

# 地表水质模型的发展:从维持生存到提升水质质量

尹海龙<sup>1</sup>, 李潇<sup>1</sup>, Steven C. Chapra<sup>2</sup>, 王道增<sup>3</sup>

1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092
2. 塔夫茨大学土木与环境工程系, 美国波士顿 02155
3. 上海大学; 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072

**摘要** 水体污染治理实践表明,水环境质量要从根本上得到改善,需要从区域甚至流域尺度开展系统规划和综合治理。地表水质模型是水环境综合治理方案优化论证的核心技术手段。介绍了地表水质模型从解决水体黑臭到提高水生态质量的4个阶段发展历程,并从经济社会发展和技术驱动两方面展望了水质模型的发展前景。

**关键词** 地表水;水质模型;环境规划;信息技术;水环境综合治理

地表水质模型是描述污染物质在地表水体中混合、随水流输移和迁移转化的数学方程,是地表水环境污染治理规划决策分析的重要工具和有效手段。地表水质模型的作用,在于提供基于污染物总量控制和环境功能区目标的区域水环境综合治理的优化技术方案。例如在20世纪90年代末实施的上海市苏州河水环境综合治理,利用地表水质模型,有效地优化了消除苏州河黑臭的工程技术方案<sup>[1]</sup>。当前,随着中国水环境治理工作的深入推进,区域甚至流域尺度水污染的协同治理越来越受到重视。国家环境保护“十二五”规划中提出,“明确各重点流域的优先控制单元,实行分区控制”、“把主要污染物总量控制要求、环境容量、环境功能区划等作为区域和产业决策的依据”。最新发布的国家环境保护“十三五”规划基本思路中,在继续坚持、深化完善总量控制制度的基础上,提出进一步增加水污染物总量控制的新指标。可以预期,地表水质模型将在水环境治理中发挥越来越大的作用。

## 1 地表水质模型的产生背景与作用

19世纪初,伴随着西方国家工业化、城市化的飞速发展,大量工业垃圾和生活垃圾被排入水体,河水受到严重污染。受工业革命影响,19世纪,伦敦的经济和人口都发生了巨大

变化,人们为了寻求更多的就业机会,纷纷移民至这个在当时(1830—1925年)已经是世界上人口最多的城市。大量涌入伦敦的移民往往定居在人口稠密的贫民窟中,而这些地方常常供水不足,并且卫生设施也存在很大缺陷,生活污水往往不经任何处理直接通过雨水管道排至泰晤士河中。1858年,排至泰晤士河的污染负荷已经超过了水体的环境容量。数不胜数的污水管道和极端炎热的酷暑气候使伦敦这座城市的水面上充斥着垃圾和恶臭,泰晤士河中随处可见动物的尸体和河面上漂浮的垃圾,由此产生的臭气弥漫整个城市,甚至威胁到了政府和立法机构的正常运转。也就在同一时期,霍乱开始在伦敦盛行<sup>[2-3]</sup>。

然而,一直到19世纪末,公众才意识到水源污染才是霍乱传播的根本途径。究其原因,当时城区供水依赖于污染严重的泰晤士河,有的取水点甚至直接对着排污口下游;而供水不足的地方,传统的取水方式(从井水中直接取水)则被广泛采用<sup>[4]</sup>。于是,严重污染的河水和不合理的城市上下水系统设计使霍乱病菌在英国大肆传播,短短几天内死亡人数甚至上百。这一问题促使土木工程师们开始设计规划更合理的城市上水系统,并投身于水厂、城市配水管网和污水收集系统的建设和完善。这些项目的设计目标十分明确,就是为城市居民供给清洁、充足的饮用水,并将居民排放的生活污

收稿日期:2016-11-22;修回日期:2016-12-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07303003)

作者简介:尹海龙,副教授,研究方向为环境水力学和水环境系统工程,电子信箱:yinhailong@tongji.edu.cn;Steven C. Chapra(通信作者),教授,研究方向为地表水水质模型,电子信箱:steven.chapra@tufts.edu

引用格式:尹海龙,李潇,Steven C. Chapra,等.地表水质模型的发展:从维持生存到提升水质质量[J].科技导报,2017,35(3):57-65. doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2017.03.006

水以及工厂排放的工业废水由排水系统收集后排放(图1)。

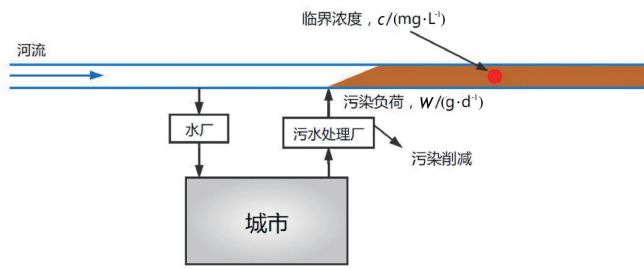


图1 城市上下水系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of urban water distribution and wastewater collection system

在城市给排水系统设计建造好后之后,最初污水未经处理集中排放至水体中。但人们很快发现:这样做不仅不能消除污染,反而会使河流变成比分散排放方式污染更加严重的污水沟。于是,工程师们开始修建污水处理厂,以降低排放到河道中的污染负荷。然而,污水可以仅作简单的沉淀处理,也可以采取更昂贵的物理化学处理手段。虽然后者可以得到相对更为清洁的出水,但开销却十分巨大。于是人们开始寻找这两者之间的平衡点,即找到一个既能有效削减污染、又经济可行的处理方案。

如图2所示,污水处理厂出水排入水体引起的水质变化,须在一个可承受的合理范围内,即不超出水体的使用用途要求。为此,需要建立污水排放负荷( $W$ )与河道接纳污染物之后所允许的最大浓度(即功能区目标对应水质浓度 $C_{goal}$ )之间的函数关系。要找到这种函数关系,就需要建立水质模型,从而确定在满足水体使用用途的前提下,污水厂最大允许排放的最大污染物负荷量。

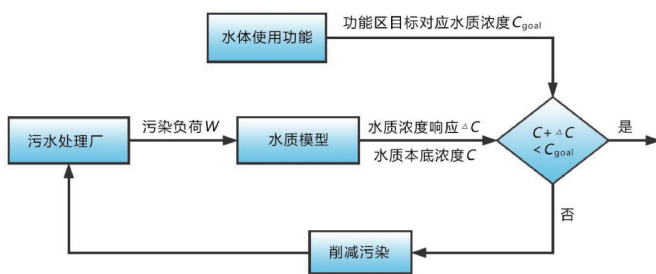
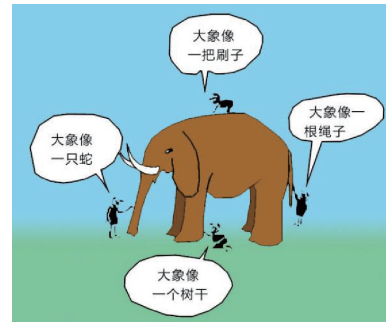


图2 基于水质模型的污染排放控制示意

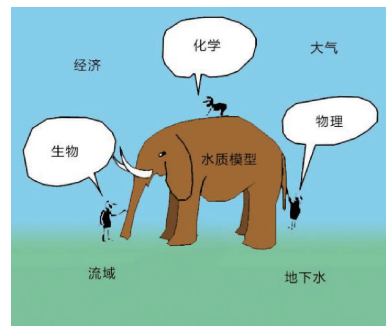
Fig. 2 Schematic diagram of water pollutants control based on water quality modeling

除此之外,建立水质模型还能使人们从一个更加整体的视角看待问题,开展区域水污染综合治理。如图3(a)所示,如果只是从大象单一的部位审视,人们很难看清大象的真正面目;而水质模型能够把与水污染有关的各方面知识相互紧密联系,让人们能够看到“大象”的整体而非局部。有了水质

模型,人们可以将生物、化学、物理等多个学科相互结合起来,从而更深刻地理解水体污染的成因,思考治理污染的最佳方案和手段。目前水质模型还能将水污染与经济、流域、大气、地下水等多个方面的影响综合起来,更好地提供流域尺度的水污染防治方案(图3(b)),如城市和农业化地区径流污染控制等。



(a) 对大象的局限认知



(b) 水质模型的特征

图3 基于系统性思想的水质模型示意

Fig. 3 Presentation of surface water quality modeling based on systematic idea

除此之外,水质模型还具有社会意义,即在不同的组织机构之间起到沟通协调的作用。如图4所示,借助于水质模型,解析污染排放来源和污染排放责任,有助于政府管理机构、环保组织和污染排放单位之间彼此对话,相互达成共识。这样不仅能够有效解决水环境污染问题,还能够防范和化解矛盾,促进社会和谐。

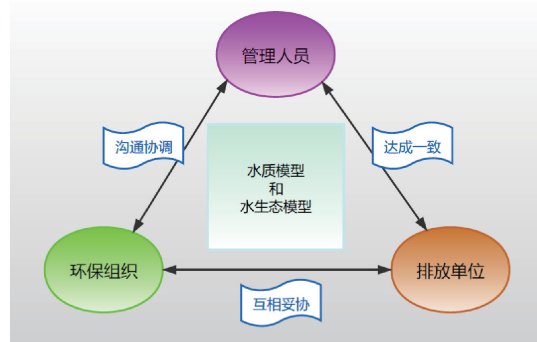


图4 水质模型的社会作用

Fig. 4 Social role of surface water quality model

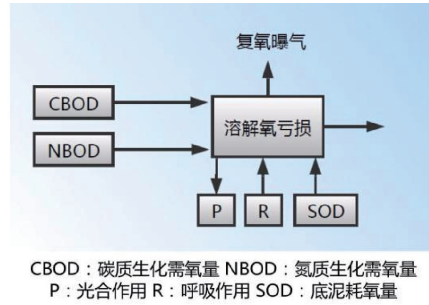
## 2 水质模型的发展历程

水质数学模型自 20 世纪初被创建至今取得了长足的发

展,总体上可以分为4个阶段<sup>[5]</sup>,如图5所示。

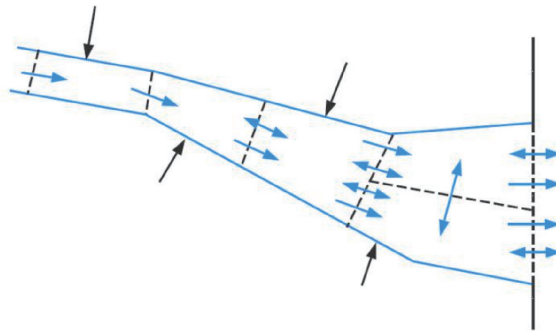
### 1925—1960 (Streeter-Phelps模型)

面临的问题: 污水未经处理排放/  
污水经简单的一级处理后排放  
污染物: 生化需氧量 (BOD) /溶解氧 (DO)  
系统: 河流/河口 (一维)  
动力学: 线性、前馈  
解决方案: 解析法



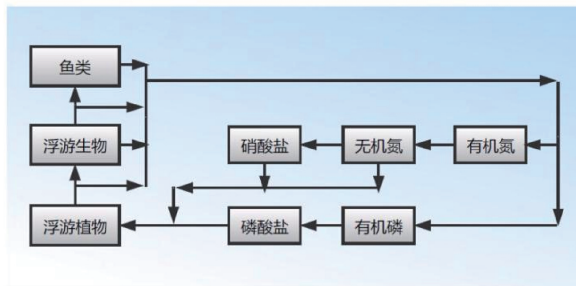
### 1960—1970 (计算机开始在模型中应用)

面临的问题: 污水经一、二级处理后排放  
污染物: 生化需氧量 (BOD) /溶解氧 (DO)  
系统: 河口/河流 (一维/二维)  
动力学: 线性、前馈  
解决方案: 解析法、数值法



### 1970—1977 (生物过程被添加至模型中)

面临的问题: 富营养化  
污染物: 营养盐  
系统: 湖泊/河口/河流 (一维/二维/三维)  
动力学: 非线性、反馈  
解决方案: 数值法



### 1977—现在 (研究有毒物质在水体中的转化)

面临的问题: 有毒物质排放  
污染物: 有机物、金属  
系统: 沉积物和水体的相互作用/  
食物链间的相互作用  
(湖泊/河口/河流)  
动力学: 线性、吸附与解吸平衡  
解决方案: 解析法、数值法

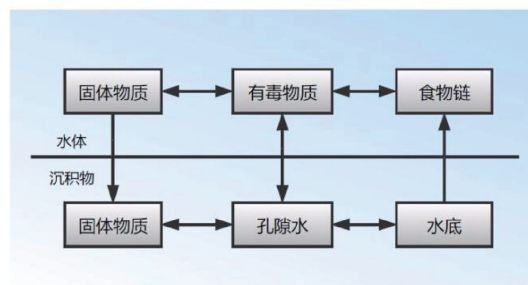


图5 水质模型发展的4个阶段

Fig. 5 Four periods in the development of surface water quality modeling

#### 1) 1925—1960年。

在水质模型发展初期,工作的重心绝大部分都放在了城市污染负荷的分配问题上。在这一阶段,影响最深远的是Streeter和Phelps(1925年)以俄亥俄河(Ohio River)为基础构建的水质模型(S-P模型),用来描述河流水质(主要是生化需氧量BOD和溶解氧DO)的变化规律。这一工作和之后开展

的相关调查为评估河流、河口等水体的溶解氧水平提供了方法学依据。与此同时,表征河道卫生状况的细菌模型也建立起来。

然而,由于在此期间没有计算机可以利用,此阶段建立的水质模型还只适用于解决线性的、稳态的和河道形状规则的水质模型(通常为一维稳态水质模型),模型方程的求解依

赖于解析解。

#### 2) 1960—1970年。

进入20世纪60年代,数字计算机开始普及,计算机技术也开始在模型中得到广泛应用。这使得模型的应用方式得到了拓展,人们开始采用数值求解的方式求解相对复杂的污染排放问题(如多个点源排放对水质的影响)。与第一发展阶段相比,尽管仍然关注大量污水排放导致河流中溶解氧浓度低(甚至河道黑臭)的问题,但是可以考虑的模拟过程更加复杂,例如能从稳态模拟拓展到非稳态模拟。在研究问题的空间尺度上,由一维尺度拓展到了二维尺度,例如可以研究宽阔的河口和海湾等。

#### 3) 1970—1977年。

进入20世纪70年代以后,在发达国家,河道大量污水排放导致溶解氧浓度低的问题得到了有效改善,公众对环境的关注从河道溶解氧转移到进一步提升水环境质量上,开始关注水生生态的恢复。这一阶段具体关注的水环境问题是水体富营养化问题,相应在水质模型中拓展了对水体富营养化动力学过程的描述,例如在模型中增加了详细的营养盐/食物链耦合模型。同时,在模型中引入了反馈和非线性动力学方法。

在这一阶段,点污染源的排放得到了大幅削减,因为绝大部分污水厂都采用了二级处理工艺,污水在一级处理的基础上得到进一步净化。这项措施不仅缓解了许多地区由于点源污染导致的溶解氧不足的问题,还将人们的视线转移到了面源排放上。以面源形式排放的耗氧有机污染物是氮营养物质的主要来源。

表面上看来,公众于20世纪70年代早期觉醒的环保意识,应该让人们更加依赖于水质模型的系统管理方法。然而事实上并不如此,有以下3点原因。第一,富营养化涉及到植物的季节性生长,对比于相对恒定的点污染源排放,富营养化问题在时间尺度上更加具有不确定性,相应需要相对于之前开发的线性、稳态和点源排放模型更为复杂的动态水质模型。第二,社会上掀起的环保运动营造出一种污染治理刻不容缓的紧迫氛围,人们“不惜一切代价”想要修复环境的决心和信念,使得各排污企业纷纷将“零排放”作为自己的奋斗目标,而不再需要水质模型来进行预测和评估。第三,这一阶段恰逢经济高速增长,人们对“零排放”这一策略的经济可行性不持怀疑态度,认为再高昂的代价也能负担得起。而利用水质模型平衡水质目标、成本和效益,最终得出一个经济的解决方案,显然不被当时的人们所认同。因此,尽管在这一阶段水质有所改善,但人们过于理想化、不切合实际的目标却从未被实现。

#### 4) 1977年至今。

20世纪70年代中期,第4次中东战争爆发,触发了二战之后最严重的全球经济危机。石油价格的暴涨,使发达国家经济受到剧烈冲击,很多工业化国家的经济增长速率都明显减缓<sup>[6]</sup>。能源危机将人们带回到残酷的现实中,开始反思20世纪70年代早期过于空洞和理想的治理污染口号。人们不

再一味追求“不惜一切代价”削减污染,而开始注重有限投资能够取得的环境修复成效究竟如何。关注点被转移到了有毒物质排放对水生态和人类健康的影响,这是当时公众和政府管理机构关心的热点问题。

这一阶段的主要成就是发现了固体物质在有毒污染物迁移转化中所扮演的重要角色,尤其是发现了有毒污染物在水体中迁移转化的主要途径,即吸附在悬浮颗粒物上,并且随悬浮物的输运、沉降及冲刷而发生迁移。同时,人们还发现微小的有机颗粒,如浮游植物和腐殖质,能够沿食物链被摄取和传递到更高级的生物体内。这种食物链之间的相互作用,让模型的开发者们开始探寻自然界有机碳循环背后的深层含义,食物链从此被看作是污染物传递和富集的重要途径。

进入到20世纪90年代,随着点源污染排放得到有效控制,如何有效控制面源污染排放成为关注的问题。相应,地表水质模型进一步将接纳水体、流域汇水区,甚至大气和地下水含水层等集成(图6),从而能够更有效地从系统性的角度,评估区域或者流域尺度的面源污染来源,以及面源污染控制措施对接纳水体水质改善的响应。例如作者结合巢湖流域城市水体污染控制与治理科技重大专项课题研究,开发了合肥市城区汇水区与南淝河集成水质模型系统,用来评估合肥市城区段排水系统溢流排放对南淝河水质的影响,以及基于南淝河水环境功能区目标(V类水)的城区面源污染控制策略<sup>[7]</sup>。

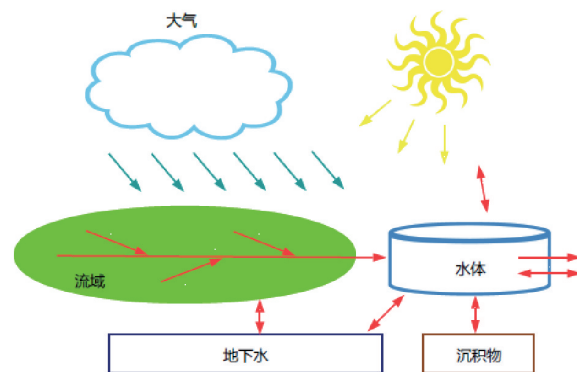


图6 针对面源污染控制的水质模型集成系统

Fig. 6 Integrated water quality modeling system for non-point pollution control

总的来说,过去几十年内水质模型的发展,最终构建了一个包含传统污染物和有毒污染物在内的理论框架体系。系统分析技术与水质模型的集成,为建立一个以管理为导向、计算机为辅助手段的水质模型,并从区域、流域尺度上提出水环境治理的经济有效的解决方案,提供了便利和可能。

## 3 水质模型的发展展望

### 3.1 水质模型发展的经济社会驱动

总体上,未来水质模型的发展将受到以下经济社会因素

驱动。

1) 目前全球经济整体放缓,未来的经济压力可能比20世纪70年代末所面临的压力更大。因此,人们对一个经济有效的水污染控制和水环境治理解决方案的需求,将比以往任何时候更加迫切。例如在美国,一个已经普遍达成的共识就是采用最为廉价的点源污染治理技术方案。如图7所示,当采用污水三级处理工艺时,刚好对应点污染源治理成本曲线上最陡峭的部分。这意味着同二级处理工艺相比,削减相同的污染负荷量时,采取三级处理工艺需要花费更多的费用。如果考虑面源污染控制,则付出的代价更为昂贵。因此一个不科学的决策,带来的经济损失是难以估量的。为了避免由于决策失误对经济造成负面影响,需要开发更好的水质模型来优化论证污染治理技术方案。

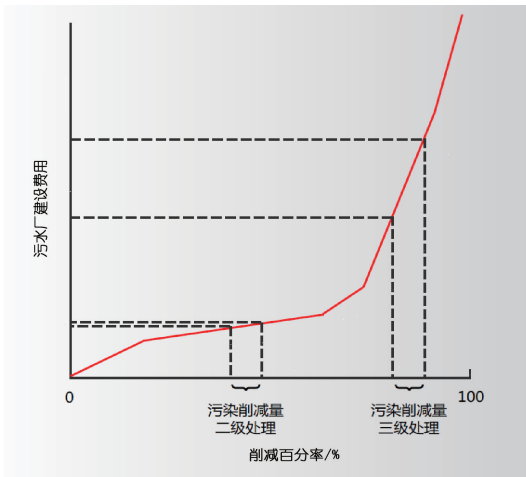


图7 污水厂建设费用和城市污水处理程度之间的关系  
Fig. 7 Capital construction costs versus degree of treatment for municipal wastewater treatment

2) 越来越多的发展中国家意识到,环境保护和经济发展应当同步推进。在经济发展的初期阶段,主要解决的是人们的温饱问题,不太关注水环境污染的治理。在经济发展到一定程度之后,人们意识到不能以牺牲环境为代价去追求经济发展,实现经济的可持续发展有赖于水环境的治理与保护;良好的水环境质量是高品质生活不可缺少的一部分。河流迫切需要从黑臭转变为能够满足生活娱乐、旅游、贸易等多方面的高品质水功能服务需求。这一功能需求的转变如图8所示。在这一过程中,也迫切需要以水质模型为基础提出污染治理策略,达到既经济高效削减污染、又保证经济持续增长,从而提升国民生活品质的目的。这也对水质模型的发展提出了新的要求,例如如何结合对高品质水环境的需求开发新的水质数学模型。

### 3.2 水质模型发展的技术驱动

自20世纪90年代以来,计算机技术和通信技术上取得的突破,进一步拓展了水质模型的功能。图9显示了水质模型复杂性和可靠性之间的关系。当水质模型很简单时,尽管

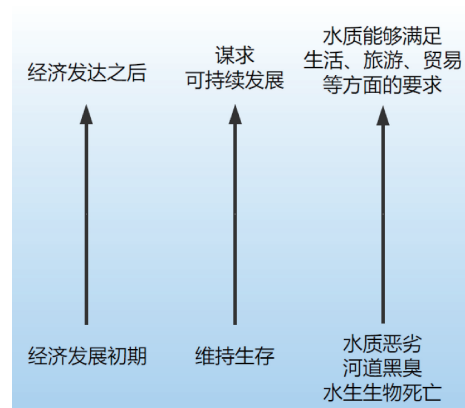


图8 经济发展与水环境问题之间的关系转变

Fig. 8 Relationship between economic development and water environment concerns shift

所需要的数据量很低,但水质模型的模拟结果不具有较高可靠性;然而,这并不意味着水质模型越复杂,其可靠性就一定越高。

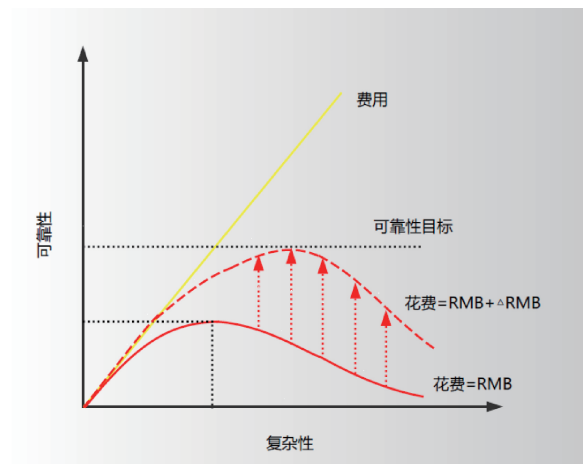


图9 水质模型复杂性和可靠性之间的关系  
Fig. 9 The trade-off between model reliability and complexity

如图9所示,随着水质模型变得复杂,由于模型中众多参数的不确定性增加,并且采集的数据不足以支撑模型建模的需求,水质模型可靠性也会降低。因此,根据所能采集到的数据,在模型的复杂性和可靠性之间存在一个最佳平衡点。然而,如果最佳平衡点对应的模型可靠性不足以达到预期的可靠性目标,则需要花费更多的费用采集数据、借助相对更为复杂的水质模型来提高预测的可靠性,如图9中的虚线曲线所示。计算机及通信技术的发展为以较低的成本来获取更多的数据、提高模型的可靠性提供了可能。特别是近年来智慧城市的发展,为进一步拓展水质模型的应用奠定了良好的技术前景。

智慧城市的实质是利用先进的信息和通信技术手段(如物联网、云计算、大数据等)感测、分析、整合城市运行系统的

各项关键信息,实现城市智慧式管理和运行。水质模型和智慧城市的结合体现为以基于智慧水务的自动监测系统及GIS、3S系统为依托,结合水质数学模型,建立区域、流域水环境基础数据库和水环境预警系统,实现对区域、流域水质时空变化的决策分析及预警预测,为制定水环境治理决策提供依据。具体可以体现为:一是基于物联网、移动互联网、云计算和大数据技术,结合镶嵌各种传感器和电子电气设备的环境参数监控系统,建立基于网络化的水质模型决策支持系统;二是结合无人机遥感、卫星图像等观测技术,建立水质的空间动态监控系统,为基于水质模型的问题诊断(如污染源追踪和溯源)、水质趋势分析提供更加可靠的数据支持。以下对这两方面的应用进行阐述。

1) 基于网络化的水质模型管理系统。

图 10 为结合巢湖流域城市水体污染控制与治理科技重大专项课题研究,提出的基于网络化的水质模型系统框架,用于开发巢湖流域城市群水环境监控与预警系统。系统软件架构共分为 3 层,分别是数据存储层、服务层、应用层。系统的分层设计可以使架构更加灵活,从而实现数据采集和模型计算的相对灵活独立管理。应用层分为网络端和桌面端 2 部分,其中桌面端主要用于数据维护和水质模型计算,网络端主要用于实时监控和数据在线展示。系统硬件架构由 GIS 应用平台、GIS 引擎、GIS 数据存储平台和存储区 4 部分组成。系统的硬件架构在设计时考虑了项目实施的弹性要求,在项目实施的初期,可将 GIS 应用平台、GIS 引擎、GIS 数据存储平台均部署在一台服务器上,随着项目应用规模的扩大而逐步扩充至设计要求。

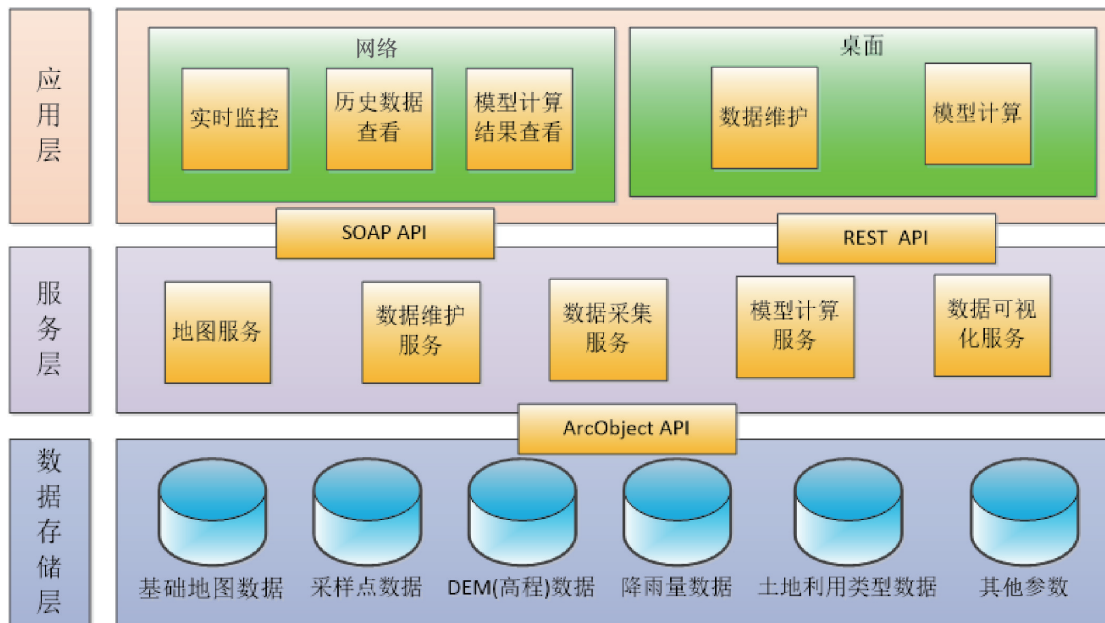


图 10 网络化水质模型系统构架

Fig. 10 Framework of website based water quality modeling system

图 11 为美国塔夫茨(Tufts)大学 Walker 和 Chapra 开发的基于互联网的交互式河流水质模型(WIRM)<sup>[8]</sup>,其本质为一个客户端网页应用程序,用于模拟河流中生化需氧量与溶解氧含量的响应关系。利用客户端网页应用程序对客户本地工作分解结构(WBS)架构的支持,WIRM 模型的所有数值计算和可视化任务均可在浏览器中完成。由此可见,网络应用程序从服务器端向客户端的转变,以及更加简明的用户操作界面,提高了仿真模型的可访问性,为决策者科学决策和环境管理提供了便利。

2) 无人机遥感与水质模型的结合。

如前所述,水质模型建模依赖于可靠的现场监测数据。传统的监测方法是基于典型站点的水文水质监测,具有空间上不连续的特点。对于大尺度的水质模型建模,典型站点获

取的数据不一定能够反映研究区域水质空间变化特征,而大面积、空间上连续的数据获取则能够为水质模型建模提供更加有效的支撑。遥感监测技术的发展,为实现空间上连续的水环境调查提供了可能。因传统的卫星遥感和载人航空遥感受分辨率低、时效性差、周期长等因素限制,很难提供及时有效的数据;相比之下,目前兴起的无人机遥感技术具有响应快速、图片分辨率高、自主灵活性强、操作简单、适应性强、使用成本低、系统集成性强等特点,是大面积水体水质、水生生态空间连续监测的潜在技术手段<sup>[9-10]</sup>。无人机遥感系统由飞行平台、导航与飞行控制系统、地面监控系统、任务设备、数据传输系统、发射与回收系统、野外保障装备及其他附属设备等组成。其中,飞行平台即无人机本身,可搭载多种任务设备,如高分辨率数码相机等以获得遥感数据。

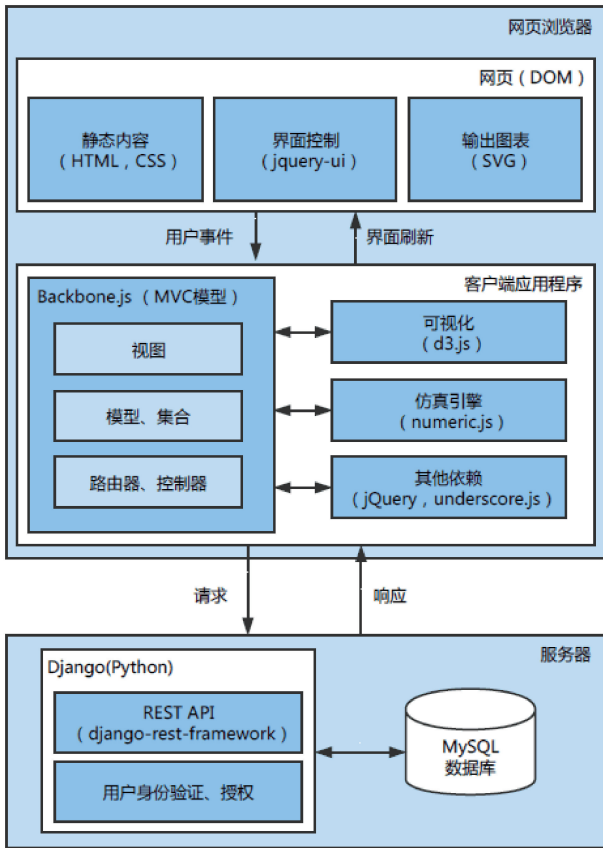


图 11 网络化交互式河流水质模型的客户端-服务器架构示意  
Fig. 11 Schematic diagram of the client and server architectures for WIRM

图 12 为美国塔夫茨大学 Flynn 和 Chapra 在 2013 年针对美国蒙大拿州西部地区 Clark Fork 河流,采用无人机进行河流沉水植物调查的技术方案<sup>[11]</sup>。研发的无人机由摄像系统、罗盘和全球定位系统组成,该款无人机携带方便,适用于在低空操作(<330 m)。

Clark Fork 河是一条浅水河流,河流中细丝状的刚毛藻生长有着很长的历史,破坏了河流景观。藻类生长开始于每年 6 月底,在 8—9 月达到峰值,在 10 月份逐渐消退。利用无人机于藻类生长高峰期进行拍摄,经过处理和校准之后的图像如图 13 所示。可以看出,藻类在空间上呈片状不均匀分布。某些河段几乎没有藻类覆盖,而有些河段则几乎被藻类完全覆盖。与河流的构造形态相对照,河流变窄处(水流变为湍流,流速增加),以及在河道和下游水塘相连的河段(水流变缓),都没有水生植被覆盖;这反映了水流流速与藻类覆盖率之间的关系。这种空间上藻类分布不连续变化,用传统的水质监测站点数据很难准确表征,而基于无人机的遥感监测数据则为准确描述水质和水生植物的空间变化提供了可能。此外,借助于无人机的快速布置,并通过向水体中投加光学可见染料,还可以实时观测水体中污染物的混合效应(如横向和纵向混合)。同早期利用卫星的传统监测方法相比,在无人机平台上能够更频繁地获取高分辨率的监测数据,甚至能够实现对河流水环境动态变化的近似连续监测。因此,基于无人机的遥感观测技术和水质模型的结合,将有助于推动水质数学模型向更高层次发展,如与观测结果相结合来更加准确地描述水生生态系统动力学过程。

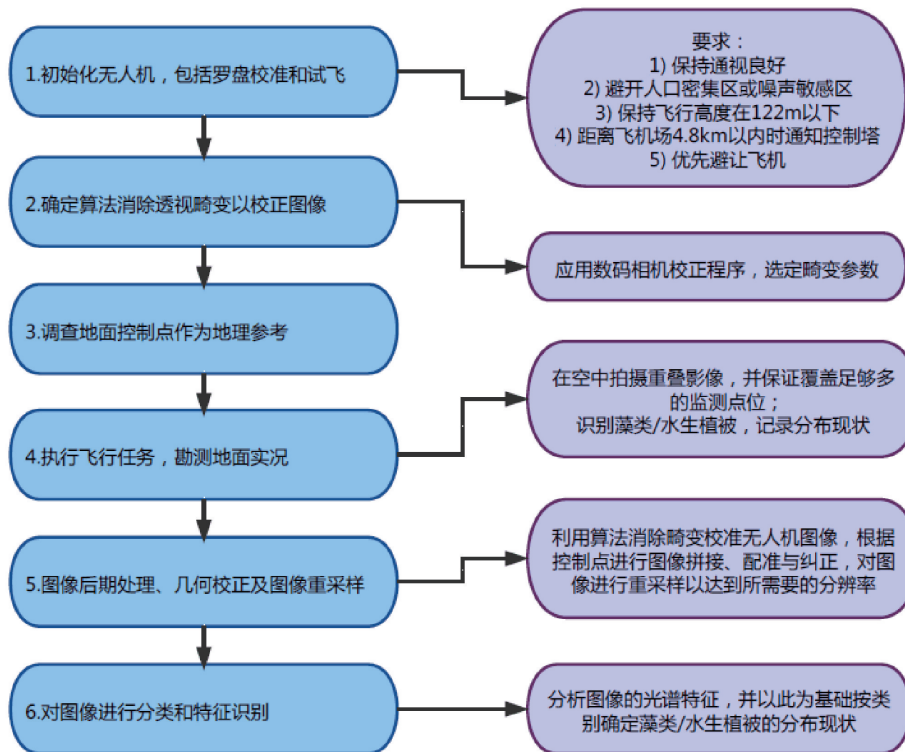
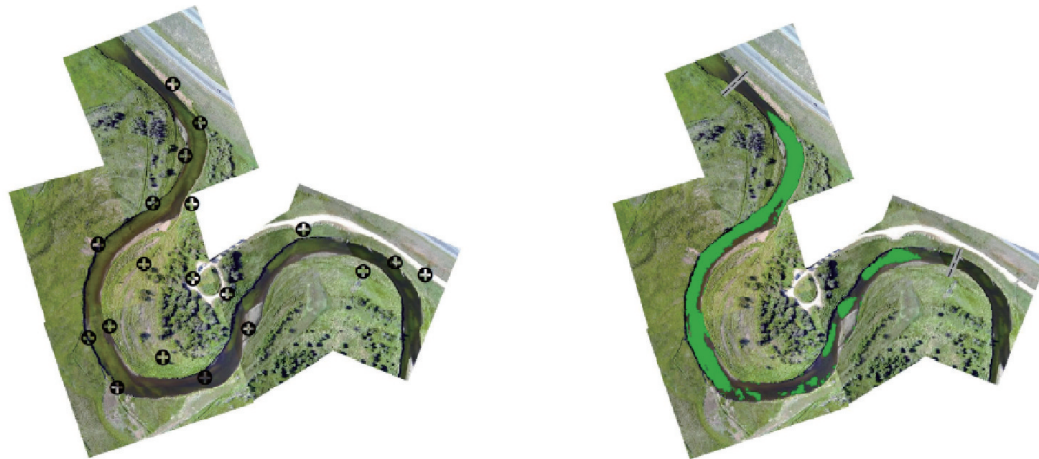


图 12 基于无人机遥感的浅水藻类监测技术方案

Fig. 12 Steps for unmanned aerial vehicle (UAV) use and subsequent algal cover mapping in shallow rivers



(a) 根据地面目标点位进行拼接和校正

(b) 藻类的空间分布近似余弦函数

图 13 基于无人机遥感的拼接和校正后藻类分布图像

Fig. 13 Mosaicked and georeferenced unmanned aerial vehicle images

#### 4 结论

地表水水质模型发展至今已有 90 多年的历史,水质模型的阶段发展与同时期面临的水环境问题密切相关。随着经济社会的发展,水质模型的内涵也将变得更加丰富。未来,构建水质模型的目的将不再是解决严重污染水体消除黑臭的问题,而是满足人们对高品质水环境的需求,并且以经济成本最优的方案实现高品质的水环境目标。

水质模型对水生态系统过程描述越复杂,相应所需要获取的信息量就越大。现阶段,智慧城市的建设能够为水质模型的发展提供有效的支持。借助于互联网技术、物联网技术和无人机遥感观测等技术,可以获得时间和空间上的实时观测数据,从而有助于以相对较低的人力成本投入,来提高复杂过程水质模型的预测精度,这对于提高区域水污染防控和水环境规划管理的决策水平无疑将具有重要意义。

#### 参考文献 (References)

[1] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.  
Xu Zuxin. Planning theory and practice of river pollution control[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.

[2] 舒丽萍. 19 世纪英国的城市化及公共卫生危机[J]. 武汉大学学报(人文科学版), 2015, 68(5): 86-92.  
Shu Liping. The urbanization and sanitation crisis of England in the 19th century[J]. Wuhan University Journal (Humanity Sciences), 2015, 68(5): 86-92.

[3] Griffith D C, Kelly-Hope L A, Miller M A. Review of reported cholera

outbreaks worldwide, 1995-2005[J]. American Journal of Tropical Medicine & Hygiene, 2006, 75(5): 973-977.

[4] 郑州市疾病预防控制中心. 1831-1832 年英国发生的霍乱及其社会应对[EB/OL]. [2016-1-30]. <http://www.zzws.gov.cn/viewNews.aspx?id=4865>.

Zhengzhou Center for Disease Control and Prevention. The cholera outbreak and countermeasures in Britain during 1831-1832[EB/OL]. [2016-1-30]. <http://www.zzws.gov.cn/viewNews.aspx?id=4865>.

[5] Chapra S C. Surface water-quality modeling[M]. Illinois: Waveland Press, 1997.

[6] 朱未萍. 世界石油态势及中国能源战略[J]. 国际经济合作, 2001(11): 31-36.

Zhu Weiping. World oil situation and strategic energy management of China[J]. International Economic Cooperation, 2001(11): 31-36.

[7] Xue C H, Yin H L, Xie M. Journal of Hydrodynamics, 2015, Development of integrated catchment and water quality model for urban rivers [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(4): 593-603.

[8] Walker J D, Chapra S C. A client-side web application for interactive environmental simulation modeling[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 55(2): 49-60.

[9] 王桥, 王晋年, 杨一鹏, 等. 环境监管无人机遥感技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

Wang Qiao, Wang Jinnian, Yang Yipeng, et al. Technology and application of unmanned aerial vehicle remote sensing in environmental regulation[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[10] Yang X. Urban remote sensing: Monitoring, synthesis and modeling in the urban environment[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

[11] Flynn K F, Chapra S C. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle[J]. Remote Sensing, 2014, 6(12): 12815-12836.

## Development of surface water quality modeling: From survival to quality of life

YIN Hailong<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>, Steven C. Chapra<sup>2</sup>, WANG Daozeng<sup>3</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Massachusetts 02155, USA

3. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics; Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** Practices of water pollution control at home and abroad indicate that obvious water quality improvement depends on systematic planning and integrated water environment rehabilitation on a catchment or even watershed scale. Surface water quality modeling is the key technical approach to optimize the set of water pollution control schemes. This paper introduces the four stages of surface water quality modeling development, from emphasizing the elimination of black and odorous water to restoring aquatic ecological system. Furthermore, the prospects for the development of surface water quality modeling are discussed, from the perspective of social-economical and technical drive. In the future, the trade-off between model complexity and reliability is anticipated to be overcome, thus quality modeling will play a more effective role in the realization of high quality water environment during the shift from people survival to quality of life.

**Keywords** surface water; water quality model; environmental planning; information technology; integrated water environment rehabilitation

(责任编辑 傅雪)