

地矿勘查工作信息化的理论与方法问题

吴冲龙^{1,2}, 刘刚¹, 田宜平¹, 刘军旗¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 实现地矿勘查工作信息化的有效途径与方法是根据地矿勘查工作自身的特点, 建立以主题式地矿点源数据库(包括空间数据库和属性数据库)为基础的共用数据平台; 利用信息系统技术对地矿勘查工作主流程进行充分改造, 实现全程计算机辅助化; 进行“多S”的技术集成、网络集成、数据集成和应用集成, 同时实现勘查数据的三维可视化。为此, 需要加强地质信息科学和地矿勘查工作信息化的理论框架、技术体系和方法论研究, 重视与地矿勘查工作相适应的集成化信息技术开发。

关键词: 地学定量化; 地质信息科学; 地质信息技术; 地矿工作信息化; 地矿数据可视化。

中图分类号: P62; P228; P209

文章编号: 1000-2383(2005)03-0359-07

收稿日期: 2004-10-27

Theory and Method Problems of Informatization of Geological Surveying and Mineral Resource Exploration

WU Chong-long^{1,2}, LIU Gang¹, TIAN Yi-ping¹, LIU Jun-qi¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, China

Abstract: The effective approaches of improving the level of information technology application in geological surveying and mineral resource exploration are: (1) A common data platform should be established based on subject geological and mineral point-source resource databases (including spatial databases and attribute databases) according to the character of the work itself; (2) The main flow of geological surveying and mineral resource exploration can be rebuilt by making use of information system technology to put the computer-aided whole working flow into practice; (3) The “multi-S” system integration such as technical integration, network integration, data integration and application integration should be carried out, and meanwhile 3D visualization of exploration data can be realized. Therefore, it is important that the research into the theory framework, methodology and technological systems in consolidating data from geological surveying and mineral resource exploration should be taken seriously and enhanced.

Key words: quantification of geosciences; geological information science; geological information technology; informatization of geological surveying and mineral resource exploration; visualization of geological and mineral resource data.

我国的地矿勘查工作信息化概念是 20 世纪 80 年代中期提出来的, 地质矿产部曾作为全国性工程加以推动。自从“数字地球”被提出以来, 我国的地矿勘查工作信息化工程便因被纳入“数字中国”(徐冠华等, 1999)和“数字国土”(张洪涛, 2001)工程而加速进行了。本文拟对其中所涉及的若干理论与方法

问题做些初步探讨。

1 地矿勘查工作信息化的概念

当前, 在基础地质调查、矿产资源勘探、环境地质勘察、灾害地质勘察和工程地质勘察工作(总称为

地矿工作)中,从野外数据采集到室内数据管理、综合处理、编图、解释、评价,再到地矿工作成果的保存、管理使用和出版印刷,以及地质矿产工作的科学管理与决策等诸多方面,无一不与信息技术的应用紧密相连。地质信息技术已经渗透到地矿勘查工作的全过程,成为地矿勘查工作新技术新方法应用的主流。然而,在地矿勘查工作的各个环节应用信息技术,仅仅是地矿勘查工作信息化的开端,而非地矿勘查工作信息化的完成。

从国内外地矿工作领域信息技术的应用状况及其所带来的影响角度看,地矿勘查工作信息化是指:采用信息系统对传统的地矿勘查工作主流程进行了充分改造,实现了全程计算机辅助化,数据在各道工序间流转顺畅、充分共享。这里面包含着 3 个相互密切相关的内容:(1)建立以主题式地矿点源数据库(包括空间数据库和属性数据库)为基础的共用数据平台,力求避免系统内出现大量的数据冗余;(2)利用信息系统技术对地矿工作主流程进行充分改造,实现从野外数据采集到室内综合整理和编图,再从成果保存、管理、使用到资源评价、预测的全程计算机辅助化;(3)进行“多 S”的技术集成、网络集成、数据集成和应用集成,使各部分有机结合、相互衔接,数据在其中流转顺畅、充分共享,同时实现勘查数据的三维可视化。这 3 项既是推进地矿勘查工作信息化、建立和完善地质信息技术体系所必须进行的工作内容,也是衡量一个地矿勘查单位勘查工作信息化程度的基本标志。

2 建立主题式的共用地矿数据平台

实现地矿工作信息化的关键环节,是建立以主题式点源数据库为基础的共用数据平台。主题式点源数据库可将实现地质矿产勘查全过程数据资料采集、处理计算机化,与实现地质数据资料管理、检索计算机化、网络化这两大目标结合起来,为使国家资源信息系统具有支持政府决策和进行地质研究的双重功能提供必要保证(吴冲龙,1998a)。

2.1 建立主题式的共用地矿数据平台的必要性

地质矿产勘查工作每日每时都在获取资料和数据,特别是新一轮的基础地质、工程地质、环境地质、灾害地质和农业地质的开展,使得地质资料和数据数量急剧地增加。由于地质矿产勘查的数据资料具有反复使用、长期使用的价值,因而具有长期保存

的必要性;同时又由于获取时的代价昂贵和对于不同勘查对象、不同勘查目的和不同勘查阶段的通用性,因而具有共享的必要性。这 2 种必要性使得地矿勘查资料和数据成为国家的宝贵财富,其数据库通常被放在优先建设的地位上。欧美各国都建立了大量的地矿数据库,并且实现了联机检索或商业化服务。我国从 20 世纪 80 年代中后期开始起步,在许多工业部门建立了大量不同类型的数据库。近期,国土资源部提出了实现地质调查信息化、提高地质工作的技术含量、建立国家地学数据库和开放式的社会服务体系的总目标。中国地调局也确定了以主流程信息化建设为核心、包括地学数据库建设、信息标准建设、网络建设等内容在内的地质调查信息化工作总体框架。经过几年的努力,又建立了上万个数据库,各种数据产品正在快速产生着。我国地矿行业信息系统建设所采用的数据环境多数是应用数据库。这类数据库的显著特点是:(1)以功能处理为核心,以功能软件为基础,设计依据是某个地矿勘查单位或研究单位和某个项目的当前需求——为了存储或编制某些专用图件、解决某些专门问题、实现某些功能和处理、分析某些地质规律或编写某些勘查设计与报告;(2)各单位、各项目分散开发,缺乏统一的概念模型、数据模型、数据标准、数据代码、软件平台和接口。这些应用数据库很容易成为“信息孤岛”,所存储的信息既不完整又有冗余,许多数据资料被重复存贮、重复加工,无法实现交叉访问,不能支持未来的再开发、再提高,难以满足迅速增长的信息处理要求,更难以被纳入国家地矿信息系统网络中去。解决的途径是:采用主题数据库(subject databases)的设计思路与方法(James, 1977),不是以功能处理为核心,而是以数据管理为核心;统一概念模型和数据模型,实行术语、代码标准化;兼顾地矿行业的当前与未来需求,通过系统分析和模型设计来形成与各种业务主题相关联的数据库(吴冲龙和刘刚,2002),建立以主题式点源数据库为核心的共用数据平台。

2.2 共用地矿数据平台可采用分布式结构

地质矿产勘查数据库有 2 个并行的发展方向:一个是大型集中式方向;一个是微型分布式方向。西方诸国所建立的早期全国规模信息系统,以及我国早期建立的全国矿产储量数据库、全国 1:20 万化探数据库、全国 1:100 万和 1:20 万重力数据库、全国石油探井数据库和全国煤质数据库,基本上都是大型集中式的。大型集中式数据库都是建立在巨

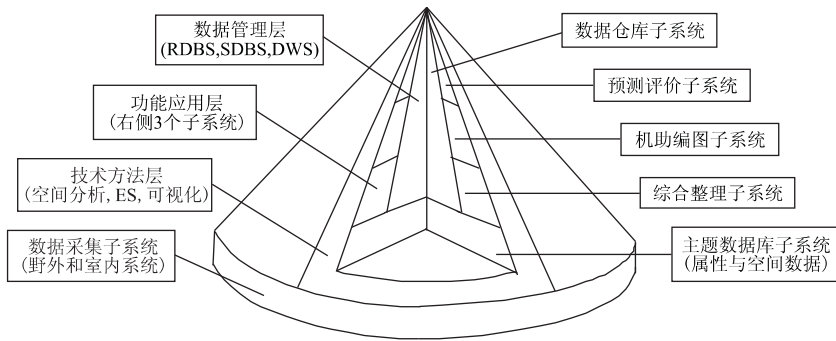


图 1 以数据管理为核心的地矿资源勘查信息系统逻辑结构

Fig. 1 Logical structure of geological and mineral resources exploration information system with the core of data management

型和大、中型机上的,其优点是便于集中管理,缺点是不便于各地使用,而且也难于组织、容纳繁多的点源数据类别和复杂的数据结构,更难于应付不断增多的日常点源信息处理需求。微型分布式数据库是指建立于基层勘查单位的各种点源数据库系统(吴冲龙等,1996;吴冲龙,1998a)。从某种意义上说,只有建立以点源数据库为核心的点源地矿信息系统,才能真正满足地矿工作信息化的需求。20世纪90年代以来,随着微型机技术的普及和提高,分布式数据库建设提上了议事日程。特别是近年来网络和网格技术的发展,使得分散于各地的点源地矿信息资源的管理、交叉访问、数据互操作及远距离传输成为可能,分布式点源地矿信息系统的价值受到普遍的认同。这显然是一个值得重视的发展方向。

我国幅员辽阔,地矿勘查数据量庞大,以主题式点源数据库为基础的共用数据平台可以分级建设和管理,按中央(部委、集团公司)、省(厅局、矿务局、石油管理局)和地区(地区国土局、地质队、大型矿山、采油厂、大专院校)三级布局;地区级共用数据平台存放除遥感信息外的所有点源数据,省级共用数据平台可存放部分综合数据和大型待开发矿床的原始数据,中央级共用数据平台可存放一些重要的综合数据和超大型待开发矿床或成矿带的原始数据。

2.3 共用地矿数据平台支撑软件亟待研发

目前,国内外许多类似的共用数据平台,例如土地管理数据平台、交通管理数据平台、管道网络数据平台和城市规划数据平台等,都是采用GIS来实现的。从本质上说,GIS是地理领域的一种通用的点源空间数据管理和处理的软件平台。值得指出的是,地理与测绘领域从步入信息化道路的起点处,就采用了GIS这种点源信息系统,随后又以GIS为平台来组建上述各种地域性或城域性的共用数据平台,这

确实是十分合理、十分正确的选择。GIS本身具有较强的二维空间数据管理、处理能力和空间分析、区域评价能力;然而,GIS目前还难以单独面对多源、多类、多维和多主题地矿数据的存贮、管理和处理,难以支持复杂地矿信息的综合分析、综合解释和复杂地质问题的综合解决。直接采用GIS来建立一个地区的专业化地矿共享数据平台,仍有许多问题难以解决。因此,研发适合于地矿勘查工作信息化的共用数据平台的支撑软件,是十分必要的。

这样的共用地矿数据平台支撑软件,即地矿点源信息系统,应该具备勘查数据采集、勘查数据管理、勘查数据处理、勘查图件编绘和地矿资源预测评价等5大功能。根据结构—功能一致性准则,该支撑软件的结构可分为内、中、外3层(图1)。内层为数据管理层,由下部的主题式对象—关系数据库子系统与上部的数据仓库组成,其职能是实现数据组织、存贮、检索、转换、分析、综合、融合、传输和交叉访问;外层是技术方法层,包括各种高功能的硬、软件平台和空间分析技术、三维可视化技术、CAD技术、人工智能技术;中层是功能应用层,由下而上分为数据综合整理、图件编绘和资源预测评价3个层次,其职能是实现系统的全部功能处理和决策支持。

3 用信息系统改造地矿工作主流程

地矿勘查工作的主要工作环节包括野外数据采集、室内综合整理和日常数据处理、勘查图件编绘、地质过程分析(计算机模拟)、地质条件或矿产资源评价、地矿数据远程传输。有了共用数据平台和地矿点源信息系统,还需要根据系统的工作原理和特点,对传统的勘查工作流程和信息处理流程进行改造、

重组和优化(吴冲龙, 1998b)。只有这样, 才能充分发挥信息技术的作用。

3.1 地矿数据的数字化采集

地矿勘查数据的数字化采集, 是地矿工作信息化的瓶颈问题。地矿勘查数据主要来源于地球物理勘探与遥感、地球化学勘探、野外地质勘测、室内岩矿分析测试和图形编绘。其中, 野外地质勘测数据的数字化采集程度较低, 野外数据采集系统与室内数据管理与处理系统集成度低, 数据采集内容的标准化、代码化和数据模式的通用性问题也有待进一步解决。特别是应当加强基于便携机的野外数据采集系统的研发, 以便集成关系数据库、GIS、RS 和 GPS, 实现野外无纸填图、立体填图和室内一次性成图(刘刚等, 2003), 彻底改变野外数据采集的落后面貌。

3.2 地矿数据的计算机处理

日常勘查数据的计算机处理主要是利用电子计算机的快速运算功能, 来实现各种数学模型的解算, 达到压制干扰、突出有用信息的目的, 并且对有效信息分析和综合。其内容包括物探方法模型的正、反演计算、化探及地质编录数据的统计分析、矿产储量的计算与统计、工程岩土力学和水力学计算、钻井(孔)设计等。此外, 还包括大量日常工作的数据换算。

随着以地矿数据多元统计分析为基础的数学地质理论与方法迅速发展(赵鹏大等, 1983; 侯景儒和黄竟先, 1990), 以及矿产资源统计预测理论和方法的完善, 已经涌现出大量的应用软件。但这些软件大多是分散开发、分散应用的, 很少有数据库和可视化技术支持, 其数据模式、应用模式和标识符都严重缺乏标准化, 需要加以清理、完善并挂接到公用地矿数据平台上。必要时应当以公用数据平台支撑软件为依托, 重新编制并按专题进行技术集成和应用集成。只有这样, 日常勘查数据的计算机处理才有可能真正地进入地矿勘查工作的主流程。

3.3 地矿图件的计算机辅助编绘

应用计算机图形技术来编制地矿图件, 既能保证质量、减少编图、制图和修编的工序和时间, 还有利于图形的存贮、保管和使用, 保证实现图形数据共享(刘刚等, 2002)。国内外在这方面都进行了许多探讨和研发并取得了重要进展, 所涌现出来的应用软件已经进入了地矿勘查工作的主流程。目前存在的主要问题是地矿信息提取、转换和成图的自动化程度仍然较低, 特别是彩色地形地质图的编绘, 主要还是依靠人工地质图件机助编制; 其次是复杂地质结

构的二维和三维表现力有限, 复杂图件的编绘过程仍然十分繁琐, 可供灵活调用的标准图例、花纹和色标缺乏。地矿图件的计算机辅助编绘技术的发展方向, 一是以公用数据平台支撑软件为依托, 提高地矿图件编绘的数据库支持程度; 二是与 GIS、RS、GPS 技术相结合, 提高地矿信息提取、转换和成图的自动化程度(Reddy *et al.*, 1990); 三是与三维图示技术结合, 实现地质数据资料的立体表现(Williams, 1996); 四是采用参数化方式(刘刚等, 2001), 并与人工智能方式相结合, 提高人机交互能力和工作效率。

3.4 地质成矿过程计算机模拟

地质成矿过程计算机模拟也称为地质过程数学模拟或地质过程定量分析, 它是近 20 年来在计算机地质应用领域里迅速发展着的一种仿真技术。地质工作者可以将概念模型及其相应的方法模型看作实验工具, 通过改变各种条件和参数来观察它的反应, 从而定量地揭示各种地质事件中影响因素的相互关系, 以及变化趋势和可能结果(Harbaugh and Bonham-Carter, 1980)。

当前发展得最为迅猛的领域是石油天然气勘查领域的盆地模拟、油气成藏动力学模拟和油藏模拟, 其已经进入了资源预测评价的实际应用阶段。所存在的主要问题是实现油气系统分析的信息化与定量化、缺乏油气成藏作用所依存物质空间的三维再造、未能顾及各地质作用之间的控制和反馈控制关系、难以描述油气运移聚集的非线性过程(吴冲龙等, 2001)。针对这些问题, 可采用系统工程学的理论与方法, 将动力学模拟与拓扑结构模拟结合起来, 用拓扑结构模拟客观再造油气生排运聚散过程的物质空间; 将常规动力学模拟与系统动力学模拟结合起来, 用系统动力学模拟描述油气系统整体的非线性过程; 将数值模拟与人工智能模拟结合起来, 用人工智能模拟解决油气运聚过程的局部非线性问题(吴冲龙等, 1993)。其他领域的地质过程数学模拟虽然也取得了很大进展, 但基本上停留在理论探讨和简单的过程再造, 还难以进入地矿勘查工作的主流程。

地质过程数学模拟的一个发展方向是与数据可视化技术相结合。数据可视化技术是一种“将解译图像数据输入计算机, 以及从复杂多维数据集生成图像”的工具, 包括科学计算可视化、分析可视化、过程可视化、结果可视化和决策可视化(李俊, 2001)。地质体、地质现象和地质作用都不同程度地存在着参数信息不完全、结构信息不完全、关系信息不完全和

演化信息不完全的情况,对这种不良结构化或半结构化问题进行定量化描述十分困难,借助三维动态可视化技术可以提供新的洞察力,启迪思路,有助于直观地感知和了解地质体、地质现象和地质过程。

3.5 地矿资源的人工智能评价

资源预测评价专家系统是一种计算机程序,它由“知识库”和“推理机”²部分组成。在知识库内凝聚有相当数量的权威性知识,并能根据用户提供的信息,运用所存储的专家知识,通过推理机以专家水平或接近专家的水平来解决特定领域中的实际问题。地质学由于学科本身的特点,一直是专家系统应用研究的活跃领域。许多复杂地质问题的解释和处理,在很大程度上依赖专家的知识 and 经验。专家系统可以充分发挥专家作用,使得一般地质人员能像专家那样工作,从而提高找矿和勘探效果。在固体矿产资源评价和油气资源勘探评价方面,已经涌现出一批有实用价值的软件系统;但为了解决复杂的组合优化和多目标决策问题,例如,地矿勘查、开发和管理中的技术方法和手段组合优化决策、最优勘探方案的选择、资源配置与合理利用、勘查投资结构优化及投资风险评估决策等,地质领域的专家系统(ES)需要与人工神经网络技术(ANN—artificial neural network)相结合。而为了使 ANN 具有求解不确定性、模糊性和随机性问题的能力,并解决地质矿产资源预测评价领域中的复杂空间分析问题,有必要把模糊数学、数理统计、拓扑几何等方法结合到 ANN 的学习规则中来,并且将 ES 和 ANN 与 GIS 及可视化技术结合起来。此外,将资源预测评价专家系统置于共用地矿数据平台之上,也是使之进入地矿勘查工作流程的必由之路。

3.6 地矿数据数字化传输

地矿数据数字化传输既包括将野外采集的数据向室内数据处理中心传输,也包括在室内进行远程数据查询、交换和互操作。地矿信息数字化传输主要是通过数字通讯网络来实现的。国家信息高速公路和通讯网络建设的加速进行,将使地矿数据的远程共享和综合应用成为现实。这里需要着重解决多源异构数据和海量空间数据的传输问题。

海量空间数据的传播不同于一般的事务管理和商务管理,需要研发专门技术并建立国家空间数据基础设施。国家空间数据基础设施包括:空间数据协调、管理与分发体系和机构,空间数据交换网站,空间数据交换标准以及数字地球空间数据框架。我国

的信息基础设施(China NII,即中国信息高速公路)已于 1994 年启动,并根据国情以“金桥工程”为起步工程,实现了全国联网及国际联网。我国的空间数据交换格式标准也已经制定,且完成了全国 1:100 万、1:25 万和 1:5 万基础空间数据库的建设,目前正在启动各省市 1:1 万数字地球空间数据框架的建设,为开展空间信息远程传输与共享打下了良好基础。地矿空间信息的远程传输,只有利用国家空间数据基础设施才有可能实现。为此,需要研究和开发专门的系统集成技术和数据集成技术。

3.7 地矿勘查工作流程的改造

勘查工作流程和信息处理流程的改造、优化程度,是衡量信息化水平高低的重要标志。在地矿勘查工作各环节都采用了地质信息技术的条件下,全部勘查工作及其信息处理都可以纳入一个完整的机助作业流水线中,即实现从野外数据采集到室内综合整理和编图,再从成果保存、管理、使用到资源评价、预测的全程计算机辅助化。地矿勘查工作流程的改造和优化,最好是与点源信息系统建设同时进行并一步到位,也可以分 2 步走:首先在地矿勘查工作的各个环节实现信息技术集成化(低级别集成)应用,并且对各个环节的工作内容和方式进行改造、优化;然后将各环节的信息技术进一步集成(高级别集成)在共用地矿数据平台上,采用点源信息系统对地矿工作主流程进行整体改造和优化。

4 实现地质信息技术的集成化

为了最大限度地发挥各种信息技术的作用,需要实现集成化。其原则和出发点是:使各部分有机地组成一个整体,每个元素都要服从整体,追求整体最优,而不是每个元素最优;各个信息处理环节相互衔接,数据在其间流转顺畅,能够充分共享。系统有了这样的整体性,即使在系统中每个元素并不十分完善,通过综合与协调,仍然能使整体系统达到较完美的程度。

从地矿信息系统实现的逻辑结构看,系统集成的内容包括:技术集成、网络集成、数据集成和应用集成。系统技术集成是指将系统建设中使用的多种技术或技术系统有机地结合起来,共同实现某项功能要求。系统网络集成是指通过现代化的网络技术(包括硬件和软件)将地理上呈分布状态的各子系统或功能模块连接起来,达到信息共享和增强系统功

能的目的. 系统数据集成则指通过一定的技术方法将系统的各类数据或信息连接起来进行提取和处理. 系统应用集成是指将各子系统或功能模块通过先进的技术方法连接组合或相互作用, 实现系统的功能集成和操作集成. 分布式地矿点源信息系统的研发, 是上述四方面集成的结果.

在测绘、交通和土地管理部门, 为了保证数据源并补充功能的不足, 通常采用以 GIS 为核心的“3S (GIS、RS、GPS)” (李德仁, 1997) 和“5S (GIS、RS、GPS、DPS、ES)” 结合与集成技术 (李德仁, 1995). 由于上述部门所需管理和处理的主要是地表空间数据, 以 GIS 为核心的上述“3S” 或“5S” 结合与集成, 足以支撑日常工作, 而地矿勘查所要管理和处理的不但有地表空间数据, 更主要的是地下空间数据和属性数据. 这些数据将随着地矿勘查工作的进行而逐渐积累, 并且会经常被目的不同的用户同时使用, 所以应该考虑关系式数据库 (RDBS) 和空间数据库 (SDBS 或 GIS) 的集成, 还要考虑构建用于数据分析和资源预测、评价的模型库、方法库、数据仓库与数据银行, 甚至实现地下结构三维可视化. 因此, 地质信息技术体系应当考虑“多 S (DBS、GIS、RS、GPS 和 ES 等)” 结合与集成, 应当成为一种以共用地矿数据平台为基础的综合性技术系统.

5 几点认识

地矿勘查工作信息化是地矿勘查技术与信息技术结合的必然结果, 代表了新世纪地矿勘查科学技术的发展趋势; 同时, 也表明一个新兴的边缘学科——地质信息科学已经初露端倪. 地质信息科学的技术体系是在借鉴和引进遥感技术、数据库技术、计算机辅助设计技术和地理信息系统技术的基础上发展起来的; 但至今还没有形成一个如同“GIS” 和“3S 集成” 对于地理信息科学那样完整的技术体系和方法论体系, 多数地质信息技术的应用仍然是孤立和分散的. 究其原因, 一方面是地质信息及其处理本身极端复杂, 需要有“多 S” 结合与集成; 另一方面是缺乏专门的技术体系和方法论体系研究. 近几年随着“数字地球” 概念的提出, 各国政府和地矿部门纷纷把地矿勘查工作信息化构想付诸实施, 大大地促进了地质信息技术的发展.

地矿勘查工作信息化既是实现“数字地调”、“数字勘查”、“数字勘察” 和“数字国土” 的基础 (吴冲龙

和刘刚, 2002), 也是地质学定量化 (赵鹏大和孟宪国, 1992) 的基础. 为了快速推进地矿勘查工作信息化和地质学定量化, 应当重视并加强地质信息科学和地矿勘查工作信息化的理论框架、技术体系和方法论研究, 同时还应加强各种集成化的技术开发.

References

- Harbaugh, J. W., Bonham-Carter, G., 1980. Computer simulation in geology. Wiley-Interscience, New York.
- Hou, J. R., Huang, J. X., 1990. Theory and methods of geological statistics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- James, M., 1977. Computer database organization. Second Edition. Prentice Hall PTR, NJ, USA.
- Li, D. R., 1995. Discussion on combination of globe positioning system (GPS), digital photograph system (DPS), remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and expert system (ES). In: Du, D. S., ed., Integration and application of GPS, RS, GIS. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, Wuhan, 200—209 (in Chinese).
- Li, D. R., 1997. Discussion on definition of integration of GPS, RS and GIS. *Journal of Remote Sensing*, 1(1): 64—68 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., 2001. Research on visualization of GIS decision support; [Dissertation]. Wuhan University, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Han, Z. J., Luo, Y. J., et al., 2001. Research into application framework of parametric design method of computer-aided map generation in resources exploration information system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 197—200 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Wang, X. Q., Li, W. Z., et al., 2002. The structure analysis and development strategy of resources exploration map computer-aided design system. *Geology and Prospecting*, 38(4): 60—63 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Wu, C. L., Wang, X. Q., 2003. Research progress of field working system of computer-aided regional geological survey. *Advance in Earth Sciences*, 18(1): 77—84 (in Chinese with English abstract).
- Reddy, R. K. T., Bonham-Carter, G. F., Wright, D. F., 1990. GIS for mapping and assessing mineral resource potential; an application to base-metal resource evaluation in Manitoba. In: GIS for the 1990s, National Conference,

- Canadian Institute of Surveying and Mapping, Canada, 384—400.
- Williams, F. N., 1996. Three-dimensional subsurface characterization using geoscientific information systems in the Springfield-Harrison 1 : 250 000 map quadrangles, Missouri and Arkansas. Golden, CO, United States, 200.
- Wu, C. L., Zhang, H. N., Zhou, J. Y., 1993. The system viewpoint and methodology of basin modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 18(6): 741—747 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Wang, X. Q., Liu, G., et al., 1996. Geological and mineral resources point-source information system: Design principle and applications. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wu, C. L., 1998a. Development and applications of geological and mineral resources point-source information system (GMPIS). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 193—198 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., 1998b. Computing technology in the field of geology and mineral resources. *Earth Science Frontiers*, 5(2): 343—355 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Wang, X. P., Mao, X. P., et al., 2001. Petroleum pool-formation 3-D dynamics modeling and its soft development. *Petroleum Geology and Experiment*, 23(3): 301—311 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Liu, G., 2002. Discussion on methodology of “digital land and resources of China” project. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 605—609 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. H., Sun, S., Chen, Y. T., et al., 1999. Meeting the challenge of “digital Earth”. *Journal of Remote Sensing*, 3(2): 85—89 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. T., 2001. Serving national aim and incarnating innovation of science and technology. *Geology in China*, 28(1): 4—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Li, Z. J., Hu, W. L., 1983. Statistical prediction of deposits. Geological Publishing House, Beijing, 10—12 (in Chinese).
- Zhao, P. D., Meng, X. G., 1992. Quantification problems of geology. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(Suppl.): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 侯景儒, 黄竟先, 1990. 地质统计学的理论与方法. 北京: 地质出版社.
- 李德仁, 1995. 论全球定位系统(GPS)、数字摄影测量系统(DPS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和专家系统(ES)的结合. 见: 杜道生编, GPS、RS、GIS的集成与应用. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 200—209.
- 李德仁, 1997. 论GPS、RS与GIS集成的定义. 遥感学报, 1(1): 64—68.
- 李俊, 2001. GIS决策支持可视化的研究[博士学位论文]. 武汉: 武汉大学.
- 刘刚, 韩志军, 罗映娟, 等, 2001. 资源勘查信息系统中参数化图形设计方法的应用框架研究. 地球科学——中国地质大学学报, 26(2): 197—200.
- 刘刚, 汪新庆, 李伟忠, 等, 2002. 资源勘查图件计算机辅助编绘系统的结构分析与开发策略研究. 地质与勘探, 38(4): 60—63.
- 刘刚, 吴冲龙, 汪新庆, 2003. 计算机辅助区域地质调查野外工作系统研究进展. 地球科学进展, 18(1): 77—84.
- 吴冲龙, 张洪年, 周江羽, 1993. 盆地模拟的系统观与方法论. 地球科学——中国地质大学学报, 18(6): 741—747.
- 吴冲龙, 汪新庆, 刘刚, 等, 1996. 地质矿产点源信息系统设计原理与应用. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 吴冲龙, 1998a. 地质矿产点源信息系统的开发与应用. 地球科学——中国地质大学学报, 23(2): 193—198.
- 吴冲龙, 1998b. 计算机技术与地矿工作信息化. 地学前缘, 5(2): 343—355.
- 吴冲龙, 王燮培, 毛小平, 等, 2001. 三维油气成藏动力学建模与软件开发. 石油实验地质, 23(3): 301—311.
- 吴冲龙, 刘刚, 2002. 中国“数字国土”工程的方法论研究. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 605—609.
- 徐冠华, 孙枢, 陈运泰, 等, 1999. 迎接数字地球的挑战. 遥感学报, 3(2): 85—89.
- 张洪涛, 2001. 服务国家目标, 体现科技创新. 中国地质, 28(1): 4—8.
- 赵鹏大, 李紫金, 胡旺亮, 1983. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社, 10—12.
- 赵鹏大, 孟宪国, 1992. 地质学的量化问题. 地球科学——中国地质大学学报, 17(增刊): 51—56.