

**The Spatial Information System
in Hydrogeology**

水文地质

空间信息系统

——设计·开发·应用

◎ 孔金玲 王文科 著



陕西科学技术出版社

责任编辑 屈马龙
封面设计 党菲

水文地质 空间信息系统

设计·开发·应用

The Spatial Information System
in Hydrogeology



11010.....
001010100101.....
11001.....

11010.....
001010100101.....
11001.....
10101101010110.....

ISBN 7-5369-4015-7



9 787536 940154 >

ISBN 7-5369-4015-7/P · 78

定价: 25.00元

水 文 地 质

空 间 信 息 系 统

——设计·开发·应用

孔金玲 王文科 著

陕 西 科 学 技 术 出 版 社

内 容 简 介

本书系统介绍了水文地质空间信息系统的概念、构成与功能、水文地质空间数据库结构及应用模型体系结构;以 ARCGIS 8.1 为平台,开发了水文地质空间信息系统,并详细介绍了系统各功能模块的实现方法;以中国西部典型区域的水文地质实际勘查资料为基础,对系统的功能及稳定性进行了应用与验证。全书共分6章:第1章 GIS与数字水文地质学;第2章 水文地质空间信息系统结构与功能;第3章 水文地质空间数据库;第4章 水文地质空间分析模型体系;第5章 水文地质空间信息系统的实现;第6章 水文地质空间信息系统的应用。

本书可作为高等院校水文学与水资源、环境科学、地质工程、GIS专业及相关专业学生的学习用书,也可供科研机构、事业单位从事水资源管理、环境评价与保护及GIS应用工作的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文地质空间信息系统——设计·开发·应用/
孔金玲等著. —西安:陕西科学技术出版社,2005.9
ISBN 7-5369-4015-7

I. 水... II. 孔... III. 水文地质—地理信息系统
IV. P641-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111266 号

出 版 者	陕西科学技术出版社 西安北大街 131 号 邮编 710003 电话(029)87211894 传真(029)87218236 http://www.snstp.com
发 行 者	陕西科学技术出版社 电话(029)87212206 87260001
印 刷	长安大学雁塔印刷厂
规 格	787 mm × 1 092 mm 16 开本
印 张	13.125
字 数	274 千字
版 次	2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
定 价	25.00 元

版权所有 翻印必究



前 言

人类社会正从工业经济迈向知识经济时代,一场以信息技术为核心的革命正在深刻改变着人类生活与社会面貌。作为全球信息化浪潮重要组成部分的地理信息系统(GIS)的建设和应用,极大地推动了水文地质领域的信息革命,促进了数字水文地质学科的形成与发展。由于地下水资源及其相关的地质生态环境具有明显的空间分布特征,决定了GIS可以在该领域发挥重要作用。开发基于GIS的水文地质空间信息系统可以对水文地质信息进行有效管理、支持对水文地质实体进行分析、模拟与评价,以解决复杂的地下水资源评价、管理等问题,改变了传统水文地质空间分析中以纸为介质,利用单一表格、数据和单个模型分析的缺陷,提高了地下水勘查、评价与信息管理的效率和精度,为水资源合理开发利用,提供了新的技术途径。

本书基于GIS技术,以水文地质空间信息系统的研究为主题,从理论上研究基于GIS的水文地质空间信息系统的概念与总体结构、数据模型、应用模型结构体系等问题;从技术方法上研究解决水文地质数据库的建立、应用模型的实现、应用模型与GIS环境的集成、用户界面的设计与实现等问题。以此为指导,全书在系统分析、总结GIS在水文地质领域应用现状的基础上,分析和研究了基于GIS的水文地质空间信息系统的概念、构成与功能;以区域水文地质信息化与空间分析为目标,运用结构化系统设计方法,对系统可行性进行分析,研究了基于GIS的水文地质空间信息系统的研究目标、设计原则和系统总体结构;在深入研究控制地下水形成、赋存等因素的基础上,以服务于用户和空间分析模型为前提,研究了水文地质空间数据库结构、空间数据图层的划分及图元属性数据结构;从区域地下水空间分析的需要出发,研究、建立了由空间统计分析、地下水量计算与潜力分析、地下水流数值模拟和综合评价四大类模型21个模型元构成的水文地质空间分析模型结构体系;系统以ARCGIS 8.1为技术平台,开发了基于GIS技术的水文地质空间信息系统,以嵌入方式集成了水文地质空间分析模型,实现了GIS平台与分析模型的无缝集成。该系统由空间数据库管理模块、模型库管理模块、空间分析模块、数据转换模块、查询与检索模块和系统管理模块六部分构成,实现了在同一平台对地下水资源信息的存储、管理、检索、更新、再现、分析与评价等功能。运用开发的水文地质空间信息系统,以中国西部典型区域的地下水勘查资料为基础,完成了水文地质空间数据库建设、实现了水文地质空间信息的叠加分析、大气降水系列资料频谱分析及水文地质要素间的统计分析、地下水水化学成分分类与水质评价、地下水量计算和资源评价与潜力分析、数值模拟分析、地质生态环境评价等内容,取得了满意的效果。同时对系统的性能、系统分析评价的可靠性进行了验证。本书可作为水文地质相关专业人员,运用现代高新技术解决当代水文地质问题的参考书,也可作为高等院校水资源与环境专业、GIS专业及相关专业学生的学习用书。



在这里要特别说明的是本书作者近年来有幸承担了国家“973”课题——黄河流域地下水可再生性变化规律；中国地质调查局项目——河西走廊地下水勘查、塔里木盆地地下水勘查；教育部科学技术重点研究项目——天山北麓“三水”转化的动力学机制与生态效应等科研项目中水文地质信息系统的研究工作，本书的内容实际上是上述研究成果的进一步总结和深化。全书包括6章内容：第1章 GIS与数字水文地质学；第2章 水文地质空间信息系统结构与功能；第3章 水文地质空间数据库；第4章 水文地质空间分析模型体系；第5章 水文地质空间信息系统的实现；第6章 水文地质空间信息系统的应用。其中第1章由孔金玲、王文科编写；第2、3、5章由孔金玲编写；第4、6章由王文科编写。

在系统开发中，得到了长安大学环工学院的大力支持以及甘肃地调院、新疆地调院的资助和技术上的指导；陕西省测绘局给予了技术上的协助与支持；在系统开发、测试过程中，乔晓英博士、翁晓鹏博士参与部分计算的测试和验证工作，还有杨泽元博士、王雁林博士、段磊博士、杨晓婷博士在数据库建设方面参与了部分工作；麦柳妍硕士对部分算例进行了验证。另外，在资料整理、数据库建库等工作中，得到甘肃省地调院曹炳媛工程师及相关人员和同学的热情帮助，在此一并表示深深的谢意。值得指出的是，在水文地质空间信息系统研发之初，在缺乏经验且我国在该领域GIS的应用刚刚起步之时，魏余广、孙晓明、侯光才、刘方、刘斌、陈冰、邵新民等一批活跃在西北地下水研究第一线的同志们给予了启迪和大力支持，正是这些同志的鼎力相助，才使本书作者的研究得以持续和深化，他们对推动中国的水文地质信息化同样作出了积极的贡献。感谢李俊亭教授、曹玉清教授给予的关心、支持和鼓励，李老师、曹老师孜孜不倦、甘为“蜡烛”的高贵品格，深深地感染着我们、激励着我们，使我们奋发向上，不敢懈怠。谨向所有关心、帮助、支持本书编著的领导、老师、同事、同学、朋友表示由衷的感谢！

本书的研究成果得到了中国地质调查局——河西走廊地下水勘查项目（199910400107）、塔里木盆地地下水勘查项目（19991040020063）；国家重点基础研究发展规划（973）课题——黄河流域地下水可再生能力变化规律（G1999043606）；教育部科学技术研究重点项目——天山北麓平原区三水转化的动力学机制与生态效应研究（02708）和国家自然科学基金项目——河流与地下水关系演化的动力学机制与数值仿真模拟（40472131）的资助，特此向支持和关心作者研究工作的单位和个人表示衷心的感谢！

由于地下水系统的复杂性，加之GIS技术发展飞速以及我们的知识、视野有限，书中错漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2005年8月



目 录

第1章 GIS与数字水文地质	(1)
1.1 GIS与数字水文地质	(1)
1.2 GIS在水文地质领域的应用概况	(5)
1.2.1 GIS在水文地质领域的应用现状	(5)
1.2.2 存在问题	(11)
1.2.3 发展趋势	(12)
第2章 水文地质空间信息系统结构与功能	(14)
2.1 水文地质空间信息系统概念	(14)
2.1.1 信息、地理信息	(14)
2.1.2 水文地质信息	(14)
2.1.3 信息系统、地理信息系统	(15)
2.1.4 水文地质空间信息系统	(15)
2.2 系统的总体结构设计	(16)
2.2.1 系统设计的基本原则	(16)
2.2.2 系统的总体结构设计	(16)
2.3 系统的基本功能	(17)
2.3.1 空间数据的管理	(17)
2.3.2 应用模型的管理	(18)
2.3.3 空间分析	(18)
2.3.4 空间数据的查询与检索	(18)
2.3.5 空间数据的转换	(19)
2.3.6 系统管理	(19)
第3章 水文地质空间数据库	(20)
3.1 数据的标准化设计	(20)
3.1.1 引用标准和规范	(20)
3.1.2 基本术语定义	(20)
3.1.3 数据编码原则	(21)
3.1.4 数据的标准化设计	(21)
3.2 数据库结构设计	(23)
3.2.1 数据库结构	(23)
3.2.2 数据库图层的划分	(25)



3.2.3 属性数据结构	(26)
3.3 数据库的建立	(27)
3.3.1 数据的采集	(27)
3.3.2 数据格式转换	(29)
3.3.3 地图投影	(29)
3.3.4 地理数据库的建立	(29)
3.3.5 外部属性数据的连接	(30)
3.4 空间数据库建设工作流程	(31)
第4章 水文地质空间分析模型体系	(32)
4.1 模型体系结构	(32)
4.2 模型计算原理	(32)
4.2.1 空间统计分析模型	(32)
4.2.2 地下水资源量计算与分析模型	(36)
4.2.3 地下水流数值模拟模型	(42)
4.2.4 综合评价与分析模型	(45)
4.3 模型与GIS的集成模式	(47)
4.3.1 松散式集成模式	(47)
4.3.2 紧密式集成模式	(48)
4.3.3 嵌入式集成模式	(48)
第5章 水文地质空间信息系统的功能实现	(50)
5.1 系统开发平台的选择	(50)
5.1.1 开发方式的选择	(50)
5.1.2 开发平台的选择	(51)
5.2 系统开发环境	(51)
5.2.1 系统硬件配置环境	(51)
5.2.2 系统软件开发环境	(51)
5.3 系统开发工作流程	(52)
5.4 系统模块组织	(54)
5.5 系统功能实现	(55)
5.5.1 数据库管理子模块	(55)
5.5.2 查询检索子模块	(56)
5.5.3 模型管理子模块	(59)
5.5.4 空间分析子模块	(61)
5.5.5 数据转换子模块	(97)
5.5.6 系统管理子模块	(98)
第6章 水文地质空间信息系统的应用	(100)
6.1 HSIS在关中盆地地下水资源信息管理中的应用	(100)
6.1.1 空间数据库的建立	(100)



6.1.2	空间数据的查询与检索	(103)
6.1.3	空间数据的更新与维护	(103)
6.1.4	成果表达与输出	(103)
6.2	基于 HSIS 的关中盆地水文地质要素叠加分析	(104)
6.3	基于 HSIS 的河西走廊水文地质要素的统计分析	(105)
6.3.1	大气降水系列资料频谱分析与保证率计算	(105)
6.3.2	水文地质要素间统计关系	(107)
6.4	基于 HSIS 的关中盆地地下水水化学成分分类	(109)
6.5	基于 HSIS 的河西走廊黑河中游盆地地下水潜力分析	(110)
6.6	基于 HSIS 的河西走廊黑河中游盆地地下水数值模拟	(113)
6.7	基于 HSIS 的河西走廊黑河流域地质生态环境质量评价	(116)
6.7.1	评价指标与评价标准建立	(117)
6.7.2	评价单元及评价指标的确定	(118)
6.7.3	基于 HSIS 的地质生态环境质量评价及结果分析	(118)
参考文献		(122)
附录 1	水文地质空间数据库数据分类与代码	(129)
附录 2	水文地质空间数据库图层划分方案	(141)
附录 3	水文地质空间数据库图元属性数据结构	(150)



第 1 章



GIS 与数字水文地质

1.1 GIS 与数字水文地质

地理信息系统 (Geographic Information System, 简称 GIS) 是对地球空间数据进行采集、存储、查询、分析、建模和显示的计算机系统。它是集信息科学、空间科学、地球科学和计算机科学为一体的新兴边缘学科。自从 20 世纪 60 年代加拿大测量学家 R. F. Tomlinson 提出并建立世界上第一个地理信息系统, 特别是 20 世纪 90 年代以来, 地理信息系统在全球得到了空前的发展, 已经在资源环境、公路交通、军事、城市规划等领域得到广泛应用。发达国家和新兴工业化国家大多已建立了本国统一、规范和广泛共享的国家基础信息系统, 积累了相当规模的数字化专业空间信息。与此同时, 多种形式的数字化地理信息产品广泛进入市场, 带动了相关的 GIS 产业, 现已成为信息产业中一个重要的分支。特别是美国前副总统 Al. Gore 于 1998 年 1 月 31 日提出“数字地球”(The Digital Earth) 概念后, 更是将 GIS 的开发和应用在全球掀起了一个新高潮, 在 GIS 支持下的“数字国土”、“数字城市”、“数字水资源”、“数字长江”、“数字黄河”等领域的信息化工程成为国家基础设施建设的一个战略方向已逐步启动, 极大地推动了资源环境领域的技术革命, 受到越来越明显的关注。

地理信息系统的定义是由两部分组成的: 一方面, 地理信息系统是一门学科, 是研究描述、存储、分析和输出空间信息的理论和方法的交叉学科; 另一方面, 地理信息系统是一个技术系统, 是以地理空间数据库 (Geospatial Database) 为基础, 采用地理模型分析方法, 适时提供多种空间的和动态的地理信息, 为地理研究和地理决策服务的计算机技术系统。

地理信息系统 (GIS) 具有以下几个方面的特征:

(1) GIS 的物理外壳是计算机化的技术系统。该系统又有若干个相互关联的子系统构成, 如数据采集子系统、数据管理子系统、数据处理和分析子系统、可视化表达与输出子系统等。

(2) GIS 的对象是地理实体, GIS 的操作对象是地理实体的数据。所谓地理实体指的是在人们生存的地球表面附近的地理圈层 (大气圈、水圈、生物圈、岩石圈) 中可相互区分的事物和现象, 即地理空间中的事物和现象。GIS 以地理实体数据作为处理和操作的对象, 这是它区别于其他类型信息系统的根本标志, 也是其技术难点之所在。

(3) GIS 的技术优势在于它的混合数据结构和有效的数据集成、独特的地理空间分



析能力、快速的空间定位搜索和复杂的查询功能、强大的图形创造和可视化表达手段,以及地理过程的演化模拟和决策支持功能等。其中,通过地理空间分析可以产生常规方法难以获得的重要信息,实现在系统支持下的地理过程的动态模拟和决策支持,这既是 GIS 的研究核心,也是 GIS 的重要贡献。

(4) GIS 与地理学、测绘学和地学有着密切的关系。地理学是一门研究人—地关系的科学,研究自然界中的生物、物理、化学过程,以及探求人类活动与资源环境间相互协调的规律,这为 GIS 提供了有关空间分析的基本观点与方法。测绘学不但为 GIS 提供各种不同比例尺和精度的定位数据,而且其理论和算法可直接用于空间数据的变换和处理。而 GIS 引入地学界,正如美国地质学家 K. I·兰菲尔所说的“GIS 引入地学界,如同 Fortran 语言引入计算机科学界一样重要”,GIS 是以一种全新的思想和手段来解决复杂的规划、管理和地理相关问题。

GIS 起源于 20 世纪 60 年代,历经 40 多年的发展,已经取得很大成就,并广泛应用于资源管理、土地利用、环境监测、交通运输、城市规划、经济建设以及政府各职能部门。随着计算机领域的面向对象技术、对象—关系数据库管理技术、组件技术、Web 技术、移动通信技术、虚拟现实技术和网络服务技术的发展,GIS 的研究与应用进入了一个新的时期,并在空间数据的管理、组件 GIS、WebGIS、移动 GIS、三维 GIS 与虚拟现实技术等方面,取得一系列重大研究成果,也使得 GIS 技术的应用领域越来越广泛、应用层面越来越丰富。目前,地理信息系统在理论和应用上都处在一个飞速发展时期,“数字中国”到“数字城市”的空间数据基础设施的建设,更进一步推动了作为其技术支撑的 GIS 的发展。GIS 的广泛应用、普及必将成为 21 世纪一个重要的特征。

作为水资源的组成部分,地下水不仅具有重要的资源属性,而且具有重要生态价值。影响地下水形成、赋存和运移的因素具有明显的空间和时间分布特征,这决定了地下水勘查过程中获得的大量数据是典型的空间型数据,具有丰富的空间内涵。传统的水文地质分析方法是以前以纸为介质(图、报告、表格)、以单个分散模型对地下水系统进行分析、评价与管理,这些分析方法极大地推动了地下水科学向定量化方向发展,但在地下水信息化与提高工作效率等方面,传统分析方法尚存在不足,主要表现在:

第一,在对地下水的研究过程中,模型的应用是分散方式。多数情况下是应用某一模型或专门软件,解决某一特定的问题,缺乏对模型之间的联系即模型体系的研究,因而不能实现在同一平台上对地下水实体进行预测、模拟、分析与评价等一体化研究。地下水系统是一个复杂的巨系统,对其进行因素间分析、分类、水资源评价与管理、水质以及与地下水相关的地质生态环境评价等需要建立不同模型进行分析,利用单个分散式模型,不利于实现信息资源共享、信息更新以及不同模型之间交互和对地下水进行实时动态分析,工作效率低。

第二,支持模型建立、运算的水文地质空间数据及模型运算的结果数据,缺乏用数据库技术来进行统一的存储和管理,大大降低了数据的使用效率。地下水系统受多种因素的影响,其状态(水位、水质、水温等)不断发生变化,不仅具有时域上的动态特征,而且具有空间上的变异特性,这些变化特征记录了地下水系统受激励后的响应,是支持分析者和模型对地下水系统分析的依据。大量时空变化数据,迫切需要建立与空间实体和空间关



系联系的水文地质空间数据库,对各种数据进行存储、管理和更新。虽然一般的数据库管理系统也能对数据进行管理,但缺乏对空间实体的定义能力和缺乏基于空间关系的查询功能,使得对地下水系统的分析需要借助多种专业软件才能完成。

第三,模型建立、运算所需的水文地质空间数据及模型运算结果的表达,缺乏一体化的空间信息表现手段。在运用模型分析与结果表达时,传统方法虽然也强调计算机的应用,但模型运算是基于 MS - DOS 或 UNIX 或 Windows 平台下的,模型操作只是少数有水文地质和计算机知识的人员,在模型计算结果的表达上以各种参数的等值线图 and 曲线图为主,缺乏空间信息综合表达的手段,总体上讲仅仅是数字化研究。

第四,地下水系统是一个复杂的巨系统,系统状态受多种因素的影响,利用传统方法分析研究多因素影响规律时,存在诸多不便,且缺乏多因素综合分析的复合手段和环境。因此,大大降低了信息综合利用的效率,不利于发现和挖掘信息中所包含的更深层次的知识,影响了对复杂水文地质问题的决策质量。

上述问题的存在,不利于地下水勘查资料的信息化、标准化管理和水文地质过程的系统分析与模拟,不利于地下水资源研究成果的可视化表达以及对地下水进行实时动态分析和实现信息资源共享,从而影响了地下水资源勘查、评价的可靠性和效率。因此,迫切需要建立以数据库为基础,以空间分析模型体系为支撑,集空间统计分析、地下水量计算与评价、地下水数值仿真模拟与综合评价等空间分析功能为一体的空间信息系统,以解决不同层次用户所面临的复杂的地下水系统信息管理、统计、分析、预测、模拟与评价等问题。

GIS 和 RS 等技术的出现,为地下水系统分析提供了技术支撑,为水文地质学的理论和方法注入了新的活力。GIS 与水文地质空间分析模型结合产生的水文地质空间信息分析技术的应用,导致水文地质领域分析技术与信息管理的重大变革与技术的提高。地理信息系统数据库由大量的空间数据图层及其属性数据组成,每个图层存放在逻辑上统一的、在类型上一致的空间对象,每一空间对象都有相应的属性数据。例如,一张综合水文地质图上含有含水岩组、富水性、水文地质单元、井孔注释、矿化度分区等,利用地理信息系统便可将一张复杂的综合水文地质图分成若干相对简单有序的图层,而这些图层的复合可以恢复原图或叠合成各种专题图。当对空间图形的对象操作时,属性也随之联动,既可以利用综合水文地质图上的空间对象查询它的属性,也可以依据属性检索相应的空间对象。综合水文地质图的内容可以随着用户的需求而选择其所需要的内容,使分析者可方便地将地理上既相互独立又相互联系的信息在一起加以考虑,从而对地下水的分布、发育规律和富水程度以及影响地下水赋存、运移的因素进行定性、定量、定位相结合的综合分析;另外,使用 GIS 可以方便地管理水文地质数据,既可以对空间数据进行管理,也可以对动态数据管理,有利于对地下水系统进行实时动态跟踪与分析。将水文地质数据与基础地质、地球物理、气象、水文等数据构成不同的层面进行叠合对比,可深化对水文地质条件的认识,实现对多源信息进行采集、组织、维护、直观再现、分析与实时动态管理等;再者,GIS 与水文地质空间分析模型的结合,促进了高动态水文地质空间分析决策能力的形成,实现了在同一平台上以数据库为基础,以水文地质空间分析模型为支撑的多源信息采集、查询、更新、合成以及对地下水资源与地质生态环境分析评价与管理等功能,突出了多



学科信息的叠加与综合,使水文地质条件分析、地下水资源评价和管理与实际更加吻合,提高了地下水资源分析效率和可靠性。同时以 GIS 为支撑的水文地质数据库研究,以图层信息为基础,强调了彩色水文地质图件和可视化图件研究,可为水文地质信息与模型分析结果表达提供直观、形式多样的一体化空间信息的表达方式。

正是由于 GIS 对空间数据所特有的采集、存储、管理、维护、更新、合成、直观再现、分析与查询功能,以及在地下水资源的勘查、评价过程中,又需要对相关的水文地质空间数据进行有效管理、分析与表达的技术手段。因此,GIS 在水文地质领域的应用,是水文地质学科发展的必然。其结果:一方面,GIS 在水文地质领域的应用,丰富了 GIS 的研究内容、扩大了 GIS 的应用范围、促进了 GIS 技术的发展。另一方面,GIS 技术的应用,为地下水资源的勘查、评价、管理等研究,提供了高效的空間信息的分析与显示手段,从而可以充分地挖掘水文地质空间信息所包含的空间内涵,深刻揭示地下水的赋存与运移规律,提高地下水勘查、评价的精度,指导地下水资源合理开发和利用。

基于上述,GIS 在水文地质领域的应用受到了国内外广泛关注,如美国国家环保局 (USEPA) 为了支持各种层次的水资源和水环境管理,基于 GIS 技术和美国地质调查局 (USGS) 的水文数据,开发了全美河段文件,河段文件已经历了 RF1A、RF1、RF2 和 RF3 四个版本,它们均是从 USGS 生产的不断细化的数字化水体数据集生成的。我国曾多次召开“数字地球”研讨会,科技部将“数字地球”研究列入“十五”科技攻关和“超级 863 计划”,并启动了“数字城市”等项目研究。与此同时,中国地质调查局在 2000 年启动的国土资源大调查和 2003 年启动的第二轮全国地下水资源评价,都将水文地质空间数据库建设放到重要位置。

以 GIS 为代表的“3S”技术的出现与应用,为数字水文地质学科的形成和发展提供了技术支撑。所谓“数字水文地质”就是综合运用 GIS、RS、GPS、虚拟现实 (VR)、网络和超媒体等现代高新技术,对影响地下水形成、赋存和开发利用诸因素以及社会、经济、生态环境等各种信息进行数字化采集与存储、动态监测与处理、深层融合与挖掘、综合管理与分析、计算、预测和评价、构建可视化的基础信息平台 and 三维立体模型,从而为地下水资源开发利用与生态环境保护以及各级政府主管部门对区域或流域的综合规划、设计、建设、管理和服务等提供决策支持。数字水文地质是对传统水文地质的拓宽和发展,是水文地质学学科和现代高新应用技术的深层次结合。

基于 GIS 技术建立以水文地质空间数据库为基础,以空间统计分析、地下水资源量计算与潜力分析,地下水流数值模拟与地质生态环境综合评价等模型为支撑,集空间数据管理、制图、水文地质空间分析功能为一体的水文地质空间信息系统,实现在同一平台对地下水资源信息的存储、管理、检索、更新、再现、分析与评价等功能。这不仅对水文地质传统的工作方法导致新的变革,推动水文地质领域信息革命以及 GIS 在地下水科学研究中应用的深度和广度,而且对数字水文地质学科的形成与发展,将会产生深远的影响,具有重要的理论和实际意义。



1.2 GIS 在水文地质领域的应用概况

1.2.1 GIS 在水文地质领域的应用现状

水文地质学是研究地下水的科学,对其研究涉及气象水文、地质地貌、土壤、植被、人类活动、地球物理等许多因素。为获取、储存和分析这些因素和信息,解决水文地质问题,前人采用了各种技术途径,包括钻探技术、数值模拟、同位素技术、遥感、地球物理、统计学、系统科学与控制论、计算机与信息技术等,从而使水文地质学从技术层面由普查勘探水文地质学,逐步发展为钻探水文地质学、物探水文地质学、遥感水文地质学、同位素水文地质学、地下水数值仿真模拟、水文地质统计与随机模拟、地下水系统工程学、地下水信息系统、专家系统水文地质学、制图水文地质学等分支,极大地推动了水文地质学的发展。“数字地球”创意的提出,实际上是对真实地球及其相关现象统一性的数字化重现与认识。它的核心思想是:运用 GIS、GPS、RS 等高新技术方法与手段,将地球系统的六大自然资源及其相关信息收集起来,按地球的地理坐标系统建立起信息模型,以快速、形象、准确、完整、动态地实施对六大自然资源的动态管理和地球系统物质结构动态研究,并充分发挥这些信息和数据的经济、社会和环境效益。地下水资源作为自然资源的组成部分,正在越来越多地利用信息技术来对它进行科学地开发与管理。

GIS 在水文地质领域的应用是 GIS 应用的一个重要方面,自 20 世纪 90 年代以来,GIS 在水文地质领域中得到了广泛应用,已从简单的信息管理、信息查询发展到综合信息的分析、服务与决策。GIS 的应用不仅明显提高水文地质工作效率和经济效益,而且为解决水资源环境问题及保障可持续发展提供技术支持。

从技术角度,GIS 在水文地质领域的应用,主要体现在三个方面:

(1) GIS 是水文地质空间数据管理的有效工具。主要特点是基于 GIS 建立水文地质空间数据库,实现对空间数据的存储、查询、浏览、检索、更新及输出,为不同部门、不同用户提供多目标、多层次的空间信息服务。

(2) GIS 是地下水及其环境问题综合分析的有力工具。GIS 技术已不限于简单的制图与信息查询,而是以空间数据的处理与分析为基本特征。利用 GIS 的空间分析功能对影响地下水及其环境的要素进行综合分析,可直接服务于生产实践,解决实际问题。

(3) GIS 是地下水资源及其环境规划管理的辅助决策工具。GIS 与各种专业应用模型的有机集成以及 GIS 与遥感(RS)、专家系统(ES)、决策支持系统(DSS)的结合,为地下水资源及其环境的动态分析、预测、模拟及规划管理提供技术支持,GIS 直接服务于与地下水有关的决策过程,成为辅助决策的有效工具。

从应用内容看,GIS 在水文地质领域的应用,可概括为以下方面:地下水勘查与评价、地下水信息管理、地下水模型研究、地下水管理与决策支持系统、区域地下水与水源地保护、水污染和水质评价与预警、水文地质编图。

1.2.1.1 地下水勘查与评价

近年来,国际上已将 GIS 技术成功地运用在地下水勘查与评价工作之中,尤其将 GIS 与 RS 和 GPS 技术相结合,极大地提高了地下水勘查与评价的精度和工作效率。例如,英



国赫特福德大学的 M. T. Richard 教授(1995)在加纳沃尔塔盆地应用 RS 与 GIS 技术识别地下水开采有利地带,他们利用了美国克拉克大学在联合国培训研究院支持下开发的 GIS 软件——IDRISI,对能反映与地下水赋存有关的植被、土壤、地质及地貌等特征的 TM 三个波段简单反差增强直方图进行了处理,得到了三个线性构造反差增强图像,然后利用评价体系,将从三个不同 TM 波段获取的三个线性构造图相叠加合成线性构造图,通过 RS 和 GIS 定位的场地与水井或已有的成功钻孔的位置进行了比较,结果表明用 GIS 确定的井位,有 55% 位于井或钻孔 200m 以内,而以前在此地区,利用航片解译的线性构造图进行定位的成功率仅为 13%。由此可见,通过将卫星图像处理、野外资料和 GIS 分析融合到一个整体中去,提高了找水靶区的准确率,费用低,使用简单;瑞典查默斯理工大学的 Per Sander 和美国沙漠研究所的 M. C. Matthew 及 B. M. Timothy(1996)共同在加纳沃尔塔盆地的蒂斯和恩考考地区的 10400km² 区域范围内,利用 RS 与 GIS 技术进行了地下水勘查,通过 GIS 和 GPS 技术解译了与风化带中的地下水分布情况以及与下伏导水断裂有关的植被、地形、水系以及基岩构造特征,通过与线状构造的相邻性分析,最终确定出地下水勘探靶区;南非共和国水利和林业部(DWAF)也将 GIS 和 GPS 用于本国地下水勘查控制和野外地下水钻孔定位(1994)。陈梦熊(2002)在中国地下水资源与环境一书指出:国外利用 Arc/Info 软件识别阿肯色州东部向单井供水的基本含水层,利用 Arc/Info 软件生成阿肯色东部密西西比河流域冲积含水层底板边界的空间图像,测定已知井点含水层底板深度,查明向各井供水的基本含水层是密西西比河流域冲积含水层还是深层含水层,经过判别,确定了 23500 口井,其基本含水层是冲积层,这是利用 GIS 对含水层识别极好的例子;M. V. V. Kamaraju(1996)采用 Arc/Info GIS 系统分析了印度安得拉邦西部戈达瓦里地区控制地下水的有关参数,如研究区的岩性、地貌、地质构造和补给条件,分析和利用已有的图件和资料,对地下水开发利用潜力进行了评价,绘制了一幅能反映出三个主要的,具有明显不同开发潜力的水文地质条件的图件,作为指导该地区地下水开发的基本依据;Patrick Lachassagne, R. wyls 和 P. Berard 等(2001)以 GIS 和多因素分析相结合,评价了 Truysère 河流域基岩风化壳中地下水资源潜力,考虑的因素有地貌、风化带厚度、线性构造和表层岩性等指标。国内潘世兵、王忠静、孙江涛(2001)利用 GIS 技术建立了黄河三角洲地区浅层地下水开发适宜性综合评价模型。评价模型考虑了浅层地下水补给,含水层导水性和储水性、地下水水质、土地利用以及地下水开采对环境影响等多因素,评价结果为地下水开发适宜性等级分区图,取得了满意的结果,具有重要的实用意义。

1.2.1.2 地下水信息管理

地下水资源具有时空分布不均且极易发生动态变化的特征,决定了水资源管理和调控必须以掌握准确、及时的信息为前提,必须通过分布广泛的现代化监测网并利用现代观测技术及时获取所需的水资源动态信息,以制定国家、地区和部门的用水计划。GIS 的引入,使水文地质中的信息源及其采集和管理方式焕然一新,正在引导地下水信息管理发生深刻的变化。据 1991 年对美国 200 家水质部门调查结果显示,有 1/3 以上的地表与地下水管理部门使用 GIS 管理水质数据,而且由于水质部门对水质数据共享要求提高,GIS 的使用使得数据资源共享具有很大潜力。美国地质调查局 GWRP 计划(地下水研究计划)建立国家含水层数据库,其中基于 GIS 的图集已经包含了来自不同机构的许多种类、可视



的和可下载的信息,国家含水层数据库可按国家、州和地方的不同尺度进行浏览,按主题加以组织并可处理许多不同的数据模型,数据以 Arc/Info 输出文件或 ArcView 图形文件的形式进行下载;荷兰政府自 1990 年组织开发了“区域水文地质信息系统 (REGIS); Rosensaft, M. 等(1997),建立了水文地质地理信息系统数据库,用于以色列海岸含水层的研究;Juracek, K. E., Kenny, J. F. (1993) 利用 GIS 技术将水利调查数据转换成一种特定的格式,这种格式便于使用者从水源(地表水或地下水)、利用类型以及使用者限定的范围等方面,对水利数据进行概略现场分类。我国水文地质信息化建设水平相对落后,当水资源决策和管理者,需要了解水资源信息时,则很难获得可靠的水资源调查数据和研究成果。目前我国正借鉴美国等一些发达国家的成功经验,加快我国水文地质信息管理的步伐,促进数据的传播与应用,如中国地质调查局开展的国土资源大调查项目,在河西走廊、塔里木盆地、鄂尔多斯等地区开展了基于 GIS 的水文地质空间数据库建库工作,笔者所在的课题组有幸参与了河西走廊、塔里木盆地水文地质信息系统的开发工作。与此同时,国内许多学者也致力于该领域的研究,如:陈刚等(1998)基于 ArcView GIS 软件,构建了水资源管理信息系统,以山西汾阳县水资源管理为例,系统实现了对水资源信息的采集、储存分析与表达;李新、程国栋等(2000)研究建立的黑河流域水资源信息系统,共包括 27 个图层的空间数据、40a 气候和水文序列以及部分 NOAA/AVHRR 和 TM 遥感数据,该信息系统已用于黑河流域水资源合理利用以及水文和生态基础研究中;陈佩佩、孙亚军(2000)探讨了 GIS 支持下岩溶地下水资源信息系统的开发与应用;彭盛华、赵俊琳等(2001)以 1: 100 万数字化地图数据 ArcChina 为基础,开发了具有一些初步功能的基于 GIS 技术的流域水文、水环境信息系统,并用于汉水流域水文、水环境信息的管理与分析。上述研究,极大地推动了我国水文地质信息化进程。

1.2.1.3 地下水模型研究

将 GIS 应用于地下水模型研究,主要解决三个方面问题:①地下水模型数据的前处理,包括数据储存、维护、组织和数据格式的转换等;②支持专业模型的运行,包括模型的识别、检验、模拟和预测;③运行结果的表达,包括表格、图件的生成,信息的叠加和显示。①、③实际上是 GIS 为地下水模型提供前端或后端数据处理;②实质是 GIS 为地下水模型运行提供平台。D. E. Sui 和 R. C. Maggio(1999)指出:GIS 与地下水系统分析模型集成模式有四种方式:地下水软件中嵌入 GIS 功能;GIS 中开发地下水系统分析模型;GIS 与地下水系统分析模型松散连接;GIS 与地下水系统分析模型紧密连接。美国水质工程中心利用美国 ESRI 公司推出的 Arc/Info 软件,以松散方式实现了水文模型 HEC1 和 HEC2 与 Arc/Info 的结合;Richard(1993)根据 GIS 软件提供的二次开发语言将地下水有限元分析模型以紧密方式集成到 GIS 中,并对水源地进行了评价;另外 Kunijan Shy 等(1993)应用 GIS 研制了一种自动生成有限元网格的数值模拟方法;Burrough P. A (1986)和 kaden So O. (1993)在 GIS 与地下水模型结合等方面都做了积极探索;S. J. Boyle, I. K. Tsanis 等建立的 IDOR^{2D} 系统,将水动力污染/运移模型与 GIS 集成, IDOR^{2D} GIS 分析扩展模块包括 ArcView 软件、水动力和污染运移模型以及数据输入、模型处理、运行、结果显示等功能。前处理程序主要是形成有限差分网格所需的有关参数、文件。IDOR^{2D} 允许用户随时控制模型任何参数,同时辅助添加了人工智能方法,用于某些参数的辅助确定等。模型计算结



束后,一系列的专题都导入到 ArcView GIS 视图中(魏加华,2001);Albertson, P. E. and Hennington G. W. (1996)将 FDM, FEM 与 GIS 集成,用来评价大坝蓄水前后地下水位的变化情况,并对建坝前与建坝后的数据进行了对比。与此同时,一些地下水软件供应商相继开发了具有 GIS 某些功能的地下水分析软件,或在专业软件加入 GIS 功能,或在 GIS 平台上挂接专业分析软件等,例如, River CAD、HEC_RAS2.0、River Tools、Feflow GMS、PMod-flow 等。但与专业 GIS 软件相比,还逊色不少。

国内不少学者也致力于 GIS 与地下水分析模型的集成研究,并取得了富有指导意义的研究成果。孔金玲、王文科等(2001)对基于 GIS 的渭北岩溶水空间分析系统框架进行了研究,提出了在 GIS 环境下,岩溶水分析与评价的新思路。魏加华博士(2001)采用面向对象编程语言 Delphi 和 GIS 控件 MapObjects2.0 研究开发了地下水地理信息系统,将地下水流模拟模型、BP 人工神经网络模型、模糊评价模型、回归分析模型、水质评价模型以及 Kriging 和逆距离加权插值模型等集成于 GIS 环境中,扩展了 GIS 的模型分析能力;武强等(1996)以 Arc/Info 为平台探讨了 GIS 支持下地下水模型的主要工作程序,包括建立空间数据库、建立临时数据库、建立网络专题层、按要求输入数据、识别模型、进行动态预测和制作水文地质图件七个方面,并于 2001 年出版了《基于 GIS 的地质灾害和水资源研究理论与方法》专著;江东、王建华等(1999)研究了基于 GIS 的煤矿底板突水预测模型的构建与应用,在对突水因素量化的基础上,应用 GIS 系统在矿区西部构建了底板突水模型,通过已知资料对初始模型拟合、调试和校正,确定最终突水模型,较准确地反映底板突水的基本规律;刘明柱、陈鸿汉等(2002)在考虑四种因子情况下利用 GIS 简单线性叠加模型和加权模型对区域地下水富水性的评价做了有意的尝试;马千里等(1999)将 GIS 技术引入格网生成过程,不仅能自动生成计算网格,还可以构建整体数值模拟环境,从而达到以下功能:建立概念模型;对研究区进行定义;自动生成有限单元格网并可接受不同来源数据;对格网数据进行算术操作、处理;利用 GIS 组织数据、对复杂数据集进行查询和浏览;以一定数据格式输出数据模型;显示数据模型及结果。这种以比较低廉的代价达到基本符合要求的计算可视化与过程可视化,不失为地下水数值模拟的一种好方法。上述研究在推动 GIS 与地下水模型的结合等方面起到了积极作用,实践证明 GIS 为地下水模型运行提供了高技术平台。

1.2.1.4 地下水管理与决策支持系统

水资源规划决策过程异常复杂,在空间上需要协调地区与地区之间的矛盾,在时间上需要考虑近期与长期利益冲突,此外,还要权衡部门之间的关系等。它纵贯社会、经济、环境和水文学等诸多领域,涉及不同层次不同部门的决策者,是一个典型的半结构化的多层次、多决策者和多目标的决策问题。水资源所具有的时空分布特征,在决策过程中需要空间的分析方法和技术支持。因此,建立基于 GIS 环境的决策支持系统(GDSS)是实现水资源科学管理与持续利用的技术保障。

爱尔兰国力大学都柏林学院水资源研究中心,研究开发的流域水管理决策支持系统(简称 DSS—CWM),将 GIS(Arc/Info)与流域水量模型及水质模型有机结合,通过分析和模型计算,客观详细地、直观准确地提供流域内各主要河段的水量 and 水质结果,为水管理决策提供客观依据;Michael 等探讨了水资源领域空间决策支持系统开发问题;Daene 等