

Water Environment Capacity Dynamic Display System in the Water Source Area about the Middle Route Project of South to North Water Diversion

Lingling Kang¹, Zhanhao Kang², Feifei Dong¹, Lian'an Ren³

¹Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou Henan

²School of Surveying and Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan

³Xinxiang Irrigation and Water Conservancy Soil and Water Conservation Technology Extension Station, Xinxiang Henan

Email: kanglingling1234@163.com

Received: Nov. 5th, 2018; accepted: Nov. 19th, 2018; published: Nov. 26th, 2018

Abstract

Taking the catchment areas of the Danjiangkou reservoir and the surrounding tributary Qihe and Laoguan rivers in the water source area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project as case study, water environment capacity of dynamic display system is developed, which uses the existing water quality monitoring data, combines with the river pollutant mixture damping model and adopts the principle of combination of points, parts and whole. The system uses the component GIS software Arc Engine 9.3 as the development platform, adopts the C#2008 programming language and uses ACCESS2003 as the database. It can perform water environment capacity calculations and dynamic display, query, save, and output of space and attribute data under conditions: pollutant cannot be degraded, pollutant concentration is stable, and vertical dispersion coefficient is ignored.

Keywords

South-to-North Water Diversion, Middle Route Project, Water Source Area, Water Environment Capacity, Dynamic Display

南水北调中线工程水源区水环境容量动态展示系统

康玲玲¹, 康展豪², 董飞飞¹, 任连安³

作者简介: 康玲玲(1966-), 女, 硕士, 教授级高级工程师。主要研究方向: 水文与流域生态环境研究。

¹黄河水利科学研究院, 河南 郑州

²河南理工大学测绘与国土信息学院, 河南 焦作

³新乡市农田水利水土保持技术推广站, 河南 新乡

Email: kanglingling1234@163.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月19日; 发布日期: 2018年11月26日

摘要

以南水北调中线工程水源区—丹江口水库和周围丹江支流淇河以及老鹳河的汇水区域为研究对象, 利用已有水质监测数据, 结合河流污染物混合衰减模型, 采取点面、部分与整体相结合原则, 以组件式GIS软件ArcEngine 9.3为开发平台, 采用C#2008编程语言, 以ACCESS2003为数据库, 进行水环境容量计算, 开发了水环境容量动态展示系统, 实现了污染物不能降解、污染物浓度稳定、忽略纵向离散系数三种情况下的水环境容量计算及动态展示和空间、属性数据的显示、查询、保存及输出功能。

关键词

南水北调, 中线工程, 水源地, 水环境容量, 动态展示

Copyright © 2018 by authors and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南水北调中线工程(以下简称中线工程)是实现国家水资源整体优化配置、缓解华北地区水资源短缺的重大战略性基础设施, 是有效缓解北方及沿线城市生活和工农业生产严重缺水状况的关键性工程。该工程从丹江口水库引水, 经河南省方城县, 沿唐白河流域和黄淮海平原西部边缘开挖渠道, 在郑州以西用隧洞穿过黄河, 沿京广铁路西侧北上, 自流到北京、天津, 输水总干渠全长 1246 km。工程主要向湖北、河南、河北、北京及天津 5 省、直辖市供水, 年调水量 130 亿 m^3 ~140 亿 m^3 。该工程水源区主要指丹江口库区周边及上游的整个积水区域 [1] [2] [3] [4] [5]。

水环境容量是环境容量的重要组成部分, 是容量总量技术体系的核心内容之一, 是环境的自然规律与社会效益等参数多变量的函数, 既反映了污染物在环境中迁移、转化和积存规律, 也反映特定条件下环境对污染物的承受能力, 是制定水资源保护和社会经济发展规划的重要依据, 并在制定水污染物排放标准、水污染控制和水资源规划、管理等方面得到广泛应用 [6] [7] [8] [9] [10]。

本文以中线工程水源区丹江口水库和周围丹江支流淇河以及老鹳河的汇水区域为研究区域, 按点面结合、部分与整体相结合原则进行水环境容量综合研究, 开发基于 ArcEngine 的水环境容量动态展示系统, 为用户提供各种水环境容量信息查询、检索和必要计算, 为水源区的发展预测、规划决策、水环境建设及管理提供可靠依据。

2. 系统平台

结合 GIS 工具软件与可视化开发语言的集成二次开发方式是 GIS 应用的开发主流。选择熟悉的开发工具, 旨在缩短开发周期、减少成本。选择功能完备、价格便宜的 GIS 平台, 以减少软件投资。本系统采用开发平台如图 1 所示:

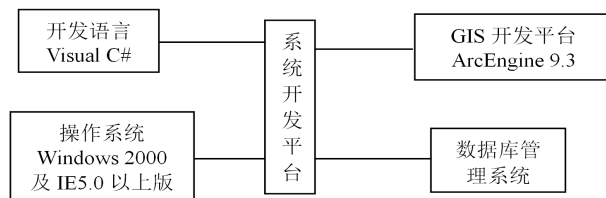


Figure 1. Development platform for dynamic display system of water environment capacity

图 1. 水环境容量动态展示系统开发平台

2.1. 地理信息系统平台

组件式 GIS 是基于标准的组件式平台, 是以一组具有标准通信接口、允许跨语言应用组件提供的 GIS, 各组件之间不仅可自由、灵活地重组, 且具有可视化界面和符合 ActiveX 控件规范的标准接口, 在 Delphi, Visual C++, Visual Basic, Power Builder 等编程工具编制的应用程序中, 可直接将 GIS 功能嵌入其中, 实现 GIS 的各种功能。

ComGIS 技术的基本思想就是把 GIS 的各大功能模块根据性质的不同划分为一个或几个控件, 每个控件完成特定的功能, 各个 GIS 控件之间, 以及 GIS 控件与其它非 GIS 控件之间, 通过面向对象的可视化开发工具集成起来, 形成最终的 GIS 应用系统。组件式 GIS 是面向对象技术和组件技术在 GIS 软件技术开发中的应用, 其控件与其他软件通过标准接口进行通信, 实现跨程序、跨计算机、跨网络的分布式操作。

鉴于以上优点, 本系统 GIS 平台使用 ArcGIS Engine 9.3, 采用 ArcEngine 组件技术, 可使用任何支持 COM 编程语言对 ArcGIS 平台的基本控件 AO (ArcObjects) 基础函数进行集成和二次开发, 实现能够脱离 ArcGIS 而独立运行的应用程序。ArcEngine 可帮助用户实现地图漫游和缩放、地图要素查询和标注及专题图制作、统计分析等最基本的地图操作功能。

2.2. 开发语言平台

本系统选择高效的 Visual C#, 是因它完全支持 ActiveX 控件的应用, 对数据库的支持也很完备, 能提供完全可视化、面向对象的编程环境, 同时还能开发出一流的用户界面, 易于系统使用。

在 Visual C# 环境下结合 ArcEngine 对系统进行开发, 可方便将地图处理功能嵌入应用程序中, 并可编译成 exe 文件, 脱离 ArcGIS 软件平台运行。同时, ArcEngine 能简单快速地在数据库管理系统中嵌入地图化功能, 以增强系统空间的查询和分析能力。

2.3. 数据库平台

Access 是微软公司推出的基于 Windows 桌面关系数据库管理系统(RDBMS), 是 Office 系列应用软件之一[11]。它提供了表、查询、窗体、报表、页、宏、模块 7 种用来建立数据库系统的对象; 提供了多种向导、生成器、模板, 把数据存储、查询、界面设计、报表生成等操作规范化。本系统数据量小, 结构简单, 将数据存储 Access 表中, 在 Visual C# 环境下通过数据库引擎 OleDb 与 Access 表相连, 用 SQL 语句等方式直接访问表中数据。

2.4. 运行平台

本系统软件运行平台为 Windows 2000 及以上操作系统。此外, 系统运行还需要 ArcGISRunTime 9.3。

3. 水质模型

水质模型又称水质数学模型, 是描述水质要素(BOD, DO 等)在其他因素(物理、化学、生物等)作用下随时间和空间变化关系的数学表达式。污染物进入河流后就与河水混合, 可按先后顺序称其为初始稀释阶段、二维

扩散阶段和一维纵向分散阶段的三个阶段[12]。

本系统在计算时运用了一维水质模型中的河流中污染物混合衰减模型，其微分方程式[13]如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Ex * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u * \frac{\partial C}{\partial x} - k * C \quad (1)$$

式中：C 代表污染物浓度(g/L)；t 代表时间(s)；Ex 代表纵向离均系数(m²/s)；x 是沿程距离(m)；u 是河流流速(m/s)；k 为污染物综合衰减系数(d-1)。

在实际应用中，为简化计算，常采用以下简化模型：

1) 污染物浓度是稳定的

在水流处于稳定流动状态，污染源连续稳定排放情况下，水中污染物分布状况趋稳定。这时污染物在某一空间位置的浓度不随时间变化，称其为稳态[14]。污染物浓度稳定模型属于一维稳态水质模型，假定只在 X 方向上存在污染物浓度梯度，即 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ ，则由(1)式易知：

$$\begin{aligned} Ex * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u * \frac{\partial C}{\partial x} - k * C &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{u}{Ex} * \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{k}{Ex} * C &= 0 \\ \Rightarrow C(x) = C_0 * \exp \left[\frac{u}{2Ex} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4kEx}{u^2}} \right) * x \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中：C(x)为计算断面污染物浓度(mg/L)；C₀为基准断面污染物的本底浓度(mg/L)；x 为计算断面至基准断面的距离(m)。参数 u、Ex、k 的意义同公式(1)。

2) 污染物不能降解

此简化模型适用于特定的不易降解污染物类型，其衰减系数 k = 0，则由(1)式易知：

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{u}{Ex} * \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \Rightarrow C(x) = C_0 * \exp \left(-\frac{u}{Ex} * x \right) \quad (3)$$

式中：C(x)、C₀、u、x、Ex 等参数意义同公式(2)

3) 忽略纵向离均系数

对于宽深比不大的河流，短期内污染物在断面内能均匀混合，污染物浓度在断面上横向变化不大，可用一维水质模型模拟污染物沿河流纵向迁移来计算纳污能力。在稳态或准稳态情况下，Ex = 0，则由(1)式易知：

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{k}{u} * C \Rightarrow C(x) = C_0 * \exp \left(-\frac{k}{u} * x \right) \quad (4)$$

式中：k 为污染物综合衰减系数(d-1)；C(x)、C₀、u、x 等参数意义同公式(2)。

4) 均匀分布概化河段水环境计算公式

概化为均匀分布即设定污染物排放在同一个河段内沿河均匀分布，并认为污染源源强在同一功能区内沿河均匀分布，其计算公式为：

$$m = kQ \frac{x}{u} * \frac{C(x) - C_0 * \exp \left(-k \frac{x}{u} \right)}{1 - \exp \left(-k \frac{x}{u} \right)} \quad (5)$$

式中：m 为纳污能力(g/s)；Q 为河段设计流量(m³/s)；其他参数意义同公式(4)。

4. 系统设计

4.1. 设计目标

水环境容量计算是掌握和评价水环境质量的重要内容，是对水环境总量进行统一配置与管理的依据。它既有描述地理特征的信息，又有反映不同时间水资源质与量的属性数据。这些信息还有分布存储、存储量大和格式繁多的特点。为此，利用 GIS 强大空间信息管理能力和动态分析功能和输出与打印等功能，设计基于组件式 GIS 技术的水环境容量动态展示系统。旨在计算机软、硬件支持下，结合河流中污染物混合衰减模型实现对水环境容量的计算、管理、查询和输出。

4.2. 总体设计

本系统分为数据显示、数据查询、水环境容量计算、帮助及退出五大模块。数据显示模块主要用于地图放大、缩小等基本操作；数据查询主要是连接数据库，提供几种不同监测断面水质数据查询方式；水环境容量计算是本系统的核心模块，依据三种不同水质模型，输入相应参数进行计算、展示和结果保存；帮助模块是帮助用户快速了解系统功能，熟悉操作；退出模块用于系统退出，若用户在规定时间内未有任何操作，系统将关闭。

4.3. 结构设计

根据系统目标、设计原则以及总体设计的要求，系统结构设计如图 2：

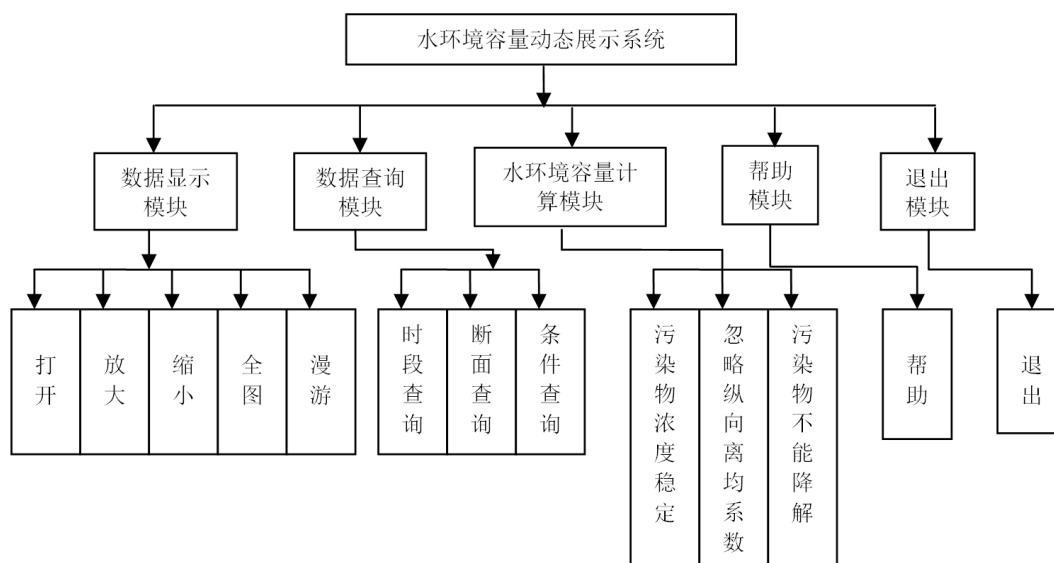


Figure 2. Structure design of water environment capacity dynamic display system

图 2. 中线工程水源区水环境容量动态展示系统结构设计图

4.4. 数据库设计

数据库是 GIS 的核心部分，包括空间特征数据和属性特征数据两部分。

1) 空间数据

空间数据按便于不同部门需求信息的提取与使用、便于数据拓扑关系建立、便于数字化及后续处理工作等原则分层组织。系统所用数据为水源区河流分布图，按地图中地物类型，依 ArcGIS 数据分层组织方法，将地图信息分为 pollutmonitors 图层(点图层)、河流图层(线图层)和 nydjk2 图层(面图层)，各图层中都包含几何数据和属性数据。其中 pollutmonitors 图层含水源区断面数据；河流图层含河流数据；nydjk2 图层含丹江口水库数据。

2) 属性数据

属性数据通常用关系数据库来存储管理，并对空间数据补充，主要有两个来源：一是矢量化时生成的属性数据，另一个来源是建立 Access 数据库，将一些地物信息存入其中。本系统应用第二种属性数据。

由于河流在一年内会经历丰水期、平水期和枯水期三阶段，各阶段水环境容量计算参数均不相同，因此系统在 ACCESS 中建立了断面、丰年期断面、枯年期断面和平年期断面的水质数据库。该数据库用于存储全年不同时期各断面的水质数据。其中丰年期断面水质数据库是提取丰年期各断面的监测数据，包括用于水环境容量计算的高锰酸盐、氨氮、生化需氧量和溶解氧量等污染物数据，如表 1。

Table 1. Water quality database for wet period

表 1. 丰年期断面水质数据库

河流	断面名称	高锰酸盐(g/L)	氨氮(g/L)	生化需氧量(g/L)	溶解氧(g/L)	起始断面	终止断面	距离(m)
丹江	高湾	3.21	0.12	6.53	8.89	界碑	高湾	0.236
丹江	史家湾	6.4	0.85	5.9	7.5	高湾	史家湾	0.122
丹江	界碑	5.6	0.43	4.4	6.5		界碑	0.1
丹江口水库	陶盆	3.1	0.37	2	9.82			
丁河	封弯	6.77	0.94	4.55	6.42	西峡水电站	封弯	0.046
老灌河	张营	14.25	1.59	6.84	5.9	埧子岭	张营	0.145
老灌河	埧子岭	6.57	1.57	5	6.1	东台子	埧子岭	0.078
老灌河	西峡水文站	10.73	2.86	6.11	5.23	徐营	西峡水电站	0.14
老灌河	徐营	4.21	0.61	3.21	7.5	杨河	徐营	0.11
老灌河	杨河	4.74	0.89	3.47	7.39	三道河	杨河	0.41
老灌河	三道河	3.91	0.54	4.01	6.44		三道河	0.24
淇河	高湾	5.9	1.33	3.1	6.71	上河	高湾	0.224
淇河	上河	6.14	1.74	4.7	7.02	下河	上河	0.292
淇河	下河	7.24	1.13	3.83	7.01		下河	0.426
蛇尾河	东台子	5.51	0.39	2.88	7.5	封弯	东台子	0.038

数据库中“起始断面”、“终止断面”是按断面位置、河流流向及干支流关系来确定，“距离”则是在地图矢量化过程中通过计算得到。平年期、枯年期的断面水质数据库建立方法与丰年期一致。

5. 系统功能实现

5.1. 系统语言及其功能

系统采用 Visual C#作为可视化编程语言，结合 ArcEngine 9.3 开发。在 Visual C#环境下与 Access 数据库连接，用 SQL 语句访问表中数据，实现对水环境容量信息管理。同时利用 ArcEngine 组件提供的各种属性、方法和工具，能进行空间数据展示、数据查询和数据计算，以实现水环境容量计算信息的管理。

5.2. 用户界面

1) 用户即水环境容量动态展示系统的使用者，作为人机交互的界面环境，需考虑人们操作习惯和接受能力，使应用程序在视觉感受、概念语义上易理解，易于操作。系统颜色搭配合理，并由菜单栏区、工具条区、地图主显示区、鹰眼显示区、状态栏区等五部分组成。

2) 主界面具有如下三个特点：① 基于面向用户，使用汉字菜单及提示，操作简单方便；② 采用基于 Windows 风格的用户界面，使用窗口、菜单，图标、对话符号操作来完成系统应用；③ 各类菜单、窗口、工具、按钮等保持一致，便于用户使用。

5.3. 系统主要功能

本系统包括数据显示、数据查询、水环境容量计算、帮助、退出五大模块。

5.3.1. 数据显示

数据显示模块由工具条、图层控制区、图层显示区、鹰眼显示区、状态栏及最大与最小化、关闭等组成，用于显示水源区监测点、河流及丹江口水库的基本信息，还有鹰眼功能，可实时显示屏幕放大区域在总区域范围内的位置，并在屏幕下方状态栏可动态实时显示坐标信息以及鼠标所在处点的 X、Y 坐标。

5.3.2. 数据查询

此模块主要用到数据库连接，提供了按时段数据、断面和条件等三种查询方式。

1) 按时段数据查询

丰年、平年、枯年水量不同，故各断面上污染物检测指标值不同，本系统提供了按丰、平、枯三种时段数据分别查询的方式，结果将以地图和表格两种形式展示。

系统还提供了对结果表格的打印输出功能。单击“打印输出”即以 Excel 表格形式输出，表格还可动态更新打印日期。单击“保存”即可将结果保存在合适位置。

2) 按断面查询

本系统按断面查询提供了两种实现方式，即在 ComboBox 中选择断面名称查询和直接通过鼠标在地图显示区点选查询。

此项查询功能也提供表格打印输出功能，操作步骤同按时段数据查询。

3) 按条件查询

此查询是对高锰酸盐、氨氮、生化需氧量和溶解氧四种污染物浓度选择查询，分别在数据项、关系下拉列表框中选择之后，在目标文本框中输入数值，单击“查询”即可，此功能也配合按时段数据查询。

5.3.3. 水环境容量计算

该模块为系统核心模块，计算时运用了前述水质模型中的河流中污染物混合衰减模型。由污染物浓度稳定(式 3-2)、污染物不能降解(式 3-3)和忽略纵向离均系数(式 3-4)三种简化计算公式可知，计算时需输入多个参数，因此系统分别设置了时段、计算因子、断面、计算类型供选择。计算时还需在河流流速、纵向离均系数、衰减系数等各文本框中输入相应参数，在主界面中菜单栏里单击“水环境容量计算”，即弹出水环境容量计算界面。

该模块的断面设置中提供了 2 种方式，即在起始断面下拉列表框里选择和直接在地图显示区单击选择。由于一个起始断面只对应唯一的一个终止断面，因此系统未提供终止断面点的选择，而是在选择起始断面同时即生成终止断面。故在断面设置后，起始断面在地图上以“START”图标来显示，终止断面以“END”图标来显示。

在计算数据设置中，按三种简化模型产生三种不同算法。

在忽略纵向离散系数计算类型中，不需输入纵向离均系数，故纵向离均系数文本框中显示“不需要此参数”，在污染物不能降解计算类型中，不需输入衰减系数，故衰减系数文本框中显示“不需要此参数”。

以起始断面西峡水文站为例，采用污染物的浓度是稳定的计算类型，单击“计算”键，出现结果界面，之后点击“保存结果”，弹出“是”或“否”将结果进行保存的提示框，之后根据需要进行结果保存。

另外，本模块还提供地图制图功能，可为地图添加边框、比例尺、指北针以及保存为*.mxd 文档。

5.3.4. 帮助与退出

帮助模块为系统提供帮助文件, 用户通过查看帮助文件即可了解系统所有功能模块及各模块的操作与说明; 该模块应用 AE 和 WinCHM 软件来实现用系统功能。退出模块用于系统退出。若用户在一分钟之内不执行任何操作, 系统即关闭。

6. 结语

1) 本文以南水北调中线工程水源区为研究对象, 从河流中污染物混合衰减模型、数据库建立等方面着手, 分析研究了水环境容量计算方法、空间和属性数据的关联及系统平台建立; 同时利用水源区水系图, 结合网上搜集信息, 运用 C# 2008 开发了水源地水环境容量动态展示系统(含数据显示、数据查询、水环境容量计算、帮助和退出等模块), 实现了水环境容量计算和动态展示。

2) 为及时掌握区域水环境污染排放削减与增加对水环境质量影响之间的动态变化, 必须加强对排污总量的控制、分配和管理。作者认为, 在水环境保护领域广泛引入、推广地理信息系统同时, 应充分利用地理信息系统强大图形编辑、空间数据处理功能, 建立综合查询平台, 为决策和管理提供模拟现实的空间环境。

3) 本文对水环境容量计算与 GIS 结合技术进行了初步探讨, 但因受多种条件限制, 尚未对一些问题更深层次探讨, 在今后工作中将继续完善和深入研究。

基金项目

国家重点研发计划(编号: 2017YFD0301102 黄淮海南部小麦 - 玉米周年光热资源高效利用与水肥一体化均衡丰产增效关键技术研究与模式构建); 河南省重点科技攻关(编号: 152102110096 基于土壤水时空分布的精准灌溉 ET 调控指标体系)。

参考文献

- [1] 郭占胜, 李富海. 南水北调中线工程水源区森林生态系统碳储量[J]. 福建林业科技, 2016, 43(3): 91-95.
GUO Zhansheng, LI Fuhai. Study on forest ecosystem carbon storage for water source area of middle route of south-to-north water diversion project. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2016, 43(3): 91-95. (in Chinese)
- [2] 朱九龙. 南水北调中线工程水源区生态补偿优先系数研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 100, 113-116.
ZHU Jiulong. Study on priority level of ecological compensation in water source area of middle route of south-north water transfer project. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 100, 113-116. (in Chinese)
- [3] 袁峥, 韩沛. 南水北调中线丹江口库区及汇水支流水质现状与污染防治对策[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 50-53.
YUAN Zheng, HAN Pei. Water quality condition and pollution control strategy about Danjiangkou reservoir and the main tributaries for the middle line of south-to-north water diversion. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(4): 50-53. (in Chinese)
- [4] 孙玉君, 李丹华. 南水北调中线工程水源区水质现状分析[J]. 人民长江, 2016, 47(14): 15-18.
SUN Yujun, LI Danhua. Analysis on water quality situation in water sources area of middle route project of S-N water diversion. Yangtze River, 2016, 47(14): 15-18. (in Chinese)
- [5] 朱锐, 冯晓波, 陈清. 南水北调工程建设监管中心南水北调中线工程水质保护工作研究[J]. 中国科技信息, 2016(22): 59, 61.
ZHU Rui, FENG Xiaobo and CHEN Qing. Research on water quality protection of the middle route project of south-to-north water diversion project of the south-to-north water diversion project construction supervision center. China Science and Technology Information, 2016(22): 59, 61. (in Chinese)
- [6] 王少平, 俞立中, 许世远, 程声通. 基于 GIS 的苏州河非点源污染的总量控制[J]. 中国环境科学, 2002(6): 520-524.
WANG Shaoping, YU Lizhong, XU Shiyuan and CHENG Shengtong. The total quantity control of non-point source pollution in Suzhou creek based on GIS. China Environmental Science, 2002(6): 520-524. (in Chinese)
- [7] 张永良. 水环境容量基本概念的发展[J]. 环境科学研究, 1992, 5(3): 59-61.
ZHANG Yongliang. The development of basic concept of water environmental capacity. Research of Environmental Sciences, 1992, 5(3): 59-61. (in Chinese)

- [8] 杨喆, 程灿, 谭雪, 等. 官厅水库及其上游流域水环境容量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 163-168.
YANG Zhe, CHENG Can, TAN Xue, et al. Analysis of water environmental capacity of Guanting reservoir and its upstream basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(1): 163-168. (in Chinese)
- [9] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 451-463.
DONG Fei, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, et al. Calculation methods of water environmental capacity of surface waters: Review and prospect. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 451-463. (in Chinese)
- [10] 耿庆斋. 基于 GIS 的水质模型集成研究及水环境信息管理系统开发[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2004.
GENG Qingzhai. Integrated research of water quality model based on GIS and development of water environment information management system. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [11] 慕金波, 郝光前, 张洪秀, 等. 泗河水环境容量及最大允许排污量计算[J]. 环境科学与技术, 2009(11): 177-180.
MU Jinbo, HAO Guangqian, ZHANG Hongxiu, et al. Water environmental capacity and maximal permitted discharge amount for Sihe River. *Environmental Science & Technology*, 2009(11): 177-180. (in Chinese)
- [12] 涂新军. 水污染控制规划与 GIS [J]. 环境污染与防治, 1999(4): 38-40.
TU Xinjun. Water pollution control planning and GIS. *Environmental Pollution & Control*, 1999(4): 38-40. (in Chinese)
- [13] 张丽静. 小清河水环境质量评价及容量研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2007.
ZHANG Lijing. Research on water environment quality evaluation and capacity of Xiaoqing River. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese)
- [14] 李海红, 刘晓利. 南门河水环境容量的确定[J]. 水资源与水工程学报, 2010(5): 79-82.
LI Haihong, LIU Xiaoli. Determination of water environment capacity of Nanmen River. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010(5): 79-82. (in Chinese)