

地下水空间信息可视化分析技术研究

胡卓玮 官辉力

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037) (三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037)
(资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要 将虚拟现实与可视化空间分析技术应用于地下水科学管理工作可以弥补传统技术在分析研究、辅助决策中的不足,发现仍有空间数据模型、空间数据库、合适的虚拟现实方法以及高效的可视化空间分析算法等问题有待解决。结合实际研究与应用工作,探讨了地下水及其赋存地质体的空间数据建模与数据库存储技术,基于OpenGL图形库实现了地下水、地质体、相关地表信息、等水位线、地下水流向等的3D可视化,设计并实现了基于纵断面快速生成算法的可视化空间分析功能。以苏锡常地区为研究示范区,开发了“苏锡常地区地下水空间信息可视化虚拟分析系统”软件,在实际地下水科学管理工作中取得了明显效果。

关键词 地下水 虚拟现实 空间分析 可视化

中图分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)08-1463-08

Visualization and Virtual Analysis Technology of Ground Water

HU Zhuo-wei, GONG Hui-li

(College of Resource Environment and GIS, Capital Normal University, Beijing 100037)
(Beijing Key Laboratory of Resource Environment and GIS, Beijing 100037)
(Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOST, Beijing 100037)

Abstract To resolve the problems in conventional technologies of analysis and decision supporting, the virtual reality and visual spatial analysis technology can be applied to the scientific management of ground water. There are some problems to be solved, such as spatial data model, spatial database, appropriate virtual reality method, effective algorithm of visual spatial analysis, and so on. Integrated with practical research and application works, the modeling method of ground water and geological body, the storage environment of ground water, was analyzed and discussed. Visualization of ground water, geological body, relative surface information, iso-water-level line, flow direction of ground water was realized based on OpenGL, a world famous open 3D graphic library. After that, visual spatial analysis functions based on fast vertical-section generation algorithm was designed and realized. Taking “Su-xi-chang”, a region locates in Jiangsu (a east province of China), as a case study, we developed a suit of software named “Ground Water Spatial Information Visualization and Virtual Analysis System for Su-xi-chang Region”, which is an effective evidence in the application to scientific management of ground water.

Keywords ground water, virtual reality, spatial analysis, visualization

1 引言

地下水作为一种埋藏于地下的特殊地质矿产资

源,具有一般地质矿产资源和地表水资源的双重属性^[1],因此在人类赖以生存的自然环境中扮演着特殊角色,地下水科学研究工作对人类自身的生存与发展而言具有极其重要的意义,其主要工作基础是

基金项目:国家自然科学基金项目(40571125);北京市教育委员会科技发展计划重点项目(KZ200510028017);中国地质调查项目苏锡常地区地面沉降监测网建设([2003]019-02)

收稿日期:2007-03-28;改回日期:2007-05-11

第一作者简介:胡卓玮(1979~),男,首都师范大学自然地理学专业博士研究生。主要从事3维空间信息模型、遥感与地理信息系统开发应用研究工作。E-mail: huzhuowei@gmail.com

摸清地下水形成条件、埋藏分布条件、资源的历年变化、化学组分等特征。

近年来,为弥补传统技术(如水文地质纵横剖面图、历年的水位曲线图,以及大量数据表或文本等)在分析研究、辅助决策中的不足,科研工作者运用先进的地理信息系统技术、计算机虚拟现实技术进行了有益探索与实践。20 世纪 80 年代以前,研究人员通常以水文地质纵横剖面图反映地下水系统的赋存条件,利用历年水位曲线图表达地下水动态变化过程,或者用大量数据表或文本表述来表达地下水相关信息。20 世纪 80 年代末以来,随着计算机技术的飞速发展和计算机图形学理论的日渐完善,利用计算机屏幕上产生的图像直观地表达复杂的水文地质信息,对地下水相关数据信息进行可视化。进入 20 世纪 90 年代,国外较早开展了虚拟地理信息技术在地下水科学管理工作中的应用研究工作。地下水模拟系统(groundwater modeling system, GMS)是美国环境模型研究实验室开发的一个综合性、用于地下水模拟的图形界面软件,目前已成为国际上最受欢迎的地下水模拟软件^[2]。GMS 在水文地质数值模拟方面占有领先地位,并能通过 3 维模型对地下水环境进行表达和分析,但在针对特定的动态模拟分析需求方面还有待完善。

目前,我国对计算机地下 3 维信息的研究主要集中在对地下 3 维信息的可视化表达方面。西北大学体视化研究所研制了“地质地层模型系统”;中国地质大学数学地质与遥感地质研究所研制了“地质岩层真 3 维分析系统”;大庆勘探开发研究院开发了地质数据可视化系统等^[3]。在地下水领域,已有学者对地下水流进行了 3 维表达,如于军采用光线跟踪技术生成具有逼真阴影和反射的地下水流表面;颜辉武利用混合体绘制方法再现了地下水流场,利用 3 维可视化开发软件 VTK 实现了地下水赋存环境的可视化表达,地下水流场的 3 维动态可视化及含水层剖面位置上的流场情况^[4];林晨运用 OpenGL 技术描述了地下水抽取过程中水位的 3 维动态变化情况^[5];陈永康提出了通过集成方式在地下水研究中实现可视化功能的思路^[6];杨旭开展了利用离散控制点建立不规则网并采用混合体绘制技术对地下水水位、水温、流场等动态监测数据进行 3 维可视化的初步研究^[7];王福刚在 GMS 平台上建立了苏锡常地区第 4 纪地层 3 维可视化模型^[8],梁秀娟利用 GMS 软件完成了苏锡常地区的地下水流模

型模拟,并在此基础上开展了预报和辅助决策应用工作^[9]。上述研究工作要么受现有软件限制,难以针对特定需求进行效果和功能定制,要么受工作目标限制,数据处理、存储、管理以及 3 维可视化分析功能难以满足其他更广泛需求。我们在参与中国地质调查项目“苏锡常地区地面沉降监测网建设”中,采取自主开发模式,系统开展了地下水空间信息可视化虚拟分析系统建设工作,将地理信息系统可视化技术运用到地下水动态模拟分析中,目标针对研究区实际特点和需求并考虑通用性,克服现有软件和技术缺陷,实现具有强大数据处理功能、高度灵活性、逼真效果和丰富功能的地下水动态模拟分析应用系统。

2 空间数据模型与空间数据库

2.1 地质体空间数据模型

为了解地下水的埋藏分布条件,需要首先对地下水的赋存地质体环境进行表达。本次研究基于钻井勘探数据,通过概化分析得到每个钻井垂直方向第 4 纪地层深度分布情况,建立地下水赋存地质体空间数据模型。选择了以三角形为基本单元,用不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)表示地层界面,通过多层 TIN 组合建立地质模型的方法。在这个空间数据模型中,经过抽象得到了点、边、三角形、顶板、地层和地质体 6 种对象。抽象数据模型如图 1 所示,模型中的三角网内部拓扑关系对于实现以下介绍的快速 3 维可视化分析具有重要意义。每个地层对象包括两个界面,即上顶板和下底板,分别由不同的 TIN 表示,TIN 之间的拓扑关系可在程序对象中通过成员变量来实现逻辑约束。

考虑到原始数据的单一性且便于空间模型建立,将所有钻孔视为垂直钻孔,即一个钻孔上的所有分层点具有相同的平面投影坐标。建模过程采用了“一次构 TIN,分层处理”的方法。即所有地层界面的三角网均一次生成(节点高程不同),然后考虑每个地层可能存在缺失现象,对每个地层界面进行单独处理,根据水文地质资料(地质剖面图、地层等厚度线等)圈出各地层的缺失边界线,由地层缺失边界线对对应层界面进行处理,最终建立完整的区域 3 维地质空间模型。由于钻孔数量较少,为提高信息可视化效果,有必要在空间模型构建之前进行钻井数据插值处理,将通过插值得到的数据称为虚

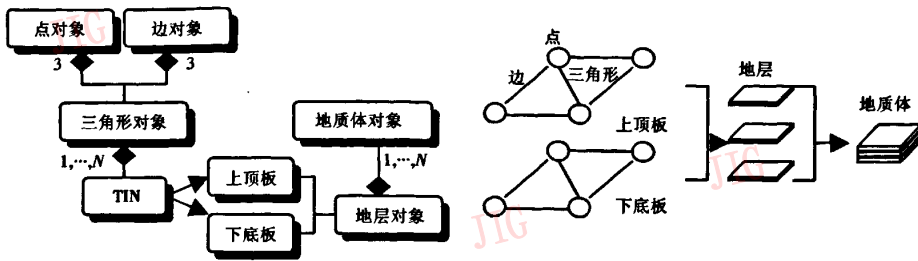


图 1 地质体空间数据抽象模型

Fig. 1 Abstract spatial data model of geological body

拟钻井。在研究中,尝试在原始数据基础上通过克里金插值(Kriging interpolation)法生成规则格网,然后生成等高线,最后使用经过筛选的等高线点作为钻井(包括原始钻井和虚拟钻井)集合,生成区域地质体空间模型,具有较好的可视化效果。

2.2 地下水面空间数据模型

地下水面模型表达的是研究区地下水位分布情况,同数字地面模型(DTM)一样,可以通过规则格网(Grid)来对水位场进行离散,通过有限规则格网节点上的地下水位来表征整个研究区的地下水位分布情况。

地下水面模型的构建以有限个水位观测点得到的水位观测值作为原始数据,通过规则格网建立方

法来生成研究区的数字地下水位模型,规则格网建立方法有反距离权插值法(inverse distance weight, IDW)、曲面拟合法以及克里金插值法(Kriging)。由于克里金插值法考虑了待估点邻域内已知点的数值大小和空间位置分布、已知点与待估点相互间的空间位置等几何特征,其本质是最佳线性无偏估计,在地下水面模型构建过程中采用了这一方法。

虽然地下水在空间垂直分布上也有多层次,但更重要的是实现地下水在时间序列上的多层次(即动态变化情况)。以地下水的观测记录时间作为节点,建立每一时间节点上的地下水面模型,以时间链来建立这些水面模型的关联关系,形成地下水面 3 维动态空间数据模型,如图 2 所示。

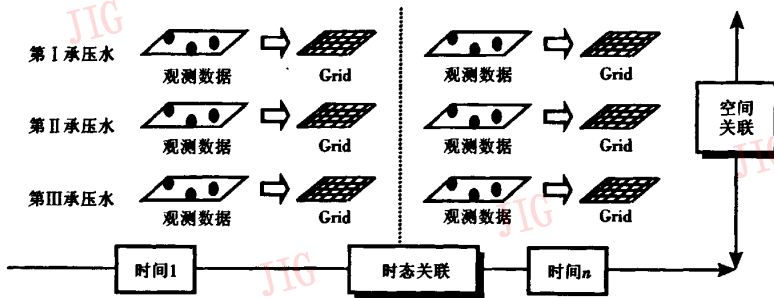


图 2 地下水面多维动态空间数据模型示意图

Fig. 2 Multi-temporal spatial data model of groundwater surface

2.3 空间数据库存储结构

为提高运行效率且便于技术实现,必须设计专门的空间数据库来存储原始建模资料数据、地质体空间模型数据以及地下水面空间模型数据。空间模型在程序中表现为对象类型,而在数据库中则表现为具体的数据物理存储结构。

2.3.1 原始建模数据存储结构

原始建模数据包括地层与地下水位测量数据,

其数据库中存储表结构如表 1、表 2 所示。

对于地质体,若干地层组成一体对象,因此在地层钻孔数据存储表中同一钻孔的多层数据集中记录。对于地下水位,不同类型地下水面独立建模,因此在地下水位观测数据存储表中将同一观测时间、同一地下水类型的数据集中记录。此外,为实现地下水面按年、月、日建模的功能,地下水位观测时间字段被设计为字符串类型,格式为“年-月-日”,月模

表 1 地层钻孔数据存储表结构

Tab. 1 Table structure for storing geological drill information

字段名	数据类型	说明
孔号	char[100]	钻孔编号
x	double	钻孔平面 x 坐标
y	double	钻孔平面 y 坐标
z	double	地层在钻孔上的垂直深度
物质层	char[100]	地层物质, 地层概化时用
层	int	地层顺序编号, 基岩层编号为 0

表 2 地下水观测数据存储表结构

Tab. 2 Table structure for storing groundwater level observation data

字段名	数据类型	说明
ID	long	地下水观测点编号
x	double	地下水观测点平面 x 坐标
y	double	地下水观测点平面 y 坐标
date	char[100]	数据获取时间
waterlevel	double	记录水位值
type	char[100]	地下水类型

型和年模型可通过日数值判别, 月模型约定日数值为 32, 年模型约定日数值为 0, 例如“1999-1-32”代表 1999 年 1 月采集的月模型数据, 而“1999-1-0”代表 1999 年采集的年模型数据。

2.3.2 空间模型数据存储结构

基于建模数据并参考空间模型结构建立地质体模型和地下水模型, 将内存数据以二进制类型放入数据表中实现空间模型数据存储。表 3、表 4 是空间数据模型存储结构。

表 3 地质体空间数据模型存储表结构

Tab. 3 Table structure for storing geological body spatial data model

字段名	数据类型	说明
LayerID	int	层编号
scale	double	缩放尺度
center x	double	层中心点平面 x 坐标
center y	double	层中心点平面 y 坐标
originPtNum	long	原始点数量
ptNum	long	构成层三角网的点数量
cellNum	long	三角单元数量
blobModel	binary	模型二进制数据

表 4 地下水空间数据模型存储表结构

Tab. 4 Table structure for storing groundwater surface spatial data model

字段名	数据类型	说明
date	char[100]	地下水时间, 可判断模型类别
start x	double	起点平面 x 坐标
start y	double	起点平面 y 坐标
startpos	int	起点位置
x step	double	x 方向步长
y step	double	y 方向步长
x num	long	x 方向单元格数
y num	long	y 方向单元格数
z list	binary	地下水列表

一个地区的地质体空间模型存储为一张数据表。地下水模型按照模型类别(年模型、月模型或日模型)以及地下水类型进行组织, 因此一个地区可能拥有多张数据表, 一张表用于存储该地区同一地下水类型、一个时间系列的地下水模型。地下水模型数据表的命名规则为: “区域” + “地下水类型” + “模型类别”, 例如“xyz 第 I 承压水日模型”。

3 地下水空间信息 3 维可视化虚拟

可视化是地下水虚拟现实的重要内容以及空间分析功能的组成部分, 也是实现其他虚拟分析功能的基础。根据地下水空间信息特点, 其可视化内容包括: 地下水赋存地质体 3 维可视化与渲染、地下水 3 维可视化与渲染、辅助信息可视化、等地下水位线生成及 3 维显示、流线生成及显示等。

空间信息 2 维屏幕显示技术已经相对成熟, 而 3 维信息可视化受真实表达空间信息要求的限制, 其技术尚在不断当中, 目前可选用的主要工具包括: OpenGL 开放图形库、Microsoft DirectX 等。本次选择 OpenGL 作为 3 维图形显示与渲染接口。基于 3 维空间坐标, 经过 OpenGL 投影变换、模型变换可将地质体空间模型和地下水模型以 3 维图形绘制在屏幕上, 还需通过物体表面分层设色、纹理贴图、光照、阴影等技术实现逼真效果。对于地质体模型, 可在每个地层上贴付不同纹理以表达其组成物质; 对于地下水, 可根据水位高低设置不同区域颜色深浅, 直观再现地下水位分布情况。

辅助信息包括钻孔、地面模型、建筑、道路、植被等。基于原始观测数据,可将钻孔显示为多段连接在一起的圆柱体(一段圆柱代表一个地层, gluCylinder),同样可以用颜色渲染和纹理贴付技术来区分不同地层的属性。地面模型表达地形情况,通过贴付遥感影像可表达丰富地物信息,由于遥感影像一般较大,因此常通过多细节纹理加速纹理贴付,OpenGL中可直接通过 Mipmap 功能实现。基于基础地理数据建模生成建筑和道路模型,将实地拍摄照片或将从遥感、航拍影像截取的纹理贴付在表面实现建筑和道路对象的真3维立体显示。在垂直面上贴付透明植被照片,保证垂直面始终面向观察点,可实现植被显示。

流线表达地下水在每个格网单元上的流向,从而可获得整个地下水流的流场信息。按下式计算每个格网单元相对 8 个邻接格网单元的坡度值:

$$S = \Delta H / D$$

其中, $\Delta H = H_C - H_N$, H_C 为当前格网单元水位, H_N 为邻接格网单元水位, D 为两个格网中心点之间距离。

坡度最大的邻接格网单元方向即为当前格网单

元上的地下水流向。以地下水流向计算为基础,在格网单元中心位置通过箭头进行地下水流场可视化。

4 空间可视化分析

4.1 基于纵断面快速生成算法的地质体可视化分析

单层 DEM 上创建纵断面一般通过插值方法实现。地质体及地下水由于具有多层属性,需要生成的纵断面是一个非单值面,同时还需要将纵断面与切割后保留的地质体综合显示,因此简单的插值方法难以满足要求。而特征线法由于耗时较多,难以满足快速空间可视化分析的要求。为此,设计并实现了一种基于三角网拓扑结构的纵断面快速生成算法。

首先在每个地层上进行纵断面计算。以图 3(a)中的三角形 T_1 为例,表 5、6 分别表示了该三角形的点-线及线-三角形拓扑情况。设计了点、线、三角形、三角网 4 种类型,数据结构 C++ 代码如表 7 所示。

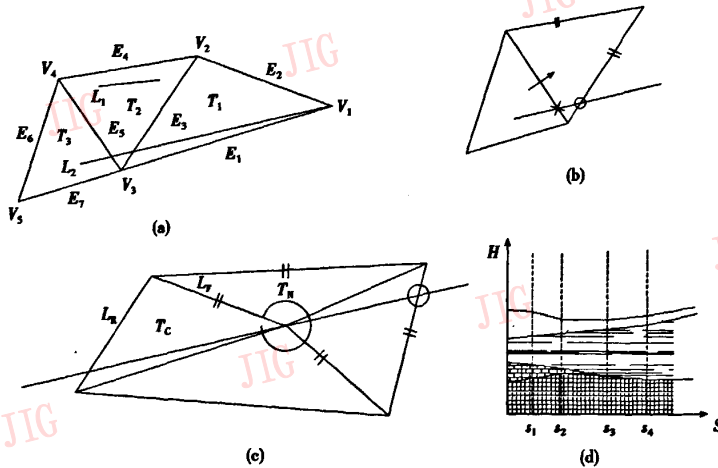


图 3 三角网断面线追踪插值示意图

Fig. 3 Section trace interpolation algorithm based on TIN

表 5 三角形 T_1 的点-边拓扑

Tab. 5 Point-edge topology of triangle T_1

顶点编号	对应边
V_1	E_3
V_2	E_1
V_3	E_2

表 6 三角形 T_1 的线-点-三角形拓扑

Tab. 6 Edge-point-triangle topology of triangle T_1

边编号	起点	终点	邻接三角形
E_1	V_1	V_3	NULL
E_2	V_2	V_1	NULL
E_3	V_3	V_2	T_2

表 7 点、线、三角形数据结构
Tab.7 Data structure of point, edge and triangle

点	线	三角形
<pre>class CPoint { long m_IID; //点编号 double m_IX; //横坐标 double m_IY; //纵坐标 double m_IZ; //高程 };</pre>	<pre>class CEdge { long m_IID; // 边编号 long m_IStartPID; // 起点编号 long m_IENdPID; // 终点编号 };</pre>	<pre>class CTriangle { long m_ITriID; // 三角形编号 long m_PtList[3]; //点列表 long m_EdgeList[3]; // 边列表 };</pre>

对一条断面线进行追踪,基本思想是循环计算断面线与三角形边的交点。首先计算起点所在的三角形的编号,然后判断终点是否也在同一三角形内,如果是则直接对两点进行指定三角形内的高程插值计算即可结束(如图 3(a)中断面线 L_1)。如果终点不在同一三角形内,则计算起点与所在三角形关系,如不在三角形顶点或边上则对起点进行指定三角形的高程插值,然后计算断面线与所在三角形某条边的交点,设为当前交点,进入下一步循环过程,否则认为起点即为当前交点,可直接进入下一步循环过程。循环过程完成对断面线剩余部分的追踪,终止条件为当前交点到下一个计算所得交点的距离大于等于当前交点到终点的距离。循环中可能遇到当前交点分别在三角形边和三角形顶点上两种情况,可利用三角形拓扑关系分别推导下一个交点所在位置(如图 3(b)、(c))。对所有单个地层进行纵断面线追踪插值计算后,得到若干纵断面点数组,可组成一个网格结构数据集,由此生成分层纵断面(如图 3(d)),通过纹理映射可实现渲染显示。

基于纵断面快速生成算法,除了能够实现地质体断面切割分析外,还可开发螺旋切割、巷道开挖等分析功能。由于具有统一的空间参考系统,可实现与地下水(线)的融合显示,从而达到了解地下水埋藏条件的目的。

4.2 地下水变化动态模拟分析

地下水模型具有准确时间参考,按照一定时间间隔连续显示某一时间段内的系列地下水模型,可模拟地下水面的动态变化情况,通过叠加等水位线、水流线可以更直观地反应地下水变化信息。

5 应用实例

以 Visual C++ 6.0 为主要开发工具,以 SQL

Server 2000 为地下水空间数据存储介质,通过 OpenGL 开放图形库实现真 3 维空间信息显示与渲染,通过 ADO 实现数据库操作并设计地下水空间数据引擎。使用设计开发的“苏锡常地区地下水空间信息可视化分析系统”对以上功能进行了实现,并在苏锡常地区地下水研究中开展了实际应用。系统提供了成套辅助工具,可实现原始资料的整理与入库。系统自身可自动完成从模型建立、子模型分割、模型存储、模型管理、模型输入/输出转换等一系列功能,并以工程和对象方式对地下水及地质体数据进行管理。

系统可对建立的地质体模型、地下水模型进行真 3 维显示,允许用户自由地对渲染方式进行控制,包括能够显示深度信息的分层设色和能够表达地质体物质组成的纹理贴付,还可与地表地形叠加显示,将高分辨率卫星遥感影像映射在地表可以获得更加丰富的研究区基本信息(如图 4),从而开展更加深入的关联分析。

在交互式动态可视分析方面,系统允许用户在地质体上任意选择切割点完成任意形状的地质体及地下水剖面分析(图 5(a));进入地质体内部进行巷道方式漫游(图 5(b)、(c));在地表上添加真实地物(如道路、房屋、植被等)3 维模型(图 5(f));对地下水面及其流场进行显示和渲染,并叠加水位等值线,对多时间序列地下水面进行连续播放,掌握地下水面及其流场的动态变化情况(图 6)。以巷道漫游为例,该功能允许用户从某点开始进入地层内部,并可自由设置可观察地层与显示效果(颜色渲染/纹理映射),通过键盘控制在地层内部的行走路线,提供缩略窗口方便用户行进到感兴趣区域,地层显示的同时可叠加地下水面。这些功能使得用户可以真正按照自己的意愿和需求对相关信息进行获取,灵活、可控,效果逼真,是目前的地下水模拟商业软件难以实现的。

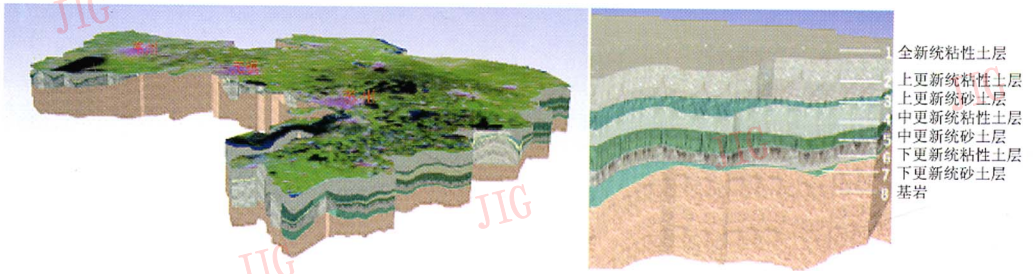


图 4 研究区地质体建模结果

Fig.4 Modeling result of geological strata for research area

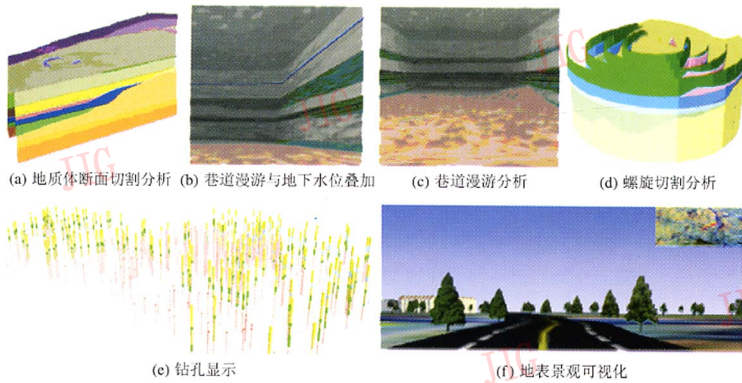


图 5 可视化及空间分析效果图

Fig.5 Effects of visualization and spatial analysis

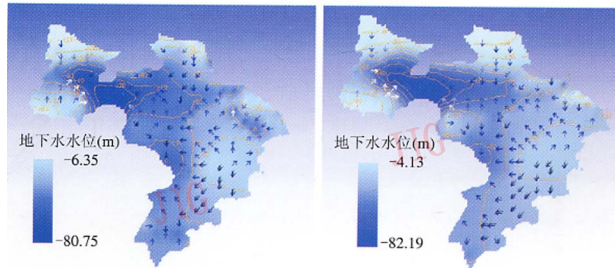


图 6 某时段地下水变化动态模拟分析效果图

Fig.6 Effects of dynamic simulation and analysis for groundwater change

6 结 论

运用空间信息 3 维可视化技术、空间分析技术等建立地下水空间信息可视化虚拟分析系统,可以增强地下水科学管理与分析决策手段,提高工作效率

率。在苏锡常地区开展的研究、开发与应用工作,是虚拟现实及可视化分析技术应用的新尝试,其空间数据模型合理,在技术实现时充分考虑了原始数据特点以及实时、快速、灵活的应用需求,取得了良好的实际运行效果。今后将针对更复杂的地质体与地下水情况展开建模分析研究,并将可视化与虚拟技

术向地下水空间结构与形态应用方向扩展,进一步提高技术的实用性,为地下水科学管理工作提供更有力的支持。

参考文献 (References)

- 1 Lin Xue-yu, Liao Zi-sheng. The basic attributes of groundwater resources and the development of underground hydrogeology science in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2002, 9(3): 93~94. [林学钰, 廖资生. 地下水资源的基本属性和我国水文地质学的发展[J]. *地学前缘*, 2002, 9(3): 93~94.]
- 2 Zhu Xiao-bin. Groundwater modeling system (GMS) software[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(5): 53~55. [祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(5): 53~55.]
- 3 Duan Fu-zhou. Research and realization of 3D geological model and data structure[D]. Beijing: Capital Normal University, 2004. [段福洲. 地质体三维模型和数据结构的研究及实现[D]. 北京: 首都师范大学, 2004.]
- 4 Yan Hui-wu, Zhu Guo-rui. Research on the Volume Visualization of Groundwater[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 125~138. [颜辉武, 祝国瑞著. 地下水的体视化研究[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 125~138.]
- 5 Lin Chen, Zhang Jian-li, Pan Mao. Dynamic modeling of groundwater based on OpenGL technology [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2002, 19(4): 13~16. [林晨, 张建立, 潘懋. 基于 OpenGL 的地下水水位动态模拟[J]. *勘察科学技术*, 2002, 19(4): 13~16.]
- 6 Chen Yong-kang, Huang Jia-zhu, Lu Guo-nian. The application of 3D visualization integration technique in the study of groundwater [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2001, 1(2): 30~35. [陈永康, 黄家柱, 阚国年. 三维可视化集成技术在地下水研究中的应用[J]. *南京师大学报(工程技术版)*, 2001, 1(2): 30~35.]
- 7 Yang Xu, Huang Jia-zhu, Yang Shu-cai. 3D visualization of groundwater dynamic monitoring [J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(4): 47~50. [杨旭, 黄家柱, 杨树才. 地下水动态监测的三维可视化初步研究[J]. *水文*, 2006, 26(4): 47~50.]
- 8 Wang Fu-gang, Liang Xiu-juan, Yu Jun. The application of the information system of visualized strata model to the research of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 219~223. [王福刚, 梁秀娟, 于军. 可视化地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(2): 219~223.]
- 9 Liang Xiu-juan, Lin Xue-yu, Su Xiao-si, et al. GMS and the simulation of groundwater in Suxichang region [J]. *Yangtze River*, 2005, 36(11): 26~28. [梁秀娟, 林学钰, 苏小四等. GMS 与苏锡常地区地下水流模拟[J]. *人民长江*, 2005, 36(11): 26~28.]