

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1685-06

基于GIS的城市地面沉降信息管理与预测系统研究

侯卫生^{1,2}, 吴信才¹, 刘修国¹

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074; 2. 中山大学 地球科学系, 广州 510275)

摘 要: 在分析 3D GIS (地理处理系统) 技术研究状况的基础上, 详细讨论了基于 GIS 的城市地面沉降信息管理与预测系统的设计思路和功能、体系结构。提出了基于地下水抽汲的地面沉降计算模型的选择原则、基于混合数据模型的地面沉降信息三维建模、数据可视化流程及系统 Web 发布功能的 3 层体系结构等解决系统建设中难题的方案。

关 键 词: 地面沉降; 信息管理与预测; 3D 地理处理系统; 三维建模; 数据可视化

中图分类号: P 208

文献标识码: A

Study of urban land subsidence information management and prediction system based on GIS

HOU Wei-sheng^{1,2}, WU Xin-cai¹, LIU Xiu-guo¹

(1. Information Engineering Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on reviewing three-dimensional geographic information system (3D GIS) technology, an information management and prediction system for urban land subsidence is designed on the basis of GIS technology. The detail of design thought, function and structure of the system is introduced. The authors proposed a series of blue print for key problems when constructing the system, such as the principle for choosing land subsidence modeling based on porous water migration, the process of 3D land subsidence modeling and its volume visualization supported by the mixed data model and three layers structure for the information broadcast function of the system through Web, etc.

Key words: land subsidence; information management and prediction; 3D GIS; 3D modeling; data visualization

1 引 言

随着城市建设的发展, 水资源匮乏、地面沉降等环境地质灾害逐一凸现出来, 其中地面沉降成为制约城市发展的一个重要因素。有资料表明, 我国已经发生地面沉降的城市近 60 座, 沉降幅度大于 100 cm 的城市约 20 个^[1]。严重的地面沉降可造成地表和地下排水不畅、建筑地基下陷、城市防潮设施功能降低、风暴潮灾害损失加重、甚至海水入侵等地质灾害, 对人类工程经济活动和生存环境产生极大的危害。目前国内部分城市已相应地建立了一些相关的专业数据库^[2-4], 在城市的规划、建设中起到了重要作用, 但随着经济发展, 城市科学规划和建设中不断提出建立数字城市、公众信息的发布、

成果表达的可视化等需求, 原有的数据库和相应的系统已难以满足需求, 因此, 建立一个新的融城市地面沉降信息管理、预测预警和公众信息发布为一体的系统成为城市建设中不可或缺的一部分, 也是建设“数字城市”和城市规划决策提供良好服务的必需手段。

近十几年来, 以 GIS (地理信息系统) 技术为核心的 3S (GIS、GPS 和 RS) 技术在地学领域中的应用获得了蓬勃发展, 为城市地面沉降信息的管理和防治工作提供了新的思想和途径, 也使建立一个基于 GIS 技术的城市地面沉降信息管理与预测系统成为可能。该系统应该能对地面沉降多源海量数据 (如水量动态观测数据、GPS 监测数据、遥感图像数据等) 进行一体化存储与管理, 并在此基础上对

收稿日期: 2006-08-20

基金项目: 基金项目, 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (No.2001AA135170)。

作者简介: 侯卫生, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事三维 GIS 技术与应用工程方面的研究。E-mail: wshou 2005@sohu.com

地面沉降进行模拟、预测和相关信息的及时发布,从而为科学、合理规划城市发展提供决策依据。根据目前三维 GIS 研究现状分析,笔者将三维 GIS 技术的最新研究成果应用于城市地面沉降信息管理与预测系统这一实际工程领域中,为系统功能的最终实现提供支持。

2 城市地面沉降系统建设思路

GIS 是对与地理空间相关的数据进行有效管理与综合分析的计算机系统^[5],它把与空间信息相关的技术与学科融合成有机的整体,将不同数据源的空间与非空间数据相结合,通过空间操作与模型分析,最终为用户提供规划、管理、决策的信息平台。同时,GIS 为用户提供了一种认识和理解地学信息的新方式,其强大的空间分析功能和空间数据库管理能力为城市地面沉降的研究提供了一个卓有成效的途径。尽管造成地面沉降的机制大不相同,所带来的灾难也不尽相同,但其结果都是造成了地形的起伏,并与地理空间信息紧密关联。利用 GIS 技术不仅可以对地面沉降及其相关信息进行管理,还可以从空间和时间的角度对其进行模拟、分析和预测。

根据地面沉降信息管理、模拟和预测的要求,基于 GIS 的城市地面沉降信息管理与预测系统至少应包含以下几个方面的内容:

(1) 基于 GIS 城市地面沉降数据管理系统。根据已有的地面沉降资料、相关的地面沉降观测设施和动态监测数据,建立动态的地面沉降数据库。该数据库不仅存储原有的地面沉降数据以及各种相关的动态监测数据,还要存储各种设施的空间信息、已有的图件和遥感数据等空间数据。数据管理系统还应能支持数据的动态更新和维护,进而通过 GIS 的空间信息管理和空间分析功能,实现对地面沉降监测设施图层、区域分布图层等图层信息库的管理和各图层间的叠加分析、监测数据与空间图层的快速交换、连接、查询、统计分析等功能,为城市地面沉降信息的科学化、网络化管理提供实时有效地服务奠定基础。

(2) 在 3-D GIS 上实现地面沉降模拟、预测和预警模型和平台,这是系统的核心所在。利用 GIS 技术作为平台,结合现有的地面沉降模拟和预测方法,充分利用 GPS 监测数据和遥感数据,建立一个集沉降模拟、水量分配、沉降预测和预警等功能为一体的系统,并在 3-D GIS 的基础上实现地面沉降状态的可视化。

(3) 基于 Web GIS 的地面沉降信息发布和咨询

决策平台。在沉降模拟和预测模型的基础上,利用 Web GIS 作为开发平台,研究出用于公众信息发布和政府咨询决策的应用平台,最终为城市规划和建设服务。

3 城市地面沉降系统构架和功能

根据地面沉降数据本身的特点和信息管理的要求,按照多层体系结构建立基于 GIS 的城市地面沉降信息管理与预测系统的总体构架,如图 1 所示。系统总体上可划分成 3 个层次:应用层、中间层和数据库层,其中中间层可以进一步分为 Web 发布层和应用业务处理层。数据库层包括空间数据库和动态监测数据库两个部分。在实际建立系统时,动态监测数据库和空间数据库均可按不同的专题进行建库,在数据库层与应用业务处理层之间设有空间数据引擎,以实现空间数据与动态监测数据之间的快速查询以及数据的一致性。应用服务器是整体领域的服务器或专题服务器,可以连接各个专题的数据库,并根据应用查询、更新数据库和完成各项应用业务功能。对于不同层次的用户而言,其所需数据内容和对数据操作权限也不一致,因此,系统采用了 B/S 和 C/S 的混合结构。对于政府和社会公众而言,只需要预测的最终结果,Web 服务器只需要从应用服务器中获取数据,而不需要与应用服务器进行交互操作。对于专业应用人员而言,需要对数据进行实时交互操作,采用 VPN/局域网可以保证数据读取的速度、系统响应速度以及数据的安全。

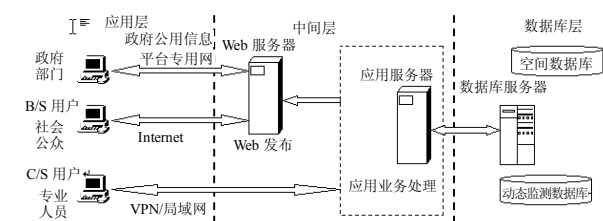


图1 城市地面沉降信息管理与预测系统的总体结构
Fig.1 The framework of information management and prediction system for urban land subsidence

基于 GIS 的城市地面沉降信息管理和预测系统根据现有的各种动态监测数据,充分利用网络技术、数据库技术、GIS 技术构建城市地面沉降综合信息数据库,在此基础上开发数据管理及维护、数据查询统计、沉降模拟、预测和地面沉降数据三维可视化表达与分析等功能,以实现城市地面沉降信息的资源共享、信息发布和为政府提供决策平台的目的。依照模块化程序设计思想,系统划分为 5 个基本模

块, 其结构见图 2。

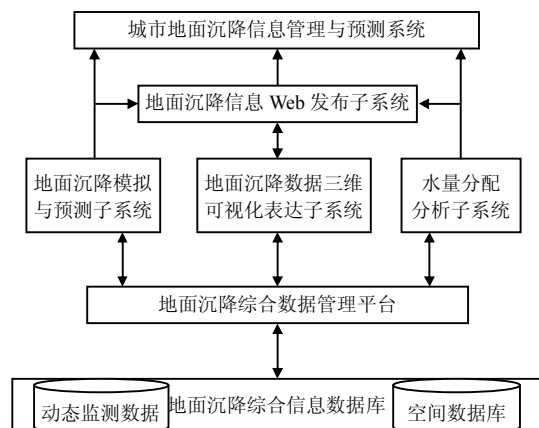


图2 城市地面沉降信息管理与预测系统功能框架

Fig.2 The function framework of information management and prediction system for urban land subsidence

具体功能可以细化成 8 个部分:

(1) 地面沉降信息动态管理功能。地面沉降数据包括来自空中的卫星遥感数据、地理地图数据、各种监测点位及监测点的各种观测数据, 最大的特点就是动态监测数据多。在数据管理功能方面, 不仅要提供常规的 GIS 数据录入功能, 如数字化等, 还要在时态数据库的基础上提供强大的数据导入、检验等数据动态管理功能, 为地面沉降的预测提供及时、准确的数据及为相关部门提供科学决策的依据。

(2) 查询统计功能。能实现对历史和现在的各类动态监测属性数据和空间数据的关联查询及统计, 包括属性数据之间、图形与属性数据之间及图形数据之间的互检索, 属性数据的统计及专题图的绘制等功能, 为地面沉降模拟和预测提供基础数据。

(3) 地面沉降模拟和预测功能。根据当前主要的地面沉降的数学模型和计算方法, 提供城市地面沉降模拟结果、地基稳定性评价、地面沉降土方量计算及地面沉降量预测等。

(4) 水量分配分析功能。鉴于大多数城市的地面沉降都由地下水的过量开采所导致, 系统根据水流模型对城市采水量、回灌水量等情况对城市的水量分配作出预测和评价, 与沉降模型相耦合对地面沉降进行预测和评价。

(5) 地面沉降三维建模及数据的三维可视化表达。在三维数据引擎支持下, 采用三维地质建模方式^[6]对地面沉降信息用三维图形图象生动地表现出来, 并实现对三维模型的旋转、平移、放大、缩小

等可视化操作及实时漫游。在三维实体模型剖分技术以及体视化技术的基础上, 实现对沉降土方量等交互计算功能。

(6) 成果输出功能。系统能将经过模拟和预测后所生成大量的数据报表和图件进行多种形式的输出。

(7) Web发布功能。系统提供两个方面的Web发布功能, 一是提供公众服务信息的查询功能, 该功能只提供最终的沉降预测和分析结果; 二是提供相关政府部门的咨询决策的功能, 该功能在沉降预测和分析的结果上, 根据一定的模型, 为政府提供水量供应分析、地面沉降预警预报分析及相关的分析功能。

(8) 系统维护功能。能够提供系统运行与安全方面的保障、数据质量检查与备份、恢复等数据维护功能。

4 系统实现中的几个关键问题

4.1 地面沉降计算模型与方法选择

自从 1936 年墨西哥的 Guevas 发表《墨西哥的地面沉降问题》以来, 地面沉降受到了国际社会的广泛关注^[7]。迄今为止, 联合国教科文组织与国际水文科学协会已分别在世界各地召开了 6 届国际地面沉降学术会议。在国内, 为了探索地面沉降的机制与防治, 也在上海和天津召开了 5 届全国性的地面沉降学术研讨会。在这些国际、国内学术研讨会的大力推动下地面沉降的成因和机制的研究有了长足的发展。目前一般认为, 地面沉降主要有 3 种类型: 内陆盆地型、冲积平原型和沿海三角洲和冲积平原型。不同类型的地面沉降所诱发的主要因素也不一致, 但总体而言, 主要有资源矿产开发、地壳活动、海平面上升、地表荷载、地下水开采和自然作用等^[8]。在众多沉降机理研究中, 对由于地下水开采所导致的地面沉降研究最多, 也最为透彻。

现有的地面沉降模拟计算中大致可以分成水流模型、土力学模型、生命旋回模型^[9]、随机介质模型^[10]、神经网络模型^[11]等, 其中水流模型可以进一步分为相关模型和准水流模型。国内所采用的水流模型都是准水流模型, 如上海和天津所采用的多层含水层系统水流模型^[12, 13]和济宁模型^[14]等。国外比较典型的水准流模型主要有 Bravo 等^[15]提出的休斯敦模型、Gambolati 等^[16]提出的拉温纳模型等。这些模型易于理解, 考虑因素相对比较多, 但是由于水流模型参数为常数, 沉降模型为线弹性模型, 水流模型和沉降模型的耦合分两步进行, 这种模型仍

难以精确刻画由弱透水层释水引起的地面沉降,不符合准三维模型的应用条件^[17]。土力学模型包含含水层变形计算和黏土层变形计算两部分。黏土层变形计算主要有太沙基固结理论、Biot 固结理论、非线性黏土性模型等。由于对土层变形的机制,尤其是次固结过程方面的研究不是很完善,给这些模型带来了先天性的缺陷,从而不能准确模拟土层的变形过程。因此,所计算的结果显然具有一定的不确定性。

对于任何一种地面沉降计算模型而言,都是在一定的地质条件下所推导出来的。对于建立城市地面沉降信息管理与预测系统而言,不可能列出所有地质条件下的地面沉降模型。也不可能设计一种通用的地面沉降模型。因而在地面沉降的成因和相关的地质条件基础上,提出或确定相似地质条件和地面沉降成因的计算模型成为整个系统计算的核心所在,也是本系统所需要解决的基本问题之一。鉴于国内大多数城市的地面沉降是由地下水抽汲而引起的,应根据各城市地质条件进行简单分类,提供具有共性特征的、比较成熟的地面沉降计算模型,如两步模型^[18]、部分耦合模型^[19]等,在此基础上,提供预留接口以备计算模型和方法的扩展。

4.2 3D GIS 支持下地面沉降模拟与数据可视化

源于二维地图计算机处理技术的二维 GIS 具有强大的二维空间数据组织能力和二维空间分析能力。但是,用二维的形式来表达三维的现实世界,其局限性是显而易见的。地面沉降数据是一种与时间紧密相联的数据,在时间维上具有不同的特征。更为准确地说,地面沉降实际上是四维数据。利用不同时间点上地面沉降的三维模拟就可以动态地反映地面沉降的变化和发展趋势,为城市建设和规划提供科学、直观的依据。

3D GIS 技术的核心在于三维空间数据模型的构建。目前三维空间数据模型有很多种,如三维栅格结构、八叉树结构 (Octree)、结构实体几何结构 (CSG)、不规则四面体结构 (TEN)、格网结构 (Grid)、面片结构 (如 TIN)、三维矢量数据结构、面向对象的数据模型等等,这些数据归纳起来可以分成 3 类:基于体元的数据模型、基于边界面的数据模型和混合数据模型^[20]。这 3 种模型数据在使用时各有优缺点。地面沉降数据具有三维空间和几何拓扑关系复杂的特点,难以用一个统一的数据模型来完整表征多边的地面沉降数据。因此,在本系统建设中采用混合数据模型以取长补短,达到从不同应用的角度描述地面沉降数据的目的。

从整体的表现形式上看,地面沉降数据具有采样的稀疏性和分布的离散性的特点,如何将这稀疏离散的数据在三维空间上进行组织和重构是实现地面沉降数据建模与可视化的基础。三维建模根据实现方法的不同可分为三维空间插值建模、几何建模和人工交互建模等几种^[21]。三维空间插值建模的方法通过有限的已知点或分区数据,根据一定的函数关系式推求任意点或分区数据,进而在三维空间内重构一个连续特征的变化^[22]。这种方法对于简单的、边界约束不明显、采样点密集、变化连续的情况有效。而地面沉降数据则在垂向上并不是连续的,显然该方法并不适用于地面沉降的建模。几何建模包括切片建模和表面建模两种。前者利用平行或基本平行的地质剖面数据建立地质体的真三维实体模型,在此基础上满足特定的要求与应用;而后者则根据 DEM 的方法对层状地质体的各个层面进行插值拟合后,按照各层属性对多层 DEM 进行交叉划分处理,从而形成空间中严格按照分层属性为要素进行划分的三维地质体的几何框架,在此基础上引入地下空间中的特殊地质现象、人工构筑物等点、线、面、体对象,完成对三维地下空间的完整剖分^[23]。人工交互建模是在一个可视化的三维建模环境中,由用户根据经验和专家知识勾画出地质实体的轮廓,在此基础上构建三维地质体的几何模型并进行其他相关分析^[20]。这种方法需要用户具有很强的专业知识背景,不适合推广。根据地面沉降数据的特点,系统采用了混合数据模型并用几何建模的方式进行建模。在文献[6, 20, 22]的基础上,笔者提出了地面沉降建模及数据可视化的基本流程,如图 3 所示。

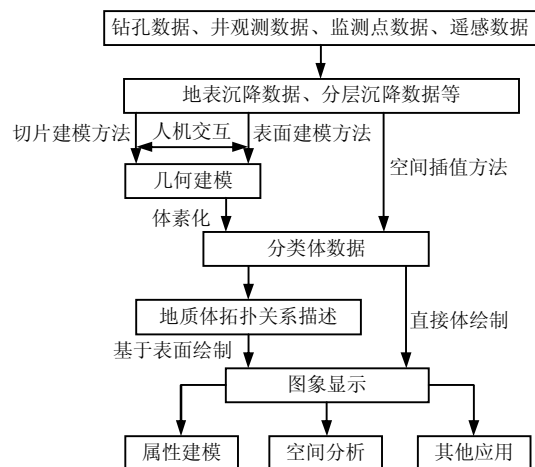


图 3 地面沉降三维建模和数据可视化流程
Fig.3 Process of 3D subsidence modeling and its volume visualization

由地下水所引起的地面沉降对象基本上是地下简单层状的各个含水层和隔水层。本系统就采用朱良峰等^[24]提出的简单层状地层的三维建模方法。该方法在多层DEM构模的基础上,改进了基于钻孔数据的“钻孔一层面模型方法”,具有算法简单、快速等特点。该方法的缺陷在于仅考虑钻孔因素对地层进行模拟,不能精确反映地层的横向展布特性。因此,可以考虑引入地质剖面、物探剖面作为建模的强约束条件,以提高模型的精度。

4.3 地面沉降信息的Web发布

城市地面沉降信息Web发布功能是实现系统社会价值的关键所在。常用的空间信息发布有3种模式:集中模式、客户机/服务器(C/S)模式和浏览器/服务器(B/S)模式。对于用于社会公众信息发布的地面沉降信息系统而言,B/S模式显然更适合于本系统的建设。B/S模式将服务器分解为数据库服务器和WebGIS应用服务器,将应用服务器作为客户端与数据库服务器的中间层^[20],这样可以很好地区分数据访问操作和应用模型,从而最大限度地减轻服务器的压力,提高网络访问效率。在具体实现方法上,系统采用ASP组件技术,该技术具有动态、高效、易于交互的特点。

基于WebGIS城市地面沉降信息Web发布系统由3个层次组成:应用服务器层、WebGIS服务器层和浏览器层。浏览器层的任务是访问WebGIS服务器中有关的ASP页面,并请求地面沉降相关的数据。WebGIS服务器层响应浏览器端所发出的请求并向应用服务器发出数据请求,利用WebGIS组件进行处理、分析、计算。应用服务器层在完成数据的定义、存储、检索、完整性约束以及有关的数据库管理工作的同时,响应WebGIS服务器的数据请求,这样的设计遵循了GIS理论和GIS标准构造,为政府决策和公众获取地面沉降的相关信息提供了一种快速、廉价的方式。该层次结构体系具有可定制、易扩展、网络性能高、数据安全等特点。

5 结 语

城市地面沉降信息管理与预测系统作为“数字城市”的一个基础部分,无疑在整个城市数字化建设中起到重要作用。鉴于现有技术缺乏对三维地面沉降数据进行有效的三维建模和可视化表达功能,本文在现有3DGIS技术的基础上,详细讨论了基于GIS的地面沉降信息管理与预测系统的设计思路和功能、体系结构,针对地面沉降数据本身的特点,提出了地面沉降模拟的计算模型、地面沉降数据三

维建模和数据可视化以及地面沉降信息Web发布等难题的解决方案,为系统终极目标的实现提供了完整的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 刘玉海. 21世纪中国沿海城市面临的主要地质灾害问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增刊): 121—126.
LIU Yu-hai. Main geological hazards confronting the coastal cities of China in the twenty first century[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(Supp.): 121—126.
- [2] 王丽瑛, 李秀玲, 陈文杰, 等. 天津市滨海新区地面沉降数据库[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 137—143.
WANG Li-ying, LI Xiu-lin, CHEN Wen-jie, et al. Land subsidence database in Binhai area of Tianjin city[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(2): 137—143.
- [3] 陆衍, 李勤奋, 过仲阳, 等. 上海地面沉降自动监测及信息系统[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2002, 12(4): 63—38.
LU Yan, LI Qin-fen, GUO Zhong-yang, et al. Automatic measurement of Shanghai subsidence and information system[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2002, 12(4): 63—68.
- [4] 张周平, 吴创奇. 城市地面沉降与地下水动态监测信息管理系统建立与研究[J]. 四川测绘, 2003, 26(4): 166—169.
ZHANG Zhou-ping, WU Chuang-qi. Studying and establishing the information analysis system about the land-surface subsidence and dynamic monitoring of groundwater[J]. *Surveying and Mapping of Sichuan*, 2003, 26(4): 166—169.
- [5] 吴信才. 地理信息系统的基本技术与发展动态[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1998, 23(4): 329—333.
WU Xin-cai. Basic technology and development of geographic information system[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1998, 23(4): 329—333.
- [6] WU QIANG, XU HUA, ZOU XUKAI. An effective method for 3-D geological modeling with multi-source data integration[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, 31(1): 35—43.
- [7] 阎世骏, 刘长礼. 城市地面沉降研究现状与展望[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 93—97.
YAN Shi-jun, LIU Chang-li. Status and prospect of urban

- land subsidence[J]. **Earth Science Frontiers**, 1996, 3(1): 93—97.
- [8] 郑铎鑫, 武强, 侯艳声, 等. 城市地面沉降研究进展及其发展趋势[J]. 地质评论, 2002, 48(6): 612—618.
ZHENG Xian-xin, WU Qiang, HOU Yan-sheng, et al. Advances and trends in research on urban land subsidence[J]. **Geological Review**, 2002, 48(6): 612—618.
- [9] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 322—325.
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during the complete process of construction and operation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 322—325.
- [10] 阳军生, 刘宝琛. 抽水地面沉降预计的随机介质模型[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5): 11—13.
YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. A stochastic medium model for prediction of ground subsidence due to water drawing[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1999, 26(5): 11—13.
- [11] 金爱善. 采用神经网络模型对天津滨海新区地面沉降预测的研究[J]. 现代地质, 14(4): 475—478.
JIN Ai-shan. Prediction of land subsidence in the new coastal region of Tianjin with artificial neural network model[J]. **Geoscience**, 14(4): 475—478.
- [12] 陈崇希, 裴顺平. 地下水开采-地面沉降模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(2): 5—8.
CHEN Chong-xi, PEI Shun-ping. Research on groundwater exploitation-land subsidence model[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2001, 28(2): 5—8.
- [13] 李勤奋, 方正, 王寒梅. 上海市地下水可开采量模型计算及预测[J]. 上海地质, 2000, 74(2): 36—43.
LI Qin-fen, FANG Zheng, WANG Han-mei. A mathematical model and forecast of groundwater workable reserves for Shanghai[J]. **Shanghai Geology**, 2000, 74(2): 36—43.
- [14] 魏加华, 崔亚莉, 邵景力, 等. 济宁市地下水与地面沉降三维有限元模拟[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 376—380.
WEI Jia-hua, CUI Ya-li, SHAO Jing-li, et al. 3D-finite element method simulation of groundwater and land subsidence in Jining city[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2000, 30(4): 376—380.
- [15] BRAVO R, ROGERS J R, CLEVELAND T G. A new three dimensional finite difference model of groundwater flow and land subsidence in the Houston area[C]// Johnson A I, ed. Land Subsidence, Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence. Houston: IAHS Press, 1991: 15—26.
- [16] GAMBOLATI G, RICCI G, BERTONI W, et al. Numerical analysis of land subsidence at Ravenna due to water withdrawal and gas removal[C]//Johnson A I, ed. Land Subsidence, Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence. Houston: IAHS Press, 1991: 199—128.
- [17] 薛禹群. 我国地面沉降模拟现状及需要解决的问题[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(1): 1—5.
XUE Yu-qun. Present status of modeling land subsidence in China and problems to be solved[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2003, 30(1): 1—5.
- [18] 崔小东. Modflow 和 IDP 在天津地面沉降数值计算中的应用与开发[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 122—128.
CUI Xiao-dong. Application and development of modflow and IDP in digital calculation of land subsidence in Tianjin[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1998, 9(2): 122—128.
- [19] 冉启全, 顾小芸. 考虑流变特性的流固耦合地面沉降计算模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 99—103.
RAN Qi-quan, GU Xiao-yun. A Coupled model for land subsidence computation with consideration of rheological property[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1998, 9(2): 99—103.
- [20] 朱良峰, 吴信才, 刘修国. 城市三维地质数据管理与服务系统框架研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 69—75.
ZHU Liang-feng, WU Xin-cai, LIU Xiu-guo. Study on the framework of management and service system for urban 3D geological data[J]. **Journal of Earth Science and Environmental**, 2004, 26(1): 69—75.
- [21] JENNIFER HORSMAN. Methods of constructing a 3D geological model from scatter data[DB/OL]. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/106526-n8dHjG/webviewable/106526.PDF>, 2007.
- [22] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 271—277.
LI Pei-jun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects[J]. **Earth Science Frontiers**, 2000, 7(Supp.): 271—277.
- [23] 吴立新, 史文中, CHRISTOPHER GOLD. 3D GIS与3D GMS中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5—11.
WU Li-xin, SHI Wen-zhong, CHRISTOPHER GOLD. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. **Geography and Geo-Information Science**, 2003, 19(1): 5—11.
- [24] 朱良峰. 基于 GIS 的三维地质建模及可视化系统关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.