

文章编号:1672-3031(2010)01-0071-05

## 河流综合水质模型 QUAL2K 应用研究

周 华

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:** 介绍了 QUAL 模型系列由 QUAL-I→QUAL-II→QUAL2E→QUAL2K 模型所经历的研究发展过程。对 QUAL-II 模型的特点和功能进行了分析, 给出了各主要水质组分之间的交互作用图。分析了 QUAL2K 模型, 指出了 QUAL2K 模型与 QUAL2E 模型的共同及不同之处。最后, 分析了 QUAL2K 模型在我国的几个应用实例, 指出 QUAL2K 模型虽然目前在我国的应用还比较少, 尚处于简单应用阶段, 但鉴于 QUAL2K 模型的诸多优势, 该模型在我国可望得到更好、更广泛的应用。

**关键词:** QUAL 模型系列; QUAL-II 模型; QUAL2E 模型; QUAL2K 模型; 应用实例

**中图分类号:** TV11; X52

**文献标识码:** A

综观河流水质模型的研究发展过程, 大致可分为 3 个阶段<sup>[1]</sup>。第 1 阶段, 1925—1970 年, 是考虑水质项不多的一维定常模型阶段; 第 2 阶段, 1970—1985 年, 是河流水质模型的快速发展阶段; 第 3 阶段, 1985 年至今, 是河流水质模型的发展与完善阶段。QUAL2E 模型和 QUAL2K 模型就是在第 3 个阶段出现的。相对于其它常用河流水质模型, QUAL2E 模型目前在我国得到了较广泛的应用。鉴于 QUAL2K 模型的诸多优势, 在不久的将来, 该模型也可望得到更广泛的应用。

### 1 QUAL2K 模型的研究发展历程

QUAL2K(或简称 Q2K)模型是 QUAL 模型系列中的一个。

QUAL 模型系列中的最初完整模型是美国德克萨斯州水利发展部(Texas Water Development Board)于 1971 年开发完成的 QUAL-I 模型。而 QUAL-I 模型的最早雏形则是 F. D. Masch 及其同事在 1970 年提出的<sup>[1]</sup>。

QUAL-I 模型应用较成功。在该模型的基础上, 1972 年美国水资源工程公司(Water Resources Engineering, Inc., 缩写为 WRE)和美国环保局(U.S. EPA)合作开发完成了 QUAL-II 模型的第 1 个版本。1976 年 3 月, SEMCOG(Southeast Michigan Council of Governments)和美国水资源工程公司合作对此模型做了进一步的修改, 并将当时各版本的所有优秀特性都合并到了 QUAL-II 模型的新版本中<sup>[2]</sup>。

自 1987 年以来, 我国学者应用 QUAL-II 模型解决了大量河流水质规划、水环境容量计算等问题, 并结合国内的实际情况, 对该模型进行了改进。

QUAL-II 模型可以模拟 13 种物质, 这 13 种物质是: 溶解氧、生化需氧量(BOD)、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解的正磷酸盐磷、藻类-叶绿素 a、大肠杆菌、温度、1 种任选的可衰减的放射性物质和 3 种难降解的惰性组分。QUAL-II 模型可按用户所希望的任意组合方式模拟这 13 种物质。

QUAL-II 模型属于综合水质模型, 它引入了水生生态系统与各污染物之间的关系, 从而使水质问题的研究更为深化。该模型各组成成分之间的相互关系以溶解氧为核心。大肠杆菌和可衰减的放射性物质, 以及那 3 种难降解的惰性组分则与溶解氧无关。

收稿日期: 2009-12-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB403400)

作者简介: 周华(1970-), 女, 宁夏银川人, 博士生, 主要从事水文学及水资源的研究。E-mail: zhouhua@pku.org.cn

模型中各主要水质组分之间的交互关系如图 1 所示。

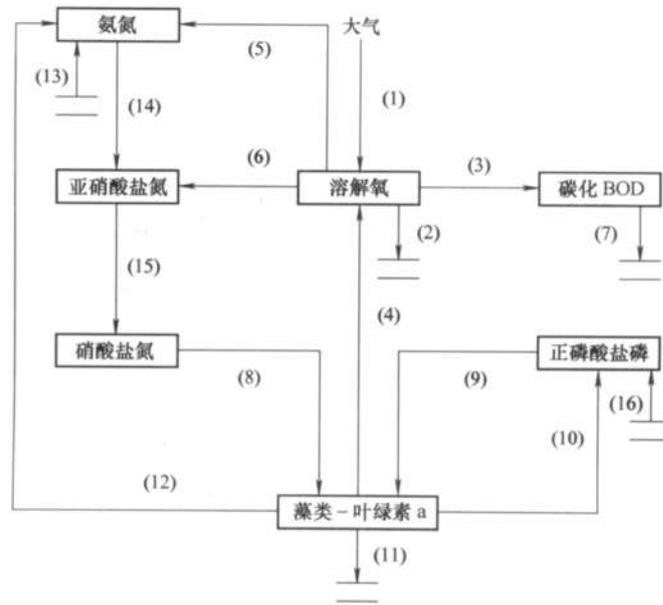


图 1 QUAL-II 模型中各主要水质组分之间的交互关系

图 1 中数字(1)—(16)分别指代 QUAL-II 模型中各主要水质组分之间的 16 种交互作用，这 16 种交互作用是：(1)大气复氧；(2)底泥耗氧；(3)碳化 BOD(CBOD)耗氧；(4)产氧；(5)氨氮耗氧；(6)亚硝酸盐氮耗氧；(7)CBOD 沉淀；(8)浮游藻类吸收硝酸盐氮；(9)浮游藻类吸收正磷酸盐磷；(10)浮游藻类呼吸产生正磷酸盐磷；(11)浮游藻类死亡及沉淀；(12)浮游藻类呼吸产生氨氮；(13)底泥释放氨氮；(14)氨氮转化为亚硝酸盐氮；(15)亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮；(16)底泥释放正磷酸盐磷。

QUAL-II 模型可用来研究点源污染，也可用来研究面源污染；既可模拟定常状态，也可模拟非定常状态；既能用于单一河道，也能用于树枝状河系及沿程流量变化等情况。该模型还适用于沿河有多条支流和多个排污口、取水口，且入河流量缓慢变化的情况；可用于计算为满足预定溶解氧水平所需的增加的稀释流量。

QUAL-II 模型的基本假定包括：(1)将研究河段分成一系列等长的水体计算单元，在每个水体计算单元内污染物是均匀混合的；(2)各水体计算单元的水力几何特征，如河床糙率、断面面积、BOD 降解率、底泥耗氧速率等各段均相同；(3)污染物沿水流纵向迁移，对流、扩散等作用也均沿纵向，流量和旁侧入流不随时间变化。

根据上述基本假定，导出 QUAL-II 模型的基本偏微分方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x E_x \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x UC)}{A_x \partial x} + \frac{S_c}{A_x \Delta x} \quad (1)$$

式中： $A_x$  为位置处的河流横截面面积， $m^2$ ； $E_x$  为纵向分散系数， $m^2/s$ ； $U$  为断面平均流速， $m/s$ ； $S_c$  为源和汇的负荷， $mg/Ld$ ； $\Delta x$  为小河段的间距， $km$ 。

1982 年，美国环保局推出了 QUAL2E(或简称 Q2E)模型。QUAL2E 3.0 版是在美国塔夫斯大学(Tufts University)土木工程系和美国环保局水质模拟中心(Center for Water Quality Modeling, 缩写为 CWQM)环境研究实验室的合作协议支持下开发的。该版本中包括了对以前版本(QUAL2E 2.2 版, Brown 和 Barnwell)的修改和对定常仿真输出的不确定分析(UNCAS)的扩充能力。该版本的 QUAL2E 和与它成套的不确定性分析程序(QUAL2E-UNCAS)用来取代所有以前版本的 QUAL2E 和 QUAL-II 模型<sup>[2]</sup>。

QUAL2E 模型使用有限差分法求解的一维平流-弥散物质输送和反应方程来模拟树枝状河系中的多种水质成分，用经典隐式向后差分法解决定常或非定常状态下的问题。

QUAL2E 中的物质输送过程考虑得较为简单。

在 QUAL2E 中, 确定一条河流的同化能力时, 最需要考虑的是该河流保有足够溶解氧的能力。

QUAL2E 考虑了氮循环的主要反应、藻类生长、水底碳化 BOD、大气复氧及它们对溶解氧平衡的相互影响。

美国环保局自 1987 年开始对 QUAL2E 模型进行修改。经过多次修订和增强功能, 美国环保局于 2003 年推出了 QUAL2K 模型新版本<sup>[3]</sup>。

## 2 QUAL2K 模型的特点与功能

QUAL2K 是一个综合性、多样化的河流水质模型, 其水质基本方程是一维平流-弥散物质输送和反应方程, 该方程考虑了平流弥散、稀释、水质组分自身反应、水质组分间的相互作用以及组分的外部源和汇对组分浓度的影响<sup>[4]</sup>。

QUAL2K 是在 QUAL2E 的基础上改进而成的, 两者的共同之处是<sup>[3]</sup>: (1) 一维。水体在垂向和横向都是完全混合的; (2) 定常。模拟的是不均匀定常流场和浓度场; (3) 日间热收支。日间热收支和温度在日间时间轴上用气象学方程模拟; (4) 日间水质动力学。所有水质变量在日间时间轴上模拟; (5) 热量和物质输入。模拟点源和非点源负荷和去除。

较 QUAL2E 而言, QUAL2K 的不同之处包括: (1) 软件环境和界面。QUAL2K 在 Microsoft Windows 环境下实现, 所用的编程语言是 Visual Basic for Applications (VBA)。用户图形界面则用 Excel 实现。可从美国环保局的网站获得该模型的可执行程序、文档及源代码; (2) 模型分割。QUAL2E 将系统分割成几个等距河段, 而 QUAL2K 则将系统分割成几个不等距河段。另外, 在 QUAL2K 中, 多个污水负荷和去除可以同时输入到任何一个河段中; (3) 碳化 BOD (CBOD) 分类。QUAL2K 使用两种碳化 BOD 代表有机碳。根据氧化速率的快慢把碳化 BOD 分为慢速 CBOD 和快速 CBOD。另外, 在 QUAL2K 中, 对非活性有机物颗粒 (碎屑) 也进行了模拟。这种碎屑由固定化学计量的碳、氮和磷颗粒组成; (4) 缺氧。QUAL2K 通过在低氧条件下将氧化反应减少为零来调节缺氧状态。另外, 在低氧条件下, 反硝化反应很明确地模拟为一级反应; (5) 沉积物-水体之间的交互作用。在 QUAL2E 中, 溶解氧和营养物在沉积物-水体之间的流量只是做了一些文字性的描述, 而在 QUAL2K 中, 则是在内部做了模拟, 即氧 (SOD) 和营养物流量可用一个方程模拟, 该方程是由有机沉淀颗粒、沉积物内部反应及上层水体中可溶解物质的浓度构成; (6) 底栖藻类。QUAL2K 模拟了底栖藻类; (7) 光线衰减。光线衰减是由藻类、碎屑和无机颗粒方程计算; (8) pH。对碱度和无机碳都进行了模拟, 在它们的基础上模拟河流 pH; (9) 病原体。对一种普通病原体进行了模拟。病原体的去除由温度、光线和沉积方程决定。(10) 不仅适用于完全混合的树枝状河系, 而且允许多个排污口、取水口的存在以及支流汇入和流出; (11) 对藻类-营养物质-光三者之间的相互作用进行了矫正; (12) 在模拟过程对输入和输出等程序有了进一步改进; (13) 计算功能的扩展; (14) 新反应因子的增加, 如藻类 BOD、反硝化作用和固着植物引起的 DO 变化。

美国环保局目前还在对 QUAL2K 模型进行着改进, 并于 2009 年 1 月发布了该模型的一个最新版本<sup>[4]</sup>。QUAL2K 模型中各主要水质组分之间的交互关系如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

## 3 QUAL2K 模型的应用分析

郭永彬等<sup>[6]</sup>应用 QUAL2E 和 QUAL2K 模型探讨了汉江中下游的水质变化趋势。在水质评价与预测中, 选择 BOD 作为预测因子。水质模型采用汉江中下游 1995 年丰水期水质监测资料。结果表明, 两个模型与实际监测数据的拟合结果均理想, 而 QUAL2K 比 QUAL2E 的拟合结果更佳。并分析发现, QUAL2K 曲线几乎总是 QUAL2E 曲线之上, 这主要是由于在 QUAL2K 模型中 BOD 比 QUAL2E 模型增加了藻类死亡 BOD 和河底 BOD 再悬浮作用两项因素。由于 QUAL2K 模型能够模拟藻类死亡 BOD、固

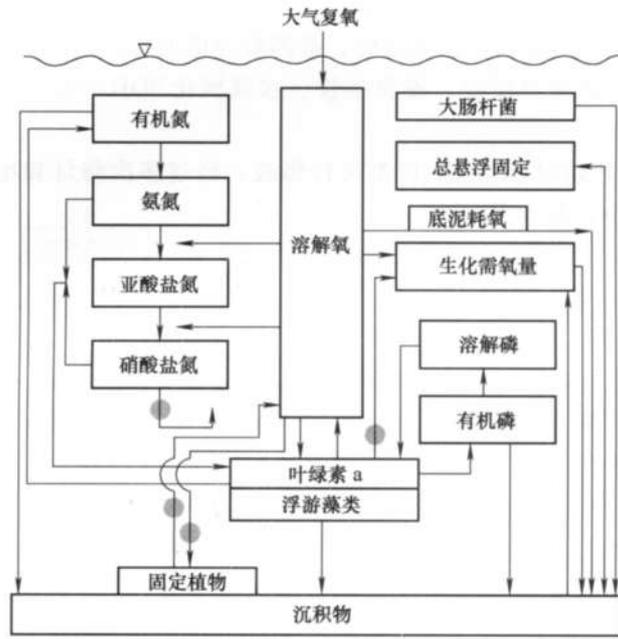


图2 QUAL2K模型中各主要水质组分之间的交互作用

着植物DO和反硝化作用，而QUAL2E模型不能模拟，因此QUAL2K模型能比QUAL2E模型更好的与野外测量数据相一致。

方晓波等<sup>[7]</sup>应用QUAL2K模型和一维水质模型研究了钱塘江流域BOD安全纳污能力。研究表明，基于QUAL2K模型的BOD安全纳污能力普遍大于基于普通一维模型的BOD安全纳污能力。基于QUAL2K模型的方法更多地考虑了流域BOD实际变化情况，因此该方法的计算结果更接近实际。QUAL2K模型的 $m$ 值水体纳污能力算法结合了总量控制与浓度控制理念，是一种流域纳污能力计算的简便方法。

陈月等<sup>[8]</sup>应用QUAL2K模型对太湖流域西苕溪干流梅溪段的水质进行了模拟和预测。针对西苕溪的具体情况，选用COD、氨氮和总磷作为模拟预测指标，用模型率定法并参考相关文献确定了COD降解系数 $K_C$ 、氨氮降解系数 $K_N$ 和总磷平衡系数 $K_p$ 等水质参数，并对模拟结果进行了验证，结果表明预测值和实测值的相关性较好。

郭怀成等<sup>[9]</sup>在云南滇池以及北京官厅水库的研究中，应用QUAL2K模型成功地对水质进行了预测和动态仿真。

综上所述，QUAL2K模型目前在我国的应用还比较少，尚处于较为简单的应用阶段，还未对模型本身进行发展和改进。此外，模拟时选用的指标也比较少，大多选用BOD，也有选用COD、氨氮和总磷作为模拟预测指标的。

#### 4 结论与展望

QUAL模型系列的开发经历了一个由QUAL-I→QUAL-II→QUAL2E→QUAL2K模型的研究发展过程。相对于其它QUAL模型，QUAL2K模型目前在我国的应用还比较少。然而，鉴于QUAL2K模型的诸多优势，在不久的将来，QUAL2K模型可望得到更广泛的应用。

QUAL2K模型的最大优势在于：(1)功能全面，通用性强；(2)该模型对数据、资料的需求量较少，所需花费的人力、时间和经费也较少；(3)QUAL2K模型是由一些简单模型组合而成，该模型中大量的动力学参数可以参照那些简单模型的数值；(4)界面规范，可视化程度高。图形用户界面采用Excel实现，操作方便、容易掌握；(5)程序语言经过了优化设计，计算效率高。该模型软件内存需

求小且运行速度快；(6)编程语言是Visual Basic for Applications(VBA)，也就是VB的简化版。该语言简单易学，用该语言开发出来的软件易于与其它兼容性软件搭配使用；(7)可从美国环保局的网站获得全部源代码。美国环保局目前还在对该模型进行着改进。美国环保局于2009年1月发布了该模型的一个最新版本。

结合我国的实际情况，今后还应对QUAL2K模型进行改进，使之更好地适用于我国水环境保护领域的相关工作。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 何孟常,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):289-294.
- [ 2 ] 李云生,刘伟江,吴悦颖,等.美国水质模型研究进展综述[J].水利水电技术,2006,37(2):68-73.
- [ 3 ] Chapra S C, Pelletier G J. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and Users Manual[R]. Medford: Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA., 2003.
- [ 4 ] Yang M D, Sykes R M, Merry C J. Estimation of algal biological parameters using water quality modeling and SPOT satellite data. Ecological Modeling[J]. 2000, 125: 1-13.
- [ 5 ] Chapra S C, Pelletier G J, Tao H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual[R]. Medford: Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA., 2008.
- [ 6 ] 郭永彬,王焰新.汉江中下游水质模拟与预测——QUAL2K模型的应用[J].安全与环境工程,2003,10(1):4-7.
- [ 7 ] 方晓波,张建英,陈伟,等.基于QUAL2K模型的钱塘江流域安全纳污能力研究[J].环境科学学报,2007,27(8):1402-1407.
- [ 8 ] 陈月,席北斗,何连生,等.QUAL2K模型西苕溪干流梅溪段水质模拟中的应用[J].环境工程学报,2008,2(7):1000-1003.
- [ 9 ] 郭怀成环境规划与管理工作组.水污染控制技术[EB/OL].(2009-08-22)[2009-11-13].[http://www.ccepr.org/huanjing/frontend/fangxiangmain\\_19.htm](http://www.ccepr.org/huanjing/frontend/fangxiangmain_19.htm).

## Application research of a comprehensive river water quality model QUAL2K

ZHOU Hua

(Dept of Water Resources, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The author introduces the evolution process of the QUAL series models, which have experienced from QUAL-I model, QUAL-II model, QUAL2E model to QUAL2K model. A full description of QUAL-II model is presented, and a chart figure of interactions among the main water quality components by QUAL-II model is given. Subsequently, QUAL2K model is analyzed and the interactions among the main water quality components by QUAL2K model is given. The agreements and differences between QUAL2K model and QUAL2E model are pointed out. The QUAL2K model possesses many advantages as compared with other QUAL sequent models, such as comprehensive functions, wide versatility, good visualization, easy operation and high processing speed, etc. At present, although QUAL2K model has been applied less commonly than other QUAL models in China, it will be widely applied in near future.

**Key words:** stream water quality model; QUAL model series; QUAL-II model; QUAL2E model; QUAL2K model; application examples

(责任编辑:韩 昆)