

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.02.005

基于 TMDL 的 WARMF 模型在水污染控制管理中的应用

牛丽冬,王晓燕

(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘要 介绍 WARMF(water analysis risk management framework)水环境管理模型及其在美国等国流域用来模拟和制定污染削减及泥沙负荷分配的应用情况,提出我国在借鉴应用 WARMF 水环境管理模型时应注意以下几点:①考虑模型模拟过程中复杂因素的相互作用;②严格制定污染物削减方法和分配量;③重视模拟结果的灵敏度分析及校准;④将模型的多功能性与模拟的准确性有机结合。

关键词 水污染控制;总量控制;污染负荷削减;TMDL;WARMF 模型;利益相关者

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** :1004-6933(2012)02-0020-05

Application of TMDL-based WARMF model to water pollution control

NIU Li-dong, WANG Xiao-yan

(College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract : This paper introduces a water environment management model, WARMF (water analysis risk management framework), and its application to simulation and design of pollution load reduction and sediment load allocation in basins of the United States and other countries. It is pointed out that when using the WARMF model, Chinese researchers should (1) consider the interaction of complicated factors during model simulation, (2) stringently establish the pollution load reduction method and the allocation amount, (3) place great emphasis on the sensitivity analysis and calibration of simulation results, and (4) make use of multiple functions of the model while taking into account the accuracy of simulation.

Key words : water pollution control; total amount control; pollution load reduction; TMDL; WARMF model; stakeholder

我国的污染物控制由浓度控制转向总量控制是一个质的转变。实行污染物总量控制的实用性和优越性体现在能更好地把企业、个人等利益相关者联系起来,把环境效益与企业、个人的经济效益联系起来,最终达到污染物总量控制的目的。污染物总量控制有着天然的社会管理功能,是一种能将科技手段与人文管理结合起来的环境管理手段^[1]。

在污染物总量控制及流域管理方面,我国综合运用经济、法律、科技和必要的行政手段,注重发挥市场机制、宏观管理机制和公众参与机制的作用,全面推进流域内经济结构的调整,取得了较好的效果,但对比国外的管理方法和控制手段,我国仍存在操作过于简单的问题,不能与利益相关者直接建立联

系,因此,需要积极借鉴国外的先进管理方法和管理理念,利用相关的定量模型系统,充分考虑各方利益,为我国的水质改善提供科学、可行的管理方案。

笔者重点介绍美国的最大日负荷总量 TMDL (total maximum daily load,以下简称 TMDL) 计划以及将 TMDL 模块与 Consensus 模块结合的 WARMF (water analysis risk management framework,以下简称 WARMF)水环境管理模型,旨在对我国的水污染总量控制工作提供借鉴。

1 美国的污染物总量控制方法

TMDL是指在水质标准下,水体每天能够接受的某种污染物负荷(包括点源污染负荷和非

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-006-04,2009ZX07212-002-01)

作者简介 牛丽冬(1985—),女,硕士研究生,研究方向为流域水污染控制。E-mail :niuld813@163.com

通讯作者 王晓燕,教授。E-mail :xuwxy@sohu.com

点源污染负荷)的最大量。根据美国环境保护局的规定,最大日负荷是在没有违反水质标准限制 WQLS(water quality limited section)的情况下,水体上游排放的点源污染负荷和非点源污染负荷的总和。污染物最大日负荷的计算公式^[2]为

$$T_{TMDL} = W_{WLA} + L_{LA} + B_{BL} + M_{MOS} \quad (1)$$

式中: T_{TMDL} 为污染物最大日负荷; W_{WLA} 为点源污染总负荷; L_{LA} 为非点源污染总负荷; B_{BL} 为水体自然背景负荷; M_{MOS} 为安全边界值。

TMDL 控制管理的技术流程分为 6 个:①识别受损水体;②按优先顺序确定水质指标,再利用优先顺序确定实施 TMDL 计划的水体;③估算 TMDL 及其分配,选择估算最大日负荷总量与实际负荷量的模型,确定污染物的削减量;④制定污染物削减措施;⑤执行污染物削减措施;⑥评价 TMDL 控制管理措施。内容包括,监测点源污染和非点源污染情况,评价点源非点源、污染控制措施的有效性,评价水质达标情况等^[3]。

TMDL 计划的应用研究包括以下 3 方面内容:

a. 计算安全边界值。安全边界值^[4]是水质管理中的一个独特概念,指污染物质与受纳水体水质之间关系的不确定值。计算安全边界值是为了应对不确定因素的影响,构建不确定因素与目标水体之间的关系。安全边界值的计算通常有两种方法:①通过对污染负荷或水质进行保守性假设来计算;②预留出一定比例的可分配污染负荷不参与污染负荷分配,而将其作为安全边界。在 TMDL 计划实施过程中,不确定性因素很多,包括河流本身性质的不确定性、监测的不确定性和模拟相关参数的不确定性,而前一个问题的不确定性会影响到后面的相关环节,因此,要进行不确定性分析。不确定性分析包括定量不确定性分析和定性不确定性分析。目前,多数研究考虑了 TMDL 计划的定量不确定性分析,主要集中于概率框架内的参数和变量的不确定性量化分析,常用方法主要有蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation)、一次近似法(first order approximation)、均值一阶可靠法(mean value first order reliability method)和广义似然不确定性估计(generalized likelihood uncertainty estimation)等^[5]。

b. 制定最佳管理措施 BMPs。最佳管理措施 BMPs(best management practices,以下简称 BMPs)指任何能减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序,如,为了达到水环境保护目的的‘清洁生产’或水污染预防设施的提供。BMPs 主要用来控制农业活动中污染物的产生和迁移,防止污染物进入水体,避

免非点源污染的形成^[6]。在进行 TMDL 估算和分配之后就要采取切实可行的污染削减措施。现已提出的农业非点源污染 BMPs 主要有:免耕法,少耕法,限量施肥,综合病虫害防治,灌溉水管理,地下水位控制,以及建设防护林、人工水塘和湿地、植被过滤带、草地缓冲带、岸边缓冲区等。BMPs 在美国德克萨斯州北博斯基河磷削减 50% 的 TMDL 计划中和在美国爱达荷州鳟鱼场的成功应用^[7],证明了它的实用性和有效性,而 BMPs 在我国应用还很少。

c. 基于模型的 TMDL 研究。基于模型的 TMDL 研究,将使 TMDL 的空间性和实效性得到很大的应用,也减少了污染负荷量预测的不确定性。有关分析 TMDL 的模型较多,如 SWAT(soil and water assessment tool)和 HSPF(hydrological simulation program fortran)及 WARMF 等。这些水质模型有着各自的特点和适用范围,见表 1。

WARMF 水环境管理模型可以追溯河湖等水质的点源污染和非点源负荷在时间和空间上的分布,也能直观地反映污染物的总量,因为它支持流域水质总量负荷的计算,而利用 SWAT 模型进行 TMDL 的 BMPs 情景分析,则需要人工进行统计计算。因此,以下重点介绍 TMDL 在 WARMF 水环境管理模型中的应用。

2 WARMF 水环境管理模型简介

WARMF 水环境管理模型是一个进行水质分析、管理的决策支持系统,由美国 EPRI(electric power research institute)发起,它伴随地表水质模型、地下水水质模型、非点源污染模型的发展以及计算机技术、3S 技术在水资源管理中的应用等而逐渐成熟。WARMF 水环境管理模型能用来进行河流水质、泥沙的模拟预测和 TMDL 的计算,其突出特点是集流域分析、评价、总量控制、污染治理与费用效益分析等于一体。WARMF 水环境管理模型主要通过引导利益相关者(stakeholders)参与水质管理方案的制订、污染总量负荷的计算、污染总量负荷的分配以及管理方案成本效益的分析,以达到管理整个流域水环境的目的。

WARMF 水环境管理模型的构建是基于数据库与作图软件,包含 5 个功能模块^[9]:

a. 工程模块(engineering module)。工程模块接受日气象数据、月大气质量数据、农药和化肥用量数据的输入,通过模拟计算输出流域各单元的水质、水量日变化过程。该模块为 WARMF 水环境管理模型的技术核心。

表 1 代表性水质模型比较^[8]

软件名称	空间维数	开发机构	适用范围	特点
QUAI2E/2K	一维模型	美国国家环保局	包含支流的河流系统	可按用户希望的组合方式模拟 15 种水质 ;将河流系统划分为一系列恒定非均匀流的河段 ;可作稳态和动态模型,也可进行不确定性分析
CE-QUAL-RIV1	一维动态模型	美国陆军工程兵团	河流、分支河网	尤其适合模拟调整非恒定流 ;能处理控制建筑物 ;模拟水流和水质梯度很陡的情况
MIKE11	一维动态模型	丹麦水动力研究所	河流、河口、河网、洪水	用于从陡峭的山区河流到感潮河口的各种垂向均质水流条件 ;可进行洪水实时预报 ;包含地理信息系统
CE-QUAL-W2	二维模型	美国陆军工程兵团	湖泊、水库、河口	横向平均,垂向分层,水动力学的计算受可变化的水的密度影响 ;河模拟 20 种组分及之间的化合作用
MIKE21	二维模型	丹麦水动力研究所	湖泊、河口、水库	数据前处理、计算结果分析及图表后处理功能强大 ;河应用于潮汐、盐流、泥沙输移沉积等
Delft3D	二、三维模型	荷兰 Delft 水力研究所	河流、河口、海岸	仅支持曲面格式 ;可供用户选择有限单元法计算格式 ;系统自带丰富的水质和生态过程库,自行建立需要模块 ;与 GIS 无缝链接,并与 Matlab 环境结合,满足二次开发和系统集成要求
WASP	一、二、三维模型	美国国家环保局	河流、湖泊、水库、河口、海湾	可模拟常规污染物和有毒有机物、重金属,“ 万能水质模型 ” 常用于富营养化问题 ;灵活性好,WASP 程序可与其他水动力程序相连 ;与 GIS 集成
EFDC	一、二、三维模型	美国国家环保局	河流、湖泊、水库、河口、海湾	水动力学计算更有突出优势,采用 Fortran77 编程,运算速度快 ;可与 WASP 模块连用
BASINS	模型系统	美国国家环保局	水系、流域	专门用以计算受纳水体的总最大日排污负荷的工具 ;运行在 ARCView 环境下,交互式界面操作 ;体系中的水文模拟程序 HSPF 是当今最常用的水系模型之一
WARMF	模型系统	美国 EPRI 公司	水系、流域、水库	追溯引起河、湖水质污染的点源与非点源负荷在空间上的分布 ;水文模拟物理机制明确,不再使用 SCS 经验方程 ;支持流域水质总量负荷计算、排污交易及其经济/效益分析 ;无尺度限制
SMS	模型系统	Brigham Young 大学	2D 和 3D 河流、港湾、海湾	功能强大的格网/栅格创建工具 ;有限元法和有限差分法都可执行 ;能够有效处理 GIS 数据

b. 利益相关者参与模块 (consensus module)。美国环境保护局要求利益相关者参加流域的管理、总量负荷计划的制订。利益相关者参与模块为此提供了一个引导利益相关者参与的路线图 :①组织利益相关者制定管理目标与任务 ;②将水质目标分配到整个流域 ;③进行模型计算 ;④观察流域污染负荷和水质的变化 ;⑤调整管理方案 (包括对点源污染、非点源污染负荷与流域引水量的调整) ;⑥对管理方案进行成本效益分析、成本共享分析、技术社会与经济分析 ;⑦确定最终管理方案。

c. 总量负荷模块 (TMDL module)。总量负荷模块提供了一个路线图以辅助进行控制断面总量负荷的计算与分配。

d. 数据模块 (data module)。该模块具有对气象、大气质量、水文与水质以及点源污染等时间序列数据的显示、输出与编辑功能,还可对流域图部分进行修正和增减。

e. 知识模块 (knowledge module)。知识模块存储关于流域水资源开发利用的有关法律条文,也包含了 WARMF 水环境管理模型应用经验的建议。

WARMF 水环境管理模型的功能包括 :①预测河、湖的逐日水文、水质的变化特征 ;②模拟引起河、湖水质污染的点源污染负荷与非点源污染负荷的空

间分布,尤其是模拟土地利用产生的各种非点源污染负荷的空间分布 ;③支持流域水质总量负荷计算、排污交易 (包括点源、非点源内部及其之间的排污交易) 及其经济效益分析 ;④支持水质污染风险分析,如选取自然或人为风险事件,模拟分析该事件引起的水质污染的风险 ;⑤评估流域生态环境管理方案的成效,如评估缓冲带的建立、水资源的调配、农耕方式的改变、农药化肥施用的控制等生态环境管理措施的效果 ;⑥引导利益相关者参与流域管理决策的制定^[10]。

3 TMDL 模块和 Consensus 模块的计算流程及应用

3.1 计算流程

WARMF 水环境管理模型里 TMDL 模块和 Consensus 模块是与利益相关者连接的通道,这两个模块的模拟结果能够反映达到污染总量控制目的的水质响应及不同措施效果的对比。

TMDL 模块的计算流程是 :首先,在基础模块里设定所模拟水体的名称 ;然后,计算该水体的污染负荷总量。计算水体污染负荷总量时,首先根据要求指定水质受限制的水库或者河流,并规划其用途,是养殖用水、游泳用水,还是景观用水等,再分别根据

水的用途指定水质标准(按照地表水的标准来查询),就可以得到各种污染物负荷的限制总量了。WARMF 水环境管理模型会自动调整水质受限制水体点源污染负荷或者非点源污染负荷的控制量。按照污染负荷控制量,就可制定污染控制措施^[11-12]。如果污染控制措施满足要求,TMDL 模块将该方案作为解决办法保存起来,如果没有找到控制污染负荷量的解决办法,模块则会提示用户重新寻求。

通过 TMDL 模块计算流程后,可让利益相关者达成共识,以便实施 TMDL 计划。利益相关者评估水体的污染负荷状况,选择要治理的各类污染物及其削减量,再进行成本效益和费用分摊(污染交易)的计算^[13],最后,通过投票决定是采取它制定措施还是重新制定措施。

WARMF 水环境管理模型的核心是 TMDL 模块和 Consensus 模块,这两个模块可模拟污染控制措施的实施和污染负荷的分配。TMDL 模块提供步骤流程使相关工作人员在河流管理和制定 TMDL 计划上达成一致,从而制定出合理的流域管理决策。

WARMF 水环境管理模型的 TMDL 模块和 Consensus 模块中有关污染控制的措施包括:

a. 削减点源污染负荷。可在 Consensus 模块里选择点源负荷,规定其削减的程度,如 0.3,则削减 70%,这样就可根据水质要求,模拟查看河流的污染负荷情况,检查水质是否达标。这个措施可用来确定点源污染排放的削减量,比较系统和直观。

b. 建立缓冲带 BMPs。通过指定缓冲带区域的相关参数,如缓冲带的百分比、缓冲带的宽度、坡度和粗糙率等,再检查水质的改善及负荷的改变,来了解措施效果。

c. 削减种植农作物引起的污染负荷。削减种植农作物引起的污染负荷可控制土壤侵蚀与磷及营养元素由土地运移到地表水中的相关性。可以确定的污染负荷削减范围为 0.1~0.8。

d. 控制大气沉降。控制降落到地表的大气干沉降及湿沉降,可达到改善空气质量的目的,也减少大气降着物冲刷入河的风险。

e. 跟踪土地化肥施用量。WARMF 水环境管理模型可用来跟踪土地化肥施用量(土地的化肥施用量减去植被吸收的化肥量等于冲刷入河的化肥总量)。WARMF 水环境管理模型也可以进行其他污染物的跟踪,如跟踪来自动物粪便、施在草坪中的肥料及非法排入下水道的污染物,如 N、P、BOD₅、粪大肠菌群、金属等。

f. 开展水权交易。利益相关者购买水段的水资源使用权,并结合排污交易制度,对排放污染物的

人员和机构进行收费。通过采取该措施,可限制污染物的排放量,增加河流的水环境容量和吸纳污染物的能力,从而较好改善水质。

g. 进行成本效益分析和费用分摊。WARMF 水环境管理模型可进行成本效益评估,可计算各点源污染排放所应支付的费用。

3.2 模型的应用

WARMF 水环境管理模型的应用大体上分为以下 4 个阶段:

a. 利用模型建立基础信息数据库。通过 DEM 进行流域刻画,收集流域数据,建立基础信息数据库,并进行模拟。这是模型的初步运行阶段。

b. 利用模型的 TMDL 模块计算污染负荷。利用 WARMF 水环境管理模型对研究流域的污染状况进行模拟,从而得到河流水系的相关污染负荷。WARMF 水环境管理模型曾用于美国 Oostanuala Creek 的 TMDL 计算^[14]。Oostanuala Creek 是一个高泥沙负荷的河流,属美国田纳西流域。为了改善 Oostanuala Creek 的水质状况,利用 WARMF 水环境管理模型的 TMDL 模块计算了该河流的污染负荷,确定该河流污染物的削减量。首先将该河流水质用途定义为鱼和水生生物养殖用水,水质目标 4 d 内至少 99.8% 的泥沙负荷平均值要小于 80 mg/L,据此要求进行泥沙负荷的非点源分配。模拟结果表明,要减少 90% 的河岸侵蚀度,Oostanuala Creek 的泥沙负荷削减分配量为 770 kg/d。

c. 建立决策支持系统。结合 TMDL 模块和 Consensus 模块,对研究流域进行污染物的模拟及污染负荷总量的估算,从而建立污染控制决策支持系统。

d. 进行产出效益模拟。联系当地的经济政策,通过 Consensus 模块将成本效益功能嵌入模型,根据研究流域的生活水平状况估计非点源污染治理的投入量,并进行非点源污染治理产出效益的模拟,求得投入和产出的最佳平衡点,最终达到环境效益与经济效益的统一。

WARMF 水环境管理模型已在美国等 15 个国家用来进行水库和河流污染负荷的模拟,流域尺度从 28 km² 到 4 142 km²,且都取得了较好效果。在国内,WARMF 水环境管理模型在巢湖进行了污染负荷的估算、水质和泥沙的模拟及灵敏度分析,但没有用于污染总量控制及管理决策。可见,WARMF 水环境管理模型在我国有着很大的应用前景和空间。

4 WARMF 水环境管理模型的借鉴意义

WARMF 水环境管理模型将 TMDL 的应用与模型的模拟有机结合,并加入相关利益者,这种污染总

量控制的思路值得学习和借鉴。我国在借鉴应用 WARMF 水环境管理模型时,需要注意以下几方面:

a. 要考虑模型模拟过程中复杂因素的相互作用。由于水质、水文及泥沙等的模型模拟过程是相对独立的过程,而研究区域是一个相互联系、相互作用的整体,因此在模型模拟的过程中,应多考虑复杂因素的相互作用。

b. 严格制定污染物削减方法和分配量。TMDL 计划总量指标本质上是根据污染物现状的排放量和预计的削减程度来确定的,模型给出了削减总量,需要相关人员严格制定污染物削减方法和分配量,而在分配过程中要考虑季节性因素及安全临界值问题,并对分配结果进行验证,以得到合理的分配结果。

c. 重视模拟结果的灵敏度分析及校准。自然界的污染物降解过程是一个复杂的有机体转化过程,但模型不会考虑这些因素,而且模型在模拟过程中存在数据、参数及机理的不确定性,使得模拟的结果与实际情况难免存在较大差异,所以模型模拟之后的灵敏度分析及校准也是一个十分重要的环节。

d. 将模型的多功能性与模拟的准确性有机结合。将 3S 技术(地理信息系统 GIS、遥感 RS 及全球定位系统 GPS)与 WARMF 水环境管理模型结合,以提供更多方便可靠的信息及先进的技术方法。还可将 WARMF 水环境管理模型与不同的水质模型结合利用,取各自优势,将模型的多功能性及模拟的准确性有机结合,达到更加可靠和实用的结果,以更有效地改善水污染状况。

参考文献:

[1] 赵绘宇,赵晶晶. 污染物总量控制的法律演进及趋势[J]. 上海交通大学学报,2009,17(1): 28-34.

[2] ENSTICE N. Stakeholder preferences and preference modeling: agricultural BMP preferences in the river raisen watershed and how those preferences may affect water quality[D]. Michigan: University of Michigan,2009.

[3] NALINI S. Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading[J]. Journal of Environmental Management,2009,90: 1385-1395.

[4] 梁博,王晓燕,曹利平. 最大日负荷总量计划在非点源污染控制管理中的应用[J]. 水资源保护,2004,20(4): 37-41.

[5] HARMEL R D. Uncertainty in TMDL models[J]. Transactions of the ASABE,2006,49(4): 1033-1049.

[6] 柯强,赵静,王少平,等. 最大日负荷总量(TMDL)技术在农业面源污染控制与管理中的应用与发展趋势[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(1): 85-91,111.

[7] BRIAN B,REBECCA Z,GENE Y. Lessons learned from TMDL

implementation case studies [J]. Water Environment Federation,2008 (2): 1-13.

[8] 张昊,张代钧. 复杂水环境模拟研究与发展趋势[J]. 环境科学与管理,2010,35(4): 24-29.

[9] 罗定贵,王学军,孙莉宁. 水质模型研究进展与流域管理模型 WARMF 评述[J]. 水科学进展,2005,16(2): 136-141.

[10] MCKISSOCK G,JEFFERIES C,DARCY B. An assessment of drainage best management practices in Scotland [J]. Water and Environmental Management,1999,13(1): 47-51.

[11] CLELAND B R. TMDL development from the“ Bottom Up”part II: using duration curves to connect the pieces[J]. National TMDL Science and Policy,2002 (11): 687-697.

[12] CHEN C W. Development of TMDL implementation plan with consensus module of WARMF[C]//Proceedings of the Water Environment Federation. Alexandria: Water Environment Federation,2002.

[13] GOLDSTEIN R A. Watershed analysis risk management framework (WARMF): update one, a decision support system for watershed analysis and total maximum daily load calculation[R]. Palo Alto: EPRI,2001.

[14] HERR J W,CHEN C W,GOLDSTEIN R A,et al. A tool for sediment TMDL development for Oostanuala Creek [C]// Proceedings of conference on total maximum daily load environmental regulations. St. Joseph: Society for Engineering in Agricultural,Food, and Biological Systems,2002: 111-116.

[15] 杨龙,王晓燕. 美国 TMDL 计划的研究现状及其发展趋势[J]. 环境科学与技术,2008,31(9): 72-76.

(收稿日期: 2010-11-19 编辑: 彭桃英)

(上接第 19 页)

参考文献:

[1] 黄程,邓春光,李晓,等. 涪陵污水处理厂排污口的污染带特性分析[J]. 中国给水排水,2009,25(2): 105-108.

[2] 黄程,钟成华,邓春光,等. 三峡水库 139 m 蓄水后排污口污染带特性分析: 以云阳污水处理厂为例[J]. 水资源保护,2007,23(2): 20-24.

[3] 薛红琴,刘晓东. 连续点源河流污染带几何特征参数研究[J]. 水资源保护,2005,21(5): 23-26.

[4] 陈永灿,申满斌,刘昭伟. 三峡库区城市排污口附近污染混合区的特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版,2004,44(9): 1223-1226.

[5] 韩龙喜,朱党生,姚琪. 宽浅型河道纳污能力计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2001,29(4): 72-75.

[6] 韩龙喜,朱党生,蒋莉华. 中小型河道纳污能力计算方法研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2002,30(1): 35-38.

[7] 张秀春,张建奎. 黄河污染带水质的模拟计算及其环境容量确定[J]. 甘肃冶金,2004,26(4): 62-64.

(收稿日期: 2010-12-17 编辑: 彭桃英)