

基于 GIS 的地下水资源评价

魏加华¹, 王光谦¹, 李慈君², 邵景力²

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国地质大学 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 为模拟地下水动态特征和进行资源评价, 开发了基于地理信息系统(GIS)、具有地下水模拟功能的地下水信息系统。将集成系统应用于北京市密(云)怀(柔)顺(义)盆地的地下水评价中, 并对不同开采条件下地下水资源变化情况进行预测。计算表明, 该区地下水调蓄能力强, 可以作为备用水源地。将 GIS 与地下水模型集成, 在改进建模方式、提高建模效率、改进模型可操作性等方面十分有效。

关键词: 地下水资源评价; 地理信息系统(GIS); 地下水模拟模型

中图分类号: P 641.8; P 641

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2003)05-1104-04

GIS-based groundwater resource evaluation

WEI Jiahua¹, WANG Guangqian¹, LI Cijun², SHAO Jingli²

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A groundwater simulation model was used to simulate groundwater dynamics and to evaluate groundwater resources using geographic information system (GIS) technology, thereby, making the groundwater simulation more effective. The integrated system was then used to develop groundwater management strategies on the Mihuashun Basin in Beijing by predicting the dynamic groundwater characteristics for different usage conditions. The study results indicate that the groundwater can be effectively used and managed as a water resource for the basin. The integration of the groundwater model with GIS is necessary for efficient operation of the model for groundwater resource assessment.

Key words: groundwater resource evaluation; geographic information system (GIS); groundwater simulation model

在地下水资源评价中, 将地下水模型与地理信息系统(GIS)集成, 充分发挥模型在表征和再现地下水系统方面的模拟预测能力, 同时借助 GIS 的数据管理和空间分析能力, 将为地下水资源评价与管

理提供强有力的工具。但由于地下水建模前期数据准备过程复杂, 目前 GIS 在地下水资源评价中的应用还主要局限于数据管理和计算结果表达等方面^[1~3]。本文探讨了 GIS 与地下水模型集成方法, 采用组件技术建立了地下水信息系统, 并应用于北京密(云)怀(柔)顺(义)盆地的地下水资源评价。

1 GIS 与地下水模型集成方法

1.1 集成方式

地下水模拟模型与 GIS 的集成方式, 根据数据流向可分为数据集成和功能集成。数据集成是以数据为纽带, 利用 GIS 空间数据管理的强大功能为模型准备各种基础数据; 功能集成则是使模型计算结果通过 GIS 实现空间数据管理、空间分析和可视化表达等功能。数据集成与功能集成两者数据流方向正好相反。完整的集成系统应该同时实现数据集成与功能集成。GIS 与地下水系统分析模型耦合, 一般可通过以下 4 种途径实现^[4]:

1) 在地下水模拟软件中嵌入部分 GIS 功能

地下水模拟模型计算需要空间数据的支持, 一些地下水模拟软件便在系统中开发部分 GIS 功能, 实现对地理底图输入输出和数据管理。这种集成方式开发者有很大的灵活性, 系统设计可不受已有 GIS 数据结构的限制, Feflow、GM S 等地下水专业软件均采用这种集成模式。

2) 在 GIS 环境中集成专业模型

为提高建模和专业分析能力, 满足专业应用需要, 一些通用 GIS 软件已将一些专业模型嵌入到 GIS 软件包, 如 ESR I 的 ArcStom 等。这种集成模

收稿日期: 2002-08-12

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究项目(G19990436)

作者简介: 魏加华(1971-), 男(汉), 陕西, 博士后。

E-mail: weijiahua@mail.tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 王光谦, 教授, E-mail: dhhwgq@tsinghua.edu.cn

式是在 GIS 软件中嵌入专业模型, GIS 空间分析能力强, 但目前通用 GIS 软件集成的模型相对简单, 还难以满足实际应用需求。

以上两种集成方式, 也可统称为嵌入式集成。

3) 松散连接

松散集成是在 GIS 软件(如 Arc/Info)与地下水模拟软件(如 Modflow)之间通过数据交换实现模型与 GIS 之间的信息交互。这种方式中, GIS 和专业软件是相对独立的系统, 各自有独立的数据管理方式, 没有共同的用户界面, 数据需要在不同软件间转换, 操作繁琐, 易出错。但只需实现接口程序, 编程工作量小, 对多数地下水专业的 GIS 用户来说, 是最现实的方法。

4) 完全整合

完全整合使 GIS 和模型共享同一数据库, 通过 GIS 宏语言或其他编程语言将模型直接嵌入到 GIS 系统中。随着组件技术的出现和逐渐成熟, 使专业人员只需通过高级编程语言, 就能将 GIS 功能很好地与专业模型整合。

1.2 面向对象的地下水模型集成

1.2.1 模型生成

地下水模拟模型的建立, 主要是根据水文地质条件和概念模型, 将研究区水文地质问题通过一组偏微分定解问题来表达。有限单元法是求解这类问题的常用数值方法, 它将表示水位随时间和空间连续变化的函数离散化, 通过离散将描述地下水模拟的定解问题化为代数方程组进行求解, 得到有限节点上的近似值。前处理是建模最主要的工作, 包括数据准备、计算域离散、参数获取、地下水系统输入输出等, 其中计算域离散最繁琐且易出错。为解决这一问题, 系统开发了交互式剖分工具, 通过人机交互, 得到剖分节点。节点形成后, 采用 Delaunay 构网方法^[5]生成单元网格, 由于地下水模拟计算对有限元计算网格有一定要求, 因此需要在构网时增加约束:

- 1) 三角形任一角不大于 120° , 不小于 30° ; 3 边长尽可能接近, 使优化形成的三角形尽可能是锐角三角形;
- 2) 尽可能占有已有资料, 将抽水井、常观孔和高程控制点放在节点上。所有网格单元形成后, 对单元的 3 个节点按逆时针方向排序, 得到单元节点编号。

1.2.2 模型参数获取

在 GIS 中, 基本概念是与空间有关的位置、分布、关系, 将研究对象概念化为点、线、面等。为便于

管理, 将地下水系统参数(变量)分为静态参数和动态变量两类。静态参数主要是含水层空间结构参数和含水层特征参数(如渗透系数、给水度等)等。动态变量主要是作用于地下水系统的输入、输出, 如降水量、蒸发量、开采量等。模型参数获取主要通过交互式设置和从属性数据库提取。

在静态参数获取过程中, 设几何实体以对象为基本单位, 通过对对象属性的设定, 实现模型参数和空间结构的定义。如抽水井的定义, 先选择要定义的节点, 设置该节点是否为抽水井, 在形成模型输入时, 利用 SQL 查询, 即可获得开采井的节点号。开发的系统中, 采用 Shape 格式(ESRI 提供的存储地理数据的矢量格式)存储节点信息。建模时, 调入经配准的地理底图, 通过交互式剖分形成计算网格, 离散单元的几何属性(如节点坐标、单元面积等)就自动生成。边界条件通过对边界节点属性的设定完成, 其他属性(初始水位、含水层顶底板标高等)可以根据控制点的资料通过 Kriging 插值生成。这种面向对象的建模技术为用户构建各种地下水模拟和评价模型提供了可能, 同时提高了建模效率。

动态变量的获取主要通过属性数据库的访问, 并通过数据过滤和预处理实现, 如集中开采井的开采量, 是通过 SQL 查询读取数据表得到各时段的数据; 降雨、蒸发、农业分散开采等通过预处理分配到各单元。图 1 是基于 GIS 的地下水系统分析模型及数据流程。

2 基于 GIS 的地下水资源评价

2.1 评价步骤

- 1) 收集研究区有关资料, 对图形扫描矢量化和数字化, 建立空间数据库和属性数据库。通过高程控制点生成区域三维地形模型, 并进行地形分析。

- 2) 对时间序列资料, 如降水、蒸发、开采量等, 进行统计、回归分析, 研究地下水动态变化规律, 为模型建立提供依据。

- 3) 将降水、蒸发、植被、地表水体、面状开采强度、岩性参数分区以及行政区划等, 在 GIS 环境下生成专题图, 通过叠加分析, 研究地下水系统的补径排条件, 初步确定地下水开采潜力区。

- 4) 结合钻孔剖面、三维地形、地下水动态、专题图等对含水层进行概化, 建立概念模型。

- 5) 建立数学模型, 运用自动剖分, 建立网格单元专题图。

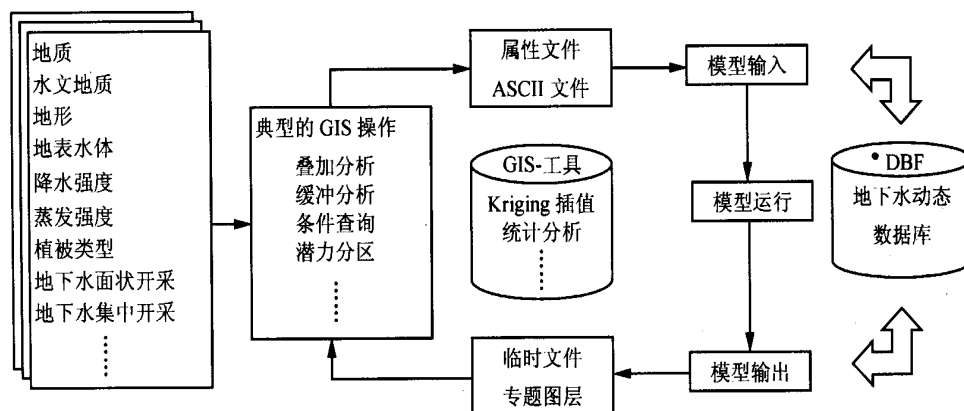


图1 地下水模拟模型与GIS集成及数据流

6) 通过交互方式设置模型对象(单元、节点等)的属性,用 Kriging 插值生成节点信息(如初始水位),形成模型输入。

7) 运行模型,并通过等值线、流场三维动态、拟合曲线等对模型计算结果进行评价,调整参数,直到模拟效果理想后,对计算结果生成相应的专题图供决策分析。

8) 模型识别验证后,可用该模型预测不同条件下的地下水资源。

2.2 模型建立

研究区位于北京市北部的密怀顺地区,是一个三面环山的汇水盆地,北部狭窄,南部开阔,由北向南倾斜(图2),面积约 384 km²,多年平均降水量 613 mm。区内地表水体发育,主要有潮白河、怀河和雁栖河,在北部还有密云水库,西部有怀柔水库。

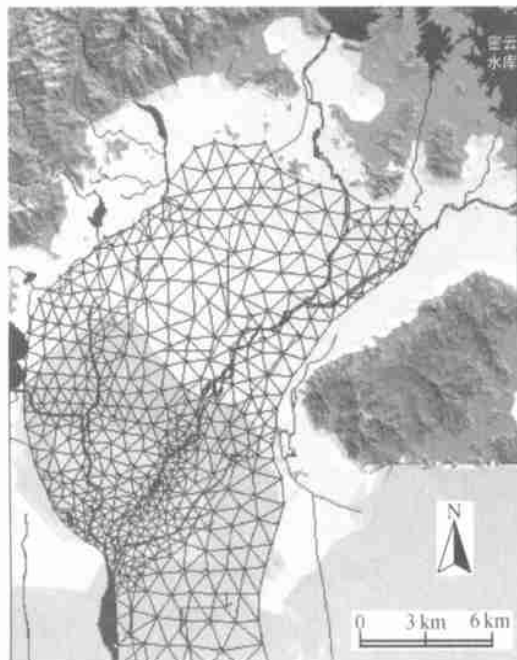


图2 计算区模拟离散

第四系地层总厚度沿潮白河一带为 180~250 m,含水层主要位于 60~90 m 以上的地层中。含水层岩性从北到南由单层沙卵石逐渐过渡为 2 层和 3 层沙卵石,最南部为沙卵石交替层,夹有薄层粘土或粘土透镜体。由于大量的开采井和观测孔连通了上下含水层,观测资料表明,它们具有统一的地下水位,水力联系密切,可以将其视为同一含水层。地下水流与地形基本一致,流速较缓慢,以水平运动为主。因此,可将本区地下水系统概括为非均质各向同性平面二维非稳定流系统^[6]。上述概念模型可用以下微分方程描述:

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(h-b)K \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(h-b)K \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q + \epsilon, & x, y \in \Omega, t > 0; \\ h(x, y, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y), & x, y \in \Omega, t = 0; \\ h(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t), & x, y \in \Gamma_1, t > 0; \\ (h-b)K \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t), & x, y \in \Gamma_2, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 是模型计算范围; h 是含水层的水位标高; b 是含水层底板标高, $h-b$ 为含水层的厚度; t 是计算时间段; K 是含水层的等效渗透系数; μ 是给水度; Q 是含水层的开采强度; ϵ 是含水层的垂向补排强度; $h_0(x, y)$ 是含水层的初始水位分布; $h_1(x, y, t)$ 是含水层的水位边界值; Γ_1 是含水层水位边界; Γ_2 是含水层流量边界; $q(x, y)$ 是单位时间内通过边界单位长度的侧向补给量,流入为正,流出为负,隔水边界为 0。

2.3 模型求解

式(1)二维地下水流的定解问题采用有限元法求解。对模拟区进行离散,采用三角剖分,将研究区离散为 476 个网格节点、871 个单元网格(图2)。

1) 定解条件 研究区的北部与山前坡积洪物相接, 有大量的山前侧向径流补给含水层, 东、西两侧补给量较少, 南部有一定量的地下潜流, 所有边界均为流量边界。在研究区南部牛栏山一带, 基岩出露地表, 为隔水边界。根据掌握资料情况, 选取1982年12月末的观测孔水位资料, 用Kriging内插获得各节点的初始水位。

2) 时间维离散 根据水文地质条件、资料情况和评价的要求来确定模拟期, 为了反映模拟期内水位动态变化, 还应将模拟期划分为若干个抽水时期。在一个抽水时期内, 地下水的均衡项可认为是均匀的, 不同的抽水时期各均衡项不同。模拟时期为1983-01—1998-12, 以月作为时段, 共计192个时段, 每个月又分若干个时间步长。

3) 源汇项处理 研究区地下水补给主要有降水入渗、侧向径流补给、农灌回渗、水库渗漏、渠系水、洪水、水库弃放水及河水入渗等。地下水主要是以人工开采、蒸发、潜流和溢出地表等形式排泄。人工开采按集中供水水源地和城镇生活及工农业开采分别统计。集中供水水源地主要是北京市第八水厂, 开采量根据实际开采记录获得。城镇生活用水主要根据人口及用水定额确定, 农业开采地下水是根据作物种类、面积、灌溉方式、灌溉定额等确定, 工业开采根据用水量统计调查得到。

4) 模型参数识别与验证 根据水文地质条件, 并参照北京市第八水厂的抽水试验资料将研究区划分为14个参数区。根据已有水位资料, 选取1983—1998共16a时间的序列, 对32个观测孔水位进行拟合。在整个模型识别过程中, 实际观测水位与计算水位之差多数在0.2~0.8m之间, 从识别、验证过程和流场拟合来看, 拟合效果较为理想。

通过模型计算可知, 从1983年末到模拟期最后一个时段(1998年末), 地下水平均年总补给量约为 $3.44 \times 10^8 m^3$, 平均年总消耗量约为 $3.49 \times 10^8 m^3$ 。在丰水年(年降水量约721mm)和平水年(年降水量约572.5mm), 地下水有一定盈余。地下水的溢出量多年平均为 $1.5 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7 m^3$, 丰水年溢出量达 $3 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7 m^3$, 极丰水年达 $8 \times 10^7 m^3$, 尚有一定开采潜力。

3 结束语

地下水模拟模型同GIS集成有嵌入式、松散集成和完全集成3种模式, 各有优缺点。将地下水模拟模型与GIS组件MapObjects集成, 实现了计算域的交互式剖分, 并通过图层自动提取部分网格节点信息, 提高了建模效率。将集成系统应用于北京市密怀顺盆地的地下水模拟中, 对研究区多元信息进行综合分析, 建立了研究区三维地形分析模型, 详细分析了研究区水文地质条件。对地下水数值模拟模型的识别和验证表明, 所建立的模型能很好地刻画研究区水文地质条件, 可以用此模型预测在不同开采条件下地下水资源变化情况。计算结果表明, 该区地下水调蓄能力强, 尚有一定开采潜力, 可以作为备用水源地。

参考文献 (References)

- [1] Cama S J, Kenneth K E. Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using Arc/Info and Modflow [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(2-3): 119-137.
- [2] Kenneth K E. Conceptualization and characterization of groundwater systems using geographic information systems [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(2-3): 111-118.
- [3] 邢毅, 张超, 翁文斌, 等. 地理信息系统城市地下水管理模型研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 59-62.
XING Yi, ZHANG Chao, WENG Wenbin, et al. Study on geography information system groundwater management model for a city [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 1998, 38(1): 59-62 (in Chinese).
- [4] Sui D Z, Maggio R C. Integrating GIS with hydrological modeling: Practices, problems, and prospects [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23: 33-51.
- [5] 武晓波, 王世新, 肖春生, 等. Delaunay三角网的生成算法研究 [J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28-35.
WU Xiaobo, WANG Shixin, XIAO Chunsheng, et al. A new study of Delaunay triangulation creation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(1): 28-35 (in Chinese).
- [6] 魏加华. 地下水地理信息系统——集成、可视化及其实例研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2001.
WEI Jiahua. Groundwater Geographical Information System—Integration, Visualization and Case Study [D]. China University of Geosciences, Beijing, 2001. (in Chinese)