

水环境数学模型研究进展

李继选,王 军

(合肥工业大学土木建筑工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要 水环境数学模型的研究按照时间可以划分为三个阶段。对每个阶段的特点和发展情况进行了详细叙述。阐述了水质模型在水质预测、水质规划评价、水环境容量计算和水质预警预报中所起的作用,以及在国内外的实际应用情况。介绍了当前国内外在各个发展方向上的研究进展,说明水质模型未来的六个发展趋势:新模型的开发,不确定性水质模型的研究,水质模型与“3S”的结合,多介质环境生态综合模型,人工智能和水质模型的结合,地下水和地表水转换的水质模型。

关键词 水环境;水质模型;发展阶段

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2006)01-0009-06

Development of water environment mathematic models

LI Ji-xuan, WANG Jun

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract According to time sequence, studies on water quality models can be divided into three stages. Characteristics and development at each stage are reviewed in detail. The important role the water quality model plays in water quality prediction, planning and evaluation, water environment capacity calculation, water quality warning and forecast as well as its application in China and abroad are presented. Progress in each research field is reviewed. The development tendency of water quality model is discussed in six aspects, including development of new model, research on random model, integration of water quality model with “3S”, multi-media ecological integral model, combination of water quality model with ANN, model for transformation of surface water and groundwater.

Key words water environment; water quality model; development stage

污染物进入水体后,随水流迁移,在迁移的过程中受到水力学、水文、物理、化学等因素的影响,引起了污染物的输移、混合、分解、稀释和降解。建立水质模型的目的就是力图把这些相互制约因素的定量关系确定下来,从而为水质的规划、控制和管理提供技术支持^[1]。利用水质模型进行河流、水库、湖泊及河口的水质规划已经取得成功,一些在 20 世纪五六十年代严重污染的河流,如芝加哥河、泰晤士河、莱茵河等利用水质模型进行规划和管理,使水体有了根本性的好转^[2]。

1 水质模型的发展过程

描述河流水质的第一个模型是斯特里特(H. W.

Streeter)和费尔普斯(E. B. Phelps)于 1925 年研究美国俄亥俄河污染问题时建立的,简称 S-P 模型^[3]。现在已有用于不同用途的各种水质模型。自 S-P 模型至今,已有 70 多年,国际上对水质模型的开发研究划分为三个阶段^[4]。

1.1 第一阶段(1925~1980 年)

这个阶段研究的主体主要是水体水质本身,模型注重分析水质内部组分之间的规律关系,主要研究受生活和工业点污染源严重污染的河流系统,输入的污染负荷仅强调点源。与水动力传输一样,底泥耗氧和藻类光合及呼吸作用都是作为外部输入,而面污染源仅仅作为背景负荷。该阶段的发展历程简述如下^[3]。

a. 1925 ~ 1965 年。开发了比较简单的生物化学需氧量和溶解氧(BOD-DO)的双线性系统模型并成功应用于水质预测。对河流与河口问题采用一维计算方法。S-P 模型的基本方程为

$$\left. \begin{aligned} U \frac{\partial L}{\partial x} &= E \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - K_1 L \\ U \frac{\partial O}{\partial x} &= E \frac{\partial^2 O}{\partial x^2} - K_1 L + K_2 D \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 : U 为河流平均流速 , m/s ; L 为河流 x 处 BOD 质量浓度 , mg/L ; x 为离排污口($x = 0$)的河水流动距离 , m ; E 为河流弥散系数 , m^2/s ; K_1 为 BOD 的衰减系数 , s^{-1} ; K_2 为河水复氧系数 , s^{-1} ; O 为河流 x 处 DO 质量浓度 , mg/L ; D 为河流 x 处溶解氧亏质量浓度 , mg/L 。

在随后的 70 多年里 ,许多学者对 S-P 模型提出了各种修正和补充 :①托马斯(H. A. Thomas)于 1948 年提出 BOD 随泥沙的沉降和絮凝作用而减少且不消耗溶解氧 ,并认为其减少速率正比于存留的 BOD 数量。因此在稳态的 S-P 生化需氧量方程中引入了絮凝系数。②奥康纳(D. J. O 'Connor)于 1967 年提出将 BOD 分为碳化 BOD 和硝化 BOD 两部分 ,并在托马斯方程上进行了修改。③多-坎(Dobbins-Camp)在托马斯模型的基础上 ,添加了因底泥释放 BOD 和地表径流所引起的 BOD 变化速率 ,藻类光合作用和呼吸作用以及地表径流引起的溶解氧速率变化。

b. 1965 ~ 1970 年。除继续研究 BOD-DO 模型的多维参数估值问题外 ,水质模型发展为六个线性系统 ,计算机的应用使水质模型的研究取得突破性进展 ,计算方法从一维发展到二维 ,开始计算湖泊及海湾问题。

c. 1970 ~ 1975 年。研究发展了相互作用的非线性系统模型。涉及营养物质磷、氮的循环系统 ,浮游植物和浮游动物系统 ,以及生物生长率同这些营养物质、阳光、温度的关系 ,浮游植物与浮游动物生长率之间的关系。其相互关系都是非线性的 ,有限差分法、有限元计算应用于水质模型的计算 ,空间上用一维和二维方法进行计算。

d. 1975 ~ 1980 年。除继续研究第三阶段的食物链问题外 ,还发展了多种相互作用系统 ,涉及与有毒物质的相互作用。空间尺度已经发展到三维。模型中状态变量的数目已大大增加。

1.2 第二阶段(1980 ~ 1995 年)

这一阶段模型的发展 :①在状态变量(水质组分)数量上的增长 ;②在多维模型系统中纳入了水动力模型 ;③将底泥等作用纳入了模型内部(如 O 'Conner 等 ,1983 年 ;Thomann 等 ,1983 年 ;DiToro

等 ,1993 年) ;④与流域模型进行连接以使面污染源能被连入初始输入(如 Donigian 等 ,1991 年)。

在这一阶段 ,由于能对流域内面源进行控制 ,从而使管理决策更加完善 ;由于将底泥的影响作为模型内部相互作用的过程处理 ,从而在不同的输入条件下使底泥通量能随之改变 ;由于水质模型的约束更多了 ,预测的主观性大大减少了。这一时期 ,人们对一些系统建立了模型 ,如美国的大湖、切萨比特湾等。

1.3 第三阶段(1995 年至今)

随着发达国家加强了对面污染源的控制 ,面源污染减少了 ,而大气中污染物质沉降的输入 ,如有机化合物、金属(如汞)和氮化合物等对河流水质的影响日趋重要。虽然营养物和有毒化学物由于沉降直接进入水体表面已经被包含在模型框架内 ,但是 ,大气的沉降负荷不仅直接落在水体表面 ,也落在流域内 ,再通过流域转移到水体 ,这已成为日益重要的污染负荷要素。从管理的发展要求看 ,增加这个过程需要建立大气污染模型 ,即对一个给定的大气流域(控制区) ,能将动态或静态的大气沉降连接到一个给定的水流域。所以 ,在模型发展的第三阶段 ,增加了大气污染模型 ,能够像对沉降到水体中的大气污染负荷直接进行评估一样 ,对来自流域的负荷进行评估(图 1)。

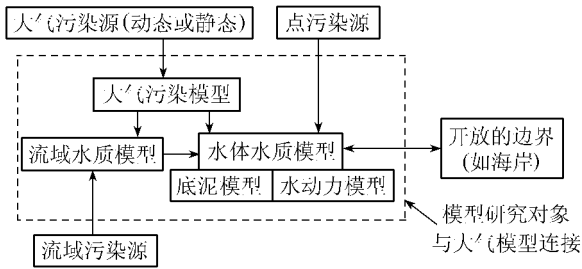


图 1 水质模型发展的第三阶段

2 水质模型的应用

2.1 污染物在水环境中行为的模拟和预测

水质模型最基本的功能是模拟和预测污染物在水环境中的行为。污染物在迁移的过程中行为非常复杂。用模型的方法有助于了解污染物的运动规律 ,而且省时、经济。国内外的学者在这方面做了很多工作^[5-9] ,研究也较为成熟 ,目前较为通用的思路为 :首先求解连续性方程和动量方程 ,得到流速场 ;然后求解水质方程 ,得到污染物浓度场。对于求解水质方程 ,传统方法采用有限差分和有限元法 ,差分法对于曲线边界拟合不够理想 ,而有限元求解对流扩散方程会产生数值振荡 ,有限体积法结合了差分法和有限元的优点 ,是目前较为理想的数值求解方法。

国外学者对水质模型的研究较早,也较为成熟。Chau 等^[6]建立了三维污染物传输数学模型和水流模型方程耦合求解,水平方向采用正交曲线坐标,竖向采用 σ 坐标,考虑侧向边界的影响,模拟了 Pearl 河的 COD 水质变化。Salterain 等^[7]用四点隐格式差分法求解圣维南水流方程,采用最近的 IWA 水质模型,试验校正水流水质模型参数,模拟了西班牙 Ebro 河长 75 km 的河段。

由于我国本身的环境污染问题,国内学者也作了大量的工作,近年来在数值模拟方面的研究工作也开展较多。赵棣华等^[10]根据长江江苏感潮河段水流水质及地形特点,应用有限体积法及黎曼近似解建立了平面二维水流-水质模型。应用浓度输移精确解验证模型算法的正确性,利用长江江苏感潮河段的水流、水质监测资料进行模型率定检验,并通过卫星遥感资料的分析检验模型计算污染带的合理性。模型在长江江苏段主要地区区域供水规划及实施决策支持系统中得到应用,为该江段水质规划提供了依据。

2.2 水质管理规划与评价

河流水质规划的基本课题是根据河流预定的基本功能所要求的水质及河流的自净能力来确定允许排入河流的污染物质^[11]。对于已经污染的河流来说,则是如何削减各污染源的污染物排入量,以最低费用且在规定时间内使河流水质达到预定目标。它是水质模型与系统工程结合,寻求最优解的过程。

20 世纪 70 年代,由于非点源污染问题突出,水质管理模型由单一的水质数学模型发展为一个包含流域水文模型、非点源模型和水质模型的复合模型系统。80 年代后期,地理信息系统开始与上述的数学模型有机耦合在一起,构成一个比较完整的流域水质管理系统^[12,13]。实践表明,利用系统方法进行水质规划,可以节省 10% 以上的基本建设投资和运行费用。

在水质评价中,水质模型多用于温排水对水体环境富营养化的环境评价。温排水多为火、核电厂的冷却水。温排水进入水体后,促使排水口附近局部区域水温提高,加快了有机物的氮、磷分解速度,促使藻类繁殖生长,产生富营养化,因此温排水是一种特殊形式的污染。根据目前的研究情况,温排水对于水体富营养化的评价主要分为两个阶段:首先根据动量方程、连续方程和温度方程求解流场和温度场,其次通过物质输运方程及各生化反应函数,计算出叶绿素 a、总磷、总氮的浓度分布。李平衡等^[14]利用二维守恒型浅水环流方程和能量方程求解陡河水库的流场和温度场,在此基础上利用生态动力学

模型求解叶绿素 a 的分布,模拟了温排水对陡河水库的富营养化影响。

2.3 水环境容量计算

水环境容量为一定水体在规定的水环境目标下所能容纳的污染物最大负荷或纳污能力,研究对象是水体的自净能力。在实践中,环境容量是环境目标管理的基本依据,是环境规划的主要环境约束条件,也是污染物总量控制的关键参数,河流的污染物总量控制,也是以河流的水环境容量为依据,把动态水质模型和线性规划结合进行水环境容量计算,具有自动化程度高、精度高等特点,主要思路是^[15,16]:在水动力模型和动态水质模型的基础上,建立所有河段污染物排放量和控制断面水质标准浓度之间的动态响应关系,以河流总排放污染负荷最大为目标函数,约束集为:各河段都满足规定水质目标;各河段容量约束,即每个河段都要有一个最小容量约束,以满足进入河道的面污染源总量要求。运用最优化方法,求解每一时刻河流水质浓度满足给定水质目标的最大污染负荷。

2.4 水质预警预报

水质预警是指在一定范围内,对一定时期的水质状况进行分析、评价,对水环境发生的影响变化进行监测、分析,并对其容量进行评价,通过生态环境状况和人为行为的分析,对其发生及其未来发展状况进行预测。确定水质的状况和水质变化的趋势、速度以及达到某一变化限度的时间等,预报不正常状况的时空范围和危害程度,按需要适时地给出变化或恶化的各种警戒信息及相应的综合性对策,即对已出现的问题提出解决措施,对未出现或即将出现的问题给出防范措施及相应级别的警戒信息^[17]。

水质预警的技术方法主要是运用计算机技术、环境科学和系统科学等理论^[18,19],主要是 GIS 和 EIS 的耦合技术,尤其是利用 GIS 的空间数据管理功能和模型分析能力,将水环境质量、水质数学模型、水污染状况及地理信息等集合在一起,用先进的技术手段,对其进行综合分析、计算、评价,解决了传统的数据库结构缺乏空间性、不能实现空间管理和空间分析的问题,使水质信息从单一的表格、数据中走出来,以生动的图形、图像方式呈现给决策者、管理人员及研究人员^[18]。同时,利用 GIS 技术建立的预警信息图形库,实现数据和图形的交互表现,增加系统的可视性,提高分析决策能力。

3 水质模型的发展趋势

3.1 新模型的开发

应用新技术,加深对污染物扩散输移机理的认

识,不断改进和完善已有模型,并开发具有通用型式的、理论依据坚实的、可操作性较强的新型水质数学模型,同时还要具有良好的用户界面、易操作性及可灵活扩展的程序接口^[20-21]。

目前国际上最新的水质模型是 IWA(早期国际水质协会 IAWQ)于 2001 年推出的 RWQM1,此模型用以碳、氧、氮、磷为特征的循环代替传统模型中的生化需氧量作为水质基本组分和转化过程,并且能与 IAWQ 提出的 ASM 系列活性污泥模型很好相容^[22]。目前国内与国外的研发差距,主要不在建立模型的方法上,而是在于开发的通用性、全面性、界面以及开发工具、平台、建立模型所需资料方面。

3.2 不确定性水质模型的研究

在湖泊富营养化研究领域,人们对富营养化机理的认识还比较肤浅,特别是缺乏对藻类生长机理和磷沉积机理等过程更深入的认识,致使富营养化数学模拟还远未达到令人满意的程度。此外,由于磷输入浓度、光照等因素实际上都是随机变化过程,并不是确定过程,因此用确定性的微分方程模拟会产生较大的误差,而应用随机微分方程进行描述,则克服了确定性微分方程的缺点,取得了较满意的效果^[23]。

目前不确定性水质模型主要有三种类型^[24]:基于概率论及数理统计的随机方法、灰色系统理论、模糊数学。它们之间虽然形式不一,但是本质是一样的。随机理论以概率表述,模糊数学则归结为模糊度,而灰色理论表现为灰色度。其中以随机方法的理论使用最为广泛,方法也较为完善,包括基于马尔可夫链和平稳时间序列的离散随机过程类,在确定模型模型中加入随机噪声项的实时估计及预测类和随机微分方程类。离散随机过程类由于仅仅考虑某一方面的不确定性,其缺点也是明显的,目前研究已大大减少。实时估计及预测类主要用于参数的实时估计及修正和状态变量的实时估计与预测。带随机系数的微分方程,结构型式简单,计算结果信息量大,便于决策机构决策,在国外已被广泛应用,但其参数识别方法仍有待改进^[25]。

3.3 水质模型与“3S”的结合

“3S”指地理信息系统 GIS、遥感系统 RS、全球定位系统 GPS。GIS 技术可把复杂多变的自然、社会变化以及变化过程以图形、图像的方式进行数字化处理。在其空间和属性库中输入河道基本数据、水文及污染源数据,利用其空间数据库采集、管理、操作和分析能力,可使水质监测与评价产生全新的面貌。通过水流-水质模型计算,可得出反映水域水流、水质变化特性的断面位置,并以逼真的图像显示水域

水流水质变化的空间特征、统计特性和未来趋势等^[26-30]。

随着计算机和空间技术的发展,RS 与 GPS 技术已能够同时获取大量的不同分辨率多谱段的可见光、红外、微波辐射和测视雷达的数据,目前与 GIS 结合,已能快速即时提供多种对地观测的具有整体性的动态资料,并对这些资料进行分析与处理。20 世纪 80 年代以来,国内外学者已应用“3S”技术为水资源与水质保护做了大量的工作,如应用彩红外投影、热红外及多光谱技术研究河湖污水污染;用多波段遥感影像研究一定水深的悬浮物和泥沙分布;用微波遥感进行河口近海水域盐度与温度研究;用卫星遥感技术估算水体叶绿素浓度;应用多谱段扫描仪研究近海及河口初级生产率及赤潮等。在流域级水流-水质-生态模型中引入“3S”技术也正在成为环境水力学发展的一个重要趋势。

3.4 多介质环境生态综合模型

多介质环境是指与大气、水体、土壤、生物等组成的总环境体系,其中水体是核心^[31]。环境中的污染物是在多环境介质中进行分配的,而多介质环境模型可将不同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,构成了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。

Tanner 等^[32]对饱和盐水蒸发池中的生物链食物链进行了研究,Zhou^[33]研究了沉淀物中所吸附的多氯联苯(PCBs)量与罗非鱼体内多氯联苯(PCBs)的富集量之间的关系。由于还没有充分认识污染物在各种介质之间的迁移过程,现有的多介质环境模型在处理实际问题时只能对污染物在介质间的迁移过程作近似假设,许多参数的随机性给模型处理实际问题带来不确定性。所以,这类模型目前还只能给出一种趋势预测,而不是状态的精确预报。

3.5 人工智能和水质模型的结合

目前,人工智能和水质模型的结合存在于两个方面:①利用遗传算法、模拟退火算法进行参数识别^[34-36];②利用神经网络进行水流水质预测^[37-40]。

传统的水质模型参数识别使用图解法、单纯形法、复合形法等,这些参数识别方法都存在受初始条件影响、算法过于复杂、运行效率低等特点。近年来,遗传算法、模拟退火算法等新型随机非数值优化方法为水质模型参数识别提供了新途径。遗传算法是基于达尔文进化规律的一种群体优化算法,它同时从多个状态出发,通过选择、交换、变异等手段,不断逼近最优解。模拟退火算法是基于热力学原理建立起来的随机优化算法。智能算法的引入,大大提

高了参数识别的准确度和运行效率。

神经网络方法是一种基本上不依赖于模型的方法,它比较适用于那些具有不确定性和高度非线性对象,并具有较强的适应和学习功能。传统的水质数学模型具有一定的局限性,这是由于环境的水文条件具有很大的随机性,会导致模型输出的不确定性,很多反应机理还不清楚,反应过程无法用数学表述。将神经网络用于水质预测,只要有充足的采样数据,就可以利用神经网络的自学习能力来进行水质的建模和预测,这种方法考虑的因素较少,并且结果准确,适用范围很广。

3.6 地下水与地表水转换的水质模型

地下水与地表水的相互作用是自然界中普遍存在的一种自然现象。联合国环境规划(UNDP)、联合国教科文组织(UNESCO)、国际水文地质学家联合会(IAH)、国际地下水基金会(IGF)、美国环境保护局、美国地质调查局、联合国环境规划署(UNEP)等组织和机构都将地表水与地下水的相互作用作为目前研究的重要热点和前沿课题。目前的水质模拟中地下水与地表水基本上是独立的,彼此间的影响只作为一种边界条件来体现,没有作为一个相互影响的综合系统来考虑^[41-44]。其实,无论是从水量还是从水质来说,地下水与地表水之间都存在着转化关系。例如,对面污染源来说,若土地的入渗能力强,则地下水受到污染的程度将更大,反之则地下水受到的污染可能较小。水域污染情况不能单看地面水的水质,需将地面水和地下水进行综合考虑。目前,在地下水与河水的耦合模型中,如何计算地下水与河水两者之间转化量是数值模拟模型的难点,如何更好地表示两者之间的转化量、确定河流的边界条件以及考虑河流以线状或面状补给将是研究的重点。

参考文献:

- [1] 徐孝平. 环境水力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1987: 88.
- [2] 钱瑾. 国外环境检测管理的几点经验[J]. 云南环境科学, 2001(1): 61-64.
- [3] 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1987: 59-60.
- [4] 徐祖信, 廖振良. 水质数学模型研究的发展阶段与空间层次[J]. 上海环境科学, 2003, 22(2): 79-85.
- [5] THOMANN R V. The future "Golden Age" of predictive models for surface water quality and ecosystem management[J]. J Environ Eng, 1998, 124(2): 94-103.
- [6] CHAU K W, JIANG Y W. Simulation of transboundary pollutant transport action in the Pearl River delta[J]. Chemosphere, 2003(9): 1615-1621.
- [7] SALTERAIN A. Development and verification of a new simulation tool for water quality prediction in the Ebro river progress in water resources[J]. Water Pollution VII: Modelling, Measuring and Prediction, 2003(9): 13-22.
- [8] GU R. Reservoir flow sensitivity to inflow and ambient parameters[J]. Water Resources Planning and Management, 1998, 124(3): 119-127.
- [9] KIM K W. Verification of a 3D hydrodynamic model of the San Juan Estuary system International[J]. Water Resources Engineering Conference-Proceedings, 1998(2): 1032-1037.
- [10] 赵棣华, 李提来, 陆家驹. 长江江苏段二维水流-水质模拟[J]. 水利学报, 2003(6): 72-78.
- [11] KAZMI, ABSAR A. Numerical models in water quality management: a case study for the Yumuna river[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(5): 193-200.
- [12] 张禹卿. 河流水质规划计算机模拟研究[J]. 同济大学学报, 1995, 23(4): 458-463.
- [13] MAHAJIAN A U, CHALAPATIRAO C V. Mathematical modeling-a tool for coastal water quality management[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(2): 151-157.
- [14] 李平衡, 陈凯麟, 鲁四光, 等. 温排水对陡河水库富营养化影响的预测研究——电厂温排水对陡河水库富营养化影响研究之二[J]. 水资源保护, 2001(2): 15-18.
- [15] 徐祖信, 卢士强. 潮汐河网水环境容量的计算分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(4): 254-257.
- [16] MIKE11: A modeling system for rivers and channels reference manual[R]. Danish Hydraulic Institution(DHI), 2002.
- [17] HUTCHINSON C. Uses of satellite data for famine early warning in Sub-Saharan Africa[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12: 1405-1421.
- [18] DE W A. Famine early warning systems and the use of socioeconomic data[J]. Disasters, 1988, 12: 81-91.
- [19] 董志颖, 王娟. 水质预警理论初探[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 224-226.
- [20] 郭劲松, 李胜海, 龙腾锐. 水质模型及其应用研究进展[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(2): 109-115.
- [21] WASP4: A hydrodynamic and water quality model[R]. EPA, 1988.
- [22] SHANAHAN P. River water quality model no. 1(RWQM1): I Modeling approach[J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(5): 1-10.
- [23] 全为民, 严力蛟. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 168-175.
- [24] 金明. 一维稳态河流的随机微分方程模型[J]. 水利学报, 1991(2): 19-25.
- [25] FINNEY B A, BOWLES D S, Windham M P. Random differential equations in river water quality modeling[J]. Water Resource Research, 1982, 18(1): 122-134.
- [26] 马蔚纯, 张超. 基于GIS的水质数值模拟——以上海市苏州河为例[J]. 地理学报, 1998, 53(12): 68-75.
- [27] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS与地表水水质模型 WASP5的集成[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(8): 125

- [28] GOODCHILD M F. The state of GIS for environmental problem-solving[C]//GOODCHILD M F , STEYAERT L T , PARKS B O. Environmental modeling with GIS. New York :Oxford Univ. Press ,1993 8-15.
- [29] MAIDMENT D R. GIS and hydrological modeling[C]//GOODCHILD M F , STEYAERT L T , PARKS B O. Environmental modeling with GIS. New York :Oxford Univ. Press ,1993 :147-167.
- [30] LIAO H ,TIM U S. An interactive modeling environment for Non-point source pollution contro[J]. Journal of the American Water Resource Association ,1997 33(3) 591-603.
- [31] FALL C. Generalized model of pentachlorophenol distribution in a mended soil - water system[J]. Water Environment Research 2001 73(1) :110-117.
- [32] TANNERERTAL R. Food chain organisms in hypersaline industrial evaporation ponds[J]. Water Environ Research , 1999 71(4) :494-501.
- [33] ZHOU H Y. Accumulation of sediment-sorbed PCBs in tilapis [J]. Water Research 2000 34(11) 2905-2914.
- [34] SRINIVAS M ,PATNAIK L M. Adaptive probability of crossover and mutation in genetic algorithm[J]. IEEE Trans on SMC ,1994 24(4) 656-667.
- [35] 李海英 ,秦肖生. 综合性遗传算法用于水质模型参数估值[J]. 中国给水排水 2002 ,18(5) 28-30.

- [36] 申玮 ,郭宗楼 ,周新超. 直接搜索——模拟退火算法在水质模型参数识别中的应用[J]. 西北农林科技大学学报 2004 32(5) :101-105.
- [37] SHARAD K J. Development of integrated sediment rating curves using ANNs[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2001 ,127(1) 30-37.
- [38] MARINA C. Forecasting river flow rate during low-flow period using neural network[J]. Water Resources Research ,1999 35(11) 3547-3552.
- [39] 魏文秋 ,孙春鹏. 灰色神经网络水质预测模型[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1998 31(4) 26-29.
- [40] ZHANG B. Prediction of water runoff using B ayesian concepts and modular neural network[J]. Water Resources Research , 2000 36(3) :753-762.
- [41] 李致家 ,谢悦波. 地下水流与河网水流的耦合模型[J]. 水利学报 ,1998(4) 43-47.
- [42] 李玉梁 ,李玲. 环境水力学的研究进展与发展趋势[J]. 水资源保护 2002(1) :1-6.
- [43] JAMES J ,BUTLER ,VITALY A Z ,et al. Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream[J]. Ground Water 2001 5 651-659.
- [44] MEIGS L C ,BAHR J M. Three-dimensional groundwater flow near narrow surface water bodies [J]. Water Resource Research ,1995 31(12) 3299-3307.

(收稿日期 2004-07-21 编辑 :傅伟群)

(上接第 8 页)

- [5] 胡振元 ,施梅儿. 水环境中痕量有机致害物的系统色谱分析[J]. 分析科学学报 ,1995 ,11(2) :1-5.
- [6] 韩长绵 ,朱艳. 毛细管柱顶空气相色谱法测定水中氯代苯研究[J]. 环境科学与技术 2002(6) :17-19.
- [7] 齐文启 ,陈光 ,孙宗光. 水环境监测技术和仪器的发展[J]. 现代科学仪器 2002(6) 8-12.
- [8] 赵怡冰 ,许武德 ,郭宇欣. 生物的指示作用与水环境[J]. 水资源保护 2002(2) :12-16.
- [9] 郭沛涌 ,沈焕庭. 水生生物资源在长江河口水环境监测中的应用[J]. 农业环境保护 2002 21(1) 81-83.
- [10] 薛建华 ,王军晖. 发光细菌应用于监测水环境污染的研究[J]. 科技通报 ,1998 ,14(5) 339-342.
- [11] 周易勇. 水环境监测的酶学方法[J]. 中国环境监测 , 1999 ,15(2) 61-64.
- [12] 李红清. 遥感技术在水环境保护中的应用初探[J]. 水利水电快报 2003 24(3) 24-25.
- [13] 郑炳辉 ,马廷. 环境遥感应用与展望[J]. 航天技术与民品 2000(9) :1-3.
- [14] 朱小鸽 ,何执兼 ,邓明. 最近 25 年来珠江口水环境的遥感监测[J]. 遥感学报 2001 5(5) 396-400.
- [15] 王学军 ,马廷. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. 环境科学 2000 21(6) 63-66.

- [16] 陈克胜 ,雷楚强. Reservoir Trophic State Evaluation using Landsat TM Data[J]. Journal of the American Water Resource Association 2001 37(5) 30-33.
- [17] 李怡庭. 我国水环境 (水质) 监测工作的回顾与展望[J]. 水文 ,1999(5) 24-26.

(收稿日期 2004-10-11 编辑 :傅伟群)

