DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.015

# 基于QUAL2K模型的水质模拟与水质风险评价

胡 珺

(中科宇图(北京)资源环境科学研究院, 北京 100101)

**摘要:** 选取对数据需求量相对较小的河流一维稳态水质模型QUAL2K模型开展水质模型模拟与水质风险评估的研究。为了简化QUAL2K模型建模过程, 提高模型计算效率, 优化模拟结果展示效果以及实现水质风险评价的应用, 将QUAL2K模型进行B/S架构系统集成, 运用ArcGIS平台实现水质模型结果的可视化动态播放和专题图制作, 并提出通过各时间步长的水质模拟结果统计各河段的水质超标风险概率的水质风险评价方法, 为流域水环境优化管理提供决策依据。

**关键词:** QUAL2K; 水质风险评价; 系统集成; 水质模拟; 老灌河

**中图分类号:** TV122; P333.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1093-04

## Water quality simulation and water quality risk assessment based on QUAL2K model

HU Jun

*(Institute of Resources and Environment Science, MAP UNI, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** With the increasingly prominent water environment pollution problem, the demand of water quality risk assessment is rapidly increasing as well. In this article, we chose the one-dimensional steady state water quality model-QUAL2K model, which has small data demand and is broadly applied to river network model, to simulate the water quality and evaluate the water quality risk. In order to simplify the model development process, improve the calculation efficiency, optimize display effects of model results, and achieve the application in water quality risk assessment, we transformed the QUAL2K model into B/S architecture system integration, utilized ArcGIS platform to achieve the visually dynamic display of water quality simulation results and thematic map production, and then proposed the water quality risk assessment method from the water quality risk probability based on time step water quality simulation results. The method can provide the decision-making basis for the water environment management.

**Key words:** QUAL2K model; water quality risk assessment; system integration; water quality simulation; Laoguanhe River

随着社会经济的迅猛发展, 人口基数的不断增大, 水资源危机已成为当今世界许多国家面临的严重问题。我国虽然水资源总量相当丰富, 但我国水资源量时空分布不均衡、与人口耕地分布不相适应等特点。同时, 随着城镇化进程的加剧, 工业化的发展迅速, 水质型缺水和资源型缺水导致水资源对社会经济的制约日益突显。河流作为工业和生活等用水的主要来源, 其污染严重威胁着人们的生存环境, 因此定量评估河流水质风险的需求也显得尤为突出。

河流水质模型现在已经广泛应用于水环境管理中, 包括污染物的模拟和预测、水环境管理规划与水质评价等方面。利用数学模型对河流水污染进行控制是十分有效的, 它可以分析各种污染物在水环境中的状态和演变规律, 为流域水环境优化管理提供决策依据[1-2]。本文遵循实用性、先进性、可行性、简洁性、现实性等基本原则, 同时, 考虑模型数据资料的可获取性和模型的广泛适用性, 选取对数据需求量相对较少的QUAL2K水质模型为水质模拟与风险评价的模型工具。QUAL2K模型作为一个强大的水质计算模型, 在可视化及结果展示方面略显薄弱, 因此在水环境管理决策支持等应用领域未能广泛应用。本研究将针对于这一方面的研究缺失, 建立基于B/S结构的QUAL2K模型, 并在利用ArcGIS Server组件, 实现河流一维水质模拟与风险分析, 具体的模型系统设计框架见图1。

收稿日期: 2015-02-26 修回日期: 2015-10-24 网络出版时间: 2015-11-03
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151103.1007.008.html
基金项目: 河北省环境保护公益性行业科研专项(14gy07); 国家科技支撑计划项目(2011BAC12AB02)
作者简介: 胡 珺(1987-), 女, 湖北武汉人, 工程师, 主要从事水环境模拟与评价方面的研究。E-mail: olive-jun@hotmail.com

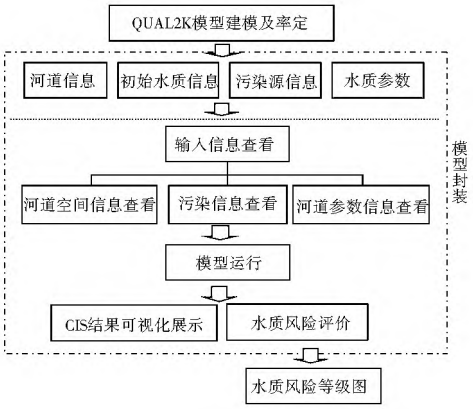



图 1　水质模型系统设计框架

Fig. 1　System design framework of water quality model

# 1　模型集成与方法

## 1.1　QUAL2K 模型介绍

QUAL 模型于 1971 年由美国德克萨斯州水利发展部开发完成, QUAL-Ñ 模型是其最早的形式[3]; 随后美国水资源工程公司与美国环保局于 1972 年合作开发了 QUAL-Ò 模型的第一版, 随后根据各版本的优秀特性对模型进行更新; 1982 年美国环保局推出了 QUAL2E 模型, 通过使用有限差分法求解一维平流弥散物质输送过程, 并通过反应方程求解河网水质, 运用隐式向后差分法求解定常或非定常状态下的水质, 但是 QUAL2E 模型仍然存在一些不足之处[4-8]; 经过对 QUAL2E 模型的多次修正和功能扩展, 美国环保局又于 2003 年推出了最新的 QUAL2K 版本; 后来, Pelletier 等人[10] 在 QUAL2K 模型的基础上开发了 QUAL2Kw 模型。该模型可以在 Windows 的界面下进行操作, 并可以通过 VBA 程序对 QUAL2K 模型进行修改。QUAL 系列模型能够模拟多个点源和线源的排污、取水, 以及支流汇入和流出等功能, 也能够模拟简单的水工建筑物, 如可以添加多个溢流堰等。该模型能够模拟 13 个水质指标和 3 种通用组分等多种指标, 通用性强, 对数据的需求量小, 在国内外得到了广泛应用[9-14]。

## 1.2　QUAL2K 模型集成

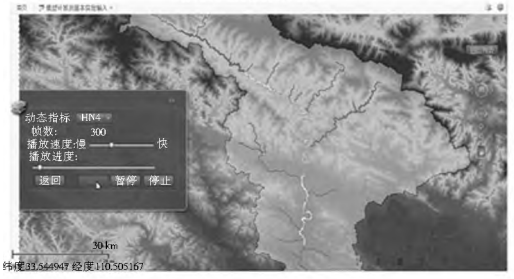
(1) 水质模型 B/S 模式转化。

本研究将 QUAL2K 模型的 EXCEL 界面, 通过 POI 进行 B/S 模式转化。运用 JAVA 调用 VBA 计算程序, 将原本的 EXCEL 输入界面转化为基于建模过程导向式的数据输入形式, 辅助使用者水质建模, 其中数据输入界面包括基本信息、河道信息、初始水质信息、污染源信息、水质参数。河道信息界面需要输入模拟河道的经纬度、河段长度、海拔、曼宁系数等基本信息。初始水质信息需要填入模拟的初始流量值, 以及初始的各河道的水质信息。污染源信息通过河道距离查找的形式, 按照河道距离输入入河排污口及河道取水的相关信息。模型通过底图查看的功能, 可以检查相关信息是否输入正确, 并根据相关信息进行修正。能够简化模拟预测的操作难度。模型通过 GIS 二次开发, 有效提高了模拟结果的可视化展示效果。

(2) 水质模型封装及结果展示。

运用基础地形数据、河道矢量数据进行区域地形配图, 结合河道划分气象、模型参数数据建立水质模型系统, 用户可以根据不同的模拟数据设置和参数选择进行不同时期的水质模拟预测(图 2(a))。系统通过引导式操作步骤, 模型运行, 得到水质模拟结果。模拟结果展示有两种形式: 一种为生成模拟结果的线性图; 另一种生成 GIS 动态展示动画(图 2(b))。

(a) 模型输入主界面




(b) GIS动态结果展示

图 2　模型系统截图

Fig. 2　Screenshot of model system

## 1.3　水质风险评价方法

风险(Risk) 是对自然或人类活动造成潜在损失发生的可能性和危害程度进行度量, 其产生具有随机性和不确定性等特点, 是典型的概率事件[15-16]。水环境风险评价是评估水环境系统的质量状态超过给定水环境质量标准的控制限值的程度及其发生的概率[17], 是防止污染事故、控制环境污染的有效手段之一[18-20]。本研究提出的水质风险评价对象是监测断面水质类别的概率分布, 即根据水质模型时间步长计算得到某计算单元系列水质模拟结果, 经过水质评价后, 分析其时间尺度上呈现的概率分布。例如计算步长设置 5 min, 模拟 30 d 得到每个计算单元 8 640 个模拟结果, 根据《地表水环境质量标准》GB 3838- 2002, 确定各时间节点的水质等级, 参考水质超标率的计算方法计算风险概率, 水质未达标时间节点数量为 $Na$, 总的时间节点数为 $N_T$, 则各模拟点位的水质风险概率为 $P= Na/N_T \times 100\%$。

根据水质风险评价结果, 将不同水质风险概率分级, 其中 0~ 20% 为低风险, 20% ~ 40% 为较低风险, 40% ~ 60% 中等风险, 60% ~ 80% 为较高风险, 80% ~ 100% 为高风险。

# 2　案例分析

## 2.1　研究区概况

老灌河是南水北调中线水源地丹江口水库上游的一个重要支流, 位于河南省西南部, 是典型的山区型河道。老灌河发源于栾川县西伏牛山主峰北麓冷水镇小庙岭, 介于东经 111°01′ - 111°46′、北纬 33°05′ - 33°48′。从马驹口入卢氏县, 向西

南温口与五里川支流汇合后折向东南,经朱阳关入西峡县境,流经西峡县桑坪、石界河、军马河、米坪、双龙等 8 个乡镇,穿西峡、淅川县境,在淅川县老城东双河镇附近入丹江,见图 3。老灌河主要干流长 254 km,流域面积 4 219 $km^2$,属南阳市面积 3 266 $km^2$,落差 1 340 m。老灌河上游约 116 km 长处于深山区,两岸山势陡峭,群峰耸立,森林覆盖率达 90%。

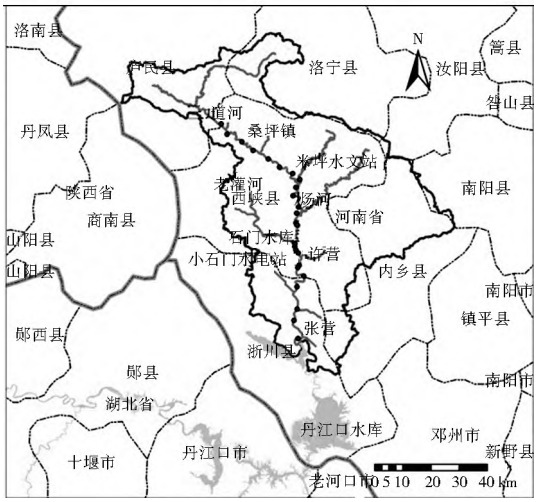



图 3　研究区域

Fig. 3　Study area

## 2.2　QUAL2K 模型建模

自然河道受到外界环境影响较大,水质模型运算时需要将河道依据水动力学和水质特性将河道进行概化,建立合理的河道设置,便于水质模型的结果计算。通过老灌河降雨量和径流量的相关性分析,确定 6 月– 9 月为丰水期,1 月– 3 月为枯水期,其余为平水期。将 2012 年 1 月– 11 月的氨氮、化学需氧量、溶解氧三个水质指标的水质监测数据用于模型的率定及验证,得到丰水期、枯水期、平水期三套率定参数,便于用户针对于不同的时期进行参数的选择。

## 2.3　水质风险评价

运用模型系统计算各水期的水质风险结果,运用反距离插值法绘制各水期的溶解氧、氨氮、化学需氧量风险评价分级图(图 4)。按水质指标分析,对于丰水期溶解氧来说,桑坪镇至米坪为高风险,西峡水文站和张营区域为较高风险,平水期和枯水期溶解氧为低风险;氨氮方面,桑坪镇至米坪风险高,其中丰水期和平水期为高风险,枯水期降低为较高风险,平水期石门水库下游至许营及丰水期西峡水文站附近也出现不同程度的水质风险,张营断面上下游全年存在较高风险;化学需氧量方面,桑坪镇至米坪为高风险,西峡水文站至张营全年处于较高风险至高风险,平水期杨河至许营也存在较低风险至较高风险。整体而言,化学需氧量水质风险较溶解氧及氨氮水质风险高。

结合流域的调研情况综合分析发现,老灌河地区桑坪镇至杨河区域受到生活污水及企业污染较为严重,应该控制上游企业的排污,同时加快地方农村分散式污水处理设施的建设;西峡水文站至张营段受到企业排污、城市河道污水排放以及农业面源污染的影响,对下游水环境影响较大,需要进一步分析研究各类污染物对下游水环境的影响并制定相应的管理措施,避免水质风险对丹江口水库水质的影响。

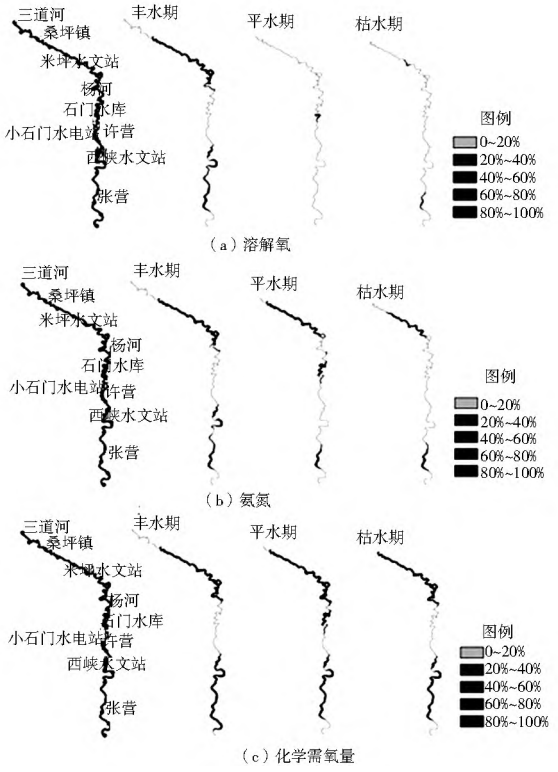



图 4　风险评价分级

Fig. 4　Classification of risk assessment

# 3　结论与展望

QUAL2K 模型通过系统封装集成后,可以在 B/S 端进行水质建模与模拟计算,实现基于 ArcGIS 平台的水质模拟结果可视化展示。集成系统用于水质风险评价方法改进后,可以直观的渲染展示不同时期河道各水质指标超标的风险概率,为水环境管理提供数据支持,为水环境管理决策提供科学的支撑。

QUAL2K 模型进行封装集成后能够将该模型技术应用于环境管理的业务化系统平台中,方便更多用户进行本地化的操作应用;简洁的界面设置和系统的本地化设置,降低了使用者建模能力的要求。模型率定和调试是模型应用中的重点,率定调参工具集成于系统平台将大大减少人工调试的成本,这将成为未来模型技术的集成与业务化运行的重要研究方向。

参考文献(References):

[1]　McIntyre, N R, Wheater, H S. A tool for risk-based management of surface water quality[J]. Environment Model Software, 2004, 19: 1131-1140.

[2]　Kannel P R, Lee S, Lee Y S, et al. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal[J]. Ecological Modelling, 2007, 202: 503-517. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033

[3]　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): 289-294. (LUO Ding-gui, WANG Xue-jun, SUN Li-ning. Progress in study of water quality model and review of river basin management

model WARMF[J]. Advance in Water Science, 2005, 16(2): 289-294. (in Chinese))

[4] Park S S. Lee Y S, A multiconstituent moving segment model for the water quality predictions in steep and shallow streams [J]. Ecological Modelling, 1996, 89: 121-131.

[5] Park S S, Uchrin C G. A stoichiometric model for water quality interactions in macrophyte dominated water bodies[J]. Ecological. Modelling, 1997, 96: 165-174.

[6] Park S S, Na Y, Uchrin C G. An oxygen equivalent model for water quality dynamics in a macrophyte dominated river[J]. Ecological Modelling, 2003, 168: 1-12.

[7] Anh D T, Bonnet M P, Vachaud G, et al. Biochemical modeling of the Nhue River (Hanoi, Vietnam): practical identi ability analysis and parameter estimation[J]. Ecological Modelling, 2006, 193: 182-204.

[8] Pelletier G J, Chapra C S, Tao H. QUAL2Kw, A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21: 419-4125.

[9] 王亚炜, 杜向群, 郁达伟, 等. 温榆河氨氮污染控制措施的效果模拟[J]. 环境科学学报, 2013, 33( 2): 479-486. (WANG Yawei, DU Xiangqun, YU Dawei, et al. Assessment of ammonia nitrogen pollution control in Wenyu River by QUAL2K simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33( 2): 479-486. (in Chinese))

[10] 杨乐, 钱钧, 吴玉柏, 等. 基于 QUAL2K 模型的秦淮河水质优化方案[J]. 水资源保护, 2013, 29(3): 51-55. (YANG Le, QIAN Jun, WU Yubai, et al. Water quality optimization scheme for Qinhuai River based on QUAL2K model[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(3): 51-55. (in Chinese))

[11] 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(08): 1402-1407. (FANG Xiaobo, ZHANG Jianying, CHEN Wei, et al. Assimilative capacity of the Qiantang River watershed based on a QUAL2K model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007 (08): 1402-1407. (in Chinese))

[12] 方晓波, 张建英, 陈英旭, 等. 基于纳污量的流域水环境管理模式——以金华江流域义乌段为例[J]. 环境科学学报, 2008 (12): 2614-2621. (FANG Xiaobo, ZHANG Jianying, CHEN Yingxu, et al. Environmental water management of a river watershed based on a simulative capacity Yiwu segment of Jinhua River watershed as a case study[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008(12): 2614-2621. (in Chinese))

[13] 陈月, 席北斗, 何连生, 等. QUAL2K 模型在西苕溪干流梅溪段水质模拟中的应用[J]. 环境工程学报, 2008(7): 1000-1003. (CHEN Yue, XI Beidou, HE Liansheng, et al. application of QUAL2K model for prediction of water quality in west Shaoxi[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008(7): 1000-1003. (in Chinese))

[14] 张宝, 刘静玲, 杨志峰. 北京城市水系水环境模拟及情景分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 16-22. (ZHANG Bao, LIU Jingling, YANG Zhifeng. Water quality prediction and case study for urban river system of Beijing[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2011, 5(1): 16-22. (in Chinese))

[15] 郝芳华, 李春晖, 赵彦伟等. 流域水质模型与模拟[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008. (HAO Fanghua LI Chunhui, ZHAO Yanwei, et al. Basin water quality modeling and simulation[M]. Beijing: Beijing normal university pubilishing group, 2008. (in Chinese))

[16] 肖伟华, 庞莹莹, 张连会, 等. 南水北调东线工程突发性水环境风险管理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010(05): 17-21. (XIAO Weihua, PANG Yingying ZHANG Lianhui, et al. Study on the emergency water environmental risk management during operating period in the Eastern Route of South to North Water Diversion[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010(05): 17-21. (in Chinese))

[17] 祝慧娜, 袁兴中, 梁婕, 等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. 中国环境科学, 2011(03): 516-521. (ZHU Huina, YUAN Xingzhong, LIANG Jie, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. China Environmental Science, 2011 (03): 516-521. (in Chinese))

[18] 金菊良, 吴开亚, 李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报, 2008(11): 1257-1261, 1266. (JIN Juliang, WU Kaiya, LI Ruzhong. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessment[J]. Shuili Xuebao, 2008(11): 1257-1261, 1266. (in Chinese))

[19] 李丹, 姚文锋, 郭富庆, 等. 基于模糊相似的长距离输水管线系统风险评价指标体系确立[J]. 南水北调与水利科技, 2015 (4): 803-807, 816. (LI Dan, YAO Wenfeng, GUO Fuqing, et al. Development of risk evaluation index system of long-distance water transmission pipeline based on fuzzy similarity [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(4): 803-807, 816. (in Chinese))

[20] 谢蓉蓉, 逄勇, 张倩, 等. 嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定[J]. 环境科学, 2012(7): 2244-2250. (XIE Rongrong, PANG Yong, ZHANG Qian, et al. Weight parameters of water quality impact and risk grade determination of water environmental sensitive spots in Jiashan[J]. Environmental Science, 2012(7): 2244-2250. (in Chinese))