

WASP 水质模型及其研究进展

陈美丹, 姚 琪, 徐爱兰

(河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

[摘 要] WASP(The water quality analysis simulation program, 水质分析模拟程序) 是 EPA 推荐使用的水质模型软件, 使用较为广泛, 能够模拟河流、湖泊、水库、河口等多种水体的稳态和非稳态的水质过程。介绍了 WASP 的组成模块(DYNHYD、EUTRO、TOXI)、基本原理及 EUTRO 中 8 个指标之间的相互转化, 最后介绍了该模型在国内外的应用和发展前景、方向。

[关键词] WASP; 水质模拟; 原理; EFDC; GIS

[中图分类号] TV21 [文献标识码] A [文章编号] 1006- 7175(2006)07- 0420- 03

WASP Water Quality Model and its Advance in Research

CHEN Mei- dan, YAO Qi, XU Ai- lan

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: WASP(The water quality analysis simulation program) was recommended by EPA used as water quality model. It has been applied widely, because it can simulate steady or unsteady water quality processes in such diverse water bodies as streams, lakes, reservoirs, estuaries. This paper introduced the compositions (DYNHYD, EUTRO, TOXI), their principles for every part, and the transformations among 8 targets in EUTRO model, its applications in and abroad, and its developmental prospects and directions in future.

Key words: WASP; water quality simulation; principle; EFDC; GIS

水是人类生存与发展之本, 水质模型研究一直是环境科学研究的重要内容之一。它研究天然水在自然或人类活动影响下水质随时间和空间变化规律的数学描述, 涉及气象、水文、水力、水化学、水生物、湖沼、土壤、沉积物、数学、计算机等多门学科知识, 直接为水质评价、预测及污染调控与管理提供依据^[1]。在众多水质模拟中, 比较先进、应用较多的主要有最早的 Streeter- Phelps 模型体系、20 世纪 70 年代初期的多变量水质模型 QUAL- I 模型、70 年代中期的非恒定水质模型 QUAL- II 模型和 80 年代功能全面的水质模型 WASP 系列。本文主要介绍 WASP 模型的基本原理及其发展前景。

1 WASP 水质模型概述

WASP(The water quality analysis simulation program, 水质

分析模拟程序) 是美国环境保护局提出的水质模型系统, 能够用于不同环境污染决策系统中分析和预测由于自然和人为污染造成的各种水质状况, 可以模拟水文动力学、河流一维不稳定流、湖泊和河口三维不稳定流、常规污染物(包括溶解氧、生物耗氧量、营养物质以及海藻污染) 和有毒污染物(包括有机化学物质、金属和沉积物) 在水中的迁移和转化规律, 被称为万能水质模型^[2]。

WASP 最原始的版本是于 1983 年发布的^[3], 它综合了以前其它许多模型所用的概念, 之后 WASP 模型又经过几次修订, 逐步成为 USEPA 开发成熟的模型之一。WASP5 及其以前的版本都为 DOS 程序^[4,5], 而 WASP6 则发展为 Windows 下的程序^[6], 但是只能在 Windows98 操作系统下使用, 随着 Windows98 操作系统被 Windows2000 和 Windows XP 取代, WASP6 的不适应性就显现了出来。于是, 能够在

[收稿日期] 2005- 12- 26

[作者简介] 陈美丹(1981-), 女, 江苏常熟人, 在读硕士研究生, 主要从事环境规划与评价方面的研究; 姚琪(1944-), 女, 江苏南京人, 教授, 主要从事环境水力学方面的研究; 徐爱兰(1982-), 女, 江苏南通人, 在读硕士研究生, 主要从事环境规划与评价方面的研究。

Windows2000 和 XP 系统下运行的 WASP7 版本于 2005 年孕育而生了。WASP6 和 WASP7 都具有可视化的操作界面,运行速度是以前的 DOS 版本的 10 倍以上^[7]。它们的主要特点是:① 基于 Windows 开发友好用户界面;② 包括能够转化生成 WASP 可识别的处理数据格式;③ 具有高效的富营养化和有机污染物的处理模块;④ 计算结果与实测的结果可直接进行曲线比较^[8]。但是由于它们的源码不公开,给模型的二次开发带来了很大限制。

2 WASP 的组成及其原理

2.1 WASP 的组成

WASP 有两个独立的计算机程序 DYNHYD 和 WASP 组成,两个程序可连接运行,也可以分开执行。WASP 程序也可与其它水动力程序如 RIVMOD(一维), SED3D(三维)相连运行,如果有已知水力参数,还可单独运行。WASP 是水质分析模拟程序,是一个动态模型模拟体系,它基于质量守恒原理,待研究的水质组分在水体中以某种形态存在,WASP 在时空上追踪某种水质组分的变化。它由两个子程序组成:有毒化学物模型 TOXI 和富营养化模型 EUTRO,分别模拟两类典型的水质问题:① 传统污染物的迁移转化规律(DO、BOD 和富营养化);② 有毒物质迁移转化规律(有机化学物、金属、沉积物等)。TOXI 是有机化合物和重金属在各类水体中迁移积累的动态模型,采用了 EXAMS 的动力学结构,结合 WASP 迁移结构和简单的沉积平衡机理,它可以预测溶解态和吸附态化学物在河流中的变化情况。EUTRO 采用了 POTOMAC 富营养化模型的动力学,结合 WASP 迁移结构,该模型可预测 DO、COD、BOD、富营养化、碳、叶绿素 a、氮、硝酸盐、有机氮、正磷酸盐等物质在河流中的变化情况^[9]。

该模型的使用方法,首先是河网模型概化,然后按照如下 4 个主要步骤进行:水动力研究、质量传输研究、水质转化研究和环境毒理学研究。第一步水动力研究要应用水动力模型程序 DYNHYD;第二步研究水流中物质的传输,要靠示踪剂研究和水质模型程序 WASP 的 TOXI 模块校验来完成;第三步研究水流和底质中的物质转化,要依靠实验室研究、现场观察和试验、参数估计、模型研究相结合来完成,其模型计算结果要验证;最后一步研究污染物怎样影响环境^[10]。

2.2 DYNHYD 模型

DYNHYD 适用于一维的水动力模拟,它描述在浅水系统中长波的传播。适用条件是:假定流动是一维的;Coriolis 和其它加速度相对于流动方向可忽略;渠道水深可变动而水面宽度认为基本不变;波长远大于水深;底坡适度。

DYNHYD 程序以运动方程和连续方程^[11]为基础。前者可预测水体流速和流量;后者可预测水位和河道体积。

运动方程

$$\frac{5U}{5t} = -U \frac{5U}{5x} + A_{g,K} + A_r + A_{w,K} \quad (1)$$

式中 $\frac{5U}{5t}$ 为时变加速度, m/s^2 ; $U \frac{5U}{5x}$ 为位变加速度, m/s^2 ; $A_{g,K}$ 为沿渠道方向重力加速度, m/s^2 ; A_r 为阻力加速度, m/s^2 ; $A_{w,K}$ 为沿渠道方向风加速度, m/s^2 ; K 为渠道方向; t 为时间, s ; U 为沿渠道的流速, m/s ; x 为沿渠道的距离, m 。

连续性方程

$$\frac{5H}{5t} = -\frac{1}{B} \frac{5Q}{5x} \quad (2)$$

式中 Q 为流量, m^3/s ; B 为宽度, m ; H 为水面高度(水头), m ; $\frac{5H}{5t}$ 为水面高度随时间变化率, m/s ; $\frac{1}{B} \frac{5Q}{5x}$ 为单位宽度水体体积变化率, m/s 。

DYNHYD 程序对上述方程组采用有限差分法求解,把要计算的水体系统概化成计算网络,流速、水头等在离散的网格点上求解。

2.3 WASP 原理

2.3.1 基本方程

WASP 水质模块的基本方程是一个平移))) 扩散质量迁移方程,它能描述任一水质指标的时间与空间变化^[12]。在方程里除了平移和扩散项外,还包括由生物、化学和物理作用引起的源漏项。对于任一无限小的水体,水质指标 C 的质量平衡式为

$$\frac{5C}{5t} = -\frac{5}{5x}(U_x C) - \frac{5}{5y}(U_y C) - \frac{5}{5z}(U_z C) + \frac{5}{5x}(E_x \frac{5C}{5x}) + \frac{5}{5y}(E_y \frac{5C}{5y}) + \frac{5}{5z}(E_z \frac{5C}{5z}) + S_L + S_B + S_K \quad (3)$$

式中 U_x , U_y , U_z 为流速, m/s ; C 为水质指标浓度, mg/L ; E_x , E_y , E_z 为河流纵向、横垂向扩散系数, m^2/s ; S_L 为点源和非点源负荷, 正为源、负为漏, $g/(m^3 \cdot d)$; S_B 为边界负荷,包括上游、下游、底部和大气环境, $g/(m^3 \cdot d)$; S_T 为动力转换项, $g/(m^3 \cdot d)$ 。

2.3.2 EUTRO 模块

EUTRO 模拟了 8 个常规水质指标,即 $NH_3-N(C_1)$ 、 $NO_3-N(C_2)$ 、无机磷(C_3)、浮游植物(C_4)、CBOD(C_5)、DO(C_6)、有机氮(C_7)和有机磷(C_8);这 8 个指标分为 4 个相互作用子系统,即浮游植物动力学子系统、磷循环子系统、氮循环子系统和 DO 平衡子系统。这 4 个系统之间的相互转换关系,见图 1。

在 EUTRO 模型中,充分考虑了各系统间的相互转化关系,即 S_K 项反映了这 4 个系统,8 个指标之间的相互转化和影响。而这些指标除了相互影响之外,还会受到光照、温度等的影响。

2.3.3 TOXI 模块

TOXI 模块模拟有毒物质的污染,可考虑 1~3 种化学物质和 1~3 种颗粒物,包括有机化合物、金属和泥沙

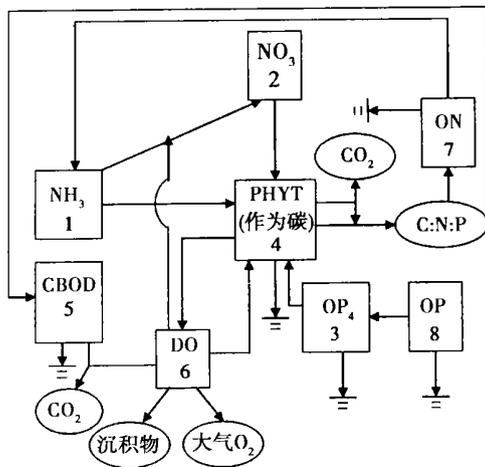


图 1 EUTRO 变量之间的相互转化关系

等。对于某一污染物可分别计算出其在水体中溶解态和颗粒态的浓度,在底泥孔隙水和固态底泥中的浓度^[13]。

模型的基本方程为式(3)。但是,污染物在河流中的迁移转化机理却要比常规指标复杂得多,它受到水体流动因素,气象因素,以及物质本身的一系列物理化学性质等的影响。因此 TOXI 模块所考虑的动力过程也更为复杂,其中包括了转化、吸附和挥发等。转化过程包括生物降解、水解(酸性水解、中性水解、碱性水解)、光解、氧化反应及其它化学反应等。吸附作用是一个可逆的平衡过程,包括 DOC 吸附、固体吸附。挥发过程与气象条件等有关。这些过程相当复杂,受篇幅限制,不一一列出。

3 WASP 的应用及发展前景

3.1 WASP 模型的应用

自 20 世纪 80 年代 WASP 模型提出以来,已在国内外得到了广泛应用。在国外,Thomann 和 Fitzpatrick 对美国东部波托马可河的富营养化进行模拟; Ambrose 对美国东部特拉华港口的挥发性有机物污染进行模拟; JRB 对美国卡罗莱纳州的重金属污染进行模拟^[6]。在国内,逢勇等人^[14]曾进行了太湖藻类的动态模拟研究,探讨了太湖藻类的动态变化机制,对治理太湖藻类/水华有一定的现实意义;廖振良等^[15]对 WASP 模型进行了二次开发,建立了苏州河水质模型,并运用该模型对苏州河环境综合整治一期工程有关工程和方案进行了模拟计算;杨家宽等^[16]运用 WASP6 预测南水北调后襄樊段的水质,最终的运行结果令人都较为满意,表明 WASP 的水质模拟能够较好地模拟各种水质过程。

3.2 WASP 模型的发展前景

在短短的 20 a 间, WASP 模型取得了飞速的发展,所建立的各类模型从总体上能较好地适用于各自的研究对象。WASP 模型的最大特点是它的灵活性,能与其它模型能够很好地耦合,进行二次开发,使水质模拟达到更加完

善的效果。

3.2.1 WASP 模型与 EFDC 模型耦合

WASP 模型由于其子模块的独立性可以与其它模型相结合使用,目前较为广泛使用的是与环境流体动态模型 EFDC 相耦合进行水质模拟。EFDC 是一个地表水模拟系统,其优点十分明显: 1 具有极强的问题适应能力; 2 所采用的数值方法和系统开发方法代表了目前国际上水环境模拟系统开发、研究的主流方向; 3 其中所包括的多种水动力过程; 4 模型本身还提供多种模拟计算方案^[17]。王建平等^[18]耦合 WASP 和 EFDC 模型开发了三维生态动力学模型来进行密云水库水质模拟,取得了令人满意的结果。

3.2.2 基于地理信息系统的二次开发

水质模型是一种数学模型,它在数值计算、参数率定上具有长处,但在数据管理和维护、模拟结果表现及空间分析上能力有限,为了提高水质模型的预测、模拟能力及易用性,出现了水质模型与地理信息系统(GIS)技术集成的趋势。将 GIS 与 WASP 模型集成进行研究是目前和今后一段时间内主要的研究方向之一,这项研究已在许多实际工程中得到了广泛地应用,并取得了良好的成效。马蔚纯等^[19]基于 GIS 平台运用 WASP 模型对上海市苏州河进行水质模拟,贾海峰等^[20]应用 GIS 与地表水质模型 WASP5 的集成对密云水库的水质进行模拟研究,结果令人满意。

水质模型与 GIS 耦合的优越性表现在以下几方面: 1 利用数字化仪及 GIS 将研究区域数字化,并进行概化以及网格化,使得模型的前期工作大大减少,人为误差减小,精度提高; 2 利用 GIS 的栅格矢量化功能可以生成高质量的填充颜色的浓度分布图; 3 GIS 的空间数据处理功能可以进行实时浓度、时间和空间的平均浓度的计算并显示、输出,查询模块可以对结果进行访问和查询。这样为决策部门进行区域污染监控、管理提供有效方便的科学手段; 4 利用可视化开发语言开发的系统使得模型的结果更直观、明确; 5 结合计算机技术实现了数据信息集中管理和共享^[21]。我们相信,基于地理信息系统的 WASP 水质模拟将是一个具有广阔前景的发展方向。

[参考文献]

[1] 罗定贵,王学军,孙莉宁,等. 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, (2): 289- 294.

[2] 李 炜. 环境水力学进展[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1995: 335- 344.

[3] Di Toro DM, Sifitpartic JJ. Documentation for Water Quality Program (WASP) and Model Verification Program (MVP)[Z]. Duluth, MN: US Environmental Protection Agency, 1983.

(下转第 426 页)

200~400 m, 在有控制地下水水位要求的地区, 农渠间距要根据农沟间距确定。

(3) 灌溉渠道和排水沟道的配合。灌溉渠系和排水渠系的规划要同步进行, 互相参照, 相互配合, 通盘考虑, 斗农渠和斗农沟的关系则更为密切, 它们的配合方式取决于地形条件, 灌排相邻布置, 地面坡度向一侧倾斜, 渠道只能向一侧灌水, 排水沟也只能接纳一边的径流, 灌溉渠道和排水沟道只能并行, 上灌下排, 互相配合。

(4) 田间渠系布置。田间渠系指条田内部的灌溉网, 包括毛渠, 灌水沟、畦等, 田间渠系布置主要采用以下方横向布置: 灌水方向和农渠平行, 毛渠布置和灌水沟、畦方向垂直, 灌溉水从毛渠直接流入灌水沟、畦。这种方式省去了输水沟, 减少了田间渠系长度, 可节省土方和减少田间损失。

采用这种方式主要是考虑地面坡度的一致性, 坡度较小。

4 田林路的规划要求

田间工程改造, 除合理规划布置田间灌排渠系外, 还需要同时考虑居民点及田间路林的规划布置。

道路是农田基本建设的重要组成部分, 它关系到农

业生产、交通运输、群众生活和实现农业机械化等方面的需要。所以, 在条田规划中必须对道路和林带作出全面规划, 对条田内的机耕道路, 一般沿支、斗、农级灌排渠布置, 沟渠路林的配合形式应有利于排灌、机耕、运输及田间管理, 不影响田间作物光照条件。从沟、渠、路 3 者的相对位置来说, 一般布置沟渠路或沟渠渠配置方式。

5 结 语

条田规划涉及的因素很多, 规划时必须因地制宜, 必须在农业区划的基础上, 进一步摸清情况, 根据所处的不同地形、土壤特点、水文地质、灌排条件及农业发展的要求, 结合农场具体情况, 统筹考虑, 才能把农田规划工作做好。

[参考文献]

(上接第 422 页)

- [4] Ambrose RB, Wool TA, Connolly JP. WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model- model Theory, User's Manual and Programmer's Guide[Z]. Athens, GA: US Environmental Protection Agency, 1988.
- [5] Ambrose RB, Wool TA, Martin JL, et al. WASP5, A Hydrodynamic and Water Quality Model- model Theory, User's Manual and Programmer's Guide[Z]. Draft, GA: Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, 1993.
- [6] Tim A. Wool, Robert B. Ambrose, James L. Martin, et al. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6.0 DRAFT: User's Manual[Z]. Atlanta: US Environmental Protection Agency, MS Tetra Tech. 2001.
- [7] 孙学成, 邓晓龙, 张彩香, 等. WASP6 系统在三峡库区水质仿真中的应用[J]. 三峡大学学报, 2003, (2): 185 - 188.
- [8] 杨家宽, 肖波, 刘年丰, 等. WASP6 水质模型应用于汉江襄樊段水质模拟研究[J]. 水资源保护, 2005, (4): 8- 10.
- [9] 何孟常, 杨居荣. 水质模型、生态模型及计算机模型软件[J]. 环境科学进展, 1999, (3): 62- 68.
- [10] 廖振良, 林卫青, 徐祖信. WASP- 5 系统及其述评[J]. 上海环境科学, 2001, (1): 3- 6.
- [11] 刘永, 郭怀成, 范英英, 等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, (6): 1169 -

- [1] 周志远. 农田水利学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993. 226- 228.
- [2] GB 50288- 99, 灌溉与排水工程设计规范[S].
- [3] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 84- 97.
- [4] 夏军, 窦明. 水体富营养化综合水质模型及其应用研究[J]. 上海环境科学, 2000, (7): 302- 308.
- [5] 戴京宪, 闫有禄. 应用 TOXI 模型进行重金属在河流中迁移变化规律的研究[J]. 环境科学进展, 1995, (3): 70- 74.
- [6] 逢勇. 太湖地区大气- 水环境的综合数值研究[M]. 北京: 气象出版社, 1998. 50- 55.
- [7] 廖振良, 徐祖信, 高廷耀. 苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析[J]. 同济大学学报, 2004, (4): 499 - 502.
- [8] 杨家宽, 肖波, 刘年丰, 等. WASP6 预测南水北调后襄樊段的水质[J]. 中国给水排水, 2005, (9): 103 - 104.
- [9] 贺彬. 滇池流域水污染控制仿真系统研究[J]. 云南环境科学, 2004, (2): 14- 16.
- [10] Wang Jianping, Cheng Shengtong et al. Water Quality Changing Trends of the Miyun Reservoir[J]. Journal of Southeast University, 2005, (2): 215- 219.
- [11] 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, (12): 66- 75.
- [12] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS 与地表水质模型 WASP5 的集成[J]. 清华大学学报, 2001, (8): 125 - 128.
- [13] 张行南, 耿庆斋, 郭亨波, 等. 水质模型与地理信息系统的集成研究[J]. 水利学报, 2004, (1): 90- 94.