

基于GIS的地下水环境演化分析系统的设计与实现

徐斌^{1,2,3}, 李佩成^{1,2,3}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 水与发展研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了解决地下水环境演化分析研究中的空间数据管理与空间分析问题, 设计并开发了地下水环境演化分析系统, 利用GIS空间分析建模技术构建了地下水动力场分析模型、地下水化学场分析模型和地下水环境演化效应分析模型, 通过编程实现了相应的系统功能。以陕西省泾惠渠灌区为典型研究区进行了实例验证, 应用地下水环境演化分析系统对研究区地下水环境进行分析, 验证了地下水环境演化分析模型的可靠性, 检验了所开发的地下水环境演化分析系统的实用性及效率。

关键词: 地下水; 地下水环境; 演化分析系统; 空间分析; GIS; 系统设计; 系统实现

中图分类号: P641; P208

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0001-07

Design and implementation of groundwater environment evolution analysis system based on GIS

XU Bin^{1,2,3}, LI Peicheng^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Research Institute for Water and Developments, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To solve the problem of spatial data management and spatial analysis in the evolution analysis of groundwater environment, the analysis system of groundwater environment evolution was designed and developed. Based on the ModelBuilder's spatial analysis modeling technology, the analysis models of groundwater dynamic field, groundwater hydrochemical field and groundwater environment evolutionary effect were built. The system functions were implemented by using programming language and GIS platform. Shaanxi Jinghuiqu Irrigation District was selected as a typical study area, the analysis functions of the analysis system of groundwater environment evolution were carried out and validated, the practicality and efficiency of the analysis system of groundwater environment evolution were proved.

Key words: groundwater; groundwater environment; evolution analysis system; spatial analysis; GIS; system design; implementation of system

1 研究背景

地下水是除冰川外地球上分布最广泛、储量最丰富的淡水资源, 对于人类生存、社会发展具有重要的意义。对地下水的形成、演化及各种影响因素相互关系的研究, 是科学地开发利用地下水资源、保护生态环境, 促进人与自然协调发展不可缺少的基础性工作, 也是国际上水科学界研究的热点问题^[1-5]。

目前, 地下水动力场、化学场以及生态环境效应等方面的研究局限在地下水环境问题的某一方面, 在综合性的研究与探讨方面则略显不足^[6-8]。因此, 数值模拟、“3S”、空间分析建模等技术综合运用, 研究自然与人类活动共同影响下地下水环境演化的复合效应, 已经成为了地下水环境演化研究的发展趋势之一。

在地下水环境演化研究中, 涉及到大量空间数

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08039); 国家自然科学基金项目(41273104); 中央高校基本科研业务费专项(310829171005, 310827171006)

作者简介: 徐斌(1978-), 男, 河北保定人, 博士, 工程师, 主要从事地下水科学与工程、地理信息系统方面研究。

通讯作者: 李佩成(1934-), 男, 陕西乾县人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程、水资源与环境、水文生态学等方面研究。

据的分析工作,需要对各种空间分析工具按照分析过程进行综合以建立分析模型,从而完成地下水动力场、地下水水化学场以及地下水环境演化效应中各种问题的模拟与分析,GIS 空间分析建模技术为地下水环境演化分析提供了新的研究方法^[9-13]。

本文针对地下水环境演化问题,设计了地下水环境演化分析系统,利用 GIS 空间分析建模技术建立地下水环境演化分析模型,通过编程实现数据库管理、专题分析、可视化等系统功能。选取典型研究区进行验证,对典型研究区的地下水环境问题进行分析,验证了系统和空间分析模型的实效性,为研究地下水在自然和人为因素影响下的演化规律与响应机制提供了技术支持。

2 系统设计

2.1 系统目标

地下水环境演化分析系统,是存储、管理地下水环境相关要素数据,分析处理地下水环境中地下水动力场、地下水水化学场动态特征,评价地下水环境演

化所引起的生态与环境效应的信息系统。系统建设的目标是以地下水环境演化分析理论为基础,以实现区域地下水环境系统科学的分析为目的,通过时空数据库、地理信息系统、空间分析建模等技术手段,构建功能实用、性能可靠的地下水环境演化分析平台,为及时掌握区域地下水环境的状态、生态与环境演化效应以及演化趋势提供技术支持,并对区域水资源的开发利用、地下水环境保护与治理提供科学依据^[14]。

2.2 系统总体结构

地下水环境演化分析系统在逻辑上采用三层结构,如图 1 所示。

数据支撑层为系统分析提供数据基础。业务层是系统的核心,在业务层通过空间分析模型实现地下水环境演化分析所涉及的基础分析和专题分析。集成应用层是人机交互的关键,通过可视化手段以图表、地图、图像形式展示地下水环境状态和演化趋势,并为科研人员进行分析提供了友好的交互界面^[15]。

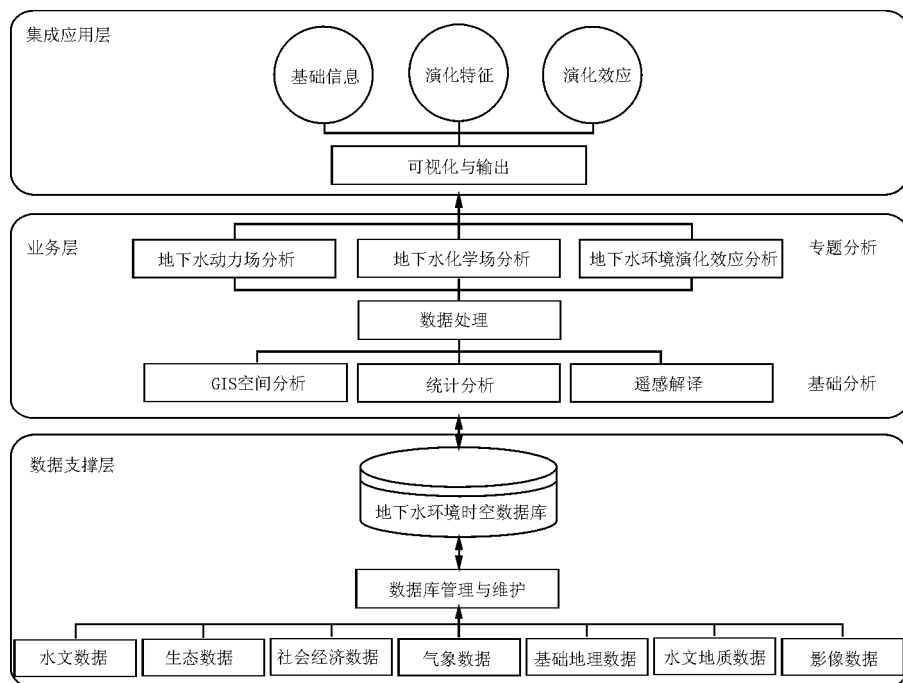


图 1 系统的逻辑结构

2.3 系统功能设计

(1)数据库管理与维护功能。实现地下水环境的空间数据建模,建立地下水环境时空数据库,对区域地下水系统中的多源数据从时间和空间的综合角度进行集成管理与维护。

(2)地下水动力场分析功能。建立地下水动力

场分析模型,实现区域地下水动力场演化分析。研究地下水水位时空演化特征,计算潜水储量动态,确定地下水动态类型,最终获得综合因素影响下由阶段性动态变化引发的地下水动力场演化特征。

(3)地下水水化学场分析功能。建立地下水水化学场分析模型,实现对区域地下水水化学场各个要素的

分析。包括主要成分的空间分布及变化趋势,水化学类型分布,水化学成分的形成与转化,分析地下水化学成分与相关因素的相互关系,明确地下水化学场演化规律等。

(4)地下水环境演化效应分析功能。实现地下水环境演化效应分析,包括地下水质量和地下水污染等方面,分析地下水环境演化可能引发的土壤盐渍化等生态效应问题。

(5)可视化与输出功能。通过GIS的可视化与输出功能,地下水环境演化分析中的重要数据与信息可以多种方式进行显示输出,在此基础上通过可视化分析与综合解释,可以进一步揭示地下水环境在自然因素与人为因素干扰下发生演化的规律。

3 系统实现

系统实现选择ESRI的ArcGIS系列产品为地理信息系统环境,基于Geoprocessing的空间分析建模理论,以ArcGIS提供的ModelBuilder(模型生成器)与Python脚本语言为空间分析建模平台,综合运用ArcToolbox的系统分析工具进行脚本编程,建立地下水环境演化研究的空間分析模型。基于.Net Framework和Visual Studio 2005开发环境,利用Visual C#编程实现系统功能和人机交互界面^[14-15]。

3.1 实现过程

系统各功能的实现过程包括问题求解原理研究、空间分析建模和程序代码编写3个部分,现以潜水储量动态分析为例进行说明。

3.1.1 潜水储量动态分析原理 通过已知的不同时期的地下水水位监测资料,利用GIS空间插值建立均衡期始末潜水面数字高程模型,由两期潜水面构造地质单元体,运用分布式参数来计算潜水储量变化量或相对储量^[14]。含水层地质单元体的离散化如图2所示。

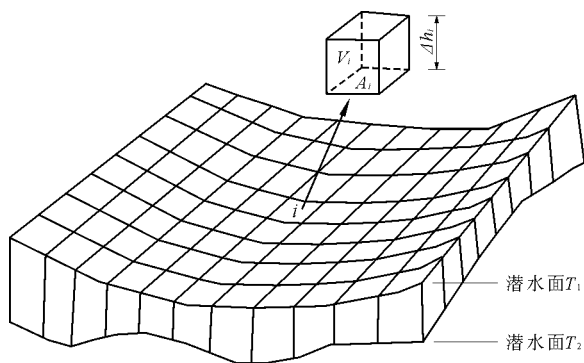


图2 含水层离散化

含水层的给水度 μ 离散化之后,每个单元都有与之空间位置相对应的给水度 μ_i ,如图3所示。

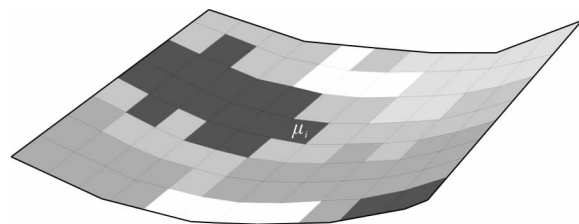


图3 含水层给水度参数离散化

选用体积单位进行水量计算时,其计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (1)$$

式中: Q 为潜水储存量的变化量, m^3 ; Q_i 为离散化的地质单元体 i 的饱和潜水储存量, m^3 ; N 为离散化的地质单元体总数。

Q_i 的计算公式为:

$$Q_i = \mu_i V_i \quad (2)$$

式中: μ_i 为地质单元体 i 的给水度; V_i 为地质单元体 i 的体积, m^3 。

V_i 计算公式为:

$$V_i = A_i \Delta h_i \quad (3)$$

式中: A_i 为栅格数据格网单元面积, m^2 ; Δh_i 为地质单元体 i 的厚度,即该单元潜水位变化值,为两期潜水面相对应单元内水位高程差值, m 。

面积 A_i 计算公式如下:

$$A_i = XY \quad (4)$$

式中: X 和 Y 为栅格格网的长和宽, m 。

Δh_i 计算公式如下:

$$\Delta h_i = h_i^{T_1} - h_i^{T_2} \quad (5)$$

式中: $h_i^{T_1}$ 为地质单元体 i 在 T_1 时期的水位高程, m ; $h_i^{T_2}$ 为地质单元体 i 在 T_2 时期的水位高程, m 。

3.1.2 空间分析建模 在ArcGIS的Geoprocessing框架中,提供了Raster、Math等栅格计算类工具,通过ModelBuilder的图形化建模,将输入数据、处理工具、输出数据按照问题的求解逻辑进行组合,建立相应的空间分析模型。过程如下:

(1) Δh_i 计算。在ModelBuilder中,将 T_1 和 T_2 时期的潜水面栅格数据作为输入数据,使用栅格减法Minus工具按照公式(5)计算 Δh_i ,结果存储于栅格数据。

(2) A_i 计算。在ModelBuilder中,通过栅格查询属性工具获得栅格单元的 X 和 Y ,调用Math工具集中的栅格乘法Times工具按照公式(4)计算 A_i 。

(3) V_i 计算。在 ModelBuilder 中,将 Δh_i 、 A_i 作为模型的输入数据,调用 Math 工具集中的栅格乘法 Times 工具公按照公式(3)计算 V_i ,结果存储于栅格数据。

(4) Q_i 计算。在 ModelBuilder 中,将 μ_i 、 V_i 作为模型的输入数据,调用 Math 工具集中的栅格乘法 Times 工具按照公式(2)计算 Q_i ,计算结果存储于栅格数据中。

(5) Q 计算。将 Q_i 作为输入数据,调用栅格统计分析工具,按照公式(1)计算 Q ,结果以表格输出。

按照分析流程建立潜水储存量动态分析模型,如图 4 所示。将模型命名为 StorageVariation,保存在 Groundwater Environmental Evolution Analyst Tools. tbx 工具集文件中。

3.1.3 程序代码编写 在 ModelBuilder 生成空间分析模型后,编写系统相应功能的程序代码,以 ModelBuilder 模式化对话框形式调用该模型执行分析任务,代码如下:

```
private void buttonXStorageVariation_Click( object
sender, EventArgs e)
{
    // 显式调用空间分析模型,以对话框形式运行
    // 引用 IGPToolCommandHelper2 接口。
    IGPToolCommandHelper2 pToolHelper = new
    GPToolCommandHelperClass( ) as IGPToolCommand-
    Helper2;
    // 空间分析模型工具箱文件路径
    // Properties. Settings. Default. Hydrodynamic-
    Toolbox =
    // @ "D:\Groundwater Environmental Evolution
    Analyst Tools. tbx";
    string sToolboxName = Properties. Settings. De-
    fault. HydrodynamicToolbox. ToString( );
    // 设置工具名称,即空间分析模型名称
    pToolHelper. SetToolByName ( sToolboxName,
    "StorageVariation" );
    // 创建 IGPMessages 对象和 bool 型返回参数给
    InvokeModal 方法。
    IGPMessages ppMessages = new GPMessages-
    Class( );
    bool pOK = true;
    // 调用潜水储存量动态分析模型
    pToolHelper. InvokeModal(0, null, out pOK, out
    ppMessages);
```

}

3.2 实现结果

3.2.1 数据库管理 按照系统功能设计与建库规范,对研究前期收集整理的各类资料进行处理后建立了地下水环境时空数据库^[11-12],并开发了数据库管理与维护系统,数据库及其系统功能实现如图 5 所示。

3.2.2 地下水动力场分析 通过 ModelBuilder 对地下水动力场中的分析内容进行建模,模型以工具集形式嵌入到 ArcToolbox 中,既可以由环境演化分析系统后台调用,也可以由支持 ArcToolbox 工具的 ESRI 系列软件加载使用。图 6 所示为系统开发结果,每个分析模型都对应有相应的分析菜单或工具集按钮,用户在系统中调用模型与在 ESRI 调用具有相同参数设置,但界面更加友好,操作便捷。

3.2.3 地下水化学场分析 地下水化学场分析的研究内容包括水化学成分空间分布特征、区域水化学类型、主要离子间的相互关系、地下水化学场的形成与演化控制因素问题。图 7 所示为地下水化学场分析模型对应分析系统功能的实现结果。

3.2.4 地下水环境演化效应分析模型 在地下水环境演化引发的生态与环境负效应问题研究中,在对地下水水质评价、地下水污染以及土壤盐渍化发生机理的理论与方法研究的基础上,建立基于分布数据的地下水环境演化效应分析模型,图 8 所示为地下水环境演化效应分析模型对应分析系统功能的实现结果。

4 系统应用验证

为对所建空间分析模型和系统功能进行验证,选择陕西省泾惠渠灌区为典型研究区,收集基础地理数据、地下水环境演化数据为数据源建立数据库,应用系统对其地下水动力场、地下水化学场和生态环境效应进行分析。以地下水动力场特征分析为例说明地下水环境演化分析系统的具体应用过程。

4.1 系统应用

4.1.1 模型前处理 在系统运行后,通过数据库管理功能打开泾惠渠地下水环境时空数据库,选择需要用于地下水动力场分析的具体数据,如图 9 所示。

4.1.2 调用空间分析模型 切换至分析工具控制台,选择地下水动力场分析工具,在地下水动力场分析工具面板中,点击储存量动态分析模型,系统会调用分析模型并弹出窗口,根据模型运行需求设置参数后,运行模型。如图 10 所示。

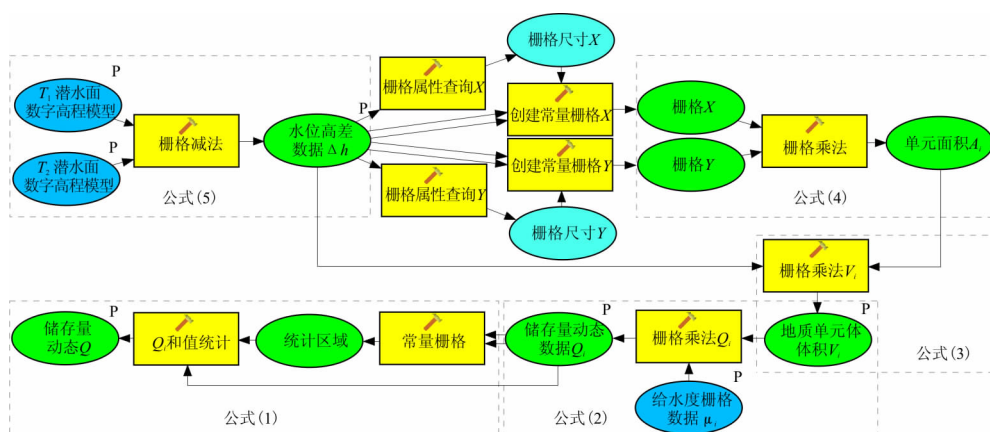


图4 潜水储存量动态分析模型

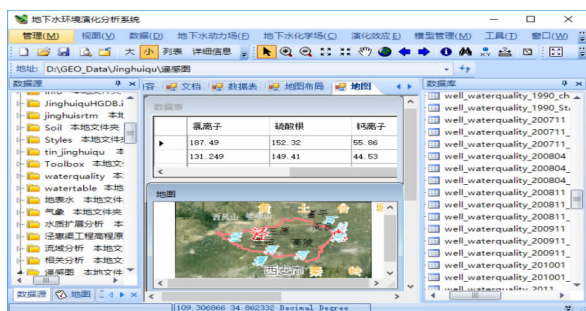


图5 数据库与系统功能实现

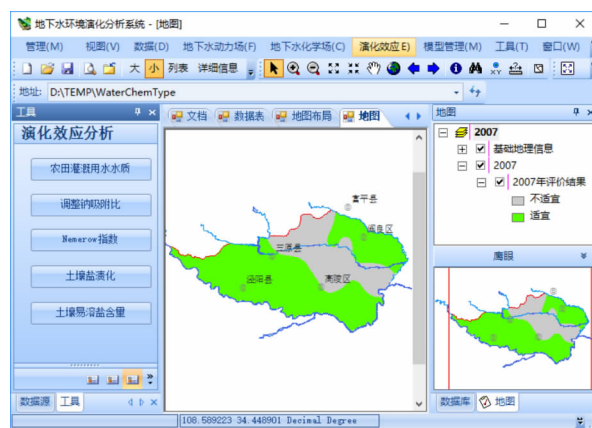


图8 地下水环境演化效应分析功能

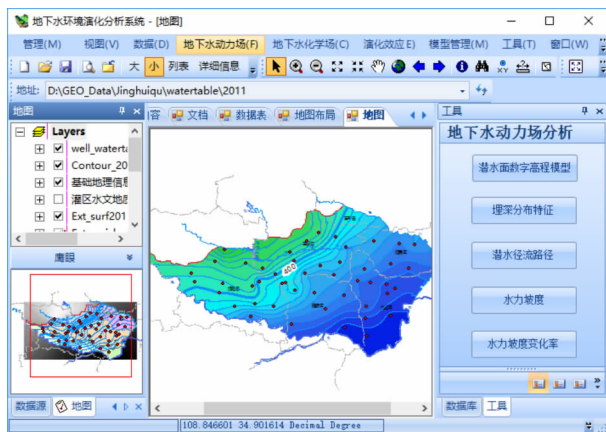


图6 地下水水力场分析功能

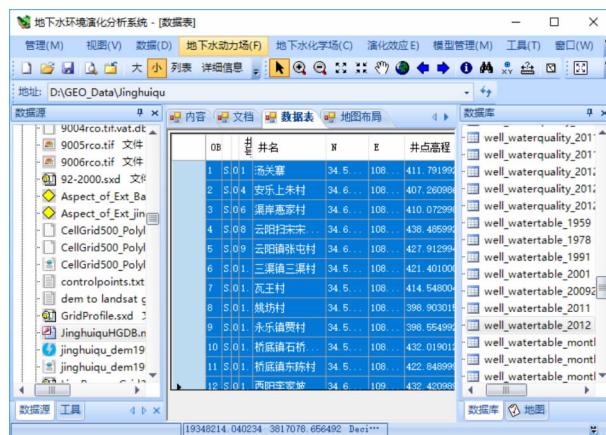


图9 系统分析应用——模型前处理

4.1.3 模型后处理 系统调用空间分析模型获得分析结果后,仍需要调用辅助分析模型对数据进行导出、裁剪等后处理工作,最后通过系统预设的地图模板定制成图,如图11所示。

在完成一项分析任务后,可以根据分析需要对不同时期的数据进行处理,即可以获得地下水动力场的演化数据。

使用相同流程,完成研究区的地下水动力场、地下



图7 地下水化学场分析功能

水化学场以及地下水环境演化效应的具体分析内容。

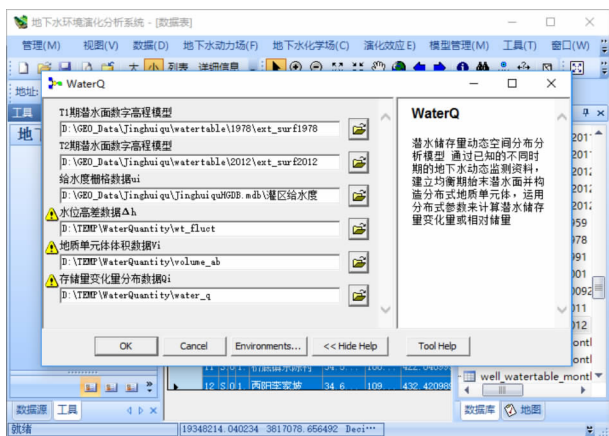


图 10 系统分析应用——调用空间分析模型

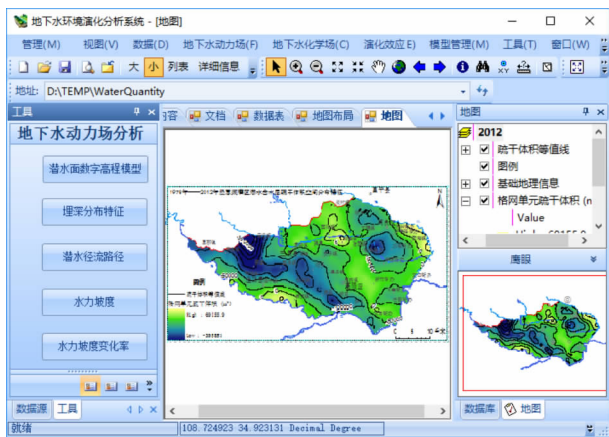


图 11 系统分析应用——模型后处理

4.2 验证分析

以 1978、2012 年潜水面数字高程模型作为输入,以《泾惠渠灌区浅层地下水资源调查研究成果报告》(陕西省泾惠渠灌区地下水调查组,1980)给出的含水岩组给水度(μ)进行离散化获得的空间分布数据作为模型参数,调用潜水储量动态分析模型分析计算,获取潜水储量动态数据。

分析结果显示:研究区西南部形成了经桥底镇—燕王—三渠镇—崇皇—张卜的长达 45 km、平均宽度 10 km 的大型疏干区域,是研究区潜水储量减少的主要区域(图 12)。经模型计算,至 2012 年,研究区潜水储量相对减少 $7.10 \times 10^8 \text{ m}^3$,其他学者通过手工绘制等水位线图及三角剖分计算研究区潜水疏干量为 $7.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16],与本文所建立系统分析结果基本一致。

验证分析表明,相比传统分析方法,地下水环境演化分析系统充分利用 GIS 海量数据管理功能与空间分析模型的先进性,分析过程自动化程度较高,分

析结果可视化效果优良且信息量丰富,有效地提高了地下水环境问题求解的计算效率与分析能力,具有较高的可靠性和实用性。

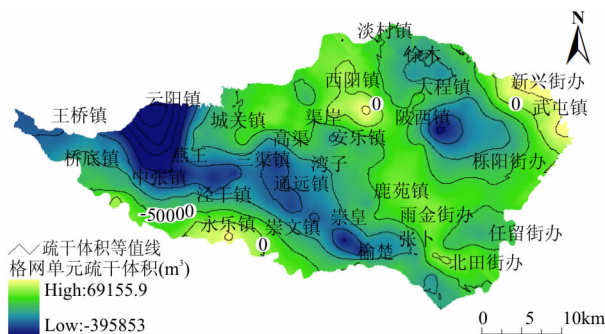


图 12 潜水储量动态分析

5 结 论

(1)以系统论的方法对地下水环境演化分析进行概念建模,对基于地理信息系统、数字高程模型、遥感、空间分析建模等综合信息技术的地下水环境演化分析系统进行设计。对地下水环境演化分析的核心分析模型结构进行定义,明确模型运行机制。

(2)基于 GIS 空间分析建模技术,利用 ArcGIS ModelBuilder 构建了地下水动力场分析模型、地下水化学场分析模型和地下水环境演化效应分析模型,通过编程实现了地下水环境演化系统的数据库管理、专题分析和可视化等功能。

(3)以陕西泾惠渠灌区为典型研究区,进行了实例验证,应用地下水环境演化分析系统对研究区进行分析,验证了地下水环境演化分析模型的可靠性与先进性,检验了所开发的地下水环境演化分析系统的实用性及效率。

参考文献:

- [1] YOSHIKOSHI A, ADACHI I, TANIGUCHI T, et al. Hydro - environmental changes and their influence on the subsurface environment in the context of urban development[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(9): 3105 - 3111.
- [2] SINGH A. Soil salinization and waterlogging: A threat to environment and agricultural sustainability[J]. Ecological Indicators, 2015, 57: 128 - 130.
- [3] IRVINE DYLAN J, KURYLYK BARRET L, CARTWRIGHT I, et al. Groundwater flow estimation using temperature - depth profiles in a complex environment and a changing climate[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 272 - 281.
- [4] 张 博, 李国秀, 程 品, 等. 基于随机理论的地下水环境

- 风险评价[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 100 - 106.
- [5] 王强民, 赵明. 干旱半干旱区煤炭资源开采对水资源及植被生态影响综述[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 77 - 81.
- [6] 李雪, 张元, 周鹏鹏, 等. 长时间尺度的京津冀平原区地下水动态模拟及演变特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 164 - 170.
- [7] 孙一博, 王文科, 段磊, 等. 关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 29 - 35.
- [8] 王战, 李向全, 王振兴, 等. 鱼卡 - 大柴旦盆地地下水生态环境效应与生态环境质量评价[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 121 - 126.
- [9] COELHO V H R, MONTENEGRO S, ALMEIDA C N, et al. Alluvial groundwater recharge estimation in semi - arid environment using remotely sensed data[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548(1): 1 - 15.
- [10] 方芳, 徐世武, 万波. GIS空间分析建模技术研究进展[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 137 - 138 + 163.
- [11] 龚健雅, 李小龙, 吴华意. 实时GIS时空数据模型[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 226 - 232 + 275.
- [12] 冯珍珍, 马孝义, 樊琨, 等. 基于GIS的SWAT模型空间数据库的建立[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 27 - 30.
- [13] XU Bin, ZHANG Yan. Constructing and optimizing of index system in evaluation of groundwater hydro - ecological security[C]// International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. IEEE, 2011: 189 - 192.
- [14] 徐斌. 基于空间分析建模的地下水环境演化分析系统[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [15] 蔡文文, 王少华, 钟耳顺, 等. 跨平台开源桌面GIS软件的设计与实现[J]. 测绘通报, 2017(1): 122 - 125.
- [16] 王建莹, 刘燕, 姚阿漫. 泾惠渠灌区地下水位动态分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 67 - 70.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库 (Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD) 收录为 2017 - 2018 年度来源期刊。2017 年又被中国科学评价中心 (RCCE)、武汉大学图书馆和中国科教评价网联合完成的第五版《中国学术期刊评价报告 (2017 - 2018)》评价为 A 类核心期刊。