

城市非点源污染模型研究进展

王龙, 黄跃飞, 王光谦

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:回顾了城市非点源污染模型的发展历史, 分析了能够模拟城市非点源污染的7个国外模型(SWMM、STORM、SLAMM、HSPF、DR3M-QUAL、MOUSE 和 HydroWorks)的特点、适用性和局限性, 介绍了国外城市非点源污染模型不确定性研究方法和成果以及城市非点源污染分析概率模型, 总结了国内城市非点源污染模型的研究成果. 指出国外城市非点源污染模型在污染物累积和冲刷、泥沙和污染物运移、污染物的生化反应等方面模拟能力不足, 而国内城市非点源污染模型多是经验模型, 模拟面积较小, 模拟精度较差. 提出未来城市非点源污染模型研究应提高泥沙和污染物的模拟能力, 探索无资料和不完全信息下城市非点源污染的模拟和预测, 加强城市非点源污染随机性模型的研究, 发展城市非点源污染模型与GIS的耦合应用.

关键词:城市非点源污染; 累积; 冲刷; 生化反应; 不确定性; 研究进展

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2532-09

Review of Urban Nonpoint Source Pollution Models

WANG Long, HUANG Yue-fei, WANG Guang-qian

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development history of urban nonpoint source pollution models is reviewed. Features, applicability and limitations of seven popular urban nonpoint source pollution models (SWMM, STORM, SLAMM, HSPF, DR3M-QUAL, MOUSE, and HydroWorks) are discussed. The methodology and research findings of uncertainty in urban nonpoint source pollution modeling are presented. Analytical probabilistic models for estimation of urban nonpoint sources are also presented. The research achievements of urban nonpoint source pollution models in China are summarized. The shortcomings and gaps of approaches on urban nonpoint source pollution models are pointed out. Improvements in modeling of pollutants buildup and washoff, sediments and pollutants transport, and pollutants biochemical reactions are desired for those seven popular models. Most of the models developed by researchers in China are empirical models, so that they can only applied for specific small areas and have inadequate accuracy. Future approaches include improving capability in fate and transport simulation of sediments and pollutants, exploring methodologies of modeling urban nonpoint source pollution in regions with little data or incomplete information, developing stochastic models for urban nonpoint source pollution simulation, and applying GIS to facilitate urban nonpoint source pollution simulation.

Key words: urban nonpoint source pollution; buildup; washoff; biochemical reaction; uncertainty; research advance

城市非点源污染是指城市屋面、路面和其它地面污染物在降雨径流的淋溶冲刷作用下以广域、分散的形式进入河湖引发的水体污染. 目前, 随着城市点源逐渐得到有效控制, 非点源污染逐渐成为城市水环境保护面临的首要问题. 美国环境保护署(USEPA)的调查报告指出, 1988年城市暴雨径流引起的污染是河流水质恶化的第四大因素和湖泊水质恶化的第三大因素, 1992年则分别是第三大因素和第二大因素. 欧洲和其它国家也得到了大致相同的结论^[1]. 在我国, 随着城市化进程的快速发展, 城市非点源污染也逐渐成为影响河流湖泊水质的主要因素之一.

国内外众多学者对城市非点源污染的研究主要集中在2个方面: 定量化研究和控制管理研究. 城市非点源污染的控制管理研究主要是在美国学者提出的最佳管理措施(best management practices, BMPs)的基础上, 结合实际情况制定各种非点源污染控制管理措施, 削减和控制非点源污染. 制定城市非点源污

染控制管理措施的前提是准确把握城市非点源污染的时空分布特征及负荷大小, 而城市非点源污染模型是城市非点源污染特征研究的重要工具和手段, 因此成为目前城市非点源污染的研究热点之一. 利用城市非点源污染模型, 可以进行不同时间、空间尺度污染物的模拟, 量化非点源污染负荷, 识别非点源污染风险, 确定非点源污染重点治理区域, 合理规划城市排水管网, 分析土地利用变化对城市水环境的影响, 制定科学合理的非点源污染治理措施, 并评价各种措施的治理效果.

1 城市非点源污染模型的发展

目前, 城市非点源污染模型经历了经验模型、机

收稿日期: 2009-12-15; 修订日期: 2010-04-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB724202); 优秀重点实验室基金项目(50823005)

作者简介: 王龙(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市非点源污染模型, E-mail: wanglong08@mails.tsinghua.edu.cn

制模型、与 GIS 耦合应用 3 个发展阶段。

20 世纪 60 ~ 70 年代,一些学者通过因果分析和统计分析的方法建立了非点源污染负荷与土地利用或径流量之间的经验关系^[2,3]。这些经验模型输入数据少,能够简便地模拟计算流域出口的非点源污染负荷,具有一定的实用性。但这些模型难以描述污染物迁移转化的过程和时空分布,使其进一步应用受到较大的限制^[4]。

20 世纪 70 ~ 80 年代,一些有影响的非点源污染模型不断推出,其中 SWMM、STORM、HSPF、DR3M-QUAL 等可用于城市的非点源污染模型。这些模型基于对城市降雨径流、污染物累积和冲刷、土壤侵蚀、排水管网中泥沙和污染物运动过程的描述,属于经验与机制相结合的模型,能够模拟降雨过程中非点源污染的迁移转化,具有较好的模拟效果。

20 世纪 90 年代以来,随着计算机和 GIS 技术的快速发展,GIS 被广泛应用于城市非点源污染的模拟和预测。初期 GIS 只是被用于提取城市非点源污染模型所需要的地形、河网、土地利用等输入数据,属于 GIS 与城市非点源污染模型的松散耦合。到 20 世纪 90 年代后期,BASINS^[5] (better assessment science integrating point and nonpoint source)、InfoWorks CS^[6] 等一些大型非点源污染模型系统集成成了 GIS,形成操作系统平台,可提取模型输入参数,并具有数据查询、空间分析和地图输出功能,实现了 GIS 与城市非点源污染模型的紧密耦合。与 GIS 的耦合应用,使城市非点源污染模型的参数提取更加准确和方便,也使模型的模拟预测效果有很大的改进,对机制型模型的发展起到了巨大的推动作用。

2 城市非点源污染模型研究

2.1 国外城市非点源污染模型研究

2.1.1 国外城市非点源污染模型简介

国外欧美发达国家对暴雨径流引起的城市非点源污染重视较早,开发推出了 SWMM、STORM、SLAMM、HSPF、DR3M-QUAL、QQS、FHWA、MOUSE、HydroWorks 等城市非点源污染模型,其中影响较大、应用广泛的主要有美国的 SWMM、STORM、SLAMM、HSPF 和 DR3M-QUAL 模型以及欧洲的 MOUSE 和 HydroWorks 模型。

(1) SWMM 模型

SWMM (storm water management model)^[7] 是 1971 年 USEPA 为解决日益严重的城市非点源污染而推出的城市暴雨水量水质预测和管理模型。模型

历经几次改进后,最新版本为 SWMM Version 5。SWMM 主要由径流模块 (Runoff)、输送模块 (Transport)、扩充输送模块 (Extran)、存储处理模块 (Storage/Treatment) 4 个计算模块和用于统计分析和绘图的一个服务模块组成,可以模拟完整的城市降雨径流过程,不透水区地表径流,透水区土壤侵蚀和下渗过程,排水管网中的溢流以及接纳水体的水质变化。SWMM 可以模拟生化需氧量 (BOD)、化学需氧量 (COD)、大肠杆菌、总氮 (TN)、总磷 (TP)、总固体悬浮物 (TSS)、沉淀物质、油类等 10 种污染物及用户自定义污染物,考虑大气污染物的沉降,但不考虑污染物之间的相互作用和转化^[8]。在不透水区,系统提供线幂函数、指数函数和饱和函数 3 种污染物累积模型,以及指数函数、关系曲线和场次平均浓度 3 种污染物冲刷模型,基本以统计经验模型为主。在透水区,采用通用修正土壤流失方程 (RUSLE) 计算土壤侵蚀,入渗过程提供霍顿公式、Green-Ampt 入渗模型和曲线数值法 3 种计算方法。输入信息包括水文气象、土地利用、累积和冲刷系数、地形、排水管网等,输出信息包括模拟区域任何地点的污染负荷、管道溢流等。模型能够对 BMPs 效果进行模拟评价。缺点和局限是对污染物的生化反应的模拟能力很差,对与水质密切相关的管道泥沙运动也不能进行较好的模拟^[9]。

(2) STORM 模型

STORM (storage, treatment, overflow, runoff model)^[10] 是美国陆军工程兵团工程水文中心 (HEC) 1973 年推出的城市暴雨径流模型,用于模拟城区降雨径流及水质过程。STORM 能模拟 TSS、沉淀物质、BOD、TN、正磷酸盐和大肠杆菌 6 种污染物,不考虑污染物之间的相互作用和转化。在不透水区,STORM 提供线性函数和污染物占泥沙一定比例 2 种累积模型,冲刷模型采用一阶指数衰减模型,皆为经验模型。在透水区,采用土壤流失方程 (USLE) 计算土壤侵蚀。模型输入信息包括水文气象、土地利用、累积和冲刷系数等参数,输出信息包括地表径流过程线和场次污染物负荷量。缺点和局限是模型结构比较简单,不能模拟泥沙运动过程和污染物的迁移转化过程,不适合连续时间尺度的模拟。

(3) SLAMM 模型

SLAMM (source loading and management model)^[11] 是 20 世纪 70 年代中期美国学者 Pitt 等开发的用于城市非点源污染物识别和控制模拟的非点源污染模型。SLAMM 可以模拟 TP、TN、溶解氧

(DO)、TSS、泥沙和金属等污染物. 在透水区和不透水区,模型采用降雨量减去截留量和入渗量计算径流量,污染物的累积和冲刷均采用指数型模型. 模型输入信息包括降雨量、土壤类型、土地利用类型、排水系统特征和控制装置和措施等,输出内容:径流量、污染物浓度、污染物负荷等. SLAMM 模型有 2 个突出特点:一是可以模拟多种控制管理装置和措施(污染源、排水系统和出口)的污染物截留和去除效果,二是模型引入了随机分析,可以进行输入参数的不确定性分析. 缺点和局限是不能进行雨水和污染物在管道和沟道中的模拟计算,因而不能输出径流过程和污染物浓度过程.

(4) HSPF 模型

HSPF(hydrologic simulation program-fortran)^[12]是 20 世纪 70 年代 USEPA 联合美国地质调查局(USGS)推出的用于模拟农村和城市地区水文水质过程的非点源污染模型. HSPF 模型借鉴集成了早期 SWM(stanford watershed model)、HSP(hydrologic simulation program)、ARM(agricultural runoff management)、NPS(nonpoint source runoff)等模型,经过不断改进,现已发展到 WinHSPF Version 12,并作为一个子模型嵌入 USEPA 1998 年开发的 BASINS 系统. 模型可以模拟 TSS、BOD、大肠杆菌、TP、硝酸盐和亚硝酸盐等污染物,考虑污染物之间的相互作用和转化. 在不透水区,模型采用线性函数累积模型,冲刷率直接取径流的比例,不同污染物可以取不同的比例. 在透水区,采用 Meyer 等^[13]提出的土壤表面降雨侵蚀模型计算土壤侵蚀,污染物作为泥沙产量的一部分. 考虑街道清扫对污染物累积的影响. 模型输入信息包括水文气象、土地利用、累积和冲刷系数、地形、受纳水体特征和污染物衰减系数等,输出信息包括地表径流量和污染物负荷过程线、污染物对受纳水体的影响以及 BMPs 等控制措施的效果评价. 缺点和局限是不能进行管道水流的复杂计算,不适合场次暴雨尺度的模拟^[14],在城区应用局限性较大,且模型校正时参数不唯一^[15,16].

(5) DR3M-QUAL 模型

DR3M-QUAL(distributed routing rainfall-runoff model)^[17]是 USGS 1982 年推出的可以模拟城区降雨径流水量和水质的基于物理概念的分布式模型. 模型将地面、各级管道看作一个系统,逐日计算场次暴雨之间的土壤湿度,采用运动波演算地面径流,最小时间步长为 1min,适合于小城市区域的应用. DR3M-QUAL 可以模拟 TN、TP、TSS 和金属 4 种污染

物,不考虑污染物之间的相互作用. 在不透水区,模型采用指数函数累积、冲刷模型,考虑街道清扫. 在透水区,采用 RUSLE 计算土壤侵蚀. 模型输入信息:水文气象、土地利用、累积和冲刷系数等参数,可以输出降雨径流过程线和场次污染物负荷. 缺点和局限是不能模拟污染物之间的相互作用,对地表和管道中的泥沙运动模拟能力差^[9].

(6) MOUSE 模型

MOUSE(model for urban sewers)^[18,19]是丹麦水力学研究所(DHI)1984 年推出的用于模拟城市径流、管道水流的暴雨径流模型. 1994 年,增加了污染物模拟模块的 MOUSETRAP^[20]发布. MOUSETRAP 能够模拟泥沙和溶解态、颗粒态污染物的运动,以及管道中水质变化过程和微生物的降解过程. MOUSE 能模拟 DO、BOD、COD、溶解态氨、溶解态磷、泥沙、温度、3 种细菌以及用户自定义金属等水质参数. 在不透水区,模型提供线性函数和指数函数 2 种污染物累积模型,污染物冲刷通过雨滴溅蚀引起的物理分离进行模拟. 在透水区,模型提供 4 种经验或机制模型模拟土壤侵蚀、沉积和泥沙运动. 模型输入信息包括水文气象、土地利用、累积冲刷系数、泥沙运动参数、微生物降解的模拟参数等,可以输出流域内任何地点的污染负荷分布. 缺点和局限是模型复杂,参数率定繁琐,基础数据获取困难,有较大的不确定性^[8].

(7) HydroWorks 模型

HydroWorks^[21]是英国 Wallingford 软件公司 1997 年开发推出的可以模拟城市雨水水质及污染负荷的水文水质模型. HydroWorks 现被纳入 Wallingford 软件公司的排水网络模拟软件 InfoWorks CS 中,作为该软件的一个城市水量水质模拟组件,不再是独立的模型. 模型采用分布式模型模拟降雨径流过程,并进行汇流计算,采用完全求解的圣维南方程模拟管道流动. HydroWorks 能模拟 TSS、BOD、COD、铵态氮、TKN、TP 以及 4 种用户自定义污染物. 在不透水区,污染物累积模型是线性函数,冲刷模型是雨强和累积泥沙质量的函数. 在透水区,模型提供 3 个模型计算土壤侵蚀和泥沙沉积. 模型输入信息包括水文气象、土地利用、累积和冲刷系数以及管网布置和尺寸等参数,可以输出流域内任何地点的污染负荷. 缺点和局限性是管道中污染物运动仅考虑水平对流,没有考虑离散;模型比较复杂,参数率定繁琐,基础数据获取困难,有较大的不确定性^[8].

以上 7 个常用城市非点源污染模型的特点、适用性和局限性总结比较如表 1 所示.

表 1 7 个常用城市非点源污染模型特点、适用性和局限性

Table 1 Features, applicability and limitations of seven popular urban nonpoint source pollution models							
项目	SWMM	STORM	SLAMM	HSPF	DR3M-QUAL	MOUSE	HydroWorks
时间尺度	场次、连续	场次	场次	场次、连续	场次	场次、连续	场次、连续
空间尺度	城市	城市	城市	城市、流域	城市	城市管网	城市
污染物累积模型	幂函数、指数函数、饱和浸润方程	线性函数	指数函数	线性函数	指数函数	线性函数、指数函数	线性函数
污染物冲刷模型	指数函数、关系曲线、场次平均浓度	指数函数	指数函数	径流比例	指数函数	雨滴溅蚀	雨强和污染物累积量的函数
泥沙、污染物运动模拟	地表、管道	地表	地表	地表	地表	地表、管道	地表、管道
污染物相互作用和转化模拟	不可以	不可以	不可以	可以	不可以	可以	不可以
污染负荷图输出	可以	不可以	不可以	不可以	不可以	可以	可以
模型复杂性	较高	一般	一般	较高	一般	高	高
模型不确定性	较大	较小	较小	较大	较小	大	大
GIS 耦合应用	松散	松散	松散	紧密	松散	松散	紧密
BMPs 模拟评价	可以	不可以	可以	可以	不可以	可以	可以

2.1.2 国外城市非点源污染模型应用研究

通过以上对各个模型特点的介绍和分析,可以看出在具体应用时,各个模型均有其局限性和适用性,国外众多学者通过实例应用对各个模型进行了验证分析。

SWMM 模型的应用最为广泛,不仅适用于小型或大型城市区域的暴雨径流水量和水质模拟,也适用于城市管网的辅助设计. Tsihrintzis 等^[22]将 SWMM 应用于南佛罗里达 4 个面积较小(5.97 ~ 23.56 hm²)的城市区域,并用 16 场独立的降雨事件进行了验证,结果流量过程和污染物负荷与实测数据均吻合很好. Barco 等^[23]将 SWMM 应用于南加利福利亚某大型城市区域(217 km²),得到了较好的模拟预测效果,证明了 SWMM、GIS 和优化方法的耦合应用是大型城市区域非点源污染模拟的有效工具. Lowe^[24]将 SWMM 应用于城市生活污水管网的设计,指出只要参数设置合理,SWMM 能方便地应用于生活污水管网的设计,而且便于修改和动态显示。

STORM 模型多用于 20 世纪 90 年代,受其模拟精度和效果的影响,该模型应用越来越少. Warwick 等^[25]将 STORM 应用于德克萨斯州达拉斯一个居民区,进行了径流和水质的模拟和验证,结果并不理想. Najjar 等^[26]将 STORM 应用于新泽西,进行了 TSS 和大肠杆菌的模拟和验证,但没有给出具体的误差结果。

HSPF 模型通常用于流域水量和水质的模拟,但也适用于快速城市化的地区. Bergman 等^[27]应用 HSPF 模拟佛罗里达一个快速城市化的地区,TSS、

TN 和 TP 的模拟和验证结果比较理想. In 等^[28]应用 HSPF 模拟城市化对水环境的影响,结果表明,城市化将导致径流量、洪峰流量和泥沙量增大,而由于农田大量减少,TKN 和 TP 负荷将减小. Ackerman 等^[29]将 HSPF 应用于佛罗里达南部一个干旱的城市化地区,结果表明,模型在汛期模拟效果较好,而干旱期模拟效果较差。

SLAMM 模型最初开发用于弄清城市非点源污染源与径流水质的关系,后来主要用于城市降雨非点源污染控制和管理措施的效果模拟和评价. Myllyoja 等^[30]应用 SLAMM 模型模拟评价了各种 BMPs 对污染物截留和去除的效果. Pitt 等^[31]应用 WinSLAMM 模型研究评价了低冲击开发(low impact development, LID)对城市暴雨径流引起的非点源污染的控制效果. 应用结果表明,SLAMM 模型能准确客观地模拟评价各种雨洪和污染物控制管理措施的效果,是城市非点源污染控制管理的一种有效工具。

DR3M-QUAL 模型一般用于小型城市地区或集水区水量和水质模拟,但模拟效果一般,20 世纪 90 年代以后鲜有应用成果发表. Linder-Lundsford 等^[32]将 DR3M-QUAL 应用到丹佛一个半干旱城市流域,并与一个线性回归方法进行了比较,结果表明,两者对场次降雨污染负荷的预测效果均较差. Thomas^[33]将 DR3M-QUAL 应用于新墨西哥阿尔布开克一个 32 hm² 的城市区域,进行了径流量和洪峰流量的模拟和验证,结果表明,径流量和洪峰流量的模拟值和实测值分别相差 29% 和 37%。

MOUSE 和 HydroWorks 模型通常用于城市排水

管道和管网模拟. Garsdal 等^[34]将 MOUSE 应用到丹麦一个 5km 的重力排水管道中,进行了 DO 和 COD 的模拟和验证,结果表明,模拟值与实测值拟合较好. Vasiliades 等^[35]将 HydroWorks 和 MOUSE 应用到英格兰 Gateshead 的管网模拟,结果表明,HydroWorks 比 MOUSE 降雨径流过程模拟效果稍好,因为前者在计算降雨径流时采用了一个基于实测数据的经验回归公式. Masse 等^[36]将 HydroWorks 应用到法国一个 239 hm² 的集水区,进行了排水管网中污染物的长系列模拟,结果表明,TSS、COD、TKN 和氨氮的模拟效果都很好. Zug 等^[37]将 HydroWorks 应用到法国一个 620 hm² 的城市区域,进行了排水管网中 TSS 的模拟,得到了较好的模拟效果.

2.1.3 城市非点源污染模型不确定性研究

为解释和描述城市降雨径流非点源污染的迁移转化过程,城市非点源污染模型往往将高度复杂的城市水文和水质过程概念化和抽象化,采用相对简单的数学模型和公式进行描述. 这些模型在具体应用时,往往会出现“异参同效”的“失真”现象,体现了确定性模型的不确定性.

城市非点源污染模型不确定性的来源^[38] 以下 4 类:输入误差、模型结构误差、模型参数不确定性和输出不确定性. McCarthy 等^[38]研究了城市暴雨径流中大肠杆菌观测数据的不确定性,分析了观测数据被应用之前进行不确定性分析的重要性,提出了提高城市暴雨径流大肠杆菌观测的准确性和减小观测数据的不确定性的建议. Freni 等^[39]研究了一个城市水量水质综合模型输入数据的不确定性,证明了当缺少输入数据时,模型的验证和有效性评估往往会导致模型使用者过分相信模型输出结果,同时指出输入数据的缺少将增加模型的不确定性. Gaume 等^[40]研究了 SWMM 模型参数输入的不确定性,指出输入数据过少和过多都会导致参数之间有很大的相互影响作用,从而影响模型的验证. Freni 等^[41]研究评价了一个综合城市排水模型的参数和结构的不确定性,并提出了减小模型不确定性的方法和建议.

分析和评价城市非点源污染模型的不确定性,国内外使用比较广泛的是普适似然不确定性估计方法 (generalized likelihood uncertainty estimation, GLUE). Jia 等^[42]应用 GLUE 研究了 HSPF 模型参数输入的不确定性, Thorndahl 等^[43]应用 GLUE 研究了 MOUSE 模型的不确定性,证明了 GLUE 是分析和评

价城市非点源污染模型不确定性的有效方法. Freni 等^[44,45]研究了在应用 GLUE 时,可接受阈值和似然函数对城市暴雨径流水质模型的不确定性的影响,指出可接受阈值的确定和似然函数的选择以及模型使用者的经验对模型不确定性的分析非常重要.

2.1.4 城市非点源污染分析概率模型研究

由于确定性模型往往结构复杂,数据广度和精度要求高,而且不确定性较大,一些学者研究建立了输入数据相对较少、不确定性较小的城市非点源污染分析概率模型. Behera 等^[46]应用概率分布理论和指数型污染物累积冲刷模型,建立了城市暴雨径流水质分析概率模型,应用该模型,能得到场次降雨污染物冲刷量、年平均污染物冲刷量、场次降雨污染物冲刷量概率分布函数以及多年平均污染物浓度 (event mean concentration, EMC),经验证,该模型计算简便,适用于城市非点源污染的规划分析. Chen 等^[47-49]应用不同的降雨径流模型,结合污染物累积冲刷模型,建立了 2 种城市暴雨径流水质分析概率模型,并与 SWMM 模型进行了对比分析,证明了该模型是城市暴雨污染物控制和水质管理的有效工具.

2.2 国内城市非点源污染模型研究

我国城市非点源污染模型的研究起步较晚,最早的非点源污染研究始于 20 世纪 80 年代的湖泊富营养化调查,真正意义上的城市非点源污染研究始于北京城市径流污染的研究,之后相继在上海、杭州、苏州、长沙、南京、成都等城市开展了城市非点源污染规律的研究^[50]. 随着我国城市非点源污染问题逐渐突出,国内学者对城市非点源污染的研究给予了足够的关注,在城市非点源污染模型方面也取得了一定的研究成果.

(1) 城市降雨径流与污染负荷的相关性分析研究

此类研究主要根据实测流域出口降雨径流量和污染物平均浓度,建立污染物负荷与降雨径流或土地利用的经验模型. 温灼如等^[51]建立了以降雨为输入、水量单位线和污染负荷单位线为响应函数、径流和污染量为输出的苏州暴雨径流污染模型;吴祖林^[52]基于对杭州市不同功能区的暴雨径流污染的研究,得到了多场暴雨径流量和污染负荷的相关关系以及累积径流量和累计污染负荷的相关关系;刘曼蓉等^[53]对南京市城北地区的径流量和污染物负荷量进行了研究,建立了暴雨径流的概化模型和统计模型;卓慕宁等^[54]在监测珠海城区暴雨径流污染

的基础上,引用 SCS 模型对城区暴雨径流污染负荷进行了估算和分析评价。这类研究成果和经验模型往往只在研究区域内适用,不具有外推性,预测性较差。

(2) 国外城市非点源污染模型的应用研究

此类研究主要是对国外应用广泛、影响较大的城市非点源污染模型进行参数识别和验证,使其适用于国内城市非点源污染的模拟和预测。施为光^[55]用修正的 STORM 模型应用于成都市降雨径流污染负荷研究;王志标等^[56]建立了基于 SWMM 的重庆市棕桐泉小区非点源污染模型,对非点源污染负荷进行了量化研究;祁继英等^[57]应用 SWMM 对苏州古城区南园水系排水区的单场降雨产生的非点源污染负荷量及其变化过程进行了研究,比较了不同非点源污染管理措施的效果;杨勇等^[58]应用 SWMM 对天津市汉沽区主城区的非点源污染进行了研究,模拟计算了不同设计雨型下 TSS、COD、TN 和 TP 这 4 种污染物的负荷量。

(3) 基于概率统计的城市非点源污染模型研究

此类研究主要通过概率分布和统计分析的方法建立城市非点源污染的概率模型,并应用于城市非点源污染的模拟预测。许仕荣等^[59]把以物理过程为基础的模拟特征融入到概率模型中,建立了城市雨水径流污染负荷的概率模型,并用 Monte Carlo 随机抽样法,对长期径流污染负荷进行了模拟研究,得出了流域径流污染负荷的分布特征及其特征值;方红远等^[60]通过建立苏州某小区降雨径流量和径流中 TP 负荷的密度分布函数,估算了该小区径流 TP 负荷的平均值。

此外,国内一些学者还研究建立了有各自特色的城市非点源污染模型。贺锡泉^[61]建立了包括运动水流模式、污染传输方程和地表径流冲刷的城市径流非点源污染运动波模型,并应用到成都市一次典型降雨径流过程;车伍等^[62]建立了计算城市径流面污染负荷的数学模型,具有参数少、因果关系清楚和简便直接等特点,可对城市径流非点源污染进行量化分析并确定合理的初期雨水径流控制量;叶闽等^[63]结合武汉市汉阳地区城市非点源污染特性,将城市地表径流产汇流联系在一起,基于单元网格产流、产污和汇流模型,以及排水管网的水动力学模型和污染物迁移模型,建立了分布式城市非点源污染模型,可以模拟城市暴雨径流非点源污染特性及其变化规律。

3 存在不足及发展趋势

3.1 存在不足

城市非点源污染模型在欧美等国家起步较早,取得了丰富的研究成果,开发推出了一些比较成熟的城市非点源污染模型,但存在以下几方面的不足:

(1) 污染物累积和冲刷模型需要改进和修正。Kanso 等^[64]应用贝叶斯方法检验了一个常用的污染物累积冲刷模型,发现模型的参数输入不唯一,而且对不同地区模型公式需要修正,否则不能进行准确的模拟;Robien 等^[65]研究发现实际污染物冲刷过程比现有常用污染物冲刷模型复杂,现有模型不能区分径流携带泥沙量和径流冲刷泥沙量。

(2) 大多数模型不能对暴雨径流挟带的泥沙的运动进行准确模拟。污染物大多以吸附态随泥沙一起运动,因此泥沙运动对污染物的迁移转化有非常重要的影响。暴雨径流挟带泥沙的运动的准确模拟需要泥沙级配、泥沙黏聚性和管道形状的详细资料,需要对非恒定流理论有深刻的认识 and 了解,而现有许多模型将冲淤水动力学误用于管网泥沙运动的模拟计算^[66,67]。

(3) 大多数模型不能模拟污染物的生化反应过程。污染物在地表和排水管道中运动时会发生一定的化学和生物变化,直接影响径流中各种污染物的浓度和含量。泥沙颗粒上吸附的微生物会影响暴雨径流中的 BOD、COD 和 DO^[34];Delleur^[68], Ashley 等^[69]强调了模拟泥沙和微生物相互作用的必要性;Zoppou^[70]和 Rauch 等^[71]指出现有城市非点源污染模型的主要缺点之一就是不能充分模拟污染物的生化反应过程。

国内非点源污染模型起步较晚,取得了一定的研究成果,但主要存在以下不足:经验型模型居多,有水文过程和污染物迁移转化机制的模型很少,经实际应用检验效果理想的模型几乎没有;大多数模型只适用于小城市,对面积较大的城市非点源污染模拟能力较差,且只适用于某一特定的城市区域,不便于推广应用;模型不够完善,不能准确模拟城市暴雨径流和非点源污染过程,模拟结果不理想。

3.2 发展趋势

城市非点源污染模型在城市水环境管理中具有不可替代的作用。随着研究的不断深入和新技术手段的引入,未来研究展望如下:

(1) 提高暴雨径流中泥沙和污染物的模拟能力。地表侵蚀冲刷和管道中泥沙和污染物运动、

污染物与泥沙相互作用以及污染物在地表和管道中生化反应过程的模拟. 管道中泥沙和污染物运动相对复杂, 需要考虑有压、无压、泥沙粒径和污染物种类等. 污染物与泥沙的相互作用和污染物的生化反应过程是研究的难点, 同时也是准确模拟污染物负荷的关键之一.

(2) 探索无资料或不完全信息下城市非点源污染的模拟预测. 城市非点源污染模型往往需要大量的参数信息. 然而, 许多城市往往没有相应的基础数据, 如何在无资料或不完全信息下模拟预测该地区的非点源污染负荷, 是未来非点源污染模型研究的另一热点.

(3) 加强随机模型的研究, 结合常用的确定性模型, 建立城市非点源污染综合模型. 目前, 国内外应用广泛的非点源污染模型多为确定性模型, 而城市非点源污染模拟系统具有很强的复杂性和不确定性, 大量的参数和过程具有不确定性. 综合模型能发挥随机性模型和确定性模型的优点, 减小不确定性, 提高模拟预测效果, 因此有很好的应用前景, 也是未来的发展方向.

(4) 发展城市非点源污染模型与 GIS 的耦合应用. 目前, GIS 已越来越多应用到城市非点源污染的模拟预测中. 在 GIS 的支持下, 实现模型所需流域参数提取的计算机化, 开发用于城市非点源污染模拟、预测、分析和评价的综合系统, 也将成为未来城市非点源污染模型研究的发展趋势.

参考文献:

- [1] Tsihrintzis V A, Hamid R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: a review [J]. *Water Resources Management*, 1997, **11**(2): 137-164.
- [2] Burges S J, Lettenmaier D P. Probabilistic methods in stream quality management [J]. *Water Resources Bulletin*, 1975, **11**(1): 115-130.
- [3] Driscoll E D, Toro D M D, Thomann R V. A statistical method for the assessment of urban stormwater [R]. USA: United States Environmental Protection Agency, 1979.
- [4] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型——理论方法与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 10-15.
- [5] Whittemore R C. The BASINS model [J]. *Water Environment and Technology*, 1998, **10**(12): 57-61.
- [6] Koudelak P, West S. Sewerage network modelling in Latvia, use of InfoWorks CS and Storm Water Management Model 5 in Liepaja city [J]. *Water and Environment Journal*, 2008, **22**(2): 81-87.
- [7] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5.0 [Z]. USA: United States Environmental Protection Agency, 2009.
- [8] Obropta C C, Kardos J S. Review of urban stormwater quality models: deterministic, stochastic, and hybrid approaches [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**(6): 1508-1523.
- [9] Donigian Jr A S, Huber W C. Modeling of nonpoint source water quality in urban and non-urban areas [R]. USA: United States Environmental Protection Agency, 1991.
- [10] HEC. Storage, treatment, overflow, runoff model, STORM, generalized computer program 723-57-L7520 [Z]. USA: Hydrologic Engineering Center, United States Corps of Engineers, 1977.
- [11] Pitt R, Voorhees J. SLAMM, the source loading and management model [A]. In: *Wet-weather Flow in the Urban Watershed: Technology and Management* [M]. CRC Press, 2002. 79-101.
- [12] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, et al. Hydrological simulation program-Fortran user's manual for release 11 [R]. USA: United States Environmental Protection Agency, 1996.
- [13] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water [J]. *Transactions of the ASAE*, 1969, **12**(6): 754-758.
- [14] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases [J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, **46**(6): 1553-1566.
- [15] Doherty J, Johnston J M. Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, **39**(2): 251-265.
- [16] Gallagher M, Doherty J. Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22**(7): 1000-1020.
- [17] Alley W M, Smith P E. Distributed routing rainfall-runoff model: version II [R]. USA: United States Geological Survey, 1982.
- [18] DHI. MOUSE surface runoff models, reference manual [R]. Denmark: DHI Software, 2004.
- [19] DHI. MOUSE pipe flow, reference manual [R]. Denmark: DHI Software, 2004.
- [20] Crabtree R, Garsdal H, Gent R, et al. MOUSETRAP-a deterministic sewer flow quality model [J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(1): 107-115.
- [21] Wallingford Software. Using HydroWorks [R]. United Kingdom: Wallingford Software, 1997.
- [22] Tsihrintzis V A, Hamid R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. *Hydrological Processes*, 1998, **12**(2): 311-329.
- [23] Barco J, Wong K M, Stenstrom M K. Automatic calibration of the U. S. EPA SWMM model for a large urban catchment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **134**(4): 466-474.
- [24] Lowe S A. Sanitary sewer design using EPA Storm Water Management Model (SWMM) [EB/OL]. http://www3.interscience.wiley.com/journal/116835322/issue_2009-02-10/

- 2010-03-04.
- [25] Warwick J J, Wilson J S. Estimating uncertainty of stormwater runoff computations [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1990, **116**(2): 187-204.
- [26] Najjar K F, Park S S, Uchrin C G. A water quality management model for the lakes bay estuarine embayment. 1. receiving water-quality model[J]. *Journal of Environment Science and Healthy Part A-Environmental Science and Engineering*, 1995, **30**(5): 1001-1023.
- [27] Bergman M J, Green W, Donnangelo L J. Calibration of storm loads in the South Prong watershed, Florida, using BASIN/HSPF [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, **38**(5): 1423-1436.
- [28] In S J, Brannan K M, Mostaghimi S. Simulating hydrologic and water quality impacts in an urbanizing watershed[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, **39**(6): 1465-1479.
- [29] Ackerman D, Schiff K C, Weisberg S B. Evaluating HSPF in an arid, urbanized watershed [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, **41**(2): 477-486.
- [30] Myllyoja R, Baroudi H, Pitt R, *et al.* Use of SLAMM in evaluating best management practices [A]. In: *Models and Applications to Urban Water Systems*, Monograph 9 [C]. Canada: Computational Hydraulics International, 2001. 131-141.
- [31] Pitt R, Voorhees J. The use of WinSLAMM to evaluate the benefits of low impact development [A]. In: *Low Impact Development Conference: Putting the LID on Storm Water Management*[C]. USA: College Park, MD, 2004. 21-23.
- [32] Linder-Lundsford J B, Ellis S R. Comparison of conceptually based and regression rainfall-runoff models, Denver Metropolitan area, Colorado, and potential applications in urban areas [R]. USA: United States Geological Survey, 1987.
- [33] Thomas R P. Application of the DR3M watershed model on a small urban basin[J]. *Water Resources Bulletin*, 1990, **26**(5): 757-766.
- [34] Garsdal H, Mark O, Dorge J, *et al.* MOUSETRAP: modelling water quality processes and the interaction of sediments and pollutants in sewers[J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(7): 33-41.
- [35] Vasiliades L, Loukas A, Valentine E, *et al.* Modelling of a combined sewer overflow using hydroworks and mouse software packages [A]. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Environmental Science and Technology* [C]. Greece: University of the Aegean, 2001. 911-919.
- [36] Masse B, Zug M, Tabuchi J P, *et al.* Long term pollution simulation in combined sewer networks[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(7): 83-89.
- [37] Zug M, Faure D, De Belly B, *et al.* Use of real time control modelling on the urban sewage system of nancy [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(2-3): 261-268.
- [38] McCarthy D T, Deletic A, Mitchell V G, *et al.* Uncertainties in stormwater *E. coli* levels[J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1812-1824.
- [39] Freni G, Mannina G, Viviani G. Assessment of data availability influence on integrated urban drainage modelling uncertainty[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(10): 1171-1181.
- [40] Gaume E, Villeneuve J P, Desbordes M. Uncertainty assessment and analysis of the calibrated parameter values of an urban storm water quality model [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**(1-4): 38-50.
- [41] Freni G, Mannina G, Viviani G. Uncertainty assessment of an integrated urban drainage model [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **373**(3-4): 392-404.
- [42] Jia Y B, Culver T B. Uncertainty analysis for watershed modeling using generalized likelihood uncertainty estimation with multiple calibration measures [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2008, **134**(2): 97-106.
- [43] Thorndahl S, Beven K J, Jensen J B, *et al.* Event based uncertainty assessment in urban drainage modelling, applying the GLUE methodology [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **357**(3-4): 421-437.
- [44] Freni G, Mannina G, Viviani G. Uncertainty in urban stormwater quality modelling: The effect of acceptability threshold in the GLUE methodology [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2061-2072.
- [45] Freni G, Mannina G, Viviani G. Uncertainty in urban stormwater quality modelling: The influence of likelihood measure formulation in the GLUE methodology [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(1): 138-145.
- [46] Behera P K, Adams B J, Li J Y. Runoff quality analysis of urban catchments with analytical probabilistic models [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, **132**(1): 4-14.
- [47] Chen J Y, Adams B J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(10): 1314-1330.
- [48] Chen J Y, Adams B J. A derived probability distribution approach to stormwater quality modeling [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, **30**(1): 80-100.
- [49] Chen J Y, Adams B J. Development of analytical models for estimation of urban stormwater runoff [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **336**(3-4): 458-469.
- [50] 张瑜英,孙丽云,李占斌. 城市非点源污染研究进展与展望 [J]. *人民黄河*, 2006, **28**(3): 42-43.
- [51] 温灼如,苏逸深,刘小靖,等. 苏州水网城市暴雨径流污染的研究 [J]. *环境科学*, 1986, **7**(6): 2-6.
- [52] 吴祖林. 杭州城市径流污染特征的初步分析 [J]. *上海环境科学*, 1987, (6): 34-36.
- [53] 刘曼蓉,曹万金. 南京市城北地区暴雨径流污染研究 [J]. *水文*, 1990, (6): 15-19.
- [54] 卓慕宁,王继增,吴志峰,等. 珠海城区暴雨径流污染负荷估

- 算及其评价[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(5): 35-38.
- [55] 施为光. 成都市径流污染的概念性模型[J]. 四川环境, 1994, **13**(2): 65-70.
- [56] 王志标. 基于 SWMM 的棕榈泉小区非点源污染负荷研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [57] 祁继英. 城市非点源污染负荷量化研究[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [58] 杨勇. 设计暴雨条件下城市非点源污染负荷分析[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [59] 许仕荣, 周永潮, 张伟. 基于 Monte Carlo 法的城市雨水径流污染负荷模拟[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(5): 57-59.
- [60] 方红远, 陈志春. 城市降雨径流负荷计算的统计分析法[J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(1): 13-15.
- [61] 贺锡泉. 城市径流非点源污染运动波模型初探[J]. 上海环境科学, 1990, **9**(8): 12-15.
- [62] 车伍, 刘燕, 欧岚, 等. 城市雨水径流面污染负荷的计算模型[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(7): 56-58.
- [63] 叶闽, 杨国胜, 张万顺, 等. 城市面源污染特性及污染负荷预测模型研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(2): 67-69.
- [64] Kanso A, Gromaire M C, Gaume E, *et al.* Bayesian approach for the calibration of models: application to an urban stormwater pollution model[J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(4): 77-84.
- [65] Robien A, Striebel T, Herrmann R. Modeling of dissolved particle-bound pollutants in urban street runoff [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(8-9): 77-82.
- [66] Tait S J, Chebbo G, Skipworth P J, *et al.* Modeling in-sewer deposit erosion to predict sewer flow quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **129**(4): 316-324.
- [67] Kanso A, Chebbo G, Tassin B. Application of MCMC-GSA model calibration method to urban runoff quality modeling[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, **91**(10-11): 1398-1405.
- [68] Delleur J W. New results and research needs on sediment movement in urban drainage [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, **127**(3): 186-193.
- [69] Ashley R, Crabtree B, Fraser A, *et al.* European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **129**(4): 267-275.
- [70] Zoppou C. Review of urban storm water models[J]. Environment Modelling & Software, 2001, **16**(3): 195-231.
- [71] Rauch W, Bertrand-Krajewski J L, Krebs P, *et al.* Deterministic modelling of integrated urban drainage systems [J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(3): 81-94.