

引用格式: 马钧霆, 陈锁忠, 朱晓婷, 等. 3D GIS 下地下水流有限元数值模拟方法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 749-757. [Ma J T, Chen S Z, Zhu X T, *et al.* 2016. Finite element numerical simulation method of groundwater flow and its application under 3D GIS. *Journal of Geo-information Science*, 18(6): 749-757.] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.00749

3D GIS 下地下水流有限元数值模拟方法与应用

马钧霆, 陈锁忠*, 朱晓婷, 何志超

1. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023;
2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

Finite Element Numerical Simulation Method of Groundwater Flow and Its Application under 3D GIS

MA Junting, CHEN Suozhong*, ZHU Xiaoting and HE Zhichao

1. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: The existing finite element numerical simulation method of groundwater flow has some defects in the three-dimensional visual spatial analysis and the expression of numerical calculation process and simulation results. In order to solve this issue, the key steps of the finite element analysis process including the conceptual model construction, spatial discretization, hydrogeological parameters extraction and initial condition assignment are taken into consideration respectively. Based on the finite element method and 3D GIS platform, the method and technique framework of the groundwater finite element numerical simulation under 3D GIS are proposed with the supports of GIS spatial analysis algorithms and computer graphics theory. In addition to describe the technique framework, the core algorithms' implementation details are given and the complete process of 3D GIS groundwater flow simulation is presented. The groundwater simulation example demonstrates that the proposed method and technique framework are capable of simplifying the finite element analysis process and improving the calculation efficiency of the model. The whole technique framework can be integrated into 3D GIS platform, and furthermore the visualization of simulation process and calculation results can be achieved eventually.

Key words: finite element numerical simulation; 3D GIS; hydrogeological modeling; model parameters; visualization

***Corresponding author:** CHEN Suozhong, E-mail: 09153@ninu.edu.cn

摘要: 目前缺乏针对较强空间特性水文地质计算参数的高效采集方法与管理机制, 而且现有孔隙地下水流有限元数值模拟在三维可视化与空间分析等方面仍存在很多不足。因此, 本文以有限元数值计算方法和三维地理信息平台为基础, 结合 GIS 空间分析算法和计算机图形学理论, 针对孔隙承压地下水有限元分析过程的关键步骤(概念模型构建、空间离散、水文地质参数提取与赋值等), 提出了孔隙地下水有限元数值模拟过程在 3D GIS 下的实现方法和技术框架。基于水文地质钻孔数据和 GTP(Generalized Tri-Prism)空间数据模型, 以盐城市滨海平原水文地质区为研究区域, 实现了地下水系统空间结构特征的三维表达, 同时与地下水流有限元数值模型相耦合, 提出了 3D GIS 模型与地下水非稳定流有限元数值模型耦合的核心处理算法, 并在此基础上开发了 3D GIS 地下水数值模拟系统。应用实例表明, 该技术框架可有效简化有限元分析流程、优化模型计算效率、实现地下水有限元数值模拟过程及计算结果的三维可视化。

关键词: 有限元数值模拟; 3D GIS; 水文地质建模; 模型计算参数; 可视化

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571386); 江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA170028); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)。

作者简介: 马钧霆(1987-), 男, 安徽人, 博士生, 研究方向为地下水数值模拟与可视化分析方法。E-mail: junted_m@163.com

*通讯作者: 陈锁忠(1964-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为地学应用模型与 GIS 集成, 科学计算可视化。

E-mail: 09153@njnu.edu.cn

1 引言

地下水数值模拟是对下水进行定量评估与预测的重要手段,目前国际上已有很多成熟的地下水数值模拟商业软件,如MODFLOW、FEFLOW、GMS等,可有效地支持地下水的数值模拟^[1-2]。当前,地下水数值模拟模型主要包括有限元模型和有限差分模型,差分方法主要适用于结构化网格,网格步长由实际地形和柯朗稳定条件决定。由于其一般采用结构化规则格网,较适用于边界形状较为规则的问题,但在表达离散含水层介质在区域边界处的几何特征时存在较大误差^[3-4]。如MODFLOW中采用的规则离散体元对含水层进行离散时,边界处存在大量的“锯齿”现象,虽然所构建的模型具有较高的收敛性,但在反映含水层的空间结构特征方面精度不足。而有限元模型由于对离散计算体元形态要求较为灵活,边界的拟合性较高,具有更好的空间结构表达能力。

围绕GIS模型与地下水流模型耦合这一课题,很多学者开展了大量研究:如Uddameri^[5]建立了多重标准地下水流最优路径模拟的GIS辅助决策体系;EL-Kadi等^[6]基于GIS建立了面向区域特征的地下水流模拟模型;孙继成^[7]等综合运用FEFLOW和GIS技术对甘肃省秦王川盆地的水文地质条件进行概化,建立该地区的地下水流系统数值模型;陈锁忠等^[8-9]研究了基于GIS的不规则六面体含水层三维空间离散方法,给出了GIS下模型计算参数的自动提取方法;武强等^[10]研究了地下水渗流场的动态模拟可视化方法;毕振波等^[11]开发了地下水有限元计算可视化系统等。由此可见,如何实现地下水有限元数值模型与GIS的空间数据模型的有效集成,并在GIS的框架下完成有限元数值模拟流程中数据管理、预处理、分析以及可视化等关键步骤,对各类分布式计算参数进行集成管理与可视化^[9],是当前GIS应用领域的一个研究热点。

本文以盐城市滨海平原水文地质亚区的水文地质区为研究区域,基于水文地质钻孔数据和广义三棱柱(Generalized Tri-Prism, GTP)空间数据模型实现地下水流系统空间结构特征的三维表达,并将其与地下水流有限元数值模型^[12-13]相耦合;综合运用计算机图形学和约束格网自适应等方法^[14-16],研究了3D GIS模型与地下水非稳定流有限元数值模型耦合的核心处理算法,并在其基础上开发3D GIS

下的地下水流数值模拟系统。实验结果表明,该系统实现了地下水空间数据的预处理、管理、分析及可视化,可为水文地质研究人员提供可靠的图形化交互平台与模拟试算工具。

2 孔隙承压地下水连续运动方程

研究区内松散沉积状的层状岩层分布广泛,如假设赋存于其中的地下水运动主要发生在水平方向,可采用式(1)所示的连续性动力学方程描述地下水的非稳定运动。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(T_h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{K_z}{d_z} (H_z - H) + W = S \frac{\partial H}{\partial t}; \\ t \geq 0, (x, y) \in D \\ \text{初始条件: } H(x, y, 0) = H_0(x, y) \\ \text{边界条件: } H|_{\Gamma_1} = \phi(x, y, t); t \geq 0 \\ T \frac{\partial H}{\partial n} = q(x, y, t); \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上, } t \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: t 表示模拟时段; K_z 表示越流补给系数; d_z 表示越流经过的垂直距离; T_h 表示含水层水平方向的导水系数; H_z 表示含水层补给层的水头; $H(x, y)$ 为水头函数(m); $H(x, y, 0)$ 表示初始模拟时段时的水头分布函数; $H|_{\Gamma_1}$ 表示第一类边界上水头的分布函数; Γ_2 表示第二类边界; W 代表单位时间、单位面积上含水层测补给水量(流出取负值); D 代表渗流区,由一类边界和二类边界包围而成; q 表示边界上单位宽度内流入的流量(流出取负值); n 表示外法线方向; S 为含水层的贮水系数; H_0 为初始水位。

利用有限元数值法对式(1)进行数值计算的关键步骤^[17]:(1)确定计算渗流区的边界范围和性质,圈定越流补给范围;(2)空间离散,将计算渗流区剖分为一系列的三角形单元;(3)节点和单元拓扑关系的组织与管理;(4)基于插值原理建立单元渗透系数矩阵,对每个单元渗透系数矩阵进行拼接,形成总体渗透矩阵,构建总体数值方程;(5)确定模拟时步长、时段数、源汇项,进行矩阵运算。

3 3D GIS下地下水流有限元数值模拟原理

由上述地下水连续性运动方程数值计算过程可知,3D GIS技术与地下水数值模拟进行结合的切

入点主要体现为以下4个方面:

(1)水文地质概念模型建立。孔隙地下水系统空间分布连续,不同含水层之间的水力联系,受含水层空间结构特征影响明显^[18]。为反映地下系统在三维空间的分布特征,引入三维地质建模理论辅助水文地质概念模型构建。

(2)空间离散格网生成。离散格网生成是进行地下水有限元数值模拟前处理的重要环节,格网单元的形态、尺寸对有限元模拟精度和计算效率均有较大影响。为兼顾计算精度和效率,一般要求三角单元尺寸与不同部分的水力梯度相适应,且相邻单元之间尺寸过渡尽量平缓,避免出现狭长三角形;同时需顾及含水层空间分布变、越流补给等约束条件^[19]。本文采用改进前沿推进法(Advancing Front Technique, AFT)生成模拟区域自适应三角形空间离散格网,综合考虑水力梯度、边界条件、含水层结构等约束条件,获取局部区域最优单元尺寸,以动态生成新的自适应空间离散格网。

(3)模型参数提取与初始条件赋值。地下水数值模拟模型参数具有明显空间特性,依据其空间分布特征,抽象为“点”、“线”、“面”矢量数据类型。将计算单元和水文地质参数矢量数据进行叠置分析,实现计算参数自动提取。根据模拟初始时刻下目标含水层初始水头空间分布、边界条件、地下水开采补给排泄、各水文地质参数空间分布情况,结合空间插值算法将模型计算参数自动赋值到计算单元或格网节点上。

(4)模拟结果可视化。采用2.5D水位DEM和3D地下水流动场等可视化表达形式,将地下水流动场与三维空间数据模型集成,即得到三维水地质空间数据模型。

从空间几何结构上看,三维空间数据模型由一系列形态各异的空间数据体元组成。在空间数据模型中,这些离散的体元不仅能够拟合水文地质对象的空间结构特征,还是地下水非稳定运动有限元模型与空间数据模型之间实现耦合的桥梁。这种耦合机制包含2个方向:①在有限元数值模拟过程中将计算网格的节点置于空间数据模型所使用体元的节点处,每个节点的值可依据相关算法从空间数据模型中自动提取,实现空间数据模型参数向有限元模型的传输;②随着模拟时段的推进,数值模拟计算结果不断发生动态改变,将计算结果实时回馈到空间数据模型的体元节点上,并驱动其空

间结构做出相应的调整。通过上述机制,实现了空间数据模型和地下水流动数值模型之间参数数据的双向传输及互相作用。

4 核心算法设计与实现

4.1 基于GTP的三维水文地质空间数据模型

GTP空间数据模型结构灵活,可表现断层、褶皱、尖灭等地质结构;上下表面为三角形,满足三角网(TIN)的形式拟合地层分界面的基本形态^[20],并支持有限元数值模拟和复杂地质结构体模型构建。基于GTP的三维水文地质方法包括4个步骤:(1)地质钻孔建模,整理水文地质钻孔数据,构建控制性水文地质钻孔模型;(2)基于空间插值算法,构建各含水层顶底板TIN模型;(3)GTP体元构建,将相邻含水层界面上的格网节点依据空间关系组织成GTP体元;(4)构建含水层模型,GTP体元包含属性信息,将属性相同的GTP体元组合成三维地质体模型。所建三维水文地质模型较传统的概念模型,能更直观地展现研究区域内部含水层分布范围、厚度、岩性等要素的三维特征。图1为模拟区内水文地质建模结果,其中不同的颜色代表了不同的含水层,暗黄色对应隔水层(弱透水层)。

4.2 基于AFT的自适应空间离散格网构建

AFT应用较为广泛,所得格网对复杂边界拟合度高、自适应性好,单元之间尺寸过渡平滑^[21-22],能够满足有限元数值模拟的要求。在AFT格网中,水数值模拟问题采用水位DEM作为背景格网,建立水力梯度和单元控制尺寸之间映射关系;预估剖分单元最大尺寸 h_{\max} 及最小单元尺寸 h_{\min} ;然后计算区域内部最大水力梯度 V_{\max} 和最小水力梯度 V_{\min} 。鉴于水力梯度和期望单元尺寸之间存在负相关关系,将水力梯度 V_i 和对应的单元尺寸 h_i 之间的关系表示为式(2)。

$$h_i = h_{\max} + \frac{h_{\min} - h_{\max}}{V_{\max} - V_{\min}}(V_i - V_{\min}) \quad (2)$$

水力梯度的计算方法可参阅文献[23]。将该对应关系(式(2))代入AFT算法得到格网单元尺寸随水力梯度自适应的空间离散格网。考虑到区域离散受区域内点、线以及面状地理要素的约束及前沿边推进过程中将不可避免地出现“交汇”效应^[14],导致所得离散格网在局部区域可能出现单元尺寸过渡不平滑、三角形形态差等问题,引入Laplace光顺

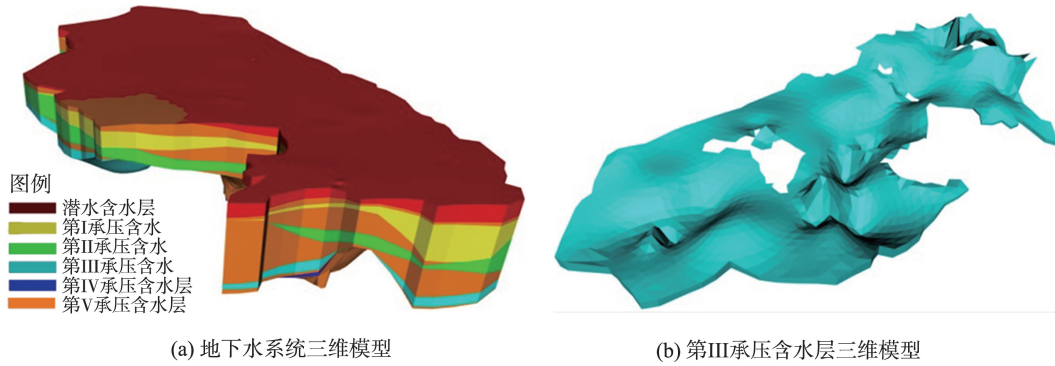


图1 研究区地下水系统及第III承压含水层的三维空间数据模型
Fig. 1 3D groundwater system and the III aquifer data model of the study area

算子对离散格网进行优化。选取2014年10月第III承压含水层为地下水水位DEM作为背景格网构建自适应有限元离散格网,预设最大单元尺寸 h_{\max} 为4 km,最小单元尺寸 h_{\min} 为2 km,格网生成结果如图2所示。图2中颜色差异较明显处相关的水力梯度也较大,其所对应的格网单元依据式(2)所描述的映射关系自适应。

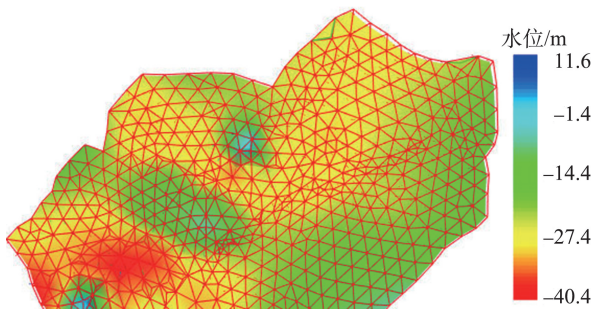


图2 随水力梯度模自适应的自适应有限元离散格网
Fig. 2 Hydraulic gradient adapted finite element mesh

4.3 基于格网拓扑重建的面状参数提取

孔隙地下水含水层在空间上连续,大多计算参数在空间上呈面状分布,参照已建概念模型和抽水试验数据,将模拟区域划分为若干水文地质参数分区,每个分区内部含水层近似均质,参数分区在空间上呈不规则多边形。分区多边形与离散格网进行叠置分析即可实现计算参数的提取。对一个单元同时分布于多个水文地质参数分区的情况如图3所示,单元ABC同时跨越了参数分区P1、P2、P3。此时无法确定单元属于哪一个分区,给单元参数提取带来一定困扰。为此,提出了参数分区约束的三角网局部拓扑重建算法,将原空间离散格网转换为分区边界线约束的三角格网,保证计算单元内部参

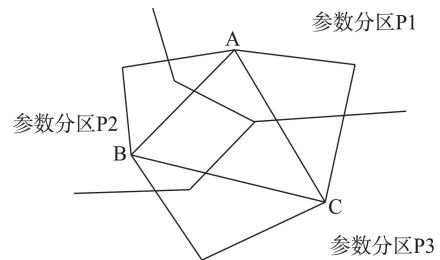


图3 格网单元压覆多个参数分区示意图
Fig. 3 Diagram of single mesh element overlapping multiple parameter districts

数的一元性。其具体步骤为:(1)对位于分区边界线上的线段,搜索该线段起点和终点所在的三角形索引;(2)确定该线段影响到的三角形组成的影响域;(3)删除影响域内部的原有三角形,以该线段为起始边,调用Delaunay算法,重剖分影响域的三角网;(4)获取分区边界线上的下一条线段,重复以上过程,直至遍历所有线段(图4)。

在拓扑重建得到的约束格网中,每个三角单元仅分布于单一的参数分区内,保证了格网单元内部参数的一元性。采用射线法^[24]提取三角形所在的参数分区编号,完成水文地质参数的自动提取。图5为进行约格网拓扑约束重建前后的渗透系数提取

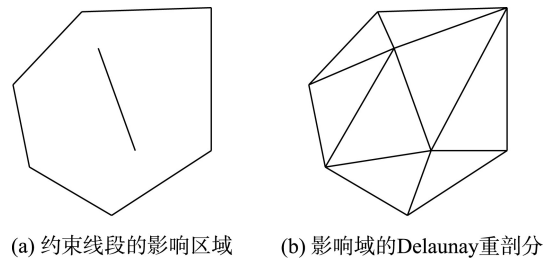


图4 三角网的局部重建原理示意图
Fig. 4 Diagram of triangular mesh topological local reconstruction

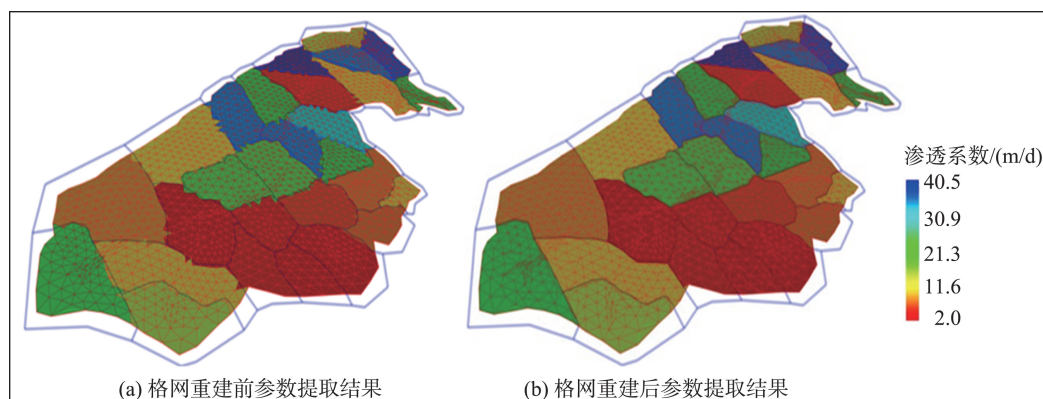


图5 网格重建前后渗透系数提取结果对比图

Fig. 5 Comparison of parameter extraction before and after the mesh local reconstruction

结果对比图。由图5可见,基于拓扑重建网格的计算参数提取结果与参数分区拟合程度得到改进。

4.4 点状分布的计算参数可视化赋值

线状要素通过线约束网格拓扑重建的方式归入离散格网,过程较简单,本文重点讨论点状分布参数的可视化赋值方法。地下水流数值模拟模型点状分布参数主要包括地下水开采量和地下水位。开采量由模拟区内的开采井决定,地下水位数据来源于模拟区域内的动态监测井。开采量和地下水位在空间上虽均以点状分布,但二者之间的空间分布特征并不一致:地下水位是由含水层的空间分布决定,具有空间连续性;地下水开采则由人类活动引起,不同开采井相互作用有限,在空间上以离散点的形式存在。

(1) 初始水位赋值

监测井提供了水位的实际数据,为参数拟合和模拟精度评价提供基础,因此需将监测井作为约束点插入计算网格。实现方法如图6所示,设点P为表示监测井的点,获取包含P点的单元BCE,搜寻

与BCE相邻的三角形单元;判断P点是否位于相邻三角形的外接圆内;若点P位于该邻边三角形外接圆内,则删除该邻边,分别连接P点和该邻边三角形的3个顶点构建新的三角形;否则,直接连接P与邻边的2个端点构建新三角形。然后,根据设定的初始日期时间,查询数据库中每个监测井在该时间的实测水位值;调用空间克里金插值算法,形成初始水位场,分配到离散格网节点上,完成初始水位的赋值。赋值结果以水位面DEM的形式进行可视化。

(2) 开采量赋值

数值模拟中开采条件含义为:计算单元单位面积的地下水开采流量。其赋值方法为:查询包含开采井的三角单元,统计该单元单位面积单位时间的开采流量,并将该值附赋予三角单元,其它不包含开采井单元开采量赋0值。

图7为3D GIS环境下盐城市第III承压含水层2014年10月地下水位及开采量可视化效果图。以蓝色柱体表示开采井模型,计算格网中红色区域表示开采量为0,其它颜色则对应不同的开采量。

5 参数数据的管理与组织

基于以上算法,本文进一步研究了模型参数相关信息与GIS数据模型进行集成的方法,主要涉及以下5个类型:

(1) 水文地质钻孔数据

在GTP构建之初,需实现对钻孔地层数据的管理组织。首先建立水文地质钻孔数据库,以描述钻孔-岩层属性-含水层之间的对应关系,这种对应关系可简要描述为一个水位地质钻孔对象,包含若干含水层对象,而每个含水层对象可能属于多个类别。

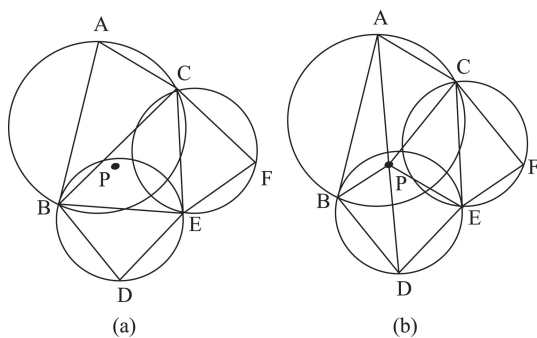


图6 点插入算法原理示意图

Fig. 6 Diagram of inserting a point into the triangular mesh

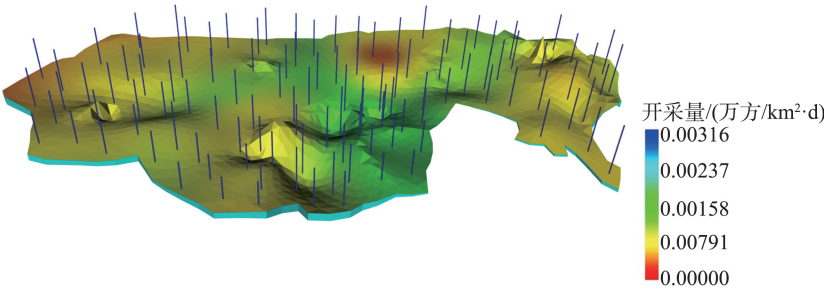


图7 初始水位和开采量赋值的可视化效果图

Fig. 7 Visualization of the initial water level and assignment of the exploitation values

以此建立如图8所示的水文地质钻孔数据库。

利用该算法建模时,首先从数据库中提取其几何结构描述信息(三维坐标、地层厚度、地表高程、钻孔深度等),构建基于规则三棱柱体元模型的空间数据模型,然后依据对象之间的对应关系,将相关的属性信息(地质年代、岩性描述、钻孔位置描述等)添加到模型中,完成空间与属性的集成和可视化管理。

(2)水文地质参数数据

水文地质参数主要包括含水土层的渗透系数、贮水系数和导水系数。这3种参数在空间上呈现出面状分布特征。在数值模拟过程中,事先假定某个特定的小范围区域内部对应的某种水文地质参数为常量。传统做法多采用文件的形式,通过分区编号与参数值的对应关系实现参数数据的组织。本文借助GIS模型实现了该类型参数数据的管理与组织。每一个范围可抽象为一个面状要素,多个面状要素形成水文地质参数分区图层,对每个面对象

附加对应的属性信息,这种方法一方面能更贴合真实水文地质参数空间分布特征;另一方面还能以空间数据库的形式对数据进行管理与组织,因而避免了传统方法中操作冗余的缺陷。

(3)初始条件数据

初始条件主要是指在模拟起始时刻对应的水头分布,其数据来源于动态监测井的历史水位数据库,在GIS环境中以“监测点”的形式进行管理。通过上述提出的算法得到初始时刻每个监测点的水位值,并赋值于该点对象的属性表中。水头的分布采用规则点格网的形式进行表达,规则点格网由一系列附加了水位值的监测点对象相互邻接而成。

(4)其它参数数据

除了以上3种主要参数外,在进行数值模拟时还应包括含水层垂向补给系数、开采量、侧向补给系数、参数分区数据等。这些数据均可采用类似的手段进行管理,其空间数据类型及其与属性表的对应关系如表1所示。

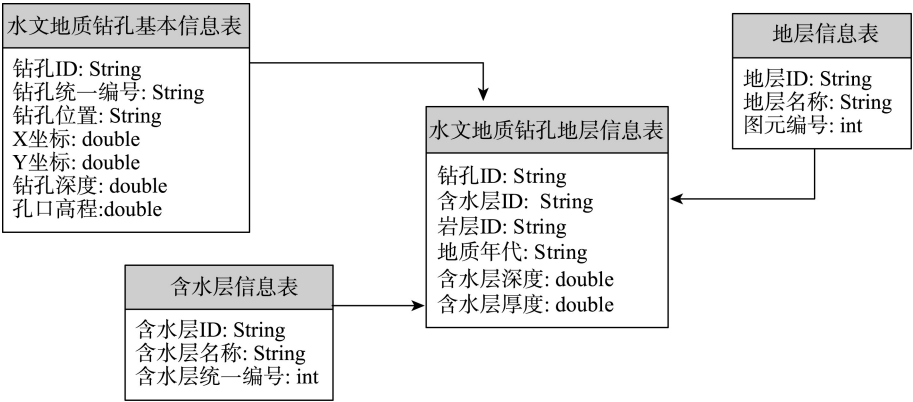


图8 水文地质钻孔标准数据库结构

Fig. 8 Standard database structure of hydro-geological bore data

表1 地下水有限元数值模型参数数据说明表
Tab. 1 Parameters of the groundwater finite element numerical model

参数名称	空间类型	属性来源
含水层地层描述信息	点要素	水文地质钻孔数据库
初始水位	点要素	动态历史水位数据库
渗透系数、导水系数、贮水系数	面要素	水文地质专题图
参数分区(河流、断层等约束线)	线要素	水文地质专题图
开采量	点要素	历史开采量数据库
越流补给系数、侧向补给系数	面要素	用户输入

6 应用实例

6.1 模拟系统开发

集成以上核心算法,开发了孔隙地下水系统三维数值模拟与可视化平台。系统分为数据存储层、数据访问层和应用系统层3个层次:基于Oracle11g和ArcGIS SDE引擎实现空间和属性数据的一体化建库与管理;利用C++语言搭建系统框架,实现数据库的查询与更新;采用OpenGL作为三维场景的渲染引擎,实现数值模拟的可视化管理。

6.2 模拟系统输出结果

根据水位监测数据以“月”为单位的特点,设模拟起始时间为2014年10月15日,模拟时步长30 d,利用该系统推算4个时段(120 d)内的水位变化情

况,经过数次参数拟合与试算后输出计算结果,部分计算结果见表2。

6.3 模拟结果的精度分析

由输出结果可看出,在模拟的初始时段(10月)模拟误差的平均值为0.013,第3模拟时段的误差约为1.213。随着时段的推移,模拟误差有逐渐增大的趋势。计算最大误差为1.95 m,出现在第4个时段,最小误差0.01 m。结果表明,本次算例具有有效性。

6.4 预测结果三维可视化

读取离散格网节点不同时段的水位数据,计算地下水渗流速度,对研究区内地下水流场、含水层静态模型和水位面DEM进行集成显示。图9反映了不同模拟时段下,第III承压含水层地下水位DEM以及水流场在空间的分布情况,实现了地下水数值模拟计算结果的可视化。

7 结论

本文结合有限元数值计算原理和承压地下水含水层水文地质特征,研究了3D GIS支持的有限元数值模拟关键技术与实现方法,提出了基于3D GIS的地下水有限元数值模拟技术框架,并通过

表2 水位计算值与实测值对比表
Tab. 2 Comparison table of the actual and calculated results

井号	时段水位/m											
	2014-10-15			2014-11-15			2014-12-15			2015-01-14		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差	实测	计算	误差	实测	计算	误差
1	-22.07	-22.08	-0.01	-22.07	-22.76	-0.69	-22.07	-20.50	1.57	-21.95	-20.76	1.19
2	-8.13	-8.14	-0.01	-8.13	-8.86	-0.73	-8.13	-7.33	0.80	-7.99	-6.44	1.55
3	-21.42	-21.41	0.01	-21.42	-21.29	0.13	-21.42	-20.22	1.20	-21.92	-20.05	1.87
4	-4.25	-4.24	0.01	-4.25	-4.90	-0.65	-4.25	-4.98	-0.73	-4.09	-3.61	0.48
5	-3.23	-3.20	-0.03	-3.23	-3.74	-0.51	-3.23	-1.27	1.96	-2.77	-1.13	1.64
6	-6.01	-6.00	0.01	-6.01	-6.60	-0.59	-6.01	-4.52	1.49	-6.18	-4.92	1.26
7	-25.32	-25.34	-0.02	-25.32	-25.94	-0.62	-25.32	-24.69	1.63	-25.36	-26.08	-1.72
8	-24.92	-24.90	0.02	-24.92	-25.80	-0.88	-24.92	-23.59	1.33	-24.70	-22.75	1.95
9	-38.89	-38.88	0.01	-38.89	-38.45	0.44	-38.89	-37.73	1.16	-36.03	-35.03	1.00
10	-33.56	-33.57	-0.01	-33.56	-33.77	-0.21	-33.56	-34.34	-0.78	-33.89	-33.11	0.78
11	-24.69	-24.70	-0.01	-24.69	-23.84	0.85	-24.69	-23.08	1.61	-23.38	-24.90	-1.52
12	2.37	2.35	-0.02	2.37	-2.87	-0.50	-2.37	-3.10	-0.73	-3.96	-3.68	0.28
13	-19.84	-19.83	0.01	-19.84	-19.22	0.62	-19.84	-18.42	1.42	-19.73	-19.52	0.21
14	-24.80	-24.81	-0.01	-24.80	-24.97	-0.17	-24.80	-24.42	0.38	-21.75	-22.82	-1.07
15	-24.06	-24.07	-0.01	-24.06	-23.64	0.42	-24.06	-22.34	1.72	-25.36	-23.62	1.74

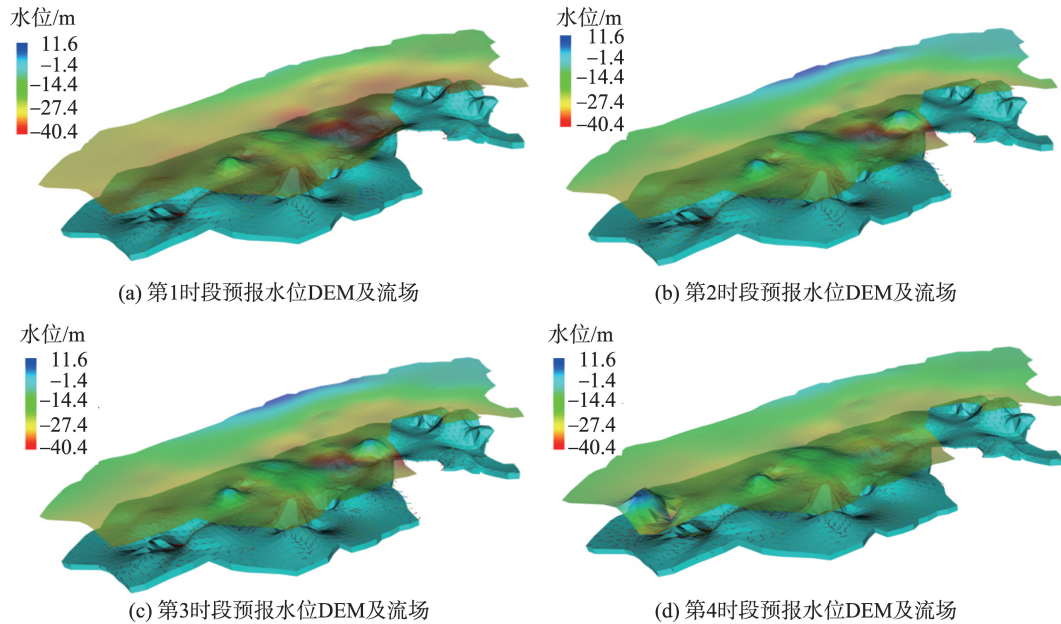


图9 第1~4时段的预报结果可视化

Fig. 9 Prediction result visualization of time intervals from 1 to 4

盐城地下水的有限元数值模拟实现了算法的验证。对现有地下水数值模拟模型的改进主要体现在以下3个方面:

(1)基于三维水文地质建模与分析技术辅助构建水文地质概念模型,以反映三维孔隙地下水系统在三维空间上连续分布特征,为概念模型构建及其空间分析提供有效的可视化工具。

(2)地下水流有限元计算所用的空间离散格网单元尺寸一般要求与水力梯度相适应,本文通过建立关系函数将水力梯度映射到单元尺寸上,并结合AFT算法提出了随水力梯度自适应空间离散格网的自动生成机制。应用实例表明,该格网能自适应地反映研究区内水力梯度的空间分布,并有效支持有限元计算。

(3)将模型计算参数划分为“点、线、面”3种矢量数据类型,并以“点”类型参数为例,研究了在GIS环境下各类型参数可视化提取与赋值的方法。实现了具有较强空间特性的参数数据的高效组织、管理存储与可视化,避免了繁琐的参数数据文件组织与管理工作。

参考文献(References):

[1] Wu J C, Shi X Q, Ye S J, *et al.* Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation in Su-Xi-Chang area, China[J]. *Environmental Geology*, 2009,57:1409-1421.

[2] Qian J Z, Zhou X P, Zhan H B, *et al.* Numerical simulation and evaluation of groundwater resources in a fractured chalk aquifer: A case study in Zinder well field, Niger[J]. *Environmental Earth Science*, 2014,72:3053-3065.

[3] Xie Y F, Wu J C, Xue Y C, *et al.* Modified multiscale finite-element method for solving groundwater flow problem in heterogeneous porous media[J]. *Journal of Hydrogeology Engineering*, 2014,19(8):481-486.

[4] Meyer P A, Brouwers M, Martin P J. A three-dimensional groundwater flow model of the Waterloo Moraine for water resource management[J]. *Canadian Water Resource Journal*, 2014,39(2):167-180.

[5] Uddameri V, Kakarlapudi C, Hernandez E A. A GIS enabled nested simulation-optimization model for routing groundwater to overcome spatio-temporal water supply and demand disconnects in South Texas[J]. *Environmental Earth Science*, 2014,71:2573-2587.

[6] EL-Kadi A I, Oloufa A A, Eltahan A A, *et al.* Use of a geographic information system in site-specific groundwater modeling[J]. *Groundwater*, 1994,32:617-625.

[7] 孙继成,张旭昇,胡雅杰,等.基于GIS技术和FEFLOW的秦王川盆地南部地下水数值模拟[J].*兰州大学学报*, 2010,46(5):31-38. [Sun J C, Zhang X S, Hu Y J, *et al.* Numerical simulation of groundwater system in the south of Qianwangchuan basin based on GI technique and FEFLOW[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2010,45(5):31-38.]

[8] 陈锁忠,黄家柱,张金善,等.基于GIS的孔隙水文地质层

- 三维空间离散方法[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 64-69. [Chen S Z, Huang J Z, Zhang J S, *et al.* 3D spatial dispersing method for interstitial geohydrology succession based on GIS[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 64-69.]
- [9] 陈锁忠, 徐网谷, 张磊. 基于GIS的地下水流数值模拟参数自动提取[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1314-1319. [Chen S Z, Xu W G, Zhang L. Automatic pick-up of groundwater flow parameters for numerical simulation by means of GIS[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11): 1314-1319.]
- [10] 武强, 徐华, 赵鹏, 等. 地下水渗流场可视化动态模拟与应用研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4841-4844. [Wu Q, Xu H, Zhao P, *et al.* Dynamic simulation for groundwater seepage field and its application[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(15): 4841-4844.]
- [11] 毕振波, 巨天乙. 地下水流有限元计算可视化系统研究与开发[D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 2-8. [Bi Z B, Ju T Y. Research and development of visual software System in FEM calculation for underground water[D]. Xi'an: Xi'an University of Science And Technology, 2006: 2-8.]
- [12] 薛禹群, 谢春红. 水文地质学的数值法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980. [Xue Y Q, Xie C H. Numerical method for hydrogeological[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1980.]
- [13] 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 1-12. [Wang H, Lu C Y, Qin D Y, *et al.* Advances in method and application of groundwater numerical simulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 1-12.]
- [14] Lo S H. A New mesh generation scheme for arbitrary planar domains[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1985, 21: 1403-1426.
- [15] 刘少华, 程朋根, 史文中. 约束Delaunay三角网生成算法研究[J]. 测绘通报, 2004(3): 4-7. [Liu S H, Cheng P G, Shi W Z. Algorithm study of the constrained Delaunay triangulation generation[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2004, 3: 4-7.]
- [16] 陆枫, 何云峰. 计算机图形学基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. [Lu F, He Y F. Computer graphics basis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.]
- [17] 陈锁忠, 常本春, 黄家柱, 等. 水资源管理信息系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [Chen S Z, Chang B C, Huang J Z, *et al.* Water resource management information system [M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [18] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Xue Y Q, Xie C H. Numerical simulation for groundwater[M]. Beijing: Science Press, 2007.]
- [19] 刘春太, 杨晓东, 陈静波, 等. 任意平面区域的变尺寸有限元网格划分[J]. 计算力学学报, 2000, 17(1): 105-108. [Liu C T, Yang X D, Chen J B, *et al.* Automatic generation of gradation finite element mesh for arbitrary planar domains [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2000, 17(1): 105-108.]
- [20] Wu L X. Topological relations embodied in a Generalized Tri-Prism(GTP) model for a 3D geo-science modeling system[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, 30(4): 405-418.
- [21] Frykestig J. Advancing front mesh generation techniques with application to the finite element method[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1994.
- [22] Lee C K, Hobbs R E. Automatic adaptive finite element mesh generation over arbitrary two dimensional domain using advancing front technique[J]. *Computer and Structures*, 1999, 71: 19-34.
- [23] Paul F. Hudak. 水文地质学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. [Hudak P F. Principles of Hydrogeology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.]
- [24] 闫浩文, 褚衍东, 杨树文, 等. 计算机地图制图原理与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Yan H W, Chu Y D, Yang S W, *et al.* Computer-aided cartography principles and algorithms basis[M]. Beijing: Science Press, 2007.]