

文章编号: 1001-8166(2003)03-0358-09

水环境非点源污染数学模型研究进展

马蔚纯¹ 陈立民¹ 李建忠¹ 高效江¹ 林卫青²

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘 要 水环境非点源污染正日益受到人们的重视, 成为国内外学者所关注的热点领域。对水文模型、非点源模型的研究现状做了归纳分析, 尤其是对模型与 RS、GIS 的集成进行了探讨, 论述了两者结合的意义和重要性, 提出了结合的层次性, 归纳了结合的多种方式。最后对非点源污染模型的发展前景进行了分析和预测。

关 键 词 非点源污染 数学模型 地理信息系统

中图分类号: X52 P33

文献标识码: A

水环境非点源(Nonpoint Source, NPS)污染是指降雨(尤其是暴雨)产生的径流, 冲刷地表的污染物, 通过地表漫流等水文循环过程进入各种水体, 引起含水层、湖泊、河流、水库、海湾及滨岸生态系统等的污染^[1-3]。20世纪70年代以后, 人们在污染控制的实践中, 逐渐认识到非点源污染的严重性和重要性。根据美国、日本和我国学者的研究, 非点源已经成为水环境的重要污染源, 甚至首要污染源^[4, 5]。

非点源污染的成分复杂, 类型多样, 又具有不同于点源的特征^[6, 7], 排放的分散性导致其地理边界和空间位置不易识别, 加上它还与一系列水文气象条件密切相关, 因此非点源污染的研究和控制具有较大的难度。国际上对非点源污染的研究大体上开始于20世纪60年代, 80年代以后进展迅速, 研究的主要领域包括非点源污染的特征、负荷、地域范围、机理以及相关的影响因子等。采用的研究手段包括野外调查与监测、土地利用方式分析、数学模型、遥感与地理信息系统等。近年来也开始趋向于控制方法和管理政策的研究^[8]。由于非点源污染涉及多学科的理论和方法, 因此综合采用多学科的最新成果, 开展对非点源污染的研究成为目前非常活跃的领域。数学模型方法不仅可以模拟各类非点源的形成、迁移转化和负荷, 还可以为非点源控制和

管理的量化提供有效的技术手段。本文将着重讨论国内外非点源污染研究的数学模型方法, 希望对我国非点源污染的研究有所启发。

1 非点源污染数学模型

1.1 水文模型

非点源污染与水文循环过程、气象条件密切相关。“大部分用来模拟非点源污染负荷的模型, 基本上都是水文模型, 或者是与水文模型紧密相关的模型”^[1]。这是非点源污染的特性所决定的。因此, 对水文循环过程的研究在非点源污染的数值模拟中占有重要地位, 犹如水动力模型对于水质模型、水文模型来说是非点源模型的重要基础。目前, 各研究机构开发的流域水文模型多达200多种, 比较著名的有澳大利亚气象局模型(CBM)、日本国家防灾研究中心的水箱模型TANK-1(I)、美国陆军工程兵团的径流综合与水库调节模型(SSARR)、美国国家天气局河流预报中心的萨克拉门托水文模型(SRFCH)、原苏联水文气象中心降雨径流模型(HMC)、我国的新安江系列模型等^[9]。这些模型研究的主要水文过程包括: 土壤渗入; 土壤水分运动特征的参数化; 蒸散发; 水量平衡过程; 流域产流; 流域汇流。

收稿日期: 2002-03-11 修回日期: 2002-11-04

* 基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划资助。

作者简介: 马蔚纯(1969-)男, 上海市人, 副教授, 主要从事环境数学模型、GIS和环境影响评价 E-mail: wma@fudan.edu.cn

近年来,流域水文模型有了较大的发展。高峰等^[9]在北京市城区洪水预报系统中采用了三水源新安江模型加上综合汇流模型,构成“三水综合汇流新安江模型”,该模型包括蒸散发模型、产流模型、分水源模型和汇流模型4个部分。熊立华等^[10,11]吸取系统模型、概念模型和物理模型的精华,开发新一代流域水文模型——三层耦合流域水文模型,并选用世界上不同地区12个流域的降雨径流资料,对模型进行率定和检验,并与著名的新安江模型和SMAR模型进行比较。

由于流域水文特征具有空间分布的特点,分布式模型日益引起人们的重视。有学者认为:分布式水文数学模型的应用将有助于定量地描述人类活动引起的流域水沙产生和迁移过程及面污染物的产生和迁移过程^[12]。从目前的发展趋势看,我们可以把分布式模型分为基于“水文响应单元”(HRU, Hydrologic Response Unit)和基于“栅格”(Grid-Based)两类。前者将流域根据雨量站及流域特征划分成若干个单元面积,当单元面积小到一定程度时,即可认为具有水文要素上的均一性,将其作为模拟输入输出的基本单元,如农业流域模型FESHM(Finite Element Storm Hydrograph Model)^[13]、Motovilov等提出的基于明确物理概念的ECOMAG模型等;后者的基本单元是矩形网格,如Beven等^[14]提出的TOPMODEL,我国学者郭方等^[15]对该模型进行了研究,应用于淮河流域,并与新安江模型作了比较分析。

1.2 非点源污染模型

非点源污染模型是采用以方程为主要形式的数学手段,模拟各种不同类型的非点源在水文循环的作用下,对水体所造成的污染负荷,以及污染物在水文循环的各个环节迁移、转化的过程。一般地,在水文模型的基础上叠加上模拟污染物负荷的组件,即构成了非点源污染模型的基本框架。近几十年来,许多研究机构和大学在研究水文循环过程的基础上,开发了数量众多的非点源污染模型。

表1简要概括了目前较常用的具有一定代表性的非点源污染模型。CREAMS(Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)模型由美国联邦农业部农业研究机构(Agricultural Research Service ARS)开发,主要用于农业污染控制最佳管理实践的分析;在CREAMS的基础上,ARS叠加了农药垂直通量模拟程序,构成了GLEAMS模型,它主要包括3个组件:水文、侵蚀/泥沙和农药。ADAPT(Agricultural Drainage And Pesti-

cide Transport)模型则是GLEAMS的延伸和扩展,它补充了一个改进的蒸散发计算方法,根据每日土壤含水量,采用一个修正的SCS水文曲线指数的径流模型,包含Green和Ampt渗流模型,根据径流过程说明大空隙流。唐万龙等^[16]以美国俄亥俄(Ohio)州达比(Darby)河流域为例,研究和比较了该模型在使用不同空间分辨率的土壤数据库时的预报精度。HSPF^[17]实际上是专用模型HSP的简化版本之一,它的其他简化版本还有面源模拟模型(NPS)和农业径流模型(ARM)。USEPA的切萨皮克(Chesapeake)湾研究计划(CBP)的流域模型就是基于HSPF, CBP采用这一模型模拟计算不同土地覆盖和土地管理方案的氮负荷,进而评估对流域造成的环境影响,帮助决策者制定相应的管理策略^[20]。

SWMM(Storm Water Management Model)是城市暴雨径流模型,Apicella等^[21]采用该模型模拟合流污水系统溢流对纽约(Newtown)河的污染负荷(主要考虑TSS和BOD),并与RMA-6水动力模型和RMA水质模型相结合,研究纽约河的水质响应。SWMM模型不具有分析来水水质的功能,但它可以与其它由CEAM(Center for Exposure Assessment Modeling, US EPA)提供的模型相整合,以完成上述功能,如可以将WASP5与SWMM的输运模块进行整合。相对而言,城市水文模型较多,而水质模型较少,除了SWMM外,主要的还有USACE的STORM、USGS的DR3M-Qual(Distributed Rainfall Runoff Routing Model-Quality)、丹麦DHI的MOUSE模型等。

USGS还开发了一个空间相关的统计模型SPARROW(Spatially Referenced Regressions on Watershed Attributes),它显示了河流氮负荷与上游源和土地利用特征的关系。该模型曾在国家尺度上成功地估算了美国大陆主要河流的总氮和总磷负荷,也被应用于CBP项目中^[22]。

其他较为著名的模型还有USGS的PRMS(Precipitation-Runoff Modeling System)、SMHI(Swedish Meteorological and Hydrological Institute)等开发的HBV-N等。

1.3 模型系统

近年来,非点源污染模型呈现出向集成系统发展的趋势。模型系统描述多种水文过程和污染物、泥沙的迁移转化,并结合图形编辑、可视化及动态显示等多项功能。MIKE-SHE(Système Hydrologique Européen, 欧洲水文系统模型)就是其中的一个典型,它的基本思想由水文研究所(英国)、SOGREAH

表 1 目前常用的非点源污染模型
Fig. 1 Nonpoint source models in common use

模型名称	主持开发者	模拟的主要过程	模拟的主要变量	模型的主要特征
CREAMS	USDA ARS	农田径流、渗透、蒸发、蒸腾、土壤侵蚀、化学物质的迁移转化	农田径流量、泥沙、营养元素、农药	农田尺度的模型, 模拟连续或离散的暴雨过程
GLEAMS	USDA ARS	基本同上, 叠加了农药垂直通量模块	同上, 农药垂直通量	同上
HSPF	US EPA, 1984, 1993	综合性的水文、水质过程	径流量、泥沙负荷、氮、农药以及用户定义的污染物浓度的时间序列	流域模型, 模拟连续或一次的暴雨过程, 既可以模拟一般的污染物, 又可以模拟有毒有机污染物
SWMM	US EPA	径流过程、储水及水处理过程、污染物输运过程	水量(水文过程线和径流量)、水质参数(包括总氮、COD、正磷酸盐、总悬浮固体等)	主要适合于城市区域的综合性水量、水质模拟程序, 可以模拟连续或一次降雨过程
SWRRB	Williams 等, 1985; Arnold 等, 1989, 1991	郊区(乡村地区)的水文过程、作物生长、泥沙沉积、污染物的迁移运动	水量、泥沙、氮、磷、农药	模拟以“日”为时间步长的连续过程, 适用于大的、复杂的乡村流域
PRZM	US EPA	模拟化学污染物在非饱和带及其相邻的下层土壤、植物根系区的迁移	径流量、农药在土壤中的各种存在形态(溶解态、吸附态等)的浓度	模拟植物根系区农药的迁移转化, 还可以模拟农田的灌溉状况
ANSWERS	Purdue 大学农业工程系	模拟农业流域的截留、渗透、地表储水、地表径流、壤中流、土壤侵蚀、泥沙输运、沉积等过程	水量、泥沙、氮	采用均匀网格系统的分布参量模型, 模拟一次暴雨过程
AGNPS	USDA ARS	流域剖面过程、土壤侵蚀、化学物质的迁移转化	径流量、泥沙、农药、氮、磷	对流域采用划分子流域的方法, 子流域又被划分为许多矩形工作单元, 是一个多介质模型, 将水文过程、大气输送和泥沙过程综合于一体
UTM-TOX	US EPA 橡树岭国立实验室	水文过程、大气输送过程、泥沙过程	水量、泥沙和用户自定义的污染物	主要适合于模拟城市化地区的离散降雨过程, 但也可用于非城市化地区和模拟 1 年以上的较长时间序列
STORM	USACE	小集水区(尤其是城市)的水文过程和污染物的迁移转化	水量、总悬浮物、 BOD_5 、总氮、正磷酸盐	

注: 资料来源于文献[16]、[17]

咨询公司(法国)和 DHI 提出。MIKE-SHE 是一个确定性、分布式并具有物理基础的综合性模型系统, 它模拟土地系统各相中的所有水文循环过程, 可以模拟水量、水质和泥沙输运。该模型系统是一个用户友好的, 包含有综合性前处理、后处理的集成软件系统(包括数字化、图形编辑、可视化及动态显示)。笔者认为该系统在以下 2 个方面有其特色: 适用尺度很广, 从单一的土壤剖面到大范围的区域尺度, 可用于大范围与地表及地下水管理有关的水资源问题研究; 采用整合式的模块化结构, 其核心模块是 MIKE-SHE WM, 该模块有 6 个面向水文过程的组件, 每一组件描述整个水文循环中一个独立的物理

过程。MIKE-SHE 的其他可选组件还包括 MIKE-SHE AD(污染物迁移转化)、MIKE-SHE GC(地球化学过程)、MIKE-SHE CN(作物生长, 根系区氮过程)、MIKE-SHE SE(土壤侵蚀)等^[17]。

MIKE-11 是又一个模型系统的实例, 它的主要特点是将降雨径流模型与水动力和水质模型统一于一个系统中。文献[17]阐述了该系统的结构并给出了实证研究。

2 与遥感、地理信息系统的结合

2.1 结合的必要性、重要性

国内外学者对于环境数学模型与地理信息系统

(GIS)的结合已有较多的论述与实例研究^[23~28]。近几年来,水文学家、GIS的开发商和用户都已经充分认识到GIS与水文模型结合的重要意义^[23]。遥感信息一方面作为GIS的重要信息源,另一方面在水文模型、非点源污染模型中具有重要的应用。两者(RS和GIS)与水文模型、非点源污染模型相结合已成为一种发展趋势。

(1)两者结合使得GIS用户可以超越单纯数据处理和管理的阶段,而通过模型化的技术来对复杂的水文过程、非点源污染的发生机制进行描述和模拟,GIS尤其是它强大的处理DEM数据的功能可以给模型的使用者提供一个新的数据管理与可视化的平台^[29]。

(2)遥感(RS)技术在收集自然地理数据方面具有速度快、宏观性强、精度高、可重复等优势,这些数据和信息都可以用于水文过程和非点源污染过程的分析、计算^[30]。来自不同数据源的信息集成于统一的GIS平台,将为非点源污染模型的运行、率定、检验提供有力的数据支持。

(3)非点源污染具有分散性的特点,它随着流域内土地利用状况、地形等的不同而具有时空上的不均匀性^[31]。模型的许多输入参数,如降雨等也具有空间不均匀性。因此,GIS的运用提供了一种有效运行模型,并以地理空间概念对模拟结果进行分析和解释的方式。

(4)RS、GIS与模型的结合对于无资料地区的水文模拟、非点源污染的模拟,具有重要的实际意义。一般来说,流域水文模型的应用往往需要一定长度时间序列的观测资料去识别模型参数,显然,在无资料或缺乏资料的地区,模型的应用受到很大的限制。因此,无资料(或缺乏资料)地区的径流模拟是水文学研究中的一个重要课题。GIS的应用可以使利用计算机信息系统的平台获取流域的地貌、地形、土壤分布、植被覆盖等地理信息,用于分析和确定模型参数,从而使无资料地区的水文模拟成为可能。

2.2 结合的层次性

RS、GIS应用于非点源污染的研究体现出一定的层次性。

应用GIS建立流域非点源污染数据库是最基础的层次,也是实现GIS与模型集成的基础性工作。我国学者董亮等^[32]采用Arc/Info建立西湖流域非点源污染信息数据库,并生成了西湖流域的数字地面模型,为非点源污染专题模型库的建立奠定了基础。遥感信息一方面可以作为GIS的重要信息源,

同时也可以直接应用于水文模拟。Corral等^[33]提出一个考虑降雨空间变化的准分布型水文模型SD-TOP,该模型采用1 km × 1 km水文单元,使用天气雷达所获得的降雨场资料,模拟径流的产生过程。并将模拟结果与传统的集中参量模型TOPMODEL进行了比较。Bruen等^[34]分析研究了水文模型的输出结果对于高精度、具有空间分布的降雨输入的响应敏感度。

将RS或GIS与模型实现集成是RS、GIS与非点源模型结合的第二层次。目前主要包括以下一些工作:将来自于RS和GIS的空间信息和属性信息用于模型的参数估计、率定及模型的检验;以GIS为主要技术平台,实现模拟结果的可视化;采用GIS技术来定义表达模型研究的区域单元。

Bhaskar等^[35]与Smith等^[36]将GIS用于水文模型的数据预处理和参数估计,Hessling等^[37]将水文模型PHASE与GIS相结合,将遥感数据用于模型区域参数的率定,应用于瑞典Cyprus,Mediterranean岛的5个流域,同时研究了水文过程与植被覆盖之间的动态反馈机制。Beven等^[38]将GIS用于分布式水文模型的检验,Shamsi^[39]将GIS作为水文模型的可视化手段。我国学者许有鹏等^[40]以浙江省曹娥江流域为试验区,重点讨论了利用Landsat TM影像资料直接或辅助确定萨克拉托托模型参数的途径和方法。Garnier等^[41]将GLEAMS与IDRISI和GRASS相结合,以意大利基亚纳(Chiana)河流域为例,研究畜牧业污染对地下水的污染。Srinivasan等^[42]将GIS与分布参量连续过程的非点源污染模型(NPS)和土壤与水评价工具(SWAT)相结合,作者的工作证明,这样的集成在数据收集、可视化、对输入输出文件的分析等方面起到了有效作用。

我国学者沈晓东等^[43]针对降雨和下垫面自然参数空间分布不均匀的特点,研究了基于栅格数据的流域降雨径流模型。梁天刚等^[44]利用Arc/Info系统的地表水文模拟方法,以甘肃省环县为典型样区,模拟了水流方向、汇流能力,进行子集水区边界的划分、水道的自动提取和水道级序的划分。在此基础上,模拟了不同降雨量时可产生的地表径流。在非点源污染模拟中,往往采用一系列技术来定义、表达所研究的区域单元,这些技术在应用上的微小差别可能会导致对径流、侵蚀、沉积的估算产生相当大的差异。Engel^[45]以模型与GIS集成为主要方法,研究了地形、土地利用、土壤等输入对非点源模型输出结果的影响,也讨论了模型网格分辨率对计

算结果的影响。与水文模型类似,Engel还将非点源模型分为基于水文响应单元(HRU)和基于栅格的两类。前者包括FESHM(Finite Element Storm Hydrograph Model)Wolfe和Neale、Shanholtz等将该模型与GIS结合,根据GIS所提供的土壤类型和土地利用类型确定HRU。后者包括ANSWERS、AGNPS、SWAT模型等。Rewerts和Engel将ANSWERS与GRASS模型相结合,模拟流域的径流、侵蚀与沉积过程。Srinivasan和Engel^[45]将AGNPS与一个栅格型GIS相结合,模拟流域径流、侵蚀和氮的输移。

在第二层次应用的基础上,以GIS为平台,以RS为重要的数据源建立综合性的集成系统是RS、GIS与模型结合的第三层次。这是政府部门日益重视对非点源污染管理与控制的要求,也为人们研究非点源污染的产生机理提供了综合性的技术手段。意味着RS、GIS与非点源模型的联系从一般结合向综合集成方向发展。USGS开发了一种GIS集成环境(GIS Weasel),它是一个图形化的用户界面,帮助水文学家或其他模型研究者对所感兴趣的地理区域、排水系统和基本模型响应单元(MRUs)进行概化、参数化并准确描述其特征。从而为各类水文模型提供技术支持^[46]。EPA越来越强调流域点源与非点源的综合评价与分析。BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)正是为适应这一要求而开发的系统。它的目的包括:对环境信息进行有效的检验;提供一个统一的流域集成模型框架;对不同的点源、非点源管理方案进行分析与评估,包括对TMDLs(最大日负荷量)的估算。BASINS的组件包括:基础信息及数据库、评价工具、流域非点源模型(HSPF)和水质模型(QUAL2E)、后处理系统。这些组件构成了一个统一的软件系统^[47]。DePinto等^[48]开发了一套名为GEO-WAMS(Geographically based Watershed Analysis and Modeling System)的系统,该系统的特点是在其框架内除了实现流域非点源负荷模型与Arc/Info的结合外,还包括一个地下水运输模型和一个改进的WASP4.0水质模型。系统的设计、可行性及应用效果通过其原型系统在布法(Buffalo)河流域的应用而得到验证。

近年来,将以数据库、模型库、知识库三库集成主体,以方案选优为主要特征的计算机决策支持系统(Decision Support System, DSS)技术引入非点源污染的管理与控制成为一种新的发展趋势,这里所指的是基于GIS的空间型决策支持系统(Spatial

DSS, SDSS)。目前,国内外在这一领域的研究已有一定的基础。国外学者较早提出了SDSS的概念^[49-50]。Neghaban^[51]等开发了一个名为LOADSS(Lake Okeechobee Agricultural Decision Support System)的奥基乔比(Okeechobee)湖农业决策支持系统,它是一个面向决策者和规划者的区域环境规划系统,主要针对由雨水冲刷引起的磷负荷对湖泊造成的环境问题。它考虑了非点源控制、点源控制及综合性的流域控制。系统基于Arc/Info 6.01版本,运行于Sun Sparc工作站。Lam等^[52]开发了RASION(Regional Analysis Information System),该系统与传统的GIS有相似之处,但更强调决策支持和专家系统。Leon等^[53]将AGNPS模型与RASION相结合,建立SDSS以实现非点源污染的模拟,并对计算结果进行可视化的统计分析,整个模拟过程可由“工具条”实现与控制。

可以说,引入SDSS是RS、GIS与非点源模型结合新的发展阶段和趋势。

2.3 结合的主要方式

许多学者讨论了水文模型、非点源污染模型与GIS结合的方式^[29,34]。概括地讲,从结合的理念上主要有以下2种:将GIS的某些功能整合进非点源污染的模型系统;将非点源污染模型整合进GIS系统。具体的技术主要有松散结合与紧密集合。对于前者,模型与GIS实际是两个独立的系统,通过数据文件来实现两者之间的通讯;后者又称为“无缝”结合,目前可以考虑的技术包括宏语言编程和DLL。宏语言编程是采用GIS所提供的宏语言,如Arc/Info的AML、ArcView GIS的Avenue和Map-Info的MapBasic等,编写非点源污染的模拟程序,这里模型与GIS实现了完全融合,但是一般来说,宏语言的计算功能不强,并且所编写的程序只能在相应GIS系统环境中运行。DLL方式主要是将模型程序编译成动态连接库,在需要时由GIS系统调用运行。

3 发展前景

(1)由单纯模拟流域水文循环、非点源污染过程、负荷转向大气、水文、水质综合系统的模拟。SRBEX(Susquehanna River Basin Experiment)模拟不同时间尺度下流域水文特征对大气强迫的响应。研究人员通过MM5模拟一次暴雨系统过境时的降雨,将高分辨率的降雨数据与HMS(Hydrological Modeling System)模型耦合^[55]。Arhonditis等^[56]采用一个综合的模型系统来评价沿海滨岸带生态系统来自

于陆地源的氮负荷。该系统由相互作用的3个子系统组成:陆地系统子模型、水动力模型、生态子模型。陆地系统子模型估算农田径流的氮通量,也考虑来自大气、生活和工业废水排放所造成的氮负荷。水动力模型基于POM(Princeton Ocean Model)模拟氮和有机碳的空间输运。生态子模型着重研究氮、浮游动植物、细菌和有机碳之间的相互作用。可见,采用综合模拟技术已是非点源污染模型研究的重要方向。

2) 研究基于地理时空概念的非点源模型系统。Sui等^[29]指出,目前GIS与水文模型、非点源模型的集成中,人们主要关注其技术方面的问题,或者说仅仅是技术层面的结合,而均未或很少涉及两者更为实质性的理论问题。Schumann等^[54]论述了基于均匀矩形网格的分布式模型的思想,认为这一方式最有利于水文模型或非点源模型与GIS的结合,因为它充分发挥了GIS,尤其是栅格型GIS的空间分析功能。实际上,实现两者真正成功结合的最大障碍在于两者时空数据结构的差异。因此,Sui等^[29]提出建立基于地理信息科学(GIScience-based)的水文模型,并且认为NCGLA在1996年提出的地理信息科学的3大核心要素^[57]是研究基于地理信息科学的水文模型的关键。可见,开发与水文模型、非点源模型相兼容的时空数据结构是未来重要的研究方向。

(3) 平原水网地区的非点源污染模拟将日益受到重视。平原水网地区水文过程的模拟一直是国内外重要的研究课题。在我国南方,尤其是长江三角洲地区河网密布、地势平坦,又由于人为活动的强烈干预,水流方向往往难以确定,传统的流域模型往往难以直接应用。而这些地区又是我国经济活动强度很大的地区,水环境非点源污染十分突出,需要采用综合性的手段对非点源污染进行研究,为管理和控制提供依据。我国学者方崇惠等^[58]对QUALHYMO水文模型和NETWORK河网汇流模型在平原水网湖区的应用进行了研究。夏军等^[59]探讨了水网地区水量转化的系统模拟问题。但总体上说,这方面的工作还有待于进一步深入。

(4) 有毒有害化学物质的污染将开始受到重视。目前,非点源模型研究的对象主要是泥沙、富营养化物质氮、磷和BOD,也有一些模型可以模拟农药的负荷与迁移、转化。我们认为,在未来的研究中,应更加关注农药、VOCs、PAH、PCBs等。一方面它们大多对人体具有较大的危害性;另一方面,研究

证实许多地表水污染中的VOCs、PCBs来源于非点源。毕新慧等^[62]论述了PCBs在大气中的传输作用,认为大气沉降是水体PCBs的重要来源。Lopes等^[61]指出城市地表是绝大多数VOCs主要的非点源,城市大气次之。因此,在非点源模型研究中,应该进一步探讨这些有毒有害物质的行为。

(5) 非点源污染的野外实验、监测及管理措施的研究将得到加强。模型的研究和实际应用离不开大量的野外实验和监测数据的支持。这方面已有学者开展了不少工作。如我国学者邬伦等^[6]研究了降雨—产流过程与氮磷流失的关系,Pionke等^[63]根据Pennsylvania流域30年的试验和监测数据,通过综合分析土地利用、水文过程、流域位置等,估算流域的氮、磷负荷,这些工作都为模型研究与应用提供了有力的数据支持。没有有效的数据支持,模型的研究和应用将受到很大的限制,因此,可以预计这项工作将在未来得到进一步的重视和加强。此外,由于政府、公众对非点源污染的认识逐步提高,在理论研究的基础上,将模型应用于非点源的管理和控制将受到重视,成为模型应用不可缺少的方面。

4 结 语

水环境非点源污染模型的研究已有多年历史与积累,国内外开发了多种模型与模型系统,在实际应用中也取得了实效。由于非点源污染与水文循环过程、气象条件密切相关,本文从分析水文模型入手,分析研究了目前常用的非点源污染模型及模型系统,探讨了模型与RS、GIS结合的必要性、重要性,提出了结合的3个层次、发展方向和结合的主要方式。在非点源污染模型研究中引入RS、GIS技术,大大提高了模型的有效性、实用性和可视化程度,为研究非点源污染机理、过程提供了新的技术手段。在未来,非点源污染模型研究将更多地利用综合模拟技术,对大气、水文、水质综合系统进行模拟,将引进地理时空概念,研究建立基于地理时空概念的非点源模型系统,并将日益重视对平原水网地区 and 有毒有害物质污染过程的模拟。同时,将有更多的野外实验和监测数据对模型提供支持。可以预计,随着人们对非点源污染机制、过程的深入理解,模型必将获得进一步发展,为流域非点源的管理、控制提供更好的技术支持。

参考文献(References):

- [1] Novomy Vladimir, Chesters Gordon. Handbook of Nonpoint Pollu-

- tion Sources and Management[M]. Lin Fangrong, Li Xueling, Wu Yadi, translated. Guangzhou: Guangzhou Branch of Popular Science Press, 1987. 1-13. 43. [Novotny Vladimir, Chesers Gordon. 面污染源管理与控制手册[M]. 林芳荣, 李学灵, 吴亚蒂编译. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1987. 1-13. 43.]
- [2] Novotny V, Olem H. Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.
- [3] He Ping, Wang Jaji. The research status, predicament and challenge for nonpoint source pollution control and management[J]. Agro-environmental Protection, 1999, 18(5): 234-237. [何萍, 王家骥. 非点源(NPS)污染控制与管理研究的现状、困境与挑战[J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 234-237.]
- [4] US EPA. National Water Quality Inventory: Report to Congress Executive Summary[R]. Washington: US EPA, 1995.
- [5] Bao Quansheng, Mao Xiangqiang, Wang Huadong. Progress in the research in aquatic environmental nonpoint source pollution in China[J]. Journal of Environmental Science, 1997, 9(3): 329-336.
- [6] He Chansheng, Fu Bojie, Chen Lidong. Non-point source pollution control and management[J]. Environmental Science, 1998, 19(5): 87-91. [贺维生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.]
- [7] Mander Ulo, Forsberg Curt. Nonpoint pollution in agricultural watersheds of endangered coastal seas[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 317-324.
- [8] Liu Jingqiang, Lu Jiarhua. An introduction to internal and external hydrological models[J]. Hydrology, 1996, 4(4): 4-8. [刘金清, 陆建华. 国内外水文模型概论[J]. 水文, 1996, 4(4): 4-8.]
- [9] Gao Feng, Liu Yuchuan, Lei Shengling. A study on urban flood prediction model for Beijing city[J]. Hefei Hydraulics, 1997, (5): 15-18. [高峰, 刘毓毓, 雷声隆. 北京市城区洪水预报模型研究[J]. 河海水利, 1997, (5): 15-18.]
- [10] Xiong Lihua, Guo Shengjian. Three layers coupled watershed hydrological model(I): Model structure and equation[J]. Journal of Wuhuan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1998, 31(1): 28-31. [熊立华, 郭生练. 三层耦合流域水文模型(I) 模型结构和数学方程[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(1): 28-31.]
- [11] Xiong Lihua, Guo Shengjian. Three layers coupled watershed hydrological model(II): Application and comparison[J]. Journal of Wuhuan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1998, 31(1): 32-36. [熊立华, 郭生练. 三层耦合流域水文模型(II) 应用比较与评价[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(1): 32-36.]
- [12] Huang Ping, Zhao Jiguo. A study on distributed hydrological mathematical model of basin and its applied prospect[J]. Hydrology, 1997, 5(5): 5-9. [黄平, 赵治国. 流域分布式水文数学模型的研究及应用前景展望[J]. 水文, 1997, 5(5): 5-9.]
- [13] Ross B B, Contractor D N, Sharholz V O. A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrologic impact of landuse change[J]. Journal of Hydrology, 1979, 41: 1-30.
- [14] Beven K J, Kirkby M J. A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Bulletin, 1979, 24: 43-69.
- [15] Guo Fang, Liu Xinen, Ren Liliang. A topography based hydrological model: TOPMODEL and its widened application[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3): 296-301. [郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型——TOPMODEL 及其拓宽应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 296-301.]
- [16] Singh Vijay P, ed. Environmental Hydrology[M] (Water Science and Technology Library, Vol. 15). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [17] Singh Vijay P, ed. Computer Models of Watershed Hydrology[M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995.
- [18] Tang Wanqiang, Chen Mi, Ward A D, et al. Comparison of ADAPT model between different scale soils data bases on predicted hydrological responses of America Ohio Darby Creek watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 15-18. [唐万强, 陈米, Ward A D, 等. ADAPT 模型在不同尺度土壤数据库中的预报精度——以美国俄亥俄州 Darby Creek 流域为例[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 15-18.]
- [19] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, et al. The HSPF users' guide, entitled Hydrological Simulation Program—FORTRAN: User's Manual for Release 11[Z]. Environmental Research Laboratory EPA/600/R-93/174, Athens, GA, 1993.
- [20] Donigan A S, Bicknell B R, Pawaradhan A S, et al. Chesapeake Bay Program Watershed Model Application to Calculate Bay Nutrient Loadings—Final Facts and Recommendations[R]. Report No. EPA 903-R-94-42. Annapolis, Maryland: USEPA Chesapeake Bay Program Office, 1994.
- [21] Apicella Gruy, Schaeffer Frederick, Zaccagnino James, et al. Water-quality modeling of combined sewer overflow effects on Newtown Creek[J]. Water Environment Research, 1996, 68(6): 1012-1024.
- [22] Preston S D, Brakebill J W. Application of Spatially Referenced Regression Modeling for the Evaluation of Total Nitrogen Loading in the Chesapeake Bay Watershed[R]. USGS Water-Resources Investigations Report 1999-99-4054.
- [23] Goodchild Michael F. The state of GIS for environmental problem-solving[A]. In: Goodchild Michael F, Steyaert Louis T, Parks Bradley O, eds. Environmental Modeling with GIS[C]. New York: Oxford University Press, 1993. 8-15.
- [24] Parks Bradley O. The need for integration[A]. In: Goodchild Michael F, Steyaert Louis T, Parks Bradley O, eds. Environmental Modeling with GIS[C]. New York: Oxford University Press, 1993. 30-34.
- [25] Fedra Krut. GIS and environmental modeling[A]. In: Goodchild Michael F, Steyaert Louis T, Parks Bradley O, eds. Environmental Modeling with GIS[C]. New York: Oxford University Press, 1993. 35-50.
- [26] Li Bengang, Tao Shu. Application of GIS in environmental model-

- eling[J]. Journal of Environmental Sciences, 1998, 19(3): 87-90. [李本纲, 陶澍. 地理信息系统在环境研究中的应用[J]. 环境科学, 1998, 19(3): 87-90.]
- [27] Liu Yong, Jing Wenyong. GIS technology and its applications in environmental sciences and engineering[J]. Journal of Environmental Sciences, 1997, 18(2): 52-65. [刘勇, 井文涌. 地理信息系统技术及其在环境科学中的应用[J]. 环境科学, 1997, 18(2): 52-65.]
- [28] Wang Hongwei, Cheng Shengrong. The comprehensive integration of Multi-media and 3S and its application in environmental sciences[J]. Journal of Environmental Sciences, 1998, 19(2): 83-86. [王宏伟, 程声通. 多媒体 3S 综合集成技术及其在环境科学中的应用[J]. 环境科学, 1998, 19(2): 83-86.]
- [29] Su D Z, Maggio R C. Integrating GIS with hydrological modeling: Practices, problems, and prospects[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1999, 23: 33-35.
- [30] Wang Depu, Zhai Jarui. The prospects for application of remote sensing to hydrology[J]. People's Huang River, 1996, 5(5): 55-59. [王德甫, 翟家瑞. 遥感技术在水文学中的应用前景[J]. 人民黄河, 1996, 5(5): 55-59.]
- [31] Pular D, Springer Darren. Towards integrating GIS and catchment models[J]. Environmental Modeling & Software, 2000, 15: 451-459.
- [32] Dong Liang, Zhai Yinmei, Wang Ke. Application of GIS to establishing nonpoint source pollution database in West Lake watershed: A case study[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1999, 25(2): 117-120. [董亮, 朱荫渭, 王珂. 应用 GIS 建立西湖流域非点源污染信息数据库[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(2): 117-120.]
- [33] Corral C, Sempere-Torres D, Revilla M, et al. A Semi-distributed hydrological model using rainfall estimates by radar, application to mediterranean basins[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000, 25(10-12): 133-136.
- [34] Bruen M. Using radar information in hydrological modeling: COST 717 WG-I activities[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000, 25(10-12): 1305-1310.
- [35] Bhaskar N R, Wesley P J, Devulapalli R S. Hydrologic parameter estimation using geographical information system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118: 492-512.
- [36] Smith M B, Vidmar A. Data set derivation for GIS-based hydrological modeling[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60: 67-76.
- [37] Hessling M. Hydrological modeling and a pair basin study of mediterranean catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 1999, 24(1-2): 59-63.
- [38] Beven K J, Moore I D, eds. Terrain Analysis and Distributed Modeling in Hydrology[M]. Chichester, UK: Wiley & Sons, 1992.
- [39] Shamsi U M. Storm-water management implementation through modeling and GIS[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122: 114-127.
- [40] Xu Youpeng, Chen Qianlan, Zhu Jingyu. Application of remote sensing images to dynamic hydrologic simulation[J]. Advances in Water Science, 1995, 5(2): 156-161. [许有鹏, 陈钦安, 朱静玉. 遥感信息在水文动态技术模拟中的应用[J]. 水科学进展, 1995, 5(2): 156-161.]
- [41] Garner M, Porto A L, Marini Renzo, et al. Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater pollution caused by agricultural disposal of animal waste[J]. Environmental Management, 1998, 22(5): 747-756.
- [42] Srinivasan R, Arnold J, Rosenhal W, et al. Hydrologic modeling of Texas gulf basin using GIS[A]. In: Goodchild M F, Steyaert L T, Park B O, eds. GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues[C]. USA: Fort Collins, 1996. 213-217.
- [43] Shen Xiaodong, Wang Lachun, Xie Shunping. A dynamic precipitation-Runoff model for a watershed based on grid data[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 264-271. [沈晓东, 王腊春, 谢顺平. 基于栅格数据的流域降雨径流模型[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 264-271.]
- [44] Liang Tianguang, Zhang Shenglei, Dai Ruolan, et al. Modeling of surface runoff based on raster system in GIS for rain harvesting agriculture[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (7): 26-29. [梁天刚, 张胜雷, 戴若兰, 等. 基于 GIS 栅格系统的集水农业地表产流模拟分析[J]. 水利学报, 1998, (7): 26-29.]
- [45] Engel Bernard A. Methodologies for development hydrologic response unit based on terrain, land cover, and soil data[A]. In: Goodchild M F, Steyaert L T, Park B O, eds. GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues[C]. USA: Fort Collins, 1996. 123-128.
- [46] Viger R J, Markstrom S L, et al. The GIS weasel-An interface for the treatment of spatial information used in watershed modeling and water resource management[A]. In: Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference[C]. April, 19-23, 1998, Las Vegas, Nevada, Vol. II, 73-80.
- [47] US EPA. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Source[EB/OL]. <http://www.epa.gov/OST/BASINS/basinsrv1.html>, June 2001.
- [48] DePinto Joseph V, Atkinson Joseph F, Calkins Paul J, et al. Development of GEO-WAMS: A modeling support system to integrate GIS with watershed analysis models[A]. In: Goodchild M F, Steyaert L T, Park B O, eds. GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues[C]. USA: Fort Collins, 1996. 271-276.
- [49] Kessel S R. An Australian geographical information and modeling system for natural area management[J]. International Journal of Geographic Information Systems, 1990, 4(3): 333-362.
- [50] Armstrong M P, Densham P J. Database organization strategies for SDSS[J]. International Journal of Geographic Information Systems, 1990, 4(1): 3-20.

- [51] Negahban B, Fonyo C, Campbell K, et al. LOADSS: A GIS-based decision support system for regional environmental planning [A]. In: Goodchild M F, Sieyaert L T, Park B O, eds. GIS and Environmental Modelling: Progress and Research Issues [C]. USA: Fort Collins 1996. 277-282.
- [52] Lam D C, Mayfield C I, Swayne D A, et al. A prototype information system for watershed management and planning [J]. Journal of Ecological Systems, 1994, 2 (4): 499-517.
- [53] Leon L F, Lam D C, Swayne D A, et al. Integration of a non-point source pollution model with a decision support system [J]. Environmental Modelling & Software 2000, 15: 249-255.
- [54] Schumann A H, Geyer J. GIS-Based ways for considering spatial heterogeneity of catchment characteristics [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000, 25 (7-8): 691-694.
- [55] Yarnal B, Lakshakia M N, Yu Z, et al. A linked meteorological and hydrological model system: The susquehanna river basin experiment [J]. Global and Planetary Change 2000, 25: 149-161.
- [56] Arhonditsis G, Tsiaris G, Angelidis M O, et al. Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: Application to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean sea [J]. Ecological Modelling 2000, 129: 209-227.
- [57] NCGIA Advancing Geographical Information Science (Final Version) [EB/OL]. <http://www.ncgia.ucsb.edu/secure/main.html>
- [58] Fang Chonghui, Bai Xianlai, Ou Guanghua. Development of compound watershed model and its application to river network lake region [J]. Yangtze River, 1995, 26 (10): 13-17. [方崇惠, 白先台, 欧光华. 流域模型在平原水网湖区研究与应用 [J]. 人民长江, 1995, 26 (10): 13-17.]
- [59] XiaJun, Liu Deping. A hydrological system model applied to water transformation and water resource assessment for drainage experiment catchment in plain area in Hubei province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (11): 46-55. [夏军, 刘德平. 湖北平原水网区水文水资源系统模拟研究 [J]. 水利学报, 1995, (11): 46-55.]
- [60] Bi Xinhui, Xu Xiaobai. Behaviors of PCBs in environment [J]. Progress in Chemistry, 2000, 12 (2): 152-160. [毕新慧, 徐晓白. 多氯联苯的环境行为 [J]. 化学进展, 2000, 12 (2): 152-160.]
- [61] Lopes T J, Bender D A. Nonpoint source of volatile organic compounds in urban areas: relative importance of land surfaces and air [J]. Environmental Pollution, 1998, 101: 221-230.
- [62] Wu Lun, Li Peiwu. Studies on rainfall process, flow-making and nitrogen and phosphorus losses [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1996, 16 (1): 111-115. [郭伦, 李佩武. 降雨—产流过程与氮、磷流失特征研究 [J]. 环境科学学报, 1996, 16 (1): 111-115.]
- [63] Pionke H B, Gburek W J, Sharpley A N, et al. Critical source area control on water quality in an agricultural watershed located in the Chesapeake basin [J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 325-335.

PROGRESS IN THE RESEARCH OF NONPOINT SOURCE POLLUTION MODELS OF AQUATIC ENVIRONMENT

MA Wei-chun¹, CHEN Li-min¹, LI Jian-zhong¹

GAO Xiao-jiang¹, LIN Wei-qing²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China)

Abstract: Two main types of pollution sources of surface waters can be generally characterized as point and nonpoint (i.e. diffuse) sources. While point sources are for the most part relatively well characterized and controlled, nonpoint sources become more and more important and are being increasingly recognized as significant aquatic pollution sources. This paper reviewed the research status of the hydrological models and nonpoint pollution models, analysed some famous and commonly-used models such as CREAMS, GLEAMS, HSPF, ANSWERS, AGNPS, etc., then discussed the significance, levels and methods of integrating RS, GIS and nonpoint pollution models. The authors also elucidated 3 levels of the integration: The basic level—establishing the database for the nonpoint sources based on GIS; The second level—integrating the RS and GIS with nonpoint pollution models, such as parameter estimation, visualization for simulation results using GIS; The third level—establishing the comprehensive and integrated simulation system based on RS and GIS. Finally four aspects of the prospects and trends of nonpoint pollution models are analysed: Establishing the integrated simulation system which can describe interactions between atmospheric, hydrological processes and water quality responses. Establishing the nonpoint pollution model system based on GIScience. Focusing on the research of nonpoint pollution simulation in the plain catchment area. Focusing on the toxic pollutants such as VOCs, PAH, PCBs, etc., in the nonpoint pollution simulation.

Key words: Nonpoint pollution model; GIS; Integration.