

GIS 中的空间建模器技术及其在全国 矿产资源潜力预测中的应用

成秋明^{1,2}, 刘江涛¹, 张生元³, 夏庆霖¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074, 北京 100083
2. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系, 加拿大多伦多 M3J1P3
3. 石家庄经济学院资源与环境工程研究所, 河北石家庄 050031

摘要: 在 GIS 技术环境下开展资源定量评价, 实现资源评价工作的自动化、数字化、智能化是矿产资源勘查与预测的重要发展趋势. 为了给地质勘查与预测人员、定量建模人员、GIS 分析与操作人员提供共同研究和技术讨论平台, 提出了在矿产资源预测全过程使用的建模技术. 介绍了建模技术的基本概念、空间模型建立、图形建模技术以及建模技术在矿产资源定量预测中的应用, 介绍了 GeoDAS GIS 中的建模技术基本功能以及建模技术在空间对象相关分析、证据(信息)图层提取、不规则地质单元划分、预测后验概率绘制等矿产资源预测工作中的应用实例. 应用结果表明, 建模技术为地质预测人员、定量建模人员、GIS 操作人员开展综合研究和空间决策提供了公共的平台, 有助于实现模型的共享和操作过程的自动化.

关键词: 建模; 空间信息系统; 矿产资源评价; 矿床预测.

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0338-09

收稿日期: 2008-12-05

Application of GIS-Model Builder Technology for National Mineral Resource Assessment

CHENG Qiu-ming^{1,2}, LIU Jiang-tao¹, ZHANG Sheng-yuan³, XIA Qing-lin¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Beijing 100083, China
2. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada
3. Institute of Natural Resource and Environment Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Mineral resources quantitative assessment involves processes of constructing models of various types from conceptual model, logical model, and mathematical model to GIS model etc.. Large project like the national project for mineral resource potential assessment currently under operation by the Chinese Ministry of Land and Resources also involves interdisciplinary research teams specialized in geology, mineral deposits, mathematical model and GIS operation etc.. It is essential to provide a common platform for these people to exchange ideas and make collective decisions on constructing geological concept models and quantitative models and on GIS procedures for model implementation with actual data input and output. This paper proposes a model builder technology to serve the above purpose. Sophisticated functions such as model iteration and user-machine interaction are developed and implemented in GeoDAS GIS. Case studies of information extraction, spatial analysis, prediction unit delineation and posterior probability mapping involved in gold mineral deposit prediction in Nova Scotia, Canada are covered to illustrate how model builder technology can be used in the whole processes of mineral resource assessment.

Key words: modeling; geographic information system; mineral resource assessment; mineral deposit prediction.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No. 40525009); 国家自然科学基金重点项目(No. 40638041); 国家 863 项目(No. 2006AA06Z115); 教育部创新团队基金(No. IRT0755); 地质调查项目(No. 121201063390110); 云南锡业集团省校合作项目; 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.

作者简介: 成秋明(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 国际数学地球科学协会最高奖——克伦宾奖章获得者, 主要从事矿产普查与勘探、数学地质、地理信息系统以及矿产资源评价的教学和研究. E-mail: qiuming@cug.edu.cn

20 世纪空间信息处理技术特别是地理信息系统(简称 GIS)的兴起对地学的发展产生了重大影响。GIS 的重要作用不仅在于其空间海量数据的管理能力,更重要的是智能化的空间信息提取和信息综合功能。它能快速地处理海量空间数据,获取空间信息,解决复杂地学问题。基于多元信息和信息综合技术的矿产资源定量评价与成矿预测是近年来矿产资源勘查领域的快速发展方向之一,也是理论—信息找矿的重要途径之一。矿产资源定量化预测和评价的方法很多。作为矿产资源定量评价和成矿预测的最常用方法之一,矿床模型法被国内外学者广泛应用,尤其是对于研究程度相对较高的地区,通过对已发现矿床的研究,建立矿床模型,确定矿床预测要素,并在已知矿区进一步找矿和对未知区寻找类似的矿产类型,预测未发现矿床的分布位置、未发现矿床个数、资源量和资源总量等。矿床模型法在我国也得到了广泛应用,早在 20 世纪 80 年代初,我国科技人员就采用国际地科联推荐的 6 种矿产预测方法开展了全国 4 种矿种的资源总量预测(赵鹏大等, 1983;王世称等, 1989;赵鹏大, 2001),之后矿产资源定量化预测和评价工作就成为数学地质、地学信息、矿产勘查领域广泛研究的内容。资源定量化预测内容在国家和部门多个研究专项中得到了应用,比如国家科技支撑计划关于矿产资源的大部分项目中都涉及到空间信息的获取、信息综合、模型建立、异常圈定、靶区优选等工作。再比如近两年国家基础研究 973 项目矿产资源领域也有关于成矿规律和矿产资源信息化研究的内容。这些内容都是近些年来数学地球科学与地学信息领域研究较多的内容。在历届的国际数学地球科学和地学信息年会上都有关于矿产资源评价、预测模型和空间信息技术等方面的分会和议题,在历届的国际地质大会上也有相应的议题。国际数学地球科学协会(IAMG)主办的 3 个国际杂志《数学地球科学》、《计算机与地球科学》、《自然资源研究》也有大量关于 GIS 应用于矿产资源研究和预测评价方面的成果。

我国科学家在多年开展空间地学信息应用于矿产调查与资源勘查与评价过程中,不仅在全国许多成矿区带取得了实际应用成果,同时培养了一大批年轻的研究人员,在矿产预测和评价理论、方法、模型、技术、应用实践上都取得了一定进展。最近,国土资源部又启动了全国矿产资源潜力预测与评价项目,在全国开展多矿种的矿产资源潜力定量化预测与评价(叶天竺等, 2007)。笔者在承担该项目中“全

国矿产资源潜力预测与评价新方法”工作项目的研究过程中,提出了适合该矿产资源项目的许多创新建议,本文所要介绍的就是其中的一项方法成果。由于矿产资源预测和评价工作是一项综合性、交叉性较强的工作,不仅涉及基础地质学、矿床地质学、数学地球科学,而且涉及地球化学、地球物理学、遥感地质学、地学信息学和计算技术等多学科交叉和融合。此外,开展全国性矿产资源预测又是一项需要很强的协调性和统一性的系统工程,涉及大量地质矿产研究人员、定量化建模人员、GIS 分析和操作人员等参与和配合。如何从组织上、方法上、技术上保证项目的合理实施和预测结果的质量是项目成败的关键。笔者通过方法和技术的创新提出在矿产资源全过程使用建模技术,这样尽可能保证项目的可行性、操作性、统一性,特别是在关键环节上都要使地质人员、定量化建模人员、GIS 分析和操作人员有共同的研究和讨论平台,从而使大家对预测工作的许多关键环节达成共识,比如预测要素的确定和预测要素向预测图层的转换等都要使矿床研究人员与定量化建模人员以及 GIS 分析和操作人员参与并了解处理过程和分析结果,以便保证预测结果的精度和结果的可解释性。为了说明建模技术的必要性和重要性,本文采用矿产资源定量化预测的最常用方法——证据权法为例,介绍在矿产预测整个过程中如何采用建模技术和如何提高模型应用效率以及预测流程的可操作性。当然,本文介绍的 GIS 建模技术不仅可以用于矿产资源评价,同时可以用于 GIS 的整个数据处理和分析过程中。该技术首先在国际通用的 GeoDAS GIS 软件中使用(Cheng, 2000),证明了该技术的可行性和有效性,相信该技术会很快被广泛应用于其他 GIS 技术中。

在矿产资源勘查和评价中,证据权方法发挥了重要作用。证据权方法是一种人工智能方法,最初应用在没有空间意义的医学诊断上。早在 20 世纪 80 年代,加拿大 Agterberg 和 Bonham-Carter 等数学地质学家对此方法进行了修改和发展,将其应用于矿产预测,将不同地质现象作为“症状”,矿床预测作为“诊断结果”(Agterberg, 1989; Bonham-Carter, 1994)。近年来许多学者在矿产资源评价和环境评价中都应用了该方法。更多关于证据权方法的内容可参考 Bonham-Carter(1994)、Agterberg and Cheng(2002)。

应用证据权方法开展矿产资源预测通常涉及:预测对象的确定、矿床模型与勘查概念模型的建立、预测要素的确定、预测要素的数值化和定量表达、单

元划分、变量的构置、组合和优化、单元成矿有利度计算、预测区的圈定、预测区内未发现矿床个数的预测、资源量预测与预测不确定性评价等内容。以上所有环节中,都会涉及模型的建立和模型的应用,这些步骤都会用到建模技术。以下将分别介绍建模技术在矿产预测的各个环节中的应用。

1 空间分析建模技术

模型是对复杂现实的某种简化、抽象和归纳,通过建立模型可以从复杂的现实问题中分解、抽象、归纳出问题的本质,并采用可视化的形式将分析过程进行表达,以便于对分析过程的重复与修改。一个模型形成的过程就是对研究对象分析和认识的过程,是将问题从“问题域”转移到“解决问题域”的过程。简单地说,模型是对现实世界的描述,一个模型仅仅描述那些解决问题的重要因素,并且创建一个简单的、易管理的流程图。通过对流程图的理解人们可以了解建模人员的思想和工作步骤。模型的类型是多种多样的,比如模型可以是定量的,可用公式来表达;也可以是逻辑的,可用逻辑语言来表达;还可以是概念的,可以用文字和符号等表示。在矿产资源预测和评价中,模型是多样的。本文将主要讨论逻辑分析和空间分析模型,包括在 GIS 环境下如何实现模型建立的自动化和规范化,如何服务于矿产资源预测的每个重要环节。

采用地理信息系统(GIS)或者地理信息技术(GeoIT)与其他计算机信息技术(IT)的不同之处在于 GIS 所处理的不是一般的数据而是空间数据,即具有空间分布位置属性的数据以及与空间位置有关的非空间属性数据,比如各种地图所涉及的空间点、线、面数据和图像中涉及的栅格像元数据等均为具有空间分布位置的空间数据。同时处于这些位置的描述性数据,比如点、线、面的各种特征均可看作与空间位置相关的属性数据。因此,应用 GIS 技术的重要目的之一是开展空间分析,比如分析点、线、面之间的空间关系和逻辑关系,复杂的空间关系可以由一系列简单空间分析模型来完成。分析过程可以采用流程图来表达,可以通过把需要在分析中依次执行的过程放在一个流程图里来自动实现,这样的流程图称为模型流程。

为什么要建立模型?创建模型具有几方面的意义和目的:首先,它可以帮助人们规划和设计所要开

展的空间分析过程,即以流程图的形式记录所作设计的思想,以便进一步修改和实施;在流程设计和确定基础上,自动实现流程中的每一步骤;如果发现流程有误或者设计方案不够合理,可以对流程进行修改和完善。如果没有模型的帮助,记录和管理数据以及处理过程中所需要的数据输入和输出就会变得非常困难。一个复杂的模型包含了一系列相关的处理过程。任何时候,你都可以添加新的处理模型,也可以删除不再需要的模型内容,或是改变模型之间的相互关系,还可以改变模型的约束条件或模型参数值等,例如,用新的数据替换老的数据集作为模型输入或者一个模型的输出作为下一个模型的输入等。

空间分析模型如何分类?空间分析模型是指用于 GIS 空间分析的数字模型或逻辑模型。空间分析建模是指运用 GIS 空间分析工具建立模型流程的过程,其建立过程包括明确问题、分解问题、组建模型、检验模型结果和应用分析结果等步骤。空间分析是地理信息系统的主要特征,也是评价一个地理信息系统功能的主要指标之一,它是基于空间对象的拓扑特征以及其他属性特征进行的数据处理,其主要目的在于提取空间对象之间的相关信息。模型的分类是多样的,在 GIS 环境下的空间分析模型包括但不局限于以下类型:

(1) 空间分布模型。研究空间对象的空间分布特征所需建立的模型,主要包括:空间分布参数的描述,如空间对象分布密度和统计特征如均值、方差、对称性等;空间分布类型检验,如正态分布、均匀分布、聚类分布、分形分布检验等;趋势分析,反映现象的空间分布趋势;空间聚合与分解,反映空间对比与趋势。

(2) 空间关系模型。研究基于空间对象的位置和属性特征的空间物体的关系,包括距离、方向、连通性和拓扑等空间关系,其中拓扑关系是最常见的空间关系,比如岩体内或外接触带关系,断层上下盘的关系等。距离是空间对象之间的最直接关系,比如远近关系可以用于许多其他相关关系的研究,比如矿床分布与离构造的距离关系等;连通性是描述空间对象的又一重要属性,比如两地道路的连通性,介质中空隙的连通性;方向性也是重要的拓扑属性,比如构造的方向性等往往是研究构造和构造分类的依据。研究这些空间关系常常可以通过建模来实现。

(3) 空间相关模型。空间对象之间的相关性研究是 GIS 应用具有独到之处的工作,也是开展复杂问题研究的基本过程。比如研究矿床的分布与岩体的

空间分布关系, 矿床分布与构造交换的空间分布关系等均是应用 GIS 空间分析功能的常见例子. 空间对象之间的关系既可以是简单的直接关系, 也可以是间接的复杂关系; 既可以是显式的关系, 也可以是隐式的关系; 既可以是确定性关系, 也可以是统计性关系. 许多空间相关分析可以通过建模过程来实现.

(4) 预测、评价与决策模型. 进行空间预测、评价与决策是最能发挥 GIS 应用的工作, 通过多种空间关系和海量空间数据支撑空间决策和预测是 GIS 应用的重要优势. 比如根据对过去和现在的分析推断未来, 根据已知推测未知, 运用科学知识和手段来估计未来发展趋势, 并做出判断与评价, 形成决策方案, 用以指导行动, 以获得尽可能好的实践效果是当前智能 GIS 应用的领域. 整个过程中均可采用建模技术.

2 图解建模

2.1 图解建模的概念

图解建模是指运用直观的图形语言将一个具体的建模过程表达出来. 一个简单的模型要包括模型输入、输出、分析或处理工具三方面内容. 复杂的分析过程可以由一系列简单模型组合而成. 图解模型可以自动执行所定义的操作功能. 当模型经过检验和执行无误后即可被保存以便在需要时随时使用. 建立的模型还可以被进一步用于组建新的模型. 模型的建立和应用具有很大的灵活性. 当然, 经过检验的模型还可以与多用户共享. 比如前面谈到的关于开展全国矿产资源潜力预测就需要对各种模型进行共享.

2.2 模型生成器

模型生成器或简称建模器 (Model Builder) 最初出现在 ArcView3 的空间分析模块中 (ESRI, 2008), 是进行空间处理工作 (Geoprocessing) 流程和脚本图形化的建模工具. 使用建模器技术可以简化复杂空间处理模型的设计和实现. ArcGIS9 中同样提供了建模器技术, 但 ArcGIS9 中的建模器仅限于空间处理模型, 对于更复杂的分析工作还不能进行建模. GeoDAS 中对建模器进行了发展, 不仅对于一般的空间处理可以建模, 而且对于更复杂的资源预测分析和决策过程也可以建模, 它还提供了适合重复性和迭代性工作的建模器技术.

2.3 模型的基本组成

图解模型主要由 3 部分组成: 输入数据、输出数

据和空间处理工具. 输入数据和输出数据的类型多种多样, 可以是栅格数据集 (Grid) 或者矢量数据集 (shapefile 和 coverage) 等. 不同的空间处理工具要求的输入数据不同, 产生的输出数据也各异. 建模由脚本 (Script) 编写和连接. 连接是模型中一个不可或缺的要害, 连接指定了数据与操作之间的关系, 因此符合条件的要素才能被连接. 如连接了不适合的要素, 模型会提示有错信息.

3 建模器技术在资源预测中的应用

模型建立是矿产资源预测与评价的核心内容. 从定性概念模型到量化模型的转换是在 GIS 环境下开展矿产资源预测与评价必不可少的工作. 可以说, 对于每一个步骤都要进行模型建立和实施. 建立模型的基本流程和步骤为: (1) 首先定义地质目标或者称之为地质概念模型; (2) 确定合理的模型和模型处理工具; (3) 确定模型的输入和输出; (4) 确定建立模型的参数; (5) 确定模型的实施条件. 这里介绍几个建模器技术应用实例, 用来说明建模过程在矿产资源量化预测过程中的普遍性、必要性和可操作性. 应用实例选自加拿大北部 Nova Scotia 省南部某区域金矿矿床预测项目. 笔者在该区作过多年的金矿资源预测研究, 更多关于该研究区的矿产地质情况和矿产资源研究结果可参考 Cheng (2008).

3.1 实例 1: 空间分析与地质预测要素的优化

地质概念模型表明: 研究区内金矿的空间分布与两种沉积岩 (泥质与砂质为主的沉积岩) 界面及其与控矿褶皱轴的交汇点可能存在空间相关关系. 为了采用已有的空间数据对以上概念模型进行统计检验和实施, 这里介绍如何采用 GeoDAS GIS 方法建立模型. 首先获取地层组 (岩性) 界面, 然后获取地层界线与褶皱轴的交汇点. 一般来说, 这种地层界线和交汇点对象并不是数据库中已有的内容, 需要通过 GeoDAS GIS 软件中提供的接触带 (Contact) 或交汇点 (Intersect) 等处理方法获得. 在获得交叉点图层的基础上, 才能将交汇点位置与已知矿床分布位置进行叠加对比, 从而获得矿床分布与交汇点的距离关系. 该关系不仅可以度量两者是否有关, 而且可以由此确定其最佳相关距离. 具体的建模流程如图 1 所示.

在运行以上模型过程中, 有 4 个主要处理过程: 模型 (A): 该模型所采用的处理工具是获取岩

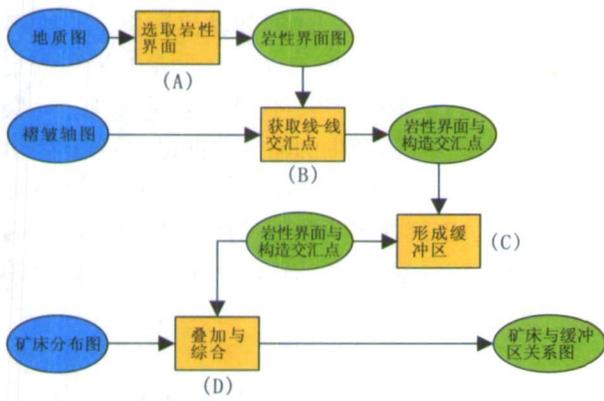


图 1 建模流程图: 岩性界面与构造交汇点与金矿分布关系模型

Fig. 1 Flow chart of model building: Model for evaluating spatial relationship between the intersects (contacts of rock formations and article axes) and location of Au mineral deposits

蓝色椭圆表示模型输入, 绿色椭圆表示模型输出, 黄色矩形表示模型运算. 图中的箭头表示模型运算的逻辑与方向

层界面(Contact). 它所采取的输入是地质图. 地质图中岩层是面源对象, 岩层的相关内容由所对应的地层属性表示. Contact 按两种指定的岩层属性即可提取其公共边界(界面). 当然该运算的输出是线源图层, 可以将该输出永久性保存, 也可以进行临时性保存并作为下一个模型(B)的输入. 输出结果见图 2a.

模型(B): 该模型所采用的处理工具是获取线与线的交汇点(Intersect). Intersect 需要两种指定的线状图层作为输入, 如褶皱轴(线源对象)和模型(A)中产生的岩层界面图输出. 可以看出, 模型(A)中的输出仅仅是为下一个模型(B)服务的, 因此模型(A)的输出不必永久保存, 当系统执行完模型(B)后即可从临时内存中将其删除. 模型(B)的输出将会是岩层界面与褶皱轴的交汇点(点状)图层. 同样可以将该输出进行永久性保存, 或临时性保存并作为下一个模型(C)的输入. 输出结果见图 2b.

模型(C): 该模型所采用的处理工具是产生缓冲区(Buffer). 它所采取的输入是模型(B)中将产生的岩层界面与褶皱轴的交汇点图层. Buffer 运算可以围绕点、线、面形成缓冲区. 该实例中模型(C)采用的是点输入, 输出是围绕岩层界面与褶皱轴的交汇点的缓冲区图层一面状图层. 同样可以将该输出进行永久性保存, 也可以进行临时性保存并作为下一个模型(D)的输入. 输出结果见图 2c.

模型(D): 该模型所采用的处理工具是叠加运算(Composite). 它所采取的有 2 个输入: 一个是模型(C)中将产生的围绕岩层界面与褶皱轴的交汇点的缓冲区(面图层), 另一个是要对比的矿床分布图(点状图层). Composite 运算可以在点状图层(矿床图层)的属性表中添加一列属性, 该属性表示相应矿床所在的缓冲区的属性. 根据该列属性内容可以计算每一缓冲区内的矿床数, 进而形成缓冲区与矿床数的频率分布直方图. 输出结果见图 2d, 结果表明 95% 矿床分布在交汇点 1 km 范围内. 因此, 可以将交汇点 1 km 范围作为有利成矿条件, 这样可以形成一个以交汇点距离为基础的控矿要素图层.

3.2 实例 2: 预测单元的划分和后验概率的计算

预测单元的划分是开展预测工作的重要环节, 划分单元的目的和作用: 单元应该具有明确的地质意义, 能够反映预测要素组合, 具有统计对比意义, 便于在 GIS 环境下处理与成图. 传统的单元划分方法有规则网格方法和地质体单元划分方法(成秋明和范继璋, 1989). 这两种方法各具优、缺点: 规则网格单元划分方法简单并便于计算机操作, 但缺乏地质意义, 不便于预测变量的定义和预测区的圈定; 地质体单元划分方法虽然具有明确的地质意义, 方便变量选择, 但单元边界确定较困难, 且往往不能覆盖整个研究区, 具有很大的人为性, 不便于有些方法如证据权方法的应用. 在 GIS 环境下这两种方法的优点可以同时实现. 这就是本次项目研究过程中我们提出并建议采用的“不规则地质单元法”. 这样的单元是采用恰当的预测要素图层组合来形成的, 因此具有明确的地质意义, 但并非传统的地质体或地质体组合单元. 它以各要素图层的边界作为单元的自然边界, 单元的形成和单元内的变量定义和赋值等均可在 GIS 环境下自动形成. 这样不仅可以提高预测工作的效率, 而且可以避免人工取值操作造成的人为误差, 有利于提高预测精度.

以下举例说明如何采用建模器技术形成具地质意义的不规则地质单元(简称不规则地质单元). 更多关于不规则地质单元的定义、单元划分过程, 以及单元如何用于变量定义和赋值、有利度计算、预测区圈定将另文发表.

根据研究区金矿的成矿模式和找矿模型, 确定了以下预测要素和预测单元划分的图层: 褶皱轴缓冲区(图 3a)、沉积岩性界线缓冲区(图 3b)、地球化学背景异常场(图 3c)(地球化学块体)、地球化学局

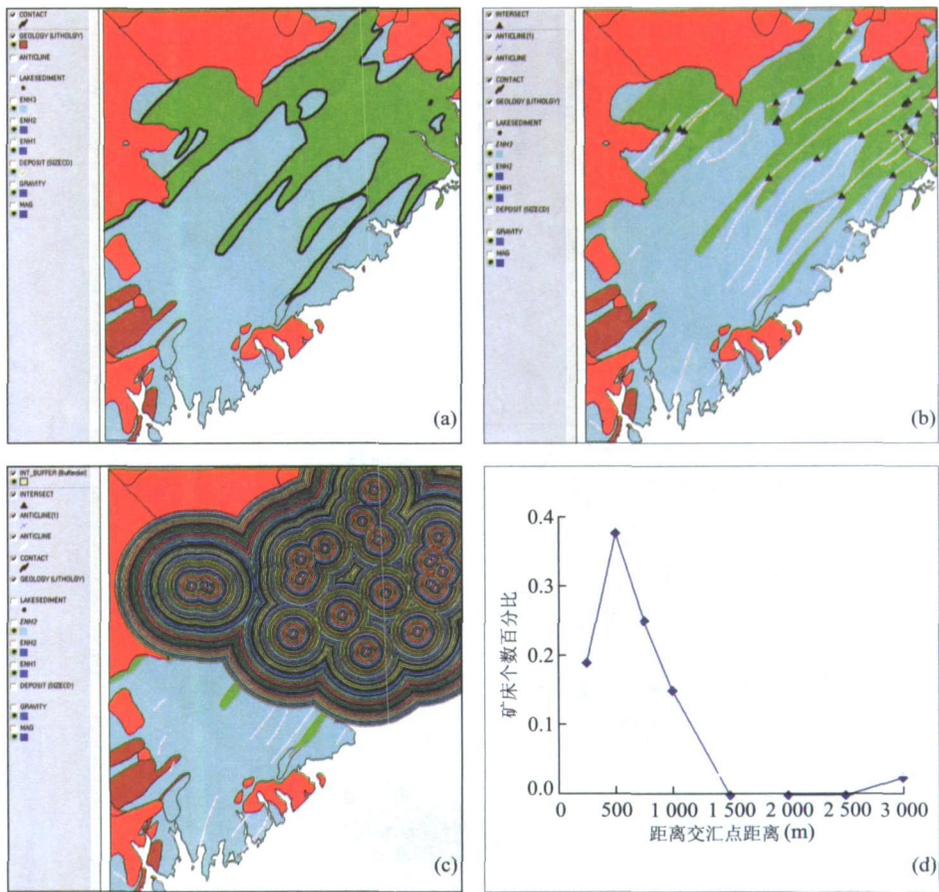


图 2 (a)输入地质图,从中提取两种岩性的界面,输出为线状图,结果用黑色粗线表示;(b)输入岩性界面图和构造图,从中提取两种线的交汇点,输出为点状图,结果用黑色三角形表示;(c)输入交汇点图,建立缓冲区图,输出为面状图,结果用环形线表示;(d)输入缓冲区和矿床分布图,建立矿床分布与缓冲区距离分布直方图

Fig. 2 Models built for (a) extracting contacts between two types of rock formations (b) extracting intersect between contacts of two rock formations obtained in Fig. 2a and anticline axes (c) creating buffers around intersects obtained in Fig. 2b; (d) creating histogram showing distribution of number of mineral deposits in each buffer zones created in Fig. 2c

部异常(图 3d). 关于这些预测要素图层的形成过程参见 Cheng(2008).

图 4 给出了单元划分的模型和流程,采用图层组合运算功能(Overlay)对多组证据图层进行叠加,可以形成组合图层,比如将图 3a 和图 3b 中的两个有利证据图层进行叠合(Overlay)可以得到图 5 中的结果. 该结果显示,由两个二态证据图层叠加可以形成有 4 种不同状态的唯一条件图层(Unique condition)以及相应的属性表. 这种综合图层有 2 种表示法:“和”(Union)和“交”(Intersect). 前一种方法所形成的结果是每一个多边形将有独立的编号、各自的面积和周长,在属性表中各占一行;而后者形成的综合图层中,将所有相同的多边形(具有相同属性组合的多边形)合并成一种多边形,在属性表中只占一行,其面积和周长是整个这一组多边形的总和. 图

5 中给出了采用“和”运算叠加图 3a 和图 3b 的单元划分结果. 图 5 中每一个单元均可看成是不规则的具有地质意义的单元(简称不规则的地质单元). 这些单元可分为 4 种类型:同时具备褶皱轴最佳距离(A)和岩层界线最佳距离(B)、具备褶皱轴最佳距离(A)但不具备岩层界线最佳距离(not B)、不具备褶皱轴最佳距离(not A)但具备岩层界线最佳距离(B)、既不具备褶皱轴最佳距离(not A)也不具备岩层界线最佳距离(not B). 可见,这些单元均以预测要素为内涵,边界是以预测要素图层边界而圈定的,因此具有明确的地质意义和明确的圈定边界,在 GIS 环境下具有可操作性. 可以采用 GIS 空间分析功能自动实现,避免了大量的手工操作、人为性及出错的机会. 如果需要叠加更多的证据图层形成更复杂的不规则地质单元,可以进一步叠加其他证据图层,

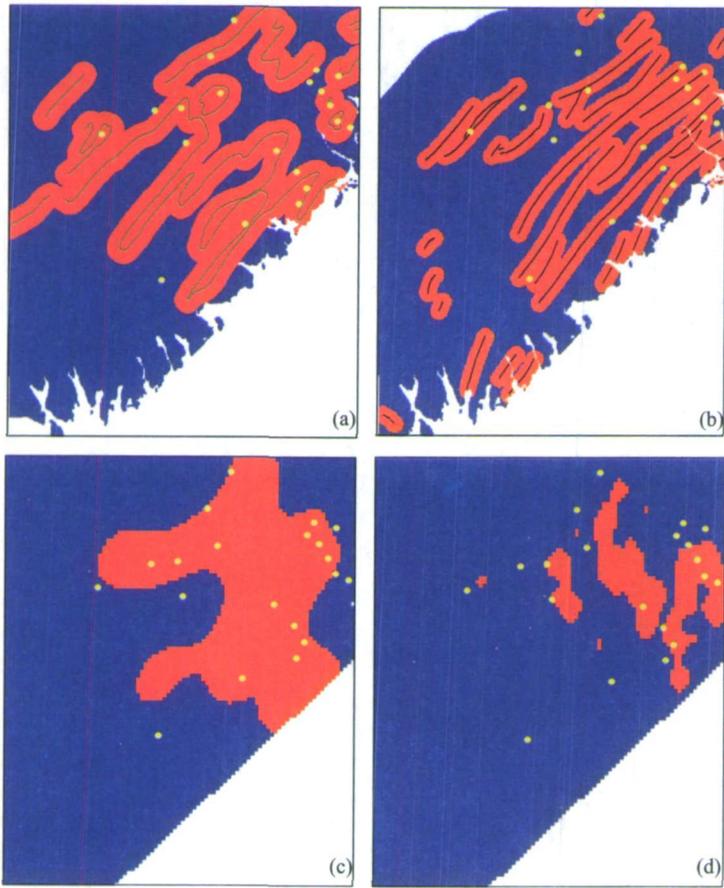


图 3 (a)距离有利地层界线距离 4 km;(b)最佳缓冲区控矿要素图层;(c)主成分分析方法与 S-A 异常-背景方法相结合获得的有利地球化学背景异常;(d)主成分分析方法与 S-A 异常-背景方法相结合获得的有利地球化学局部异常

Fig. 3 (a) Optimum correlation distance between distribution of mineral deposits and contacts of two formations; (b) optimum correlation distance between distribution of mineral deposits and anticline axes; (c) background obtained by the first principle component separated using S-A method; (d) anomalies obtained by using S-A method to the third principle component

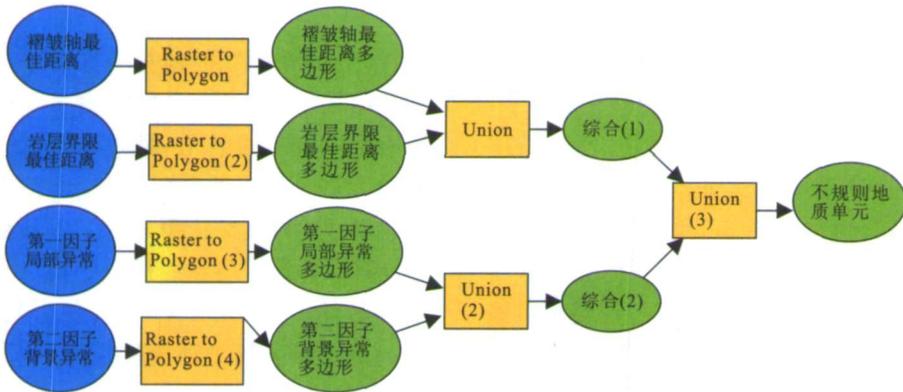


图 4 不规则地质单元划分模型

Fig. 4 Model for constructing irregular geological units

如地球化学图层(图 3c 和 3d). 确定由哪些证据图层参加单元划分要根据具体研究对象和模型而定. 本实例中, 我们采用了 4 个图层作为示范. 在单元划

分的基础上, 采用相似的方法可以叠加单元图层与其他图层, 从而得到并添加更多的单元内容(以属性保存), 如与矿床分布图层或构造交汇点图层进行叠

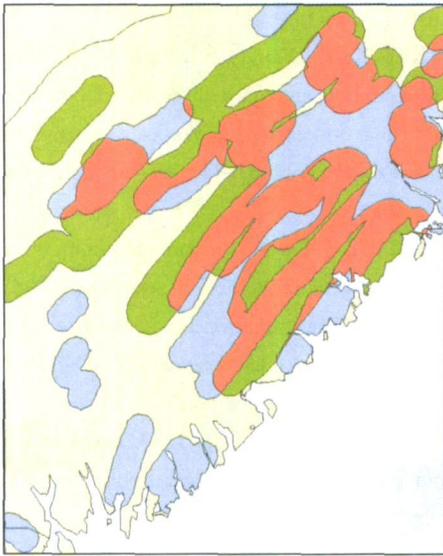


图 5 由褶皱轴缓冲区及岩层界线缓冲区两个预测要素组合形成的不规则地质单元图

Fig. 5 Geological units created by combining two binary patterns Figs. 3a and 3b

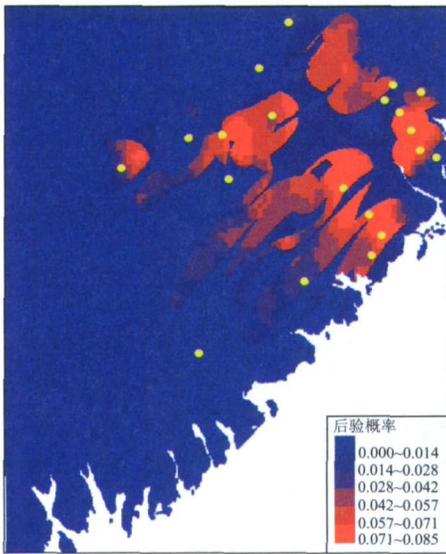


图 6 用模糊证据权方法计算的单元后验概率图

Fig. 6 Posterior probability map created by means of fuzzy weights of evidence method

采用 4 个预测要素图层:图 3a-3d,先验概率为 0.002 5

加,可以在单元属性表中添加单元内是否有某种矿床分布和构造交汇点分布等这样的内容,表示单元内的变化情况,如单元内包含几个矿床、总储量、矿点密度、构造密度、蚀变类型、包含多少构造交汇点、构造线总长度、岩性组合数、岩性组合熵等变量.这些工作都可以由 GIS 自动形成,并添加到属性中.该单元图和相应的属性表一起作为单元划分的成果

和输出,可以方便地用于各种软件和采用各种不同的计算方法计算单元成矿有利度、成矿概率等.计算方法既可以是数据驱动方法(如证据权方法),也可以是知识驱动方法(模糊逻辑方法),还可以是混合型方法(模糊证据权方法).

为了说明单元成矿有利度的计算过程和结果,这里继续采用本文介绍的实例,采用 4 个证据图层:褶皱轴最佳距离证据图层、岩层界线最佳距离证据图层、地球化学背景异常、地球化学局部异常.训练点图层包含 20 个金矿床和矿点图层.采用证据权方法计算的后验概率结果表示在图 6 中.图中红色表示高后验概率,蓝色表示低后验概率.预测结果表明,已知矿床(点)的分布与预测后验概率具有很好的空间吻合性,表明预测结果与模型的吻合较好.那些预测后验概率较高但还没有已知矿床发现的地段应该作为进一步工作的预测区.有关后验概率的计算和预测矿床的计算等内容可参考 Cheng(2008).

4 结论

建模技术不仅为 GIS 空间分析和空间数据处理带来很多方便,尤其是对于矿产资源潜力预测与评价这样复杂的系统工程,由于涉及的工作流程和逻辑关系复杂、计算和运算量大、许多分析和处理具有试验性、重复性、叠加性,建模技术的应用将发挥重要的作用.从工作层面上,建模技术解决了地质矿产研究及预测人员、定量建模人员、GIS 建模和操作人员的共同工作和讨论平台.在这一平台上,通过图解模型可以将复杂的地质问题分解为可操作的 GIS 模型和模型组合,以避免地质模型、数学模型和 GIS 模型的脱节,这样有利于保证所建模型的正确性和地质意义,同时便于对结果的解释和方案的调整和优化.经过各种验证和多方认可的模型可以推广使用,以保证项目的快速高质量完成.从应用层面上,建模技术非常便于对模型的检验、更新、修正、共享等.不同用户可以对模型进行直接使用或者进行修正和改进,可以通过改变输入和输出参数使模型满足他们的具体需要.从操作层面上,可以对模型进行迭代、重复、优化等.作为中间的过渡输出结果并不需要保存,需要时可以通过运行模型很快产生,这样避免大量中间结果的存储,导致数据库管理的困难.该技术的应用得到了项目专家认可,认为是本次全国矿产资源潜力预测项目研究的重要创新之处.

References

- Agterberg, F. P., 1989. Computer programs for mineral exploration. *Science*, 245: 76—81.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q. M., 2002. Conditional independence test for weights of evidence modeling. *Natural Resources Research*, 11(4): 249—255.
- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information system for geosciences: Modelling with GIS. Pergamon Press, Oxford, 398.
- Cheng, Q. M., 2000. GeoData analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: User's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDAS held at York University, Nov. 1 to 3, 2000, 204. <http://www.gisworld.org/geodat>.
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, 40(5): 503—532. DOI 10.1007/s11004-008-9172-6.
- Cheng, Q. M., Fan, J. Z., 1989. Geological body units in mineral resources quantitative assessments. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, (3): 21—27 (in Chinese with English abstract).
- ESRI Inc., 2008. ArcView spatial analyst. <http://www.esri.com/software/arcview/extensions/spatialanalyst/training.html>.
- Wang, S. C., Fan, J. Z., Cheng, Q. M., 1989. Modeling of gold deposit prospecting. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, (3): 156 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T. Z., Xiao, K. Y., Yan, G. S., 2007. Methodology of deposits modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 11—19 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., 2002. “Three components” mineral resources quantitative prediction and assessment—Digital prospecting theory and practice. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 139—148 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Hu, W. L., Li, Z. J., 1983. Statistical prediction of mineral deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 成秋明, 范继璋, 1989. 矿产资源预测中的地质体单元法. 长春地质学院学报, (3): 21—27.
- 王世称, 范纪璋, 成秋明, 1989. 金矿综合信息找矿模型. 长春地质学院学报, (3): 156.
- 叶天竺, 肖克炎, 严光生, 2007. 矿床模型综合地质信息预测技术研究. 地学前缘, 14(5): 11—19.
- 赵鹏大, 2002. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 482—489.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金, 1983. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社.