积分和一个二维整层积分的数值模拟方案,系统地讨论了抚仙湖、滇池环流的形成机制,分析了具有温度层结湖泊(抚仙湖)中内波以及上、下层流场的时空变化特征及其与湖区风场的关系。王谦谦等(1992)^[33]建立了一个嵌套网格的二维水动力模型对太湖和太浦河口风成流、风涌水作了数值模拟,得到了很好的结果。刘启峻(1993)^[34]以守恒

形式的二维水动力学方程组为基础,采用 Tabata 的迎风有限元法模拟了太湖,特别是太湖梅梁湾处在各种风况下的湖水运动规律,验证了太湖稳定流场分3种类型的正确性。

以上这些工作因未考虑垂直方向的切变,基本局限于研究定常、均匀风场下风生流的变化特征,只能反映整层平均情况。由于湖泊在垂直方向上也存在强烈的切变和混合作用,故许多的环境要素如溶解氧、叶绿素、光强度及浊度等都存在较大的垂直梯度,这就要求必须建立三维水动力学模型来模拟实际的湖泊水动力特征。

梁瑞驹等(1994)^[35]于1994年使用三维模型模拟太湖,采用有限差分法,垂向分为4层,并在垂直方向上使用了坐标变换技术,将任一节点的实际水深转换成无量纲水深,有效消除了因风力作用造成的自由水面波动和湖底不规则的影响。其结果显示,表层流速较大,流向与风向相同,第3层、第4层流向与表层相反,第2层为过渡层,流向变化较大。张利民等(1994)^[36]建立了一个深水湖泊的三维水动力模型,考虑非均匀局地风场影响,对日本琵琶湖的环流形成机制进行了比较深入的分析。逢勇等(1994)^[37]采用浅水波方程数值模型,考虑太湖局地风场的影响,模拟了太湖风生流、风涌水的变化情况,模拟结果与实测值符合较好。逢勇等^[37]还采用三维水动力学模型,研究了地形因子对太湖环流的影响,指出洞庭湖西山和洞庭湖东山间狭长的过道区是产生太湖大范围环流的重要原因。

这些三维模型使人们对湖泊中的分层现象有了进一步的认识,但有时应用不是很方便,如在水深变化比较大的湖泊,浅水区的层数可能减少。层面不同,模型的侧边界条件位置不同,使计算程序的设计比较困难,程序适用性受到一定限制,难以较好地反映湖流的垂直结构。为了解决以上模型的缺点,一种垂直方向的压缩 σ 坐标被从最初海洋研究应用到湖泊动力学的数值研究。该方案1983年由 Durance、Hughes 等^[38]应用于欧洲北海,1994年朱耀华^[39]把它应用于我国渤海、黄海、东海的海洋环流研究。1994年梁瑞驹^[40]应用了 σ 模型计算太湖风生流。1996年刘兴泉^[41]做了苏北冬季环流的数值模拟。1997年朱建荣等^[42]模拟了夏季苏北沿岸流场变化。1998年胡维平^[43]应用了 σ 模型的完整方程模拟了“9711”号台风对太湖水位及流场的影响,计算结果与观测值符合较好。1998年胡维平等^[44]用此模型模拟了太湖各种不同风场对湖流的影响,比较了整层平均流场与分层流场的差异,对浅水湖泊的二维模型作出了客观的评价。王惠中等(2001)^[45]建立了一个考虑垂直涡黏系数非均匀分布的太湖风生流准三维数值模型,采用交错网格技术布置各物理量和改进型的ADI法,通过对稳定和不稳定风场作用下太湖流场的模拟计算发现,垂直涡黏系数沿水深变化对水位的计算影响不大,但对流速的垂向分布和底床切应力

的计算有较大影响。刘晓东 (2002)^[46] 建立了一个四叉数网格二维水流及物质运输的数学模型, 采用四叉数网格布置, 实现了网格的边界加密和重要局部的加密, 对实际水域边界的复杂流场及浓度场的模拟效果较好。李一平等 (2003)^[47] 建立了一个三维水量、二维水质的模型, 研究了太湖风生流的特点, 并采用套网格技术, 对梅梁湾的流场进行了精细模拟, 详细地反映了局部流场的状况。罗澈葱 (2004)^[48] 利用实测资料和三维数学模型对太湖的湖流进行了综合系统地描述, 对全面了解太湖湖流特征提供了参考。Xiaobo Chao 等 (2004)^[49] 建立了一个牛轭湖三维浅水水流—水质数学模型, 对密西西比州的 Deep Hollow 湖进行了模拟。Deep Hollow 湖湖流主要是风生流, 模型模拟了由风生流引起的物质扩散, 并与现场测试的数据进行对比验证, 结果表明, 模拟结果与实测结果吻合较好。T. C. Lackey (2005)^[50] 提出浅水方程数值计算的水位修正方法放宽了对离散时间步长的限制。胡维平等 (2006)^[51] 建立了交错网格三维垂向无量纲化水动力模型, 阐明了太湖湖流结构特征。范学平、曾远 (2008)^[52] 应用 COHERENS 模型对苏北海州湾水域进行三维湖流模拟。刘晓波等 (2009)^[53] 建立了感潮河段的三维水动力模型, 能充分反映感潮河段水位以及水流流速随时间的变化情况。熊文等 (2012)^[54] 建立了太湖藻类生长模型。卫志宏等 (2013)^[55] 建立了三维水动力模型, 研究了典型风场下全湖及局部湖湾的特征流态。

1.2.1.2 湖泊波浪研究综述

波浪不仅在水工设计 (如港口设计、大坝设计) 中极为重要, 而且对湖泊环境也影响很大。波浪不仅能够产生较强的风涌流, 而且对湖底表层的浮泥还具有扰动侵蚀作用, 特别是大风浪时湖底大量浮泥会发生再悬浮, 使湖泊透明度发生剧烈变化, 并且波浪对湖岸也有较强的侵蚀作用。就太湖而言, 由于湖面开阔, 水深较浅, 风能量易于传给整个水层, 使得风生浪对风速的变化响应很快。在一般天气时, 风浪在 50cm 左右, 当风达 5~6 级时, 波高可达 1m 左右, 波长 4~7m, 最大可达 8m 以上^[56], 波浪可垂直侵蚀湖底, 故风浪对湖泊水动力的影响必须在实际工作中加以重视。

在湖泊波浪研究方面, 目前国内外大都借用海洋研究的某些成果。乔树梁 (1989)^[57] 采用电容式浪高仪对东太湖波浪进行了观测分析, 指出由于湖泊风区短, 风要素变化明显, 使得东太湖的风浪谱比海洋中观测得到的 P-M 谱、Neuman 谱图形窄而高。王其冬 (1987)^[58] 根据观测资料对太湖的风浪成因进行了分析, 对水气边界处的动量传输问题进行了探讨。张文华等 (1992)^[59] 对太湖的风浪进行了统计特征分析, 根据观测到的风浪资料建立了太湖风浪预报经验公式。逢勇等 (1996)^[60] 利用 1992 年在太湖北岸马山地区测得的浅水风浪资料, 采用 FFT 法求算风浪频谱, 对湖区谱结构特征有了一些新的认识,

并给出了在充分成长状态下以风要素为参数的风浪谱表达式。逢勇等 (1995)^[61] 还利用 1992 年在太湖马山地区测得的风浪资料, 采用由能量平衡方程导出的浅水风浪公式对太湖水底摩擦系数进行了估算。濮培民、逢勇等 (1994)^[62] 对计算湖中动量、热量垂直交换系数的方法进行了探索。

为了弄清太湖波浪要素的统计特征, 乔树梁等 (1996)^[63] 利用在太湖梅梁湾马山的波浪观测资料, 对波高和波周期的分布规律进行了分析, 基于瑞利分布的原理, 得出了太湖波高的概率密度分布遵循的关系式为

$$f(x) = \frac{\pi}{2(1+0.275x_0)(1-0.95x_0)} x^{\left(\frac{1+0.95x_0}{1-0.95x_0}\right)} \times \exp\left[-\frac{\pi}{4}(1+0.275x_0)x^{\left(\frac{2}{1-0.95x_0}\right)}\right] \quad (1.1)$$

式中: x 为无量纲数 $H/\bar{H}$ (H 为波高, $\bar{H}$ 为平均波高); x_0 为与水深有关的无量纲数 $\bar{H}/d$ (此处 d 为水深)。

利用同样资料, 陈国平等 (1999)^[64] 又对太湖的波浪谱进行了分析, 对比了自相关函数法、快速傅里叶变换法 (FFT) 和最大熵谱法 (MEM) 三者波谱分析方法的不同特点, 认为前二者基于相同原理, 计算结果亦相近, 相比之下, MEM 法避免了一些不切实际的假设, 不需要使用窗函数, 减少了谱泄漏, 分辨率较高, 在样本容量较小时亦能得出较为满意的结果。此外, 逢勇等 (1996)^[60] 采用 FFT 方法进一步作了计算, 结果说明太湖北岸的风浪谱比海洋中 P-M 谱陡而窄, 在平衡范围谱值按 -4.0 呈幂指数衰减。乔树梁等 (1996)^[63] 使用相同资料, 提出了如下计算太湖风浪参数的方法:

$$\frac{g\bar{H}}{w^2} = 0.22 \operatorname{th}\left[0.45\left(\frac{gh}{w^2}\right)^{0.75}\right] \operatorname{th} \frac{0.00168\left(\frac{gF}{w^2}\right)^{0.42}}{0.22 \tanh\left[0.530\left(\frac{gh}{w^2}\right)^{0.75}\right]} \quad (1.2)$$

$$\frac{g\bar{T}}{w^2} = 12.5\left(\frac{g\bar{H}}{w^2}\right)^{0.5} \quad (1.3)$$

式中: w 为风速; h 为水深; F 为风的吹程; g 为重力加速度; $\bar{H}$ 和 $\bar{T}$ 分别为平均波高和平均波周期。

根据式 (1.2) 和式 (1.3), 可求出平均波高和波周期。

罗澈葱等 (2004)^[48] 在前人研究的基础上, 将几种常用的适合任何水深的风一波模型, 如 SMB 法、井岛法和莆田实验站法等几种方法进行了比较, 并在太湖中加以应用并比较。最后分析比较得出 SMB 模型的模拟效果最好, 可用来计算太湖风波, 但必须进行参数校正。使用同样资料, 将该模型校正为

$$\frac{gH_s}{w^2} = 0.189 \operatorname{th}\left[0.530\left(\frac{gh}{w^2}\right)^{0.75}\right] \operatorname{th} \frac{0.0125\left(\frac{gF}{w^2}\right)^{0.42}}{\tanh\left[0.530\left(\frac{gh}{w^2}\right)^{0.75}\right]} \quad (1.4)$$

$$\frac{g\bar{T}}{2\pi w} = 1.20 \operatorname{th} \left[0.833 \left(\frac{gh}{w^2} \right)^{0.375} \right] \operatorname{th} \frac{0.077 \left(\frac{gF}{w^2} \right)^{0.25}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gh}{w^2} \right)^{0.375} \right]} \quad (1.5)$$

式中： H_s 、 $\bar{T}$ 为有效波高、平均波周期； h 、 w 与 F 为实际水深、风速和风的吹程，风的吹程根据风向取 x 和 y 方向连续水面网格所构成的直角三角形的斜边长度。

胡维平等（2005）^[65]通过用无量纲分析和线性回归方法对2002—2003年太湖4测点1000多组波浪资料进行分析，给出了太湖不同时段风浪平均波高（ H ）与风区长度（ F ）、水深（ d ）、风速（ w ）6个关系模型。在此基础上，开展了模型的误差分析及与前人模型对比。结果表明，太湖北部不同区域风浪平均波高的计算应选用不同计算模型，可用如下形式表示为

$$\frac{gH}{w^2} = a_1 \left\{ a_2 \operatorname{th} \left[a_3 \left(\frac{gh}{w^2} \right)^{a_4} \right] \operatorname{th} \left\{ \frac{a_5 \left(\frac{gF}{w^2} \right)^{a_6}}{a_2 \tanh \left[a_3 \left(\frac{gh}{w^2} \right)^{a_4} \right]} \right\} \right\}^{a_7} + a_8 \quad (1.6)$$

式中： $a_1 \sim a_8$ 为和地形及水生植物覆盖度等相关的参数。

误差分析结果显示：离岸距离大于1km区域的参数 $a_1 \sim a_8$ 的取值分别为0.217456、1.0、0.15、0.6、0.09、0.6、1.0、0.0052，模型估算平均波高的误差小于24%；近岸区参数 a_7 大于1， a_8 取0， a_4 取值介于0.6~0.72， a_5 介于0.00131~0.00168。但该模型估算平均波高的误差较大，表明近岸区波浪还需进行进一步的观测研究。

利用非稳态波浪模型对太湖波浪模拟的研究工作也正在慢慢开展。李一平等（2008）在太湖实际波浪观测基础上，采用第三代动谱能量平衡方程，考虑实际水底地形、波浪折射、浅化、反射、破碎、湖流等条件下，模拟太湖波浪场，结果表明，波高、波长、波周期等波浪参数在太湖的分布与风速、风向、水深等因素密切相关。刘兴平（2009）^[66]建立了基于动谱能量平衡方程的SWAN波浪模型和湖流三维模型，分别对太湖波浪和湖流的生消过程进行动态模拟，并研究太湖湖流对波浪的影响。周杰源（2011）^[67]采用基于非结构网格的第三代动谱能量方程对太湖波浪场进行了数值模拟。许遐祯等（2013）^[68]以均匀风场为驱动，利用SWAN模型模拟太湖波浪场，方向与波向具有高度一致性，并且进行了风场对波浪场的敏感性分析，得出风向的改变对湾区及西山岛附近狭长水域的波浪频谱形状影响较大。但是至于将湖泊波浪模型和湖流模型耦合起来，考虑波流共同作用下太湖湖体内物质迁移扩散过程的模型，报道较少，这是今后湖泊水动力模型的发展方向。

1.2.2 水质数值模型研究综述

水质数值模型是指对污染物质在水环境中因物理、化学、生物作用而发生变化的规律及影响因素之间相互关系的数学描述,是定量描述污染物质在水体中迁移转化规律的数学方程。应用水质模型的数学方程,可定量地进行水环境质量的模拟和预测,由此可以对河流、湖泊开发过程中水环境影响进行评价,进行水环境容量的计算,并制定水体水污染总量控制方案或控制规划,实施水环境目标管理等。水质模型的研究涉及水环境科学的许多基本理论问题和水污染控制的许多实际问题,它的发展在很大程度上取决于污染物在水环境中的迁移、转化和归宿研究的不断深入,以及数学手段在水环境研究中应用程度的不断提高。

最早发展的水质模型是简单的氧平衡模型 (Streeter-Phelps 水质模型,以下简称 S-P 模型)。1925 年,美国的两位工程师 Streeter 和 Phelps 在分析美国 Ohio 河流污染源及其造成的可度量影响的研究中,提出了氧平衡模型的最初形式。在该模型中,他们假定河流的自净过程中存在两个相反的过程,即有机污染物在水体中发生生物氧化反应,消耗水中溶解氧,其速率与水中有机污染物浓度成正比;同时大气中的氧不断地进入水体,其速率与水中的氧亏值成正比。在这两个相反过程的作用下,水中溶解态氧达到平衡。该模型最初被应用于城市排水工程的设计和简单水体自净作用的研究^[69]。

自水质模型在 20 世纪初诞生以来,其发展阶段有许多不同的分类方法。叶常明^[70]把水质模型的发展分成 3 个阶段,即简单的氧平衡模型阶段、形态模型阶段和多介质环境综合生态模型阶段。而谢永明^[71]把水质模型的发展分成 5 个阶段:1925—1960 年为水质模型发展的第一阶段,这一阶段以 S-P 模型为代表,后来科学家在其基础上成功地发展了 BOD-DO 耦合模型,并应用于水质预测等方面;1960—1965 年,在 S-P 模型的基础上又有了新的发展,引进了空间变量,物理系数、动力学系数。温度作为状态变量也被引入到一维河流和湖泊模型。水库(湖泊)模型,同时考虑了空气和水表面的热交换,并将其用于比较复杂的系统;不连续的一维模型扩展到其他输入源和漏源是水质模型的第三阶段,1965—1970 年期间进行的研究,其他输入源和漏源包括氮化合物好氧(NOD)、光合作用、藻类的呼吸以及沉降、再悬浮等,计算机的成功应用使水质数学模型的研究取得了突破性的进展;在 1970—1975 年期间,水质模型已发展成相互作用的线性化体系,生态水质模型的研究初见端倪,有限元模型用于二维体系,有限差分技术应用于水质模型的计算;在最近 20 多年中,科学家的注意力已逐渐地转移到改善模型的可靠性和评价能力的研究上。

20 世纪 50 年代开始,由于电子计算机技术的应用和水环境科学的发展,

氧平衡数学模型有了较大发展,尤以 O'Connor 和 Dobbins 的工作最为重要。他们在模型中考虑了氧化物和底泥的作用,从而在包括模型的参数和模型的求解技术方面都有了较大的发展。在此基础上,Grenney 开发了美国环保局推荐使用的 QUAL-II 水质模型,这是一种较为复杂的非线性氧平衡生态模型。该模型中包括 13 个状态变量,有水温、溶解氧、生化需氧量、藻类(以 Chl-a 计)、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、可溶性磷、大肠杆菌、任选一种可降解物质和 3 种任选的非降解物质,并建立了差分法求解技术和电算程序。该模型已经被成功地广泛应用于河流水质预测和水质管理规划中。

20 世纪 80 年代以来,随着对水环境的变化复杂性的认识的深化,各相关学科相互渗透、相互激励,水环境数值模型的研究进入到多介质环境综合生态系统。多介质环境是指大气、水体、土壤、生物等组成的总环境体系,其中水体是核心。模型内部结构为多种相互作用的非线性系统,空间维数已发展到三维,该模型认为污染物排放到自然环境后,将通过各种途径在环境各介质中传播、演变和分配,对环境的影响与它们在各种环境单元中的浓度水平和停留时间密切相关。因此,非常重视对于环境相边界(如大气、水、土壤等)的迁移以及它们在环境中的积累对环境潜在影响的研究。龚政等(2002)^[72]应用二维模型模拟海州湾水域的潮流场,分析了该水域的潮波运动规律。以海州湾顶的临洪口为陆源污染源,用数值方法求解物质扩散方程,分析在不同风场条件下湾内污染物平均浓度随时间的变化。田恬、魏皓等(2003)^[73]考虑物理过程的驱动,耦合浮游植物在生长、死亡及代谢过程中对营养盐的吸收和补充等因素,建立一个生物-物理耦合的三维营养盐动力学模型,模拟黄海无机氮、活性磷酸盐和 Chl-a 的年循环规律,估算了黄海营养盐的收支情况和季节差异。李一平等(2004)^[74,75]以太湖为研究对象,利用环形水槽内模拟了太湖底泥的起动规律,建立了底泥中 TN、TP 的释放通量与水体流速的关系,并在水质模型中加以应用,取得了较好的效果。2004 年,Bonnet 等^[76]应用三维水质模型(EIMO)对澳大利亚 Burragorang 湖的营养盐和 Chl-a 指标进行了预测,尤其是针对短期现象(如洪水、强风)对湖泊中浮游植物、Chl-a 的影响进行了计算,结果表明,该三维模型能作为水质管理的有效工具。2005 年,Robson 等^[77]使用 ELCOM-CAEDYM 模型对澳大利亚 Swan 河口的一次连续降雨后蓝藻的生长过程进行三维模拟,成功找出了影响生长的主要因素为盐度和温度。Zeren 等^[78]于 2006 年以丹麦 Fure 湖为例,分别对使用 3 种生态方法改善水质的效果进行了计算比较,根据其 Chl-a 和 TP 的削减量找出了最佳水质改善的方法。俞琨(2007)^[79]针对江苏近岸海域实际情况,建立了污染物扩散输移的数学模型,并将其转化为正交曲线坐标系下物质扩散输移方程,将该模型运用于江苏近海至大通道海域的污染物扩散输移过程的数值模拟,以预测大

通道内船舶的石油类污染物浓度的分布及扩散输移过程。2008年重庆市环境科学研究院和重庆大学针对长江嘉陵江重庆段干流和城区江段,分别开发了一维和二维水质数学模型,取得了较好的模拟效果^[80]。随着水质模型研究的深化,多种技术方法如随机数学、模糊数学、人工神经网络、3S(RS、GPS、GIS)、VR技术等应用到水质模型研究中^[81]。李兰等(2011)^[82]利用二维环境流体动力学模型讨论了武汉东湖实施的“引水济湖”工程中,不同的引水方案对东湖水量水质变化影响。多介质环境数学模型可将各种不同的环境单元内部的污染物变化过程与导致污染物跨过介质边界的过程相联系,构成一个能描述在多介质环境中污染物转化和介质间物质迁移的表达式,其实质是从系统环境角度来研究污染物在环境中从宏观到微观的综合效应。

由于水环境条件具有很大的随机性,为了提高模型的精确度和输出结果的可靠性,对模型的不确定性分析方法的研究,是目前和今后水质模型研究的热点之一。Andrews K. Takyi(1999)^[83]为了提高模型的精确度和结果的可靠性,对水质模型中不确定性的来源进行了分析,他认为污染物的排放量和河流背景值的随机性,估计模型参数所需的河流和水质资料的不充分,对污染物传输过程和水质管理系统的简化缺乏充分的认识是导致不确定性产生的原因,并建立了水质管理的多重实现模型(Multiple Realization)。K. Sasikumar等(1998)^[84]在水质模型中引进了模糊数学的思想,并成功地建立了污染负荷分配的模糊模型(the fuzzy waste load allocation model)。该模型在考虑污染控制部门和污染物排放单位之间的利益目标冲突下,能够提供经济的和技术上可行的方案。另外人工神经网络(ANN)和地理信息系统(GIS)近几年也在水质模型内得到了广泛的应用。如T. R. Neelakantan等(2000)^[85]用人工神经网络建立了水库运行的模拟优化模型。Marina Campolo等(1999)^[86]用ANNs来预测河流枯水期的流量并得出结论:当它与水质模型相结合时对河流的水质管理非常有用。Bin Zhang等(2000)^[87]结合贝叶斯概念(Bayesian Concepts)和组合的ANN来预测集水区的径流量。V. Chanramouli等(2001)^[88]用动态规划和ANN来模拟多水库水系的运行方案。William Dixon等(1999)^[89]在优化选取河网取样点时,首先就用地理信息系统(GIS)和成形理论以矩阵形式形成河网的数学描述等。Sharad Kumar Jain(2001)^[90]用ANNs开发了综合的沉淀速率曲线。郭宗楼(2001)^[91]研究了RBF网络在水质评价及湖泊富营养化程度评价中的应用,应用最小二乘法进行网络训练,避免了BP网络计算量大的问题,结果表明,RBF网络的分类能力、逼近能力及学习速度均优于传统的BP网络,在环境质量评价中,该模型评价结果客观、通用性强。苑希民等(2002)^[92]提到将遗传算法与BP结合,综合GA的全局收敛性和BP的局部搜索快速性,用遗传算法初始化网络权重,以避免网络的训练结果极容易