

黄河自净需水量计算模型系统开发与应用

马秀梅¹, 邵岩², 张建军¹, 张文明³, 闫莉¹

(1. 黄河水资源保护科学研究院, 郑州 450004; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003;
3. 珠江水利科学研究院, 广州 510611)

摘要: 为了保障黄河功能性不断流和供水水质安全, 利用 VB 和 Access 软件开发了黄河自净需水量计算模型系统。该系统采用三层 C/S 结构模式, 其核心层为系统应用层, 由数据采集与更新、方案制定、模型计算、结果查询和系统管理等 5 个子系统组成, 能够在黄河特定河段、特定排污口及支流空间分布条件下, 根据不同的上游来水背景浓度及河流纳污状况, 优化计算出河流接纳合理污染物所对应的、河流必须蓄存的、满足相应水质目标要求的最小水量及水量过程。系统界面友好, 操作方便, 具有很强的实用性和参考价值。

关键词: VB; Access; 黄河; 软件开发; 自净需水量; 临界浓度; 计算模型; 系统

中图分类号: TP311.52; TV214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0081-05

Development and Application of Calculation Model of Self-purification Water Requirements in the Yellow River

MA Xiu mei¹, SHAO Yan², ZHANG Jian jun¹, ZHANG Wen ming³, YAN Li¹

(1. Water Resources Protection and Research Institute, Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, Zhengzhou 450004, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China;
3. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In order to ensure the functional continuous flow and water quality safety of water supply in the Yellow River, a calculation model system of self purification water requirements in the Yellow River was developed based on VB and Access. The system applied the three tier client/ server mode, and its core layer is the application layer which is composed of five sub systems including the data acquisition and updating, plan formulation, model calculation, results query, and system management. The system can be used to calculate the self purification water requirements under the spatial distribution conditions of specific outlets and tributaries of the Yellow River. According to different background concentrations and river pollution conditions of the upstream water, this system can perform the optimization calculation to determine the minimum water and water process which can allow the pollutants to be stored in the river and satisfy the requirements of water quality objectives. The system is convenient with friendly interfaces, and has significant practicability and reference value.

Key words: VB; Access; Yellow River; software development; self purification water requirements; critical pollutants concentration; calculation model; System

黄河自净需水量^[1]是黄河稀释调度和功能性不断流的重要研究内容,也是河流系统生态环境需水的重要组成部分^[2,3]。通过研究黄河沿线城镇废污水和污染物允许排放量,以及主要支流入黄污染物控制浓度等问题,分析计算满足良好水质要求的河道最小水量及水量过程,据此平衡协调人口、自然和经济之间的关系,促进经济社会的可持续发展,并为保障功能性不断流及实施黄河水量统一调度提供一定

的技术支持。

随着计算机技术在水资源保护领域中广泛深入的应用,利用现代编程语言和数据库技术可以开发出具有特定功能的计算软件,将传统复杂繁琐的人工计算或 EXCEL 表格计算转变成高效、快速、准确的计算机软件计算,不仅有助于提高水资源保护管理工作的效率和现代化水平,还有利于管理部门及相关科研单位方便、快捷地得到需求数据,为黄河水

收稿日期: 2013-03-25 修回日期: 2013-09-05 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.040.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901023); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BA06B08)

作者简介: 马秀梅(1979-),女,河南新乡人,工程师,硕士,主要从事水资源保护研究。E-mail: mxyhohai@163.com

资源规划、管理和优化配置提供技术支持,实现黄河水质水量联合调度和水环境承载能力^[4]的优化配置。

本文以黄河一维水质模型为基础,以满足黄河水质保护目标为目标,采用 VB 编程语言和 Access 数据库技术(即以 Visual Basic 6.0 作为前台开发工具,Microsoft Access 2003 作为后台支持数据库),开发了能够实现各种分析计算功能的、基于 C/S 结构的黄河自净需水量计算模型系统。

1 系统开发思路与功能要求

黄河自净需水量计算模型系统的开发思路是,在现阶段黄河水资源管理与保护需求分析、黄河水污染现状调查评价的基础上,充分考虑黄河水功能特点、水污染特征和主要水功能区的水质保护目标,选取合适的污染控制因子(COD/氨氮),识别并建立适用于黄河实际情况的黄河自净需水量模型,并利用 VB 编程语言和 Access 数据库技术开发黄河自净需水量计算模型系统。所建立的自净需水量计算模型系统,必须能够满足分期计算、全年逐月计算、合计全年需水量的要求,能够计算出现状年、规划年不同来水背景浓度条件下,黄河干流重要水质断面的全年逐月自净需水量,以及黄河沿黄城镇废污水及污染物允许排放量,确定主要支流入黄污染物控制浓度范围,实现对污染物排放的科学控制以及保证河道内的基本自净水量,满足河流维持自净能力、接纳合理污染物的需求,平衡经济社会用水与生态需水之间的关系。

2 系统总体设计

黄河自净需水量计算模型系统设计为三层结构,分别为数据维护与管理层、系统应用层和系统操作层,见图 1^[5-6]。数据维护与管理层为模型系统提供信息支持,包括黄河自净需水量模型计算所需要的各类数据库。

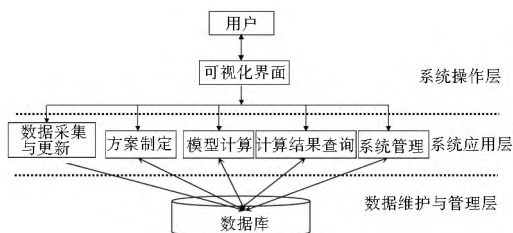


图 1 系统逻辑结构

Fig. 1 The structural diagram of system logic

系统应用层包括数据采集与更新、方案制定、模型计算、计算结果查询和系统管理等 5 个子系统,是黄河自净需水量计算模型系统的核心层。根据系统操作层用户的具体要求,通过调用数据采集与更新、方案制定和模型计算等应用组件,完成模型计算输入准备、模型计算、计算结果输出等流程,同时把计算过程及最终计算结果输出到数据库,供计算结果查询子系统进行查询、展示。

系统操作层由 VB 开发的系统界面组成,利用 Visual Basic 6.0 提供的各类组件,给用户丰富的人机交互界面,直观反映系统应用层中各子系统的内容,为模型计算及其计算结果的查询、统计等提供方便。

3 系统应用层功能组成

3.1 数据采集与更新子系统

数据采集与更新子系统主要用来收集黄河干流水质资料数据、水文资料数据、自净需水量计算模型参数及其他相关数据。其中,水质数据主要包括黄河干流各计算单元首断面的现状污染物实测浓度、现状年及规划年旁侧污染物(如入黄排污口、入黄支流)浓度;水文数据主要包括黄河干流主要断面 90% 保证率最枯月平均流量、主要断面特征值等;模型参数主要包括黄河干流各计算河段逐月污染物综合降解系数等;其他数据主要指黄河干流计算河段划分结果(考虑入黄河排污口、支流口的分布,本次将黄河八盘峡以下 3 395 km 划分为 18 个计算单元^[7],计算长度均都在 100 km 以上)、各河段对应的水质目标值及其取值范围,污染控制因子的选择等。

3.2 方案制定子系统

方案制定子系统主要用来制定详细的模型计算方案,包括河段名称、计算月份、计算水期、初始浓度和初始流量等信息。根据需要,可以单独设定所选计算河段某月份或分水期的计算方案,也可以把全年 12 个月份、3 个水期的计算方案设定在同一个计算方案中进行连续计算。

3.3 自净需水量模型计算子系统

自净需水量模型计算子系统可以根据治黄工作的具体需求来设定不同的计算方案。选择 COD 或氨氮污染作为控制因子,计算得出现状年或规划年不同来水背景浓度条件下的全年逐月自净需水量及相应污染物控制浓度。对于上游来水污染物浓度值偏高,经过自净降解后仍不能满足下游水质目标要求的河段,系统会提醒其无法满足自净需水要求,可以停止计算或选择继续计算得出上游来水的临界浓度值(即能够满足下游自净需水要求的上游来水污染物背景浓度的最大值)。

黄河自净需水量模型计算子系统计算流程见图 2,其中:现状年计算是指各计算河段采用现状年监测浓度作为各个河段计算开始的背景浓度,对各支流优化计算;规划年计算(下限)是指黄河干流第一个计算河段的首断面(八盘峡大坝)的背景浓度采用实测浓度,其余计算河段的背景水质分别采用上一计算河段优化计算得出的控制断面水质,对各支流优化计算;规划年计算(优化计算)是指黄河干流各计算河段首断面背景浓度分别采用自定义浓度(计算方案中赋值),对各支流优化计算;规划年计算(上限)是指各计算河段断面背景浓度分别采用 20 mg/L(COD)、1.0 mg/L(氨氮),各支流污染物浓度分别取规划年水质目标上限进行计算。

3.4 计算结果查询子系统

计算结果查询子系统用于实现对黄河干流各计算河段自净需水量计算结果、计算过程和主要支流入黄污染物控制浓度的查询等,包括分水期计算结果、逐月计算结果,以及计算河段所有中间断面(排污口、支流口断面等)的计算结果和相关计算过程。对于不能满足自净水量要求的河段,还能查询其上游来水的临界浓度值及其对应的自净需水量计算结果。

3.5 系统管理子系统

系统管理子系统的主要功能是对系统运行后台进行维护管理,包括系统用户账号的增加、修改和权限设置等。

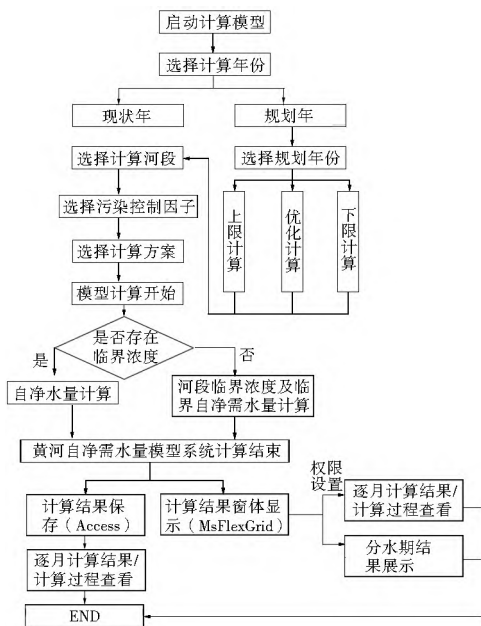


图2 模型计算流程

Fig. 2 The flowchart of model calculation

4 系统开发关键技术

4.1 自净需水量计算模型

4.1.1 模型理论

研究河流的混合输移过程时通常只关心污染物浓度的沿程变化,而不考虑其在断面上的变化,因此可采用一维水质模型进行描述^[8]。鉴于黄河自身的复杂特性,黄河自净需水量模型仅考虑需要在河道内存留的水量,而不考虑河道内的取水、蒸发、渗漏等水量损失。一维河流水质模型概化见图3,模型基本形式如公式(1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (1)$$

式中: C 为污染物浓度 (mL^3); x 为沿水流方向的距离 (L); K 为污染物综合自净降解系数 (T^{-1}); D 为河流弥散系数 (L^2T^{-1}); u 为水流流速 (LT^{-1})。

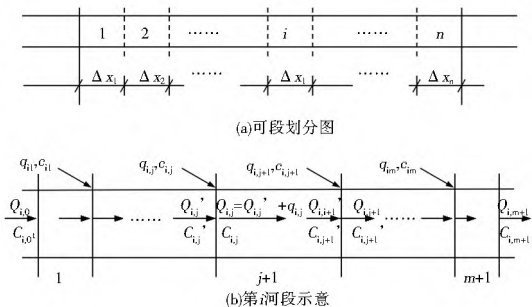


图3 一维河流水质模型概化图

Fig. 3 Generalized schematic diagram of one dimensional river water quality model

在河段定常稳态、排污的条件下, $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$, 黄河花园口以

上河段不受潮汐影响,弥散系数可以忽略,即 $D=0$, 则一维河流水质模型可变为:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = -KC \quad (2)$$

当 $x(t) = 0, C = C_0$ 时, 有:

$$C(x(t)) = C_0 \exp(-Kx(t)/u) \quad (3)$$

第 i 河段第 j 个排污口(支流)处,一维水质模型方程可具体分解为:

$$Q'_j = Q_{i,j-1}, Q_{ij} = Q'_j + q_{ij}, C'_j = C_{i,j-1} \exp(-K_j x_{ij}/u_{ij}), C_{ij} = \frac{Q'_j C'_j + q_{ij} c_{ij}}{Q'_j + q_{ij}} \quad (4)$$

式中: $Q_{i,j-1}$ 为第 i 河段第 j 小段起始断面黄河来水流量 (MT^{-1}); $C_{i,j-1}$ 为第 i 河段第 j 小段起始断面黄河来水污染物浓度 (ML^3); Q'_{ij} 为第 i 河段第 j 个排污口汇入前黄河来水流量 (MT^{-1}); C'_j 为第 j 河段第 1 个排污口汇入前黄河污染物浓度 (ML^3); Q_j 为第 i 河段第 j 个排污口汇后黄河流量 (MT^{-1}); C_j 为第 i 河段第 j 个排污口汇入后黄河污染物浓度 (ML^3); K_j 为第 i 河段第 j 个河段污染物综合降解系数浓度 (T^{-1}); x_{ij} 为第 i 河段第 j 个河段长度 (L); u_{ij} 为第 i 河段第 j 个河段平均流速 (LT^{-1})。

其中, COD 综合自净降解系数参考黄河流域水资源保护局规划成果^[9],进行温度修正,范围为 $0.11 \sim 0.25 \text{ L/d}$,其取值一般是枯水低温期 < 枯水农灌期 < 丰水高温期。

4.1.2 模型优化目标及优化原则

(1) 优化目标。由于水资源量匮乏、供需矛盾突出,黄河自净需水量研究应在保障生活生产用水的前提下,使自净需水量 Q_0 达到最小,即 $Q_{i,0} = \min\{Q(C_{s_{i,m+1}}, C_{i,0}, \{q_{i,j}c_{i,j}\})\}$ 。其中, $C_{s_{i,m+1}}$ 为河段水功能目标、 $C_{i,0}$ 为背景来水污染物浓度、 $q_{i,j}c_{i,j}$ 为旁侧流入。

(2) 优化原则。¹ 90% 保证率最枯月平均流量 (1977 年- 2006 年) 可作为河流最小流量设计值,是确定黄河自净需水量的参考依据^[10]; ⁰ 在黄河干流水质保护目标满足 0 类水的条件下,考虑黄河干流不同河段经济社会发展、排污水平的差异,各河段水质保护目标即使类别相同,污染物浓度数值应有所不同, COD 浓度变化区间为: $15.0 \leq C_{\text{COD}} \leq 20.0$; [»] 根据《中国水功能区划》^[11],支流入黄水质按水功能区水质目标控制,入黄水质维持或优于现状水质、不劣于入黄水功能区水质目标要求,在此前提下入黄支流污染物总削减率达到最小,即: $\min\{\frac{Q_{\text{控}} C_{\text{控}} - Q_0 C_0}{Q_0 C_0}\}$; ^¼ 沿黄城镇排污满足国家相关环境保护政策要求。

4.2 模型组件技术

自净需水量计算模型是本系统的核心计算模块,为便于应用系统的开发、定制、扩展和维护,将自净需水量计算模型封装成模型组件。组件封装遵循组件开发标准,封装后的组件有两个接口,一个用于传入数据和参数,另一个用于结果的输出,两个接口数据信息直接来源于数据库中相应的数据表。模型封装成组件后,程序运行与用户界面分离,不在运行过程中进行人机对话。

4.3 系统集成开发技术

本系统开发以 VB(Visual Basic) 6.0 作为开发专业模块的

工具, Microsoft Access 2003 作为后台支持数据库, 自净需水量计算模型被封装成 ActiveX DLL 通过可视化界面进行调用。VB 是一种基于 BASIC 语言、采用事件驱动方式的、面向对象的可视化软件开发工具, 它巧妙地将 Windows 编程的复杂性封装起来, 使用窗体和控件等可视化界面来设计应用程序, 提高了应用程序的开发效率^[12-13]。Microsoft Access 是一种数据库管理系统, 可以分别以表、报表、查询、页、模块、宏、窗体等 7 种形式来建立数据库系统。Access 数据库具有界面友好、操作方便、面向对象、维护简单、存储方式简单等优点, 并可以集中处理多种数据。VB 本身可以同大多数的数据库进行连接, 如 Access、SQL Server 等。在连接不同的数据库时, 需要在 VB 中引用不用的数据库引擎^[14]。在 Visual Basic 中, 常用的数据访问接口有下列 3 种: 数据库访问对象(DAO, Data Access Object)、远程数据库对象(RDO, Remote Data Object)和 ActiveX 数据对象(ADO, ActiveX Data Object)。由于 ADO 比 RDO 和 DAO 更加简单、更加灵活, 本系统在用 VB 开发时使用 ADO 作为数据访问接口。

5 黄河自净需水量计算模型验证及系统应用

5.1 模型验证

5.1.1 花园口以上河段现状年稀释水量

在现状纳污条件下, 为满足黄河水体水质目标要求, 在河

表 1 黄河现状年稀释水量推荐结果及其对应水质保证率

Table 1 Recommended results of dilute water quantity of the Yellow River and the corresponding guarantee probability of water quality

断面名称	90% 保证率最枯月平均流量 / (m ³ · s ⁻¹)	枯水低温期		枯水农灌期		丰水高温期	
		稀释水量 / (m ³ · s ⁻¹)	水质保证率 (%)	稀释水量 / (m ³ · s ⁻¹)	水质保证率 (%)	稀释水量 / (m ³ · s ⁻¹)	水质保证率 (%)
兰州	331	330~ 410	> 90	330~ 420	> 90	330~ 490	> 90
下河沿	314	310~ 330	55	310~ 330	55	310~ 330	55
石嘴山	301	310~ 350	10	300~ 310	10	300~ 310	10
头道拐	69	660~ 760	40~ 50	140~ 470	40	200~ 320	40
龙门	137	700~ 770	70	> 1 000	60	140~ 200	60
潼关	148	> 1 100	20	800~ 1 100	20~ 30	150~ 770	25
小浪底	150	260~ 460	—	> 260	—	> 800	—
花园口	161	300~ 500	40~ 45	> 290	40	> 800	30
利津	0	> 100	> 87	> 100	> 87	> 100	> 87

纳污条件, 该研究项目提出了重要入黄支流的合理可控指标(入黄水质控制浓度), 以及黄河重点河段 2030 年未来水平年不同水期的自净需水量及水量过程。篇幅所限, 本文仅列出计算结果查询界面, 见图 4。

此外, 在 2009 年黄河下游水量稀释调度工作中, 黄河自净需水量计算模型系统也被用于确定黄河各重要断面在不同水期、不同背景水质以及相应水质目标要求条件下的环境流量^[16], 取得了良好效果, 为黄河下游水量稀释调度工作提供了重要的技术支持。

6 结语

黄河自净需水量计算模型系统实现了在入黄污染物科学控制条件下维持黄河自净能力所需水量的自动化计算, 系统的开发可为黄河日常水量调度、保障黄河供水水质安全提供重要技术支持。今后, 需要在黄河污染物迁移转化规律深入研究的基础上, 继续扩展和完善系统的通用性, 丰富计算机展

道内蓄存的最小水量及水量过程被称之为稀释水量^[15], 以区别于自净需水量。利用 2005 年黄河现状纳污量逐月调查成果, 分析各河段逐月实测浓度, 并以 COD 为有机污染代表性因子, 计算黄河现状年稀释水量。考虑黄河水流演进、水资源可控性等多种因素, 推荐现状年黄河花园口以上河段重要水文断面稀释水量, 结果见表 1。

5.1.2 模型适应性分析

从表 1 中可以看出, 黄河兰州、龙门断面现状年稀释水量和实际水量、水质状况基本吻合, 水质保证率在 70% 以上, 下河沿、头道拐和花园口断面水质保证率在 50% 左右。由于黄河水质-水量响应关系比较复杂, 尤其是在石嘴山、潼关等上游较近距离有排污口、支流汇入的断面, 其水质、水量对应关系就相对较差。总体来看, 黄河自净需水量计算模型适应性较好, 能够用于自净需水量计算。

5.2 系统应用

本文开发的黄河自净需水量计算模型系统已经在国家“十一五”科技支撑计划“黄河健康修复关键技术研究”项目中得到应用。利用系统计算得出黄河兰州以下河段现状年不同水期的自净水量, 根据黄河流域未来水平年社会经济发展水平、国家宏观政策和相关规划, 及其支流所在地区经济社会可承受能力和污染治理水平等, 在黄河干流承纳污染物预测及自净需水研究的基础上, 结合各研究河段的水质保护目标和



图 4 计算结果查询界面

Fig. 4 Query interface of the calculation results

示功能,提高系统为黄河水量调度服务的决策支持功能。

参考文献(References):

- [1] 张建军,马秀梅,黄锦辉,等.黄河自净需水量研究[J].水利学报,2010,41(8):977-983. (ZHANG Jiar jun, MA Xiur mei, HUANG Jir hui, et al. Study on Self purification Water Requirements for the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 977-983. (in Chinese))
- [2] 何萍,束龙仓,邓铭江,等.西北干旱区内陆河生态环境需水量研究[J].水电能源科学,2012,30(10):23-25. (HE Ping, SHU Long cang, DENG Ming jiang, et al. Research on Ecological Environmental Water Requirement of Arid Inland River in Northwest China[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 23-25. (in Chinese))
- [3] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002,(9):14-19. (NI Jir ren, CUI Shu bin, LI Tian hong, et al. On Water Demand of River Ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (9): 14-19. (in Chinese))
- [4] 南开大学环境科学与工程学院,黄河水资源保护科学研究所,黄河流域水环境监管中心.黄河兰州段典型污染物迁移转化特性及承纳水平研究[M].北京:化学工业出版社,2006. (College of Environmental Science and Engineering, NanKai University, Yellow River Water Resources Protection Institute, Yellow River Basin Water Environment Monitoring Center. Typical Pollutants in Lanzhou Lanzhou Section of the Yellow River Migration Characteristics and on the Level of Research[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 张文明,董增川,王德智,等.基于Web Service的城市水资源决策支持系统开发及应用[J].水力发电,2007,33(7):13-15. (ZHANG Wei ming, DONG Zeng chuan, WANG De zhi, et al. Development and Application of the Decision Support System for Urban Water Resources Based on Web Service[J]. Water Power, 2007, 33(7): 13-15. (in Chinese))
- [6] 张文明,朱成涛,董增川,等.基于 Asp.NET 与 WebGIS 的城市水资源管理决策支持系统开发及应用[J].南水北调与水利科技,2007,5(6):62-65. (ZHANG Wei ming, ZHU Cheng tao, DONG Zeng chuan, et al. A Decision Support System for Urban Water Resource Management Based on ASP.NET and Web GIS [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(6): 62-65. (in Chinese))
- [7] 张建军.黄河自净水量研究[D].南京:河海大学,2008. (ZHANG Jiar jun. Study on Self purification Water Flow in the Yellow River [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [8] 周孝德,郭瑾珑,程文,等.水环境容量计算方法研究[J].西安理工大学学报,1999,15(3):1-6. (ZHOU Xiaode, GUO Jir long, CHENG Wen, et al. The Comparison of the Environmental Capacity Calculation Methods [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1999, 15(3): 1-6. (in Chinese))
- [9] 黄河流域水资源保护规划报告[R].郑州:黄河流域水资源保护局,2009. (The Yellow River Basin Water Resources Protection Planning Report. [R]. Zhengzhou: Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, 2009. (in Chinese))
- [10] 王西琴.河流生态需水理论、方法与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007. (WANG Xi qin. River Environmental Water Requirements [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))
- [11] 中国水功能区划[R].北京:水利部,2002. (China Water Function Regionalization [R]. Beijing: Ministry of Water Resources, 2002. (in Chinese))
- [12] 温贤发. Visual Basic 6 数据库程序设计高手[M].北京:科学出版社,2001. (WEN Xian fa. Master Database Programming of Visual Basic 6 [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 张朝昆,施丽娜. Visual Basic 数据库开发基础与应用[M].北京:人民邮电出版社,2005. (ZHANG Chao kun, SHI Li na. Visual Basic Database Development Infrastructure and Applications [M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese))
- [14] 龚沛曾,陆慰民,杨志强. Visual Basic 程序设计教程(6.0版)[M].北京:高等教育出版社,2000. (GONG Pei zeng, LU Wei min, YANG Zhi qiang. Visual Basic Programming Tutorial (Version 6.0) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese))
- [15] 张建军,徐志修,张建中,等.黄河水环境承载能力研究及应用[M].郑州:黄河水利出版社,2008. (ZHANG Jiar jun, XU Zhi xiu, ZHANG Jiar zhong, et al. Research and Application of Yellow River Water Environmental Carrying Capacity. [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘晓燕,连煜,黄锦辉,等.黄河环境流研究[J].科技导报,2008,17:24-30. (LIU Xiao yan, LIAN Yu, HUANG Jir hui, et al. Environmental Flows of the Yellow River [J]. Science & Technology Review, 2008, 17: 24-30. (in Chinese))