

# 流域水环境污染模型及其应用研究综述\*

朱瑶 梁志伟\*\* 李伟 杨祎 杨木易 毛巍 徐寒莉 吴伟祥

(浙江大学环境工程系, 杭州 310058)

**摘要** 流域水环境污染模型是研究流域水环境问题的重要工具,通过对整个流域系统及其内部发生的复杂污染过程量化描述,识别污染物主要来源和迁移途径,估算污染负荷,评价其对流域水环境的影响,可为流域规划与管理提供决策依据.本文对当前国内外广泛应用的流域水环境模型,尤其是模拟污染负荷的模型进行了系统总结,主要包括污染负荷模型(GWLF与PLOAD)、受纳水体水质模型(QUAL2E与WASP)、以及集成污染负荷与水体水质的综合流域模型(HSPF、SWAT、AGNPS、AnnAGNPS、SWMM),着重介绍各模型的结构原理与主要特点,讨论模型实际应用的局限性.此外,还对其他水质模型(CE-QUAL-W2、EFDC和AQUATOX)与综合流域模型(GLEAMS和MIKE SHE)进行了简要的总结.最后,通过对单个模型独立运用和多个模型联合运用的案例分析,探讨了流域水环境污染模型的发展趋势与应用前景.

**关键词** 流域 水环境 污染模型 负荷 水质

**文章编号** 1001-9332(2013)10-3012-07 **中图分类号** X52 **文献标识码** A

**Watershed water environment pollution models and their applications: A review.** ZHU Yao, LIANG Zhi-wei, LI Wei, YANG Yi, YANG Mu-yi, MAO Wei, XU Han-li, WU Wei-xiang (College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(10): 3012-3018.

**Abstract:** Watershed water environment pollution model is the important tool for studying watershed environmental problems. Through the quantitative description of the complicated pollution processes of whole watershed system and its parts, the model can identify the main sources and migration pathways of pollutants, estimate the pollutant loadings, and evaluate their impacts on water environment, providing a basis for watershed planning and management. This paper reviewed the watershed water environment models widely applied at home and abroad, with the focuses on the models of pollutants loading (GWLF and PLOAD), water quality of received water bodies (QUAL2E and WASP), and the watershed models integrated pollutant loadings and water quality (HSPF, SWAT, AGNPS, AnnAGNPS, and SWMM), and introduced the structures, principles, and main characteristics as well as the limitations in practical applications of these models. The other models of water quality (CE-QUAL-W2, EFDC, and AQUATOX) and watershed models (GLEAMS and MIKE SHE) were also briefly introduced. Through the case analysis on the applications of single model and integrated models, the development trend and application prospect of the watershed water environment pollution models were discussed.

**Key words:** watershed; water environment; pollution model; loading; water quality.

目前,国内外由于重金属、病原体、营养物质和土壤侵蚀引发的流域水环境恶化趋势尚未得到有效控制,其中由于营养物质超标引起的水体富营养化问题尤为突出<sup>[1]</sup>.然而,目前我国在解决流域水环

境污染问题的主要途径仍然是工程技术手段,运用模型在流域范围内对污染问题进行系统分析、预测、模拟和管理的手段仍然匮乏.流域水环境污染模型通过模拟污染物在流域范围内的迁移转化过程,明确污染物运移的时空分布规律,可以为治理和管理流域水环境提供有力支持.通过模型模拟,可以获悉人为污染源和土地管理活动产生的污染负荷对受纳

\* 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2013XZZX004)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: zhiweiliang@163.com

2013-01-16 收稿, 2013-07-23 接受.

水体的水质状况产生的影响,以及如何改变负荷输入以提高水质状况<sup>[2]</sup>. 国内外已有不少关于流域尺度水文和非点源污染模型的结构特点和主要类型的综述<sup>[3-4]</sup>. 国内外流域模型众多,归纳起来,主要可以分成两大类:第一类是根据物理过程描述的不同分为概念性(或经验性)模型和(半)机理机制的模型;另一类是根据空间离散程度或分辨率大小的不同分为集总式和分布式模型<sup>[5]</sup>. 本文着重对流域水环境污染模型进行系统总结,根据研究目的和服务对象的不同,将其分为污染负荷模型、受纳水体水质模型和综合流域模型三大类,详细介绍了各类模型的结构原理、模型特点与水文、污染物迁移过程,通过具体的案例分析总结各模型在实际应用过程中的优势和局限性,探讨了模型发展趋势和应用前景.

## 1 污染负荷模型

### 1.1 GWLF (Generalized Watershed Loading Functions)

GWLF 模型是由宾夕法尼亚州立大学的 Haith 和 Shoemaker<sup>[6]</sup> 共同开发的半分布式、半经验式的流域负荷模型,主要以月步长的形式模拟流域内不同土地利用类型产生的径流量、土壤侵蚀量和氮磷营养盐负荷. 模型将整个流域视为一个单一的单元,并不对流域进行空间划分,仅对所有土地利用地区的负荷量进行简单加和. GWLF 模型采用 SCS 曲线方程对地表径流进行计算模拟. 利用改进的 USLE 方程计算进入水体中的土壤侵蚀产生量. 对于污染负荷模拟, GWLF 模型将进入水体的污染物按形态分为溶解态污染物和颗粒态污染物. 溶解态污染负荷来源包括点源、农村径流和地下水;颗粒态污染负荷来源包括农村径流和城市径流. GWLF 采用负荷方程将溶解态和颗粒态污染物与流量联系起来<sup>[7]</sup>.

GWLF 模型能够利用地理信息系统技术(GIS)和遥感技术(RS)提供的空间数据,在中等尺度流域的范围内进行非点源污染负荷估算. GWLF 对数据的要求比较低,只需要土地利用信息、土地覆盖、土壤、径流参数、土壤侵蚀和营养物负荷等. 其相对 SWAT 等大型分布式流域模型具有空间数据要求少、参数量少、模拟过程相对简单等优点,且模型不需要校准,尽管水文校准已证明对具有监测数据时非常有用<sup>[8]</sup>. GWLF 模型是半分布式、半经验式的流域负荷模型,因此模拟精度较粗;虽然可以按天进行计算,但只能以月步长输出径流量、污染负荷量,因此对单次暴雨时间的模拟不理想,不能说明极端环

境情况下污染负荷贡献的问题.

### 1.2 PLOAD

PLOAD 模型是由美国 CH2M HILL 水资源工程小组开发的基于 GIS 的流域非点源污染负荷模型,主要在年尺度上分析流域非点源的负荷量情况<sup>[9]</sup>. PLOAD 模型所需的数据分为 GIS 数据(包括流域边界数据和土地利用类型数据)和表格形式的数据,输入的数据以文件的形式传递给模型进行计算. PLOAD 能够计算各种污染物的负荷,包括总悬浮物(TSS)、溶解性总固体(TDS)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、氮和磷等,计算负荷量时以不同土地利用类型进行分类统计计算. 此外,对于实施“最佳管理措施(Best Management Practices, BMP)”的区域,还可增加 BMP 数据. PLOAD 模型具有众多优点使其在许多区域得到广泛应用. 该模型计算方法简单、易于理解、操作简便,而且计算结果可视化效果好;同时又能与 BMP 模型结合,可为非点源污染控制措施的制定提供依据.

## 2 水体水质模型

### 2.1 QUAL2E

QUAL2E 是由 Tufts 大学土木工程系和 EPA 水质模型中心(CWQM)环境研究实验室合作开发,其前身是 20 世纪 60 年代推出的 QUAL-I 模型. QUAL2E 是一维稳态水质模型,适用于模拟完全混合的树枝状河流水质. QUAL2E 假定存在主流输送机理,即假定平流和离散作用都沿着河流的主流向,而在河流的横向与垂向上水质组分是完全均匀混合的,允许河流沿程有多个污染源、取水口和支流汇入. 模型可依用户需求组合模拟 15 种水质参数:溶解氧(DO)、生化需氧量、温度、叶绿素 a、氮、磷、大肠杆菌、任意非守恒物质和 3 种守恒物质<sup>[10]</sup>. QUAL2E 既可以作为静态的模型也可以作为动态的模型使用. 静态模拟时,能用来研究废水排放对河流水质的影响;动态模拟时,可研究气象数据每天的变化对水质(主要是溶解氧和温度)的影响,还可计算预定的溶解氧水平所需要的稀释流的流量. 但 QUAL2E 作为一个相对通用的软件,使用的限制条件较为苛刻:河段数最多 25 个,且每个河段不超过 20 个计算单元;汇合单元最多 6 个;源头最多不超过 7 个等.

QUAL2K 是 QUAL2E 的改进版本,较 QUAL2E 而言,QUAL2K 改进的部分主要有:QUAL2E 把河流系统分割成长度相等的河段,而 QUAL2K 采用不同

长度的河段;采用两种碳化 BOD 的形式(缓慢反应形式和快速反应形式)来表示有机碳;溶解氧和营养物的沉积物-水之间的通量被模拟成内在反应;模拟河流 pH 和底栖藻类等<sup>[11]</sup>。

## 2.2 WASP(The Water Quality Analysis Simulation Program)

WASP 模型是由美国环境保护局开发的水质模型系统,是用于模拟地表水中污染物迁移转化的通用的模型框架。适用于分析池塘、湖泊、水库、河流、河口和沿海水域一维、二维和三维的水质模拟问题。WASP 是十分灵活的动态模型,其基本方程中反映了对流、弥散、点源负荷和非点源负荷以及边界等随时间变化的过程<sup>[12]</sup>。WASP 模型是一种数学模型,在数值计算、参数率定上具有优势,但不足之处是其前期概化以及网格化较为繁琐,存在人为误差,因此需要与 GIS 耦合应用,将研究区域数字化,以提高精度。

WASP 系统由两个相对独立的计算程序 DYNHYD 和 WASP 组成,两个程序可联合运行,也可分开独立运行。DYNHYD 适用于一维的水动力学程序,用以模拟水流的运动;WASP 是水质分析模拟程序,是基于质量守恒原理的动态模型模拟体系,在时空上追踪水质组分在水体中的变化。WASP 程序由两个子模块组成:有毒化学物模块 TOXI 和富营养化模块 EUTRO。TOXI 采用 EXAMS 的动力学结构,结合模型迁移结构和简单的沉积平衡机理,可预测有机化合物和重金属在各类水体中迁移积累的动态变化过程。EUTRO 采用 POTOMAC 富营养化的动力学结构,可模拟 DO、BOD、氨、硝酸盐、叶绿素 a、正磷酸盐等营养物质在水体中的迁移转化情况<sup>[13]</sup>。

## 2.3 其他水体水质模型

除 QUAL2E 和 WASP 两种主要的常用水质模型外,还有许多其他适用于特定水体的水质模型。例如,由美国陆军工程兵团水道实验站开发的二维水质和水动力学模型 CE-QUAL-W2,用于模拟二维横向平均水动力学和水质,适用于湖泊、水库和河口等水域<sup>[14]</sup>。由美国 Virginia 海洋研究所开发的环境流体动力学模型 EFDC,可模拟水系统一维、二维和三维流场、点源、非点源的污染物、有机物迁移、回归趋势等<sup>[15]</sup>。AQUATOX 模型是淡水生态系统模拟模型,可预测营养物和有机物的迁移转化,以及这些变化对生态系统的影响,包括鱼、无脊椎动物和水生生物<sup>[16]</sup>。

## 3 流域综合模型

### 3.1 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)

HSPF 模型是由美国环境保护署(EPA)开发的半分布式水文模型,用于较大流域范围内自然和人工条件下的水文水质过程的连续模拟。HSPF 模型在斯坦福流域模型(SWM)的基础上发展而来,能够模拟流域的水量水质变化,预测径流、地表水、地下水中的污染物浓度,且计算常规的和有毒的污染物浓度以及模拟复杂非点源污染传输过程。HSPF 包括 3 个主要应用模块,分别为透水区、不透水区、河道和混合水库,分别对 3 种不同性质的地表水文和水质过程进行模拟。3 大模块又可细分为若干子模块,水文模块采用斯坦福Ⅳ模型计算径流量;侵蚀模块采用具有机理性的土壤侵蚀模型,将土壤侵蚀分为雨滴溅蚀、径流冲蚀和径流运移等若干子过程;污染物的迁移转化模块则考虑了 BOD、DO、氮、磷和农药的复杂过程<sup>[17]</sup>。HSPF 是最全面和灵活的一种流域水文水质模型,以强大的水文模型为基础,能够应用于大多数的流域,模拟精度较高,能够模拟不同时间尺度(每分钟、每小时或每日)的洪峰流量和低流量,但对其输入数据的要求也高,需要给出连续的降雨、蒸发、气温和日照等时间序列,同时也要有相应的连续水文水质监测数据来率定模型。HSPF 最大的缺陷就是假设模拟的地区对“Stanford 流域水文模型”是适用的,并且假设污染物在受纳水体的宽度和深度方向上是充分混合的,所以模型的实用性受到了一定限制。

### 3.2 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)

SWAT 模型是由美国农业部(USDA)的农业研究中心开发的流域尺度模型,被称为在以农业和森林为主的流域具有连续模拟能力的最有前途的非点源污染模拟模型<sup>[3]</sup>。模型开发的目的是在具有多种土壤、土地利用和农业管理条件的复杂流域,预测土地管理措施对水分、泥沙和农业污染物的长期影响。SWAT 模型采用日尺度为时间单位进行连续计算,是一种基于 GIS 的分布式流域水文模型,主要是利用 RS 和 GIS 提供的空间信息模拟多种不同的水文物理化学过程<sup>[18]</sup>。考虑到流域下垫面和气候因素时空变异对模型的影响,SWAT 模型按照特定的集水区面积阈值,划分成若干个子流域,再根据不同的土地利用方式和土壤类型将各个子流域进一步划分出水文响应单元 HRUs。模型在各个 HRU 上独立运



行,并将结果在子流域的出口进行汇合.模型模拟的流域水文过程分为两部分:坡面产流和汇流部分、河道汇流部分,前者控制着每个子流域内主河道的水、沙和化学物质等的输入量,后者决定水、沙和营养物质从河网向流域出口的输移情况.

SWAT 模型主要含有水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型 3 个子模型.采用 SCS 模型计算地表径流,引入反映降水前流域特征的无因子参数 CN,得到降水径流的经验方程;利用改进的通用方程 (MUSLE) 预测土壤侵蚀量;考虑各种形式的 N、P 在土壤中的迁移转化,并采用 QUAL2E 模型计算河道中营养物的迁移转化. SWAT 模型目前应用广泛,但在实际应用中亦存在一定的问题. SWAT 模型的数据库标准是针对北美地区的植被、气候与流域特点设计的,与我国现行的流域数据库 (如土壤类型) 存在差异,因此在实际应用时,需进行相关标准的转换,且工作量大而繁琐.此外,模型模拟的准确度主要通过调整与校验参数来取得,重要参数的选取也是影响模型应用效率的因素.

### 3.3 AGNPS

AGNPS 模型是由美国农业部农业研究局与明尼苏达污染物防治局共同研制出的流域分布式事件模型,不仅能预报流域的非点源污染负荷,而且还可以用来进行风险和投资/效益分析. AGNPS 按照栅格采集模型参数,由水文、侵蚀和营养物质 (主要因子为氮和磷) 迁移三个部分组成,用以土壤养分流失预测,并对农业地区的水质问题以重要性为顺序进行排列,同时对单次暴雨径流和侵蚀产沙过程进行模拟<sup>[19]</sup>. AGNPS 模型适用的流域尺度大小从几公顷到大约 20000 hm<sup>2</sup>,流域再以 0.4 ~ 26 hm<sup>2</sup> 的单元进行均等分室,并以网格为基本运行单位,通过网格间逐步演算推算出流域出口.

AGNPS 模型是单次降雨模型,无法对流域内非点源污染进行连续预测,不适用于流域物理过程的长期演变特点,以及土壤侵蚀的时空分布规律等方面的研究.因此,美国农业部自然资源保护局与农业研究局开发了连续模拟模型——AnnAGNPS 模型 (Annualized Agricultural Non-point Source Pollution Model)<sup>[20]</sup>. 与 AGNPS 模型相比,AnnAGNPS 根据流域水文特征 (地形、土地利用和土壤类型等) 按照集水区来划分任意形状的分室,并以河网连接分室,以日为基础连续模拟一个时段内每天以及累计的径流、泥沙、养分及农药等输出结果,可用于评价流域内非点源污染长期影响.

### 3.4 SWMM (Storm Water Management Model)

美国环境保护署开发的暴雨洪水管理模型 SWMM 是基于水动力学的降雨-径流模拟模型,它可以模拟完整的城市暴雨径流量和污染物运动过程. SWMM 包括径流模块、输送模块、扩展的输送模块、调蓄/处理模块和受纳水体模块等主要模块.通过这些模块,模型可以计算城市地区与产汇流相关的各种水文过程,主要包括时变降雨量、地表水蒸发、洼地截留、地表径流非线性水库演算等<sup>[21]</sup>.此外,SWMM 可以估算与径流相关的污染物负荷,可以应用以下过程对水质进行模拟:不同土地利用类型干旱天气下的污染物;在暴雨产生时,特定土地利用类型的污染物冲刷;BMPs (最佳管理措施) 引起的冲刷负荷变化等. SWMM 不仅可用于单次暴雨洪水的模拟,还具有连续模拟功能.在模拟具有复杂下垫面条件的城市时,将流域离散成多个子流域,根据各子流域的地表性质,逐个模拟,可以方便地解决复杂城市流域的雨洪模拟问题. SWMM 模型是城市雨洪资源化研究的有效工具,但该模型对参数的要求很高,有待进一步完善和改进.

### 3.5 其他流域综合模型

GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) 是由美国农业部农业研究署研制开发的基于连续降雨事件的经验型模型,可用于模拟地下水非点源污染,特别是对农药的迁移行为<sup>[22]</sup>. MIKE SHE 模型是由丹麦水力学研究院 (DHI) 在 SHE 基础上发展研制的一个综合性、确定性的完全物理分布式水文模型.模型以多模块耦合的方式来模拟水循环中几乎所有的水文过程以及水量、水质和泥沙运输<sup>[23]</sup>.

## 4 模型应用

### 4.1 模型独立应用

上述各模型自推出以来,在流域水环境污染模拟上已得到广泛的应用. Chikondi 等<sup>[24]</sup>运用 GWLF 模型模拟估算 Malawi 湖流域的 Linthipe 河集水区的总磷、总氮以及泥沙负荷,结果表明 GWLF 模型能够很好地估算泥沙以及污染物质的年平均负荷. Lee 等<sup>[25]</sup>运用模型估算从美国切萨皮克 (Chesapeake) 市滨海平原排放到 Choptank 流域的营养负荷,证实 GWLF 是一个非常有用的估算模型,在实际资料缺少的情况下, N、P 等年尺度模拟精度在 10% ~ 50%. Ning 等<sup>[26]</sup>为评估污染防治计划,运用 QUAL2E 模拟台湾 Kao-Ping 流域的生化需氧量、溶

解氧、总磷和铵氮浓度,得出需要在未来加大控制措施以减轻流域污染状况。张智等<sup>[27]</sup>将 QUAL2E 模型应用于长江重庆段水质模拟,以长江重庆主城区段平水期水质为原型,应用模型对成库后的水质进行了模拟预测。Lin 等<sup>[28]</sup>应用 WASP 模拟评估台湾咸水流域的水质和计算水环境承载力,根据模拟结果,建议应尽量减少工业和生活污水的排放。史铁锤等<sup>[29]</sup>针对湖州市环太湖河网区水流往复性特点,以 WASP 模型为基础估算了环太湖河道 COD 和氨氮的水环境容量,并建立了综合点源和非点源的 COD 和氨氮日最大排污量管理模式。

相对于污染负荷模型和水体水质模型,综合流域模型 HSPF、SWAT 和 AGNPS 以及 AnnAGNPS 在国内外的应用更为广泛。Mishra 等<sup>[30]</sup>基于 HSPF 模拟印度一个小流域的非点源污染损失量,经过模型校准和验证,模拟结果表明 HSPF 模型能够很好地模拟研究区径流和土壤侵蚀引起的非点源污染物流失。邢可霞等<sup>[31]</sup>将 HSPF 模型应用于滇池流域进行非点源污染模拟,得出 SS 是滇池流域非点源污染的首要污染物。Jha 等<sup>[32]</sup>为确定改变土地利用对硝态氮负荷的削减情况,将 SWAT 模型应用于美国以农业为主的 Squaw Creek 流域,并得出结论:土地利用改变对硝态氮的损失非常敏感,改变土地利用方式,可以削减 7% ~ 47% 的硝态氮。Wang 等<sup>[33]</sup>基于 SWAT 模型估算大尺度流域——扬子江流域非点源污染负荷。模型分溶解态和吸附态污染负荷两部分进行模拟,并根据模拟估算结果,表明溶解态负荷主要受人类活动影响,吸附态污染负荷则主要受自然因素影响。尹刚等<sup>[34]</sup>利用 SWAT 建立了东北图们江流域非点源污染数据库,分别进行水文模拟、降雨径流和土壤侵蚀量计算。Polyakov 等<sup>[35]</sup>对 AnnAGNPS 模型进行适用性研究,将其应用于 48 km<sup>2</sup> 的热带流域模拟该流域的地表径流、土壤侵蚀以及水质状况。洪华生等<sup>[36]</sup>运用 AnnAGNPS 进行中国南方山区中等尺度流域——九龙江流域农业非点源污染负荷估算和模拟流域过程和管理措施。Lee 等<sup>[37]</sup>利用 SWMM 模型评估不确定性并估算在 TMDL(最大日负荷总量)计划中基于 BMPs 更加合适的非点源负荷削减方案。为估算城市地区土地利用变化而引起的非点源污染负荷,Shon 等<sup>[38]</sup>运用 SWMM 模型模拟 Busan 市的非点源污染负荷变化,并与前人研究作对比以确定其可信性。

## 4.2 模型耦合或集成应用

由于各种模型具有不同的优势、限制以及适用

条件,大量研究者将几种模型耦合应用,最大限度地发挥各模型的优势,使模拟结果更加符合研究需求,有效解决了流域复杂污染问题。Yuan 等<sup>[39]</sup>集成 AnnAGNPS 和河岸带生态系统管理模型 REMM (Riparian Ecosystem Management Model) 评估美国海岸带平原河岸缓冲系统的污染负荷状况。Zhu 等<sup>[40]</sup>为预测黑河金盆水库水质,研究非点源污染对陕西金盆水库水质的影响,耦合应用 AnnAGNPS 和 CE-QUAL-W2 模型。密西西比湾海岸地区的圣路易斯湾河口对密西西比河的水质具有重大影响,因此 Liu 等<sup>[41]</sup>集成运用 HSPF 模型和 EFDC 模型模拟圣路易斯湾河口的水力水质状况。Ekdal 等<sup>[42]</sup>将 SWAT 和 WASP 模型耦合应用于地中海沿岸咸水湖,将 SWAT 模型模拟的流域流量和非点源负荷输出作为 WASP 模型的输入,进行水质模拟。Narasimhan 等<sup>[43]</sup>基于 SWAT 和 WASP 建立了水库水质评估综合管理模型,SWAT 模拟流域非点源污染结果表明,85% 以上的总氮(TN)和总磷(TP)来自于非点源污染,而 WASP 模拟水库水质表明,至少需削减 35% 的 TN 和 TP 才可以明显地减少水库叶绿素 a 的浓度。王建平等<sup>[44]</sup>开发了以流域非点源模型(SWAT)、水生态动力学模型(EFDC)和河流模型(WASP)为基础的,在 GIS、RS 技术支持下的密云水库水环境模拟预测集成模型,实现密云水库及流域的营养物集成模拟和预测。

## 5 流域水环境污染模型发展趋势

从流域水环境污染模型国内外的实际应用状况来看,以下几个方面需要深入研究:1) 发展与改进现有模型,尤其是水文和污染物迁移转化机理的模型,包括模型平台开发、模型功能扩展以及模型校准验证等,拓展模型的使用范围和提高模拟的精度。目前许多模型已经与 ArcView 或 ArcGIS 平台集成,利用平台对空间数据的存储和处理能力,模型能自动提取模拟区域所需要的地形、地貌、土地利用、土壤、植被和河流等数据进行模拟,提高了模型模拟效率与准确性。针对模型校准验证,SWAT 模型已推出专门用于模型率定和验证的 SWATCUP<sup>[45]</sup> 软件,单独高效地解决率定难、效率低等问题。因此,迫切需要进一步发展和完善各种模型,以提高模型应用效率。2) 不确定性分析。虽然已有关于模型不确定性的讨论,但还没有形成系统化、普遍适用的理论体系<sup>[46]</sup>。因而对模型进行深入地不确定性分析,确定误差的大小和分布,对于模型的准确应用十分有意义。3)

加强耦合模型或集成化模型的应用. 耦合模型或集成化模型就是结合各模型的优势, 最大限度地发挥模型的应用, 是解决流域水环境复杂污染问题的发展方向之一. 随着各模型的推广应用, 构建以水质为中心的大型流域集成管理模型成为必然, 代表模型有 BASINS 模型. BASINS 模型主要包括 HSPF 模型、SWAT 模型、QUAL2E 模型和 PLOAD 模型, 目前, 已有应用 BASINS 模型计算和评估污染负荷<sup>[47-48]</sup>, 但是大多数应用只针对其中单个模型如 PLOAD 模型或 HSPF 模型的应用, 未进行真正意义上的联合模拟. 随着流域水环境污染问题的日益复杂化, 耦合模型的综合优势将逐渐增强, 在我国的应用也将更加广泛.

### 参考文献

- [1] Novotny V, Olem H, Olness A. Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994
- [2] Hao F-H (郝芳华), Li C-H (李春晖), Zhao Y-W (赵彦伟), *et al.* Water Quality Model and Simulation. Beijing: Beijing Normal University Press, 2008 (in Chinese)
- [3] Borah DK, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2003, **46**: 1553-1566
- [4] Zhang Q-L (张秋玲), Chen Y-X (陈英旭), Yu Q-G (俞巧钢), *et al.* A review on non-point source pollution models. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(8): 1886-1890 (in Chinese)
- [5] Xu Z-X (徐宗学). Hydrological Model. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [6] Haith DA, Shoemaker LL. Generalized watershed loading functions for stream-flow nutrients. *Water Resources Bulletin*, 1987, **23**: 471-478
- [7] Haith DA, Mandel R, Wu RS. Generalized Watershed Loading Functions Version 2.0 User's Manual. Ithaca: Cornell University, 1992
- [8] Schneiderman EM, Pierson DC, Lounsbury DG, *et al.* Modeling the hydrochemistry of the Cannonsville watershed with Generalized Watershed Loading Functions (GWLf). *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, **38**: 1323-1347
- [9] Hill CHM. PLOAD version 3.0: An ArcView GIS Tool to Calculate Nonpoint Sources of Pollution in Watershed and Stormwater Projects: User's Manual. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2001
- [10] Brown LC, Barnwell TO. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1987
- [11] Chapra S, Pelletier D. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and Users Manual. Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, 2003
- [12] Di Toro DM, Fitzpatrick JJ, Thomann RV. Documentation for water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP). Duluth, MN: Hydrosience, Inc., 1983
- [13] Wool TA, Ambrose RB, Martin JL, *et al.* Water Quality Analysis Simulation Program (WASP): User's Manual, Version 6.0. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2006
- [14] Cole TM, Buchak EM. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0. User Manual. Vicksburg, MS: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Environmental Laboratory, 1995
- [15] Jin KR, Hamrick JH, Tisdale T. Application of three-dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **126**: 758-771
- [16] Park RA, Clough JS, Wellman MC. AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological Modelling*, 2008, **213**: 1-15
- [17] Bicknell BR, Imhoff JC, Kittle Jr JL, *et al.* Hydrological Simulation Program-Fortran: User's Manual for Version 11. Washington, DC: National Exposure Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, 1997
- [18] Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part, I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **34**: 73-89
- [19] Young RA, Onstad C, Bosch D, *et al.* AGNPS: A non-point-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44**: 168-173
- [20] Bingner RL, Theurer FD, Yuan Y. AnnAGNPS Technical Processes [EB/OL]. (2005-12-06)[2012-12-26]. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199>, 2003
- [21] Rossman LA, Supply W. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0. Washington, DC: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010
- [22] Garnier M, Lo Porto A, Marini R, *et al.* Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater pollution caused by agricultural disposal of animal waste. *Environmental Management*, 1998, **22**: 747-756
- [23] Begey MB, Gonella M, Teatini P, *et al.* MIKE-SHE Application to the Recovery Project of a Former Industrial Area in Ravenna, Italy, Strongly Polluted by Tomcetahs [EB/OL]. (1999-11-04)[2012-12-26]. [http://www.vki.dk/upload/publications/mikeshe/Begey\\_MIKE\\_SHE\\_application\\_Ravenna.pdf](http://www.vki.dk/upload/publications/mikeshe/Begey_MIKE_SHE_application_Ravenna.pdf)
- [24] Chikondi GM, Joshua V, Phiri S. Modeling the fluxes of nitrogen, phosphate and sediments in Linthipe catchment, Southern Lake Malawi Basin: Implications for catchment management. *African Journal of Agricultural*



- Research*, 2010, **5**: 424–430
- [25] Lee KY, Fisher TR, Jordan TE, *et al.* Modeling the hydrochemistry of the Choptank River Basin using GWLF and Arc/Info: 1. Model calibration and validation. *Biogeochemistry*, 2000, **49**: 143–173
- [26] Ning SK, Chang NB, Yang L, *et al.* Assessing pollution prevention program by QUAL2E simulation analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 2001, **61**: 61–76
- [27] Zhang Z (张智), Li C (李灿), Zeng X-L (曾晓岚), *et al.* QUAL2E model for water quality simulation in Chongqing section of the Yangtze River. *Environmental Science and Technology* (环境科学与技术), 2006, **29**(1): 1–3 (in Chinese)
- [28] Lin CE, Chen CT, Kao CM, *et al.* Development of the sediment and water quality management strategies for the Salt-water River, Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**: 528–34
- [29] Shi T-C (史铁锤), Wang F-E (王飞儿), Fang X-B (方晓波). The water quality management mode based on WASP in Taihu Lake network in Huzhou City. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **30**(3): 631–640 (in Chinese)
- [30] Mishra A, Kar S, Raghuwanshi NS. Modeling nonpoint source pollutant losses from a small watershed using HSPF model. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, **135**: 92–100
- [31] Xing K-X (邢可霞), Guo H-C (郭怀成), Sun Y-F (孙延枫), *et al.* Simulation of non-point source pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF model. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2004, **24**(2): 229–232 (in Chinese)
- [32] Jha MK, Schilling KE, Gassman PW, *et al.* Targeting land-use change for nitrate-nitrogen load reductions in an agricultural watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **65**: 342–352
- [33] Wang X, Hao FH, Cheng HG, *et al.* Estimating non-point source pollutant loads for the large-scale basin of the Yangtze River in China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**: 1079–1092
- [34] Yin G (尹刚), Wang N (王宁), Yuan X (袁星), *et al.* Non-point source pollution of nitrogen and phosphorus nutrients using SWAT model in Tumen River watershed, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(4): 704–710 (in Chinese)
- [35] Polyakov V, Fares A, Kubo D, *et al.* Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22**: 1617–1627
- [36] Hong H-S (洪华生), Huang J-L (黄金良), Zhang L-P (张珞平), *et al.* Modeling Pollutant loads and management alternatives in Jiulong River watershed with AnnAGNPS. *Environmental Science* (环境科学), 2005, **26**(4): 63–69 (in Chinese)
- [37] Lee SC, Park IH, Lee JI, *et al.* Application of SWMM for evaluating NPS reduction performance of BMPs. *Desalination and Water Treatment*, 2010, **19**: 173–183
- [38] Shon TS, Kim SD, Cho EY, *et al.* Estimation of NPS pollutant properties based on SWMM modeling according to land use change in urban area. *Desalination and Water Treatment*, 2012, **38**: 333–341
- [39] Yuan Y, Bingner R, Williams R, *et al.* Integration of AnnAGNPS and REMM for watershed riparian buffer system assessment. *International Journal of Sediment Research*, 2004, **22**: 60–69
- [40] Zhu L, Li JK, Li HE, *et al.* Connecting AnnAGNPS and CE-QUAL-W2 models for reservoir water quality prediction. Proceedings of the Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011 International Conference, Lushan, 2011: 1120–1124
- [41] Liu Z, Hashim NB, Kingery WL, *et al.* Hydrodynamic modeling of St. Louis Bay estuary and watershed using EFDC and HSPF. *Journal of Coastal Research*, 2008, **52**: 107–116
- [42] Ekdal A, Gürel M, Guzel C, *et al.* Application of WASP and SWAT models for a Mediterranean coastal lagoon with limited seawater exchange. *Journal of Coastal Research*, 2011, **64**: 1023–1027
- [43] Narasimhan B, Srinivasan R, Bednarz S, *et al.* A comprehensive modeling approach for reservoir water quality assessment and management due to point and nonpoint source pollution. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2010, **53**: 1605–1617
- [44] Wang J-P (王建平), Su B-L (苏保林), Jia H-F (贾海峰), *et al.* Integrated model of nutrients for the Miyun Reservoir and Its Watershed. *Environmental Science* (环境科学), 2006, **27**(7): 1286–1291 (in Chinese)
- [45] Abbaspour K. User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Eawag, Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2007
- [46] Beck M. Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, 1987, **23**: 1393–1442
- [47] Iqbal Z. Integrated Modeling for Urban Fringe Watershed Management Using Basins Model. PhD Thesis. Nanjing: Hohai University, 2003
- [48] Chou WS, Lee TC, Lin JY, *et al.* Phosphorus load reduction goals for Feitsui reservoir watershed, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **131**: 395–408

作者简介 朱瑶,女,1988年生,硕士研究生.主要从事流域水环境污染模拟与控制研究. E-mail: luisamandy@163.com

责任编辑 肖红