

基于透岩浆流体成矿理论的 GIS 矿产预测研究

赵增玉¹⁾, 潘懋¹⁾, 潘赞¹⁾, 张志虎²⁾

1) 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871; 2) 北京大学数学科学学院, 北京, 100871

内容提要: 本文以内生金属矿床透岩浆流体成矿理论为基础, 以分级预测体制的思想为指导, 认为在成矿理论指导下提出的各级预测体制对应的宏观地质标志是连接透岩浆流体成矿理论与 GIS 成矿信息的纽带, 并从成矿地质背景、成矿作用触发机制和金属大规模堆积三方面, 分别说明了各级预测体制及可能利用的宏观地质标志, 最后通过研究目前广泛使用的 GIS 评价方法, 初步建立起透岩浆流体成矿理论应用于宏观地质标志矿产预测的 GIS 预测系统框架。

关键词: 透岩浆流体; 成矿理论; GIS; 矿产预测; 分级体制

自 20 世纪 90 年代初至今, 矿产预测评价信息化的主要特征是应用高新技术和地理信息系统 (Geographic Information System, GIS), 采集多源地学信息, 从地质、矿产、地球物理、地球化学、遥感等多学科的角度进行综合分析。评价工作全面实行数字化、数据库化、自动化和网络化, 可以克服原有矿产预测评价方法中数据分散、保存方法落后、操作原始、要求不统一、资料利用率低的多种弊病。在 GIS 矿产资源评价过程中, 尤其起关键作用的是成矿信息的提取和高度综合 (Bonham-Carter, 1994; 肖克炎等, 1999), 而这项工作的实施需要依赖一个很好的理论基础。

在基于 GIS 的成矿预测中, 很多 GIS 矿产资源评价研究者 (赵鹏大等, 1994; 姜作勤, 1999; 肖克炎等, 2009) 一直都在强调, 要将 GIS 评价技术与成矿理论相结合, 真正将专家的成矿理论、找矿理论知识应用于预测实践。当然, 学者们一直都在努力做到这一点, 如袁峰等 (2004) 提出为了充分利用领域专家的知识, 一种可行的研究思路是, 采用层次分析方法, 将矿产资源预测的各要素按隶属关系分为若干层次, 而矿产预测专家对各层次各因素的相对重要性给出定量指标, 然后利用数学方法进行综合分析, 进而得到各层次各因素的相对重要性权值, 以此作为预测评价的一个基础或者一个专题层。肖克炎等 (2006), 阴江宁等 (2009) 在中国铜金数字矿床

模型评价系统中, 通过建立中国铜金数字矿床模型专家系统, 并将专家系统与综合地学 GIS 数据库及 MRAS 矿产资源 GIS 评价系统工具有机结合, 初步实现了专家系统与 GIS 技术融合。肖克炎等 (2009) 提到将成矿系列理论 (程裕淇等, 1979; 陈毓川等, 1998) 与矿产资源评价结合, 综合评述了如何将成矿系列理论用于指导找矿评价, 及矿产资源评价如何为成矿系列理论的实际应用提供平台并验证成矿系列理论。

在前人研究中指出, 成矿系列理论解决的是矿产预测中成矿作用的关键地质共性问题, 是区域矿产资源预测评价的重要理论依据 (肖克炎等, 2009)。数字矿床模型系统是通过专家系统推理出所要预测的矿床类型 (肖克炎等, 2006), 其实质是为 GIS 分析提供评价专题层的选择, 而并没有将专家知识与 GIS 完全融合。实质上, 实现 GIS 与专家知识 (即专家对成矿作用、成矿规律的认识) 的完全融合在现阶段几乎不可能, 这是由于复杂地质过程导致的多解性造成的, 不同的专家对地质过程的理解都不一样, 为此, 需要尝试选择一个先进的、普适性的成矿理论指导 GIS 成矿预测, 该成矿理论应当可以满足从不同尺度、不同层次研究成矿规律, 可以对各种异常信息的提取起指导作用, 尤其是对于大比例尺预测, 可以根据理论获取有效的找矿地质标志, 从而可以充分利用 GIS 空间数据表达及空间分析功能, 使得

注: 本文为“十一五”国家科技支撑计划重大项目子课题 (编号 2006BAC04B01)、国家自然科学基金资助项目 (编号 40742015) 的成果。

收稿日期: 2009-10-15; 改回日期: 2009-12-28; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 赵增玉, 女, 1984 年生。博士研究生。主要从事基于 GIS 的固体矿产资源评价理论与方法研究。通讯地址: 100871, 北京大学逸夫贰楼 3439 室; Email: zengyu1206@163.com。通讯作者: 潘懋, 教授。电话: 010-62751165; Email: panmao@pku.edu.cn。

GIS评价工作可以结合领域知识更好地发展。

罗照华等(2009)以科尔任斯基的透岩浆流体假说为主线,围绕矿床成因三大基本问题“源”“流”“汇”,整合了国内外有关这些问题的最新进展,运用地质学、地球物理学、地球化学、岩石学、矿物学以及热力学等多学科知识的交叉融合,发展成了透岩浆流体成矿理论。该理论对内生金属矿床的成因解释、成矿规律分析可能具有普适性,并且从热力学、运动学、动力学等不同角度论述,提出了透岩浆流体成矿作用的地球动力学事件链,及成矿作用的宏观表现,比较适合于成矿预测的GIS表达。本文试图以该理论及其分级预测体制为基础,建立GIS成矿预测框架,用以指导内生金属矿的GIS预测工作。

首先概略介绍了透岩浆流体成矿理论,其次从透岩浆流体成矿作用角度叙述了六级成矿预测体制及可能的宏观地质标志;接着以预测体制为基础,基于GIS,初步建立起了透岩浆流体成矿理论应用于宏观地质标志成矿预测的GIS应用基本框架。

1 理论基础介绍

罗照华等(2007)初步提出了一个透岩浆流体成矿作用理论的框架模型。根据该模型,岩浆体系和含矿流体体系是两个完全不同的地质体系,它们因相互需要而耦合在一起,当这种耦合关系解体时,就导致了成矿作用的发生。该理论将矿床学研究的重要进展,如小岩体与大规模成矿、成矿作用发生在混沌边缘、成矿系统或成矿系列、深部流体成矿作用、岩石圈灾变与成矿作用大爆发等,整合在一起,对成矿流体的来源、岩浆活动物理化学过程及成矿流体运移、成矿流体汇聚、含矿物质沉淀等一系列过程进行了详细的阐述,并结合野外地质现象的实际观察,提出透岩浆流体成矿作用理论可能适用于大部分与内动力地质作用有关的成矿作用(罗照华等,2007)。

透岩浆流体成矿理论可以简要描述如下(罗照华等,2007)。由于地球各圈层的封闭效应,在地球内部广泛存在被封存的深部流体。流体中成矿金属的溶解度强烈依赖于压力,这些深部流体必然含有丰富的成矿物质。当岩浆发生并向上迁移时,这些流体就会跟随着岩浆一起上升,并推动岩浆快速侵位;当岩浆快速侵位并冷却时,深部流体不能或很少进入岩浆,有可能在岩浆体冷却收缩形成的接触带构造裂隙中堆积成矿。如果岩浆上升速度与流体同步,含矿流体就有可能进入岩浆体内,既降低岩浆的密度使其得以快速上升,又可以寻求岩浆的保护,使

其成矿元素的浓度不会因为流体与围岩接触而降低。岩浆到达地壳浅部后,成矿流体与硅酸盐熔体发生不混溶分离,分别形成贫矿的熔体和富矿的流体。随着温度的下降,在寄主熔体固结成岩之后或固结过程中,成矿流体开始析出有用组分(成矿作用)。因此,所有的矿化作用都限于岩体内部,如形成斑岩型矿床。如果成矿流体上升的速度稍快,他们就有可能从岩浆体中逃逸或逃逸一部分,在岩体顶部和围岩中成矿。成矿流体上升速度足够快时,它们可以完全穿透岩浆进入围岩或流体通道中,这时岩浆体仅仅是含矿流体继续上升的驱动热源。

该理论围绕地质过程的能量驱动机制,提出了地球动力学事件链,将深部地质过程作为地球浅部所有地质过程发生的触发器,认为成矿作用涉及不同层级的地质过程,既涉及全球动力学系统,也涉及具体的触发机制;成矿预测过程中既要注意区域模型的地质产物特征,也要重视小到矿物尺度的标型指示。透岩浆流体成矿理论根据控制因素,提出了一个六级成矿预测体制,从成矿地质背景,成矿作用触发机制到金属大规模堆积,由大到小依次为成矿带、成矿段、成矿域、矿集区、成矿中心、矿床或矿体(罗照华等,2009)。

2 分级预测体制划分及宏观地质标志

矿床学研究揭示了矿床及其组合与区域构造背景的密切联系,包括成矿作用的动力学联系和物质联系。动力学联系暗示成矿事件与其他地质事件处于同一地球动力学系统的控制之下,成矿系统是地球复杂巨系统中的一个特殊子系统;物质联系表明成矿物质及其组合与岩石圈—软流圈系统物质结构有关,因而成矿作用也与区域地质发展史密切相关。但是,构造背景实际阐明了区域成矿的潜力,并不一定会导致成矿。因此,成矿过程是一个确定性随机事件,过程启动之后体系的性状强烈依赖于随后出现的外界约束,理解每一个外界约束的性质及其对系统的影响程度成为成矿预测的关键。

根据透岩浆流体成矿理论,深部流体聚集成库是成矿作用发生的一个先决条件,这将要求岩石圈具有较长的时间处于平衡运动状态。成矿作用的发生应当有一个适当的触发机制,亦即具体的深部动力学过程。这样的过程应当是地质时间尺度上的瞬时过程,因为流体中金属的溶解度强烈依赖于压力,深部流体只有快速上升才有可能导致大规模成矿作用。此外,成矿预测最终需要落实大规模金属堆积

的场所,从而实现成矿预测的最终目标。

罗照华等(2009)详细阐述了透岩浆流体成矿作用,提出了地质过程的地球动力学事件链,从内生金属矿床成因的基本解出发,逐步引申到区域的能量驱动机制上,是由小及大的推理网络,根据这一系列地球动力学链及成矿作用,下文将从成矿地质背景、成矿作用触发机制和金属大规模堆积三个方面,详细介绍各个预测层次,并试图寻找与其相对应的宏观地质标志,以期与GIS成矿信息更好的结合。

2.1 成矿地质背景

成矿系统的最高阶外部约束是系统运动的驱动力。地质过程可以理解为地球动力学系统的做功,而地球的内动力一般认为来自地球深部,其最基本的运动方式是热能和位能耦合导致的地幔对流。这种对流涉及到巨大的物质系统和能量系统,一经启动将很难发生改变,因而具有长程时空结构和可预测性。这样的动力学系统对岩石圈的约束是巨大的,可以导致岩石圈板块裂解、生成、倾没和碰撞,常常在地球表层形成巨大的构造带,金属矿产就宿主于这样的构造带中,因而从成矿作用的角度来说,这样的构造带称为成矿带。

构造带的前身是由具有不同发展历史的地块拼贴形成的,因而沿构造带延伸方向可以划分出若干岩石圈结构不同的区段。不同的区段由于物质结构不同,在同一构造热体制作用下能够提供的金属和金属组合也不同,可以产生特征性的矿床组合。因此,这样的区段可称为成矿段。

与此类似,块体在拼合过程中由于相邻块体的相互作用,其边部的结构特征将不同于内部或其主体部分,因而具有提供与主体部分略有不同的金属和金属组合的能力,可以称这样的区域为成矿域,它是岩石圈不连续的部位,也是成矿作用发生的主要位置。

上述三个方面仅仅是成矿作用的地质背景,并不意味着成矿作用本身。成矿作用的阵发性和瞬时性要求有一种触发机制导致地质过程的跃迁(罗照华等,2008,2009)。

2.2 触发机制

岩石圈灾变与成矿作用大爆发的耦合(邓晋福等,1999)暗示含矿流体大规模逃逸与岩石圈灾变有关。从动力学的角度来说,灾变的类型大致可以划分为三种:① 岩石圈拆沉作用,由岩石圈重力不稳定性引起;② 地幔柱活动,是深部地幔物质快速上升的结果;③ 大规模推覆构造,是地壳积累应力

突然释放的产物。据此,具体的成矿预测应当考虑到深部能量在浅部的影响范围,这个范围也是可能发生成矿作用的范围。由于大量矿床(点)集中产出,可称其为矿集区。在前两种情况下,理想状态时矿集区应当具有近圆形的形态,而第三种情况则是线性的或不规则的。这为遥感影像线(环)形异常提取提供了重要的理论依据。

由于深部流体的释放是一个突变过程,且与岩浆活动具有同时性,并且一个地区的岩石圈结构特征是区域最后一次最强烈构造岩浆活动的产物(罗照华等,2006),因此,还可以通过区域地球物理资料去了解该区深部成矿流体的释放机制,如魏文博等(2008)的山西文水—山东日照电性结构断面为理解区域岩浆演化提供了很好的依据。另外,地球物理方法获得的拆沉作用最可靠证据可能是软流圈中高速体的存在,常被解释为拆沉岩石圈的难溶残留。

陈衍景(2002)研究认为,大规模成矿作用的爆发总与最晚一次的强烈碰撞造山事件同步发生,尤其发生在挤压伸展转换期,成岩成矿高峰滞后全面碰撞开始时间约50Ma。罗照华等(2008)对造山带大规模花岗岩浆活动后产生的岩墙群进行岩石地球化学分析,结果表明这类岩墙群的形成是区域构造应力场由挤压向伸展转换的产物,定义为造山后脉岩组合,不仅可以用来标定造山过程结束的事件,也是区域找矿预测的宏观标志,可以根据岩脉中 SiO_2 的含量指导GIS提取过冷度较小的岩体(岩脉),结合地质特征,综合预测可能的成矿部位。

2.3 金属大规模堆积

由于岩石圈的厚度巨大且可变,深部能量与物质在浅部的逃逸范围可大可小,取决于输入能量的速率和能量输入体的几何形态。一般而言,由于地壳的结构不连续,具体的成矿范围取决于地壳的力学性质和化学性质,经常出现一些矿床(点)紧密堆积的现象,可称其为成矿中心。例如,巨量花岗岩浆形成之后,不仅可能导致地壳的刚性化,也导致下地壳的基性化。在造山带冷却过程中,基性化下地壳容易榴辉岩化进而导致岩石圈重力不稳定和拆沉作用。在这种情况下,由于花岗岩基的完整性和屏蔽效应,深部含矿流体有可能在岩基的周边产出,而岩基本身不含矿。冀东的都山岩体可能是一个很好的实例。因而,某种情况下,利用遥感或地球物理提取出的岩基信息,可以作为预测成矿中心的宏观标志。

最后,成矿预测工作应当落实到含矿流体在什

么位置堆积金属的问题。也就是说是什么因素导致了成矿物质的最终大规模堆积。於崇文(1999a, 1999b)指出,成矿作用发生在混沌边缘。对于具体的找矿工作,罗照华等(2007)将其归结为成矿作用发生在物理化学边界层。这样,对GIS成矿信息提取就有很好的指导作用,因为根据属性查询很容易提取碳酸盐岩、膏盐层等化学边界层,也很容易识别构造裂隙(破碎带、剪切带)等构造膨大部位,这些位置都是有利的成矿物质堆积区,按照这样的思路,就可以最终找到或预测矿床和矿体。

3 矿产预测 GIS 应用基本框架

上述分级预测体制很适合于在GIS中应用。因此,本GIS成矿预测基本框架的理论依据就是透岩浆流体成矿理论,成矿预测体制及对应的宏观地质标志。GIS任务则是在成矿理论的指导下,利用GIS空间分析功能,通过宏观的地质标志识别不同的成矿层次,定位矿床或矿体,为勘查工程布置提供理论依据。

GIS是一种采集、存储、管理、分析、显示与应用地理信息的计算机系统,是分析和处理海量地理数据的通用技术。由于GIS是空间信息技术的基础平台,具有强大的空间信息分析和管理能力,而矿产资源预测与评价所依据的勘查、地质、地球物理、地

球化学、遥感等基础资料都属于空间信息范畴,所以,GIS及相关空间信息技术在其发展成熟过程中,就逐步成为矿产资源预测与评价工作的基础工具,成为矿产勘查与资源评价数字化和量化的核心技术。

基于GIS矿产预测的步骤及技术应用,根据透岩浆流体成矿预测体制及成矿作用,建立了内生金属成矿预测体制的GIS应用框架(图1)。

在透岩浆流体成矿理论GIS应用框架(图1)中,最底层也是最基础的就是成矿预测GIS基础数据库。成矿预测数据源通常包括地质数据、地球物理数据、地球化学数据、航空航天遥感数据、勘探工程数据等,这些数据是GIS成矿分析、预测的基础,具有多来源多学科的特点,如何高效地组织和管理这些数据是GIS成矿预测的关键问题。叶天竺(2004)提出了可行的技术方案,并且规定了空间数据库的数据格式,对组织多源矿产地质数据提供了参考。通过对地质、物探、化探、遥感等原始数据进行处理(资料的入库、数字化及计算机成图),可直接形成GIS基础数据库。

信息提取是在成矿理论的指导下,对数据库中的多源数据进行数据解译的过程。根据数据源的不同,可以分为地球物理信息提取(隐伏岩体、深部构造、变质基底等),遥感异常提取(隐伏构造、隐伏岩

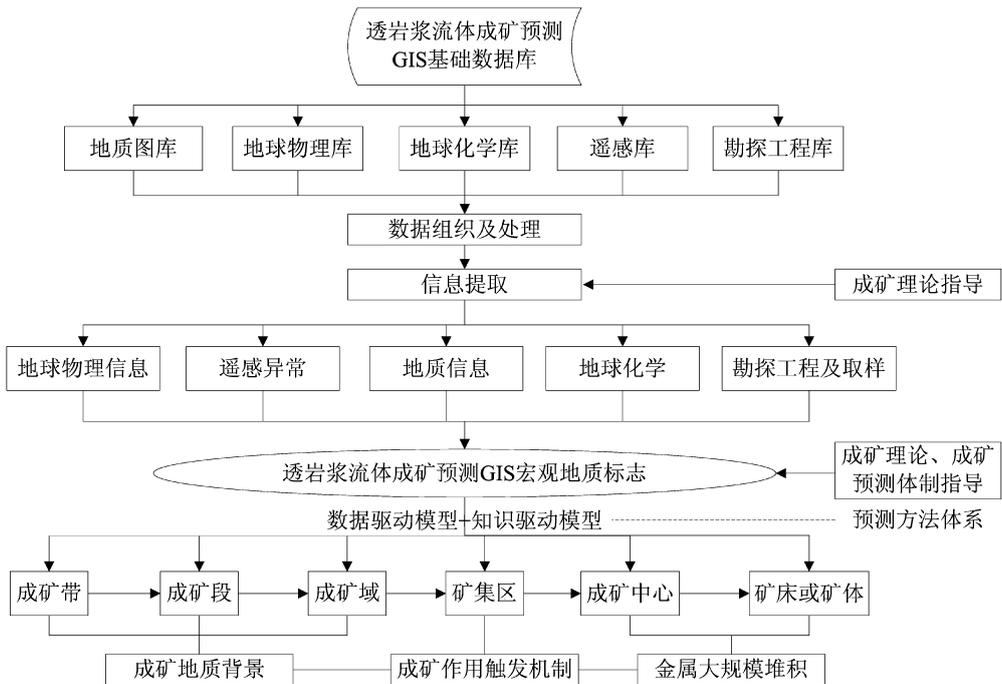


图1 透岩浆流体成矿理论 GIS 应用框架

Fig. 1 Framework of GIS based on the theory of transmagmatic fluid metallogeny

体、构造蚀变带等),地质信息提取(岩浆建造、沉积建造、变质建造、大地构造相等),地球化学信息提取(成矿元素异常、元素组合异常等)(叶天竺,2004),工程取样(矿物粒度、矿物组合、矿物结构构造等),这些数据解译是所有 GIS 矿产预测系统的基本工具,如肖克炎等(2002)研发的 MRAS 系统中,已经提供了大量的数据处理方案和成矿信息提取工具,叶天竺(2004)对地质、物探、化探、遥感(地物化遥)等各种固体矿产预测评价技术方法分别进行了描述。

如何更好地利用 GIS 技术提取的各种信息进行矿产预测是 GIS 所依据成矿理论的重任,也是 GIS 多源空间数据管理及分析与成矿理论相结合的关键。而在成矿理论及其分级预测体制指导下提出的各级预测体制对应的宏观地质标志,则是连接透岩浆流体成矿理论与 GIS 成矿信息的纽带。正如文中第二部分所分析的那样,透岩浆流体成矿理论从成矿地质背景,成矿作用触发机制到金属大规模堆积,决定了一个六级成矿预测体制,从大到小依次为成矿带、成矿段、成矿域、矿集区、成矿中心、矿床或矿体。不同的级别对应着不同的宏观地质标志,这里所谓的宏观地质标志是指在透岩浆流体成矿理论指导下,各不同层级的地质过程可能导致的地物化遥等信息的反映。这些宏观地质标志在 GIS 里以不同属性的点线面的形式表达,并指导各种异常信息的提取与综合。如带状伸展构造在 GIS 中表达为线状特征,可以由区域线性异常、遥感解译深部构造、大地构造等成矿信息综合而来;岩基表达为面状特征,可以由地球物理、遥感推断的隐伏岩体及侵入岩分布综合而来;矿物蚀变分带表达为点属性分布特征,可以通过对地球化学元素组合异常、成矿元素分异及分带特征等综合而来。宏观地质标志的提出为基于 GIS 的成矿信息提取提供了可靠的依据,从而,将透岩浆流体成矿作用理论和 GIS 矿产预测融合起来。

在成矿理论指导下确定好宏观地质标志后,接下来就是怎样综合利用这些地质标志,称为矿产预测方法,近年来,在基于 GIS 的矿产预测方法上,国内出了很多专著,如叶天竺(2004),肖克炎等(2006),李裕伟等(2007)等,这些 GIS 预测技术及方法在预测工作中无疑发挥着重要的指导性作用。姜作勤等(1999)指出预测过程既是知识驱动又是数据驱动,因而方法分为数据驱动模型和知识驱动模型,数据驱动模型,如多元统计、证据权重法等,前人

已经做了很多研究(Bonham-Carter et al., 1988, 1990; Carranza, 2004),主要是通过定量分析方法,建立起区域成矿有利度和资源潜力值与多参数地质信息的统计规律,缺陷是需要一定数量的统计样本单元。因此,在已知矿点很少或者没有的情况下,就需要依靠知识驱动模型。知识驱动是指依赖于理论知识的过程,这里的知识是指专家的成矿理论知识,对区域成矿规律的认识及对根据成矿理论一些宏观地质标志的解释。知识驱动模型主要应用于专家系统(Duda et al., 1979; Richard, 1994; 肖克炎等, 2006; 阴江宁等, 2009)。

根据不同预测级别的宏观地质标志及预测模型,最终可划分出同等级别的预测远景区范围。

4 结论与讨论

本文提出了以透岩浆流体成矿理论为理论基础的 GIS 矿产预测框架,为目前利用 GIS 进行矿产资源评价提供一个新思路,即从矿床成因基本问题(源流汇)出发,以透岩浆流体成矿机制(成矿地质背景、成矿作用触发机制和金属大规模堆积)为主线,以相应宏观标志为各预测层次(成矿带、成矿段、成矿域、矿集区、成矿中心、矿床或矿体)的控矿因素,初步将透岩浆流体成矿理论与 GIS 相结合。阐述了透岩浆成矿理论的分级预测体制,提出该理论可用于指导 GIS 控矿信息的提取与综合,降低了 GIS 技术操作的多解性。

在成矿理论,宏观标志和 GIS 结合方面,对于成矿带、成矿段、成矿域的划分,由于对成矿背景的问题需要大量的研究工作,存在很多争议性的问题,因此不能够很精确地给出确切的宏观标志及对成矿信息提取的指导作用,只能通过地球物理资料及对全球动力学的认识,概略性划分;对于矿集区的划分,则提出了以造山后脉岩组合为标志来指导 GIS 脉岩信息的提取与综合;对于成矿中心及矿床或矿体的划分,提出了物理化学边界层为指导进行 GIS 边界层信息的提取与综合。

在预测方法方面,由于篇幅限制,本文并没有给出具体的应用实例来详细阐述其原理,只是简单介绍了数据驱动和知识驱动模型,这也是本文的不足之处,将在以后的实例分析中加以说明并应用。

致谢:感谢评审专家对文章提出具有建设性的意见!

参 考 文 献 / References

陈衍景. 2002. 中国区域成矿研究的若干问题及其与陆—陆碰撞的关

- 系. 地学前缘, 9(4): 319~328.
- 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 1998. 中国矿床成矿系列初论. 北京: 地质出版社, 1~12.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列. 中国地质科学院院报, 1(1): 32~58.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 赵国春, 戴圣潜. 1999. 中国东部燕山期岩石圈—软流圈系统大灾变与成矿环境. 矿床地质, 18(4): 309~315.
- 姜作勤. 1999. 地理信息系统在矿产资源评价中的应用现状. 见: 陈毓川. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法. 北京: 地震出版社, 397~406.
- 李裕伟, 赵精满, 李晨阳. 2007. 基于 GMS、DSS 和 GIS 的潜在矿产资源评价方法. 北京: 地震出版社, 667~716.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 詹华明, 柯珊, 李文韬. 2006. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用. 岩石学报, 22(6): 1672~1684.
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 陈必河, 柯珊, 侯增谦, 江万. 2007. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据. 地学前缘, 14(3): 165~183.
- 罗照华, 卢欣祥, 王秉璋, 陈必河, 黄凡, 杨宗锋, 汪洋. 2008. 造山后脉岩组合与内生成矿作用. 地学前缘, 15(4): 1~12.
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论. 北京: 地质出版社, 1~167.
- 魏文博, 叶高峰, 金胜, 邓明, 景建恩, 等. 2008. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究——减薄的华北岩石圈特点. 地学前缘, 15(4): 204~216.
- 肖克炎, 朱裕生, 张晓华, 宋国耀, 陈郑辉. 1999. 矿产资源评价中的成矿信息提取与综合技术. 矿床地质, 18(4): 379~384.
- 肖克炎, 杨东来, 严光生, 陈郑辉, 薛群威, 李海滨, 朱裕生. 2002. 矿产资源评价系统(MRAS)的一些改进. 矿床地质, 21(增刊): 75~78.
- 肖克炎, 王勇毅, 陈郑辉, 等. 2006. 中国矿产资源评价新技术与评价新模型. 北京: 地质出版社, 1~176.
- 肖克炎, 丁建华, 娄德波. 2009. 试论成矿系列与矿产资源评价. 矿床地质, 28(3): 357~365.
- 叶天竺. 2004. 固体矿产预测评价方法技术. 北京: 中国大地出版社, 197~206.
- 阴江宁, 肖克炎, 何凯涛, 邹伟, 丁建华. 2009. 铜矿数字矿床模型专家系统的原理与技术实现. 地质论评, 55(3): 449~455.
- 於崇文. 1999a. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(上). 地学前缘, 6(1): 85~102.
- 於崇文. 1999b. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(下). 地学前缘, 6(2): 195~230.
- 袁峰, 周涛发, 李湘凌, 祁轶宏, 岳书仓. 2004. 基于 GIS 的矿产资源预测现状及关键问题. 合肥工业大学学报(自然科学版), 27(5): 486~489.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金, 等. 1994. 矿床统计预测(第二版). 北京: 地质出版社, 69~84.
- Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11): 1585~1592.
- Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. 1990. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. Agterberg F P, Bonham-Carter G F. Statical Applications in the Earth Sciences. Canada: Geological Survey of Canada, 171~183.
- Bonham-Carter G F. 1994. Geographic Information Systems for geoscientists: Modelling with GIS. New York: Pergamon, 302~329.
- Carranza E J M. 2004. Weights of evidence modeling of mineral potential: A case study using small number of prospects, Abra, Philippines. Natural Resources Research, 13(3): 173~187.
- Duda R O, Gaschnig J G, Hart P E. 1979. Model design in the PROSPECTOR consultant system for mineral exploration. Michie D. Expert systems in the micro electronic age. Edinburgh: Edinburgh University Press, 153~167.
- Richard B M. 1994. Prospector II: towards a knowledge base for mineral deposits. Mathematical Geology, 26(8): 917~936.

GIS-based Mineral Resource Prediction Based on Theory of Metallogeny by Transmagmatic Fluids

ZHAO Zengyu¹⁾, PAN Mao¹⁾, PAN Yun¹⁾, ZHANG Zhihu²⁾

1) Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Education Ministry, Peking University, Beijing, 100871;

2) School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing, 100871

Abstract: In this paper, a general framework of mineral resource predictive system is proposed to integrate the theory of transmagmatic fluid metallogeny with the technology of GIS. The geological phenomena corresponding to the classified predictive rule in the theory of transmagmatic fluid metallogeny are considered as a link between the theory of transmagmatic fluid metallogeny and the GIS-based mineral resource predictive information. The six components of the classified predictive rule and their possibly related geological phenomena are analyzed from three aspects, geological background of mineralization, trigger mechanism of mineralization and metal accumulation, respectively. The framework guided by the classified predictive rule is finally formed based on the theory of transmagmatic fluid metallogeny, and its clue is the ore-forming processess.

Key words: transmagmatic fluids; ore-forming theory; GIS; mineral resource prediction; classified predictive rule