

多源数据融合技术在成矿预测中的应用

刘 星 胡光道

(中国地质大学数学地质遥感地质研究所,湖北 武汉 430074)

摘 要 数据的融合不同于叠加,前者是信息的优化,后者是把多种数据显示在一层,本文分析了成矿预测工作面临的社会和技术挑战以及在对地质数据分析基础上,介绍了数据融合技术的原理及其适合地学数据处理的框架,进一步论述了数据融合的基本方法,探讨了在成矿预测工作中应用影像融合技术可以实现地质目标细节与色彩纹理结构的结合,该方法有助于信息表示的制图优势,最后给出了实现多源地学信息与遥感图像的融合过程和算法。

关键词 多源数据 数据融合 成矿预测

Multi-Source Geo-data Fusion and Its Application in Metallogenic Prognosis

LIU Xing HU Guangdao

(Institute of Mathematics & Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract Data fusion is different from stacking in that the former is to optimize information while the latter is to display multi-data in one layer. This paper has analyzed characteristics of geological data and challenges to the work of metallogenic prognosis from society and techniques, described the data fusion principles and the framework suitable to processing geological data, and discussed in detail basic data fusing means. It is indicated that the integration of target details and color structure has the advantage of expressing information in cartography if geological data are fused with image data. The paper also presents the steps and algorithm for realizing the fusion between remote sensing image and multi-source geological data.

Key words multi-source data data fusion metallogenic prognosis

20 世纪以来,社会与经济持续发展对矿产资源的需求持续增长,极大地促进了矿业地质勘查的发展。而长期大规模的勘查和开采等活动,由于资源的有限性,使得勘查难度越来越大,另一方面,促使资源的勘查环境及技术手段发生了根本性变化(肖克炎等,2000)。随着信息技术革命浪潮和科学找矿时代的到来,已进入现代信息找矿阶段(谢学锦,1996),大量的高分辨、强穿透性的地质、地球物理、地球化学和遥感等找矿方法不断成熟与应用,为地质勘查、成矿分析以至成矿预测提供了丰富的资料,目前全国地质、地球物理、地球化学资料建立的数据库已是海量,如何运用计算机手段,对其进行信息提取和信息综合(肖克炎等,1999),是成矿预测工作研究的热点。

数据融合技术用于多源数据的处理,能够有效地消除数据中信息的不确定因素,提高检测结果的

准确性(龚元明,2001),使系统综合结果比其各组成部分具更充分的信息。矿产资源预测中,借助 GIS 的功能,多源数据融合可以实现多源信息的合成、叠加分析与综合异常分析,通过建立矿产资源预测模型圈定靶区、预测资源量(胡光道等,1998)。

1 成矿预测数据特点

数据是信息的原始资料,是用文字、图形、数字、符号及介质来表达的事件、现象的特征(肖克炎等,1999),数据特点的研究是融合技术的基础,不同特点数据应该采用不同的处理方法,成矿预测中的地学数据具有以下特点:

(1)空间性:所有的地球科学信息都是空间信息,因此,21 世纪地球科学发展的重要技术取向是在地球科学领域大力发展和应用空间信息技术(李裕伟,1998),传统的统计学没有考虑观察点之间的

空间关系,而成矿预测中的各种地质规律则立足于观察点的空间关系,解决这个问题方法是应用地质统计学方法来对空间变化进行统计描述,例如克立格法、体积-方差法等。

(2)多源性:成矿预测面临的数据量纲不一、定性与定量数据以及文字描述同时并存,为了获取各种空间数据,使用的方法和手段也多种多样,因而产生了地学数据的多源性。例如,表征元素浓度的地球化学数据,探测地物体电导率和磁化率的物探数据,表现地物光谱特征的遥感数据,以及反映成矿目标与地质标志的地质勘探数据,这些数据具有不同量纲、间接性和不完整性的特点。但如果采用数据融合技术,选取合适的参量(马洪超等,1999),对多源地学处理的结果,就可以得到对目标状态的优化评价,甚至可以用量化指标评价期望的目标。

(3)多解性:物探、化探以及遥感勘查技术都是一种直接的找矿方法,但单项探测异常信息并不表示一定有大矿,而小异常却有时对应大矿(肖克炎等,1999),说明单一数据源信息的不确定性,因此有必要采用特殊的方法识别成矿信息,压缩和排除干扰信息,特别是要研究当一种勘查技术测量信息只有在另一种地质测量中出现才有找矿意义的方法(赵鹏大,1994)。采用恰当的数据融合技术,可以对多源数据进行优化,达到减少冗余信息、综合互补信息、扑捉协同信息的目的。

2 数据融合的一般原理与构架

综合国内外各领域研究成果,数据融合可定义为:充分利用不同时间与空间的多传感器数据资源,采用计算机技术对按时间序列获得的多传感器观察数据,在一定准则下进行分析、综合、支配和使用,获

得对被测对象的一致性解释与描述,进而实现相应的决策和估计,使系统获得比其他各个组成部分更充分的信息(龚元明等,2001)。数据融合的基本原理是模拟人脑对各个感官从外界环境获取不同度量特征和现象的综合处理。

White 建立了一个基于公共语言和概念的数据融合处理模型,对于不同的应用领域,由于数据的特点特性不同,数据融合具体方法、目标、技术路线也相差很大,马洪超(1999)研究了地学数据的特点和地学融合的目标后,改进了 White 的模型,给出了一个适合于地质学语言描述和应用目的的处理模型(图1),在该模型中,传感器收集的数据相当于地质成矿预测中所用数据源,例如遥感影像可以看作一种传感器数据源,地球物理数据看作另一种数据源,化探、地质观察数据同样可看作一种传感器数据源。初级滤波在多源地学数据融合中相当于数据的归整(包括各种变换,例如量纲的统一、标准化变换、均一化变换等);一级处理的内容是数据的关联(即数据集和目标的关联),包括变量的构置,目标信息的提取,在目前大多数开发应用中,该阶段形成的结果通常要借助 GIS 数据库管理系统的支持,由于地质学数据具有空间性和多源性以及复杂的属性,利用 GIS 空间图层管理功能,可以方便地对数据层进行任意的抽取、叠加、组合,再生成有用的图像文件。与传统的矿产预测相比,数据融合技术应用的核心是图1中的二级处理,即融合中心,研究人员可以构建有效的数学模型,对多源数据进行影像原理的操作,产生一个优化的新的数据层,再应用 GIS 的显示功能,显示并产生最终预测图件。根据数据抽象的程度不同,数据融合可分为数据级、特征级和目标级。

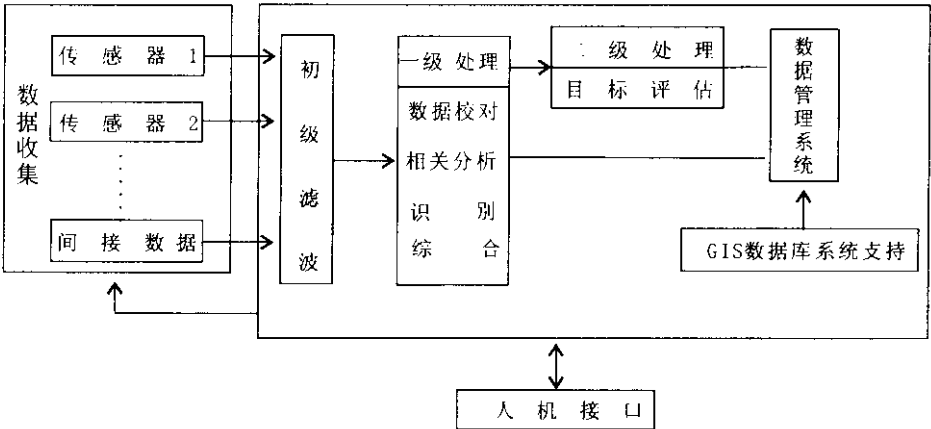


图1 多源地学数据融合框架(据马洪超等,1999修改)

3 数据融合一般方法

成矿预测就是根据研究区成矿规律,在预测理论指导下,通过恰当的数学模型,利用获取的各种信息资源,预测圈定远景靶区,对资源进行评价。

现阶段,成矿预测中要解决数据间的融合包括:①定性和定量数据的融合;②相同分辨率的不同平台测量数据的融合;③不同分辨率不同平台测量数据的融合。

多传感器、多时相和多频谱的图象融合目的是通过空间信息的综合分析,检测图像空间的目标信息,从而提高对图象目标的探测和识别(薛重生等,1997)。图像融合对于识别岩石体、断裂、地下水以及研究深部构造和预测隐伏地质体可提供有利的证据,形象而直观地反映目标的结构格架。

3.1 基于影像原理的融合方法

3.1.1 基于原始数据的数据融合 原始数据融合建立在采集到的原始数据的原始信息层次上,假设 (x_1, x_2, \dots, x_m) 为 TM 图象某个像素的特征向量, (y_1, y_2, \dots, y_m) 为 SAR 图像中相应像素的特征向量,那么该像素融合后的特征向量变为 $(x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_m)$,从而实现数据源间的优化。典型的代表有以下 3 种:

(1) HIS 变换: HIS 色度中空间是相对于 RGB 颜色空间的对物体颜色属性的描述系统,它与 RGB 系统有严格的转换关系,例如将经过空间配准的空间分辨率低的 TM4, TM5, TM3 分别作为 R, G, B 通道,经 HIS 变换得到 H, I, S 分量,再以高空间分辨率 SAR 数据替代 I 分量,记作 I' ,作 $HI'S$ 到 RGB 逆变换,生成新的 R', G', B' ,新影像的亮度指标保持了 SAR 数据的高分辨率。色度和饱和度又保留 TM 的光谱分辨率, HIS 变换是一种传统的数据融合方法,其实用性和有效性得到人们的认同, SAR 可以代替 I,也可以代替 S 和 H,张满郎(1996)通过对 JERS-1SAR 图像进行 Lee 滤波消除图像噪斑,采用拉普拉斯滤波核,增强各方向的线性构造,然后与 TM1, TM4, TM7 配准,并进行 I 复合,得到河北金厂峪金矿及周围地区岩性及线性构造特征,把图像分析与区域成矿规律有机地结合在一起,在金矿成矿构造带划分上取得较好的应用功能效果。HIS 变换的算法有 6 种,应根据实际应用目的进行选择。

(2) K-L 变换: K-L 变换是将 SAR 数据作为一个独立的波段与 TM 各波段数据做主成分分析,在

处理过程中,图像中彼此相关的信息被压缩,选择前 3 个大主分量作为 R, G, B 通道进行彩色合成。薛重生(1997)在对 TM1-5, TM7 遥感图像进行增强和滤波的处理后,进行第一次 K-L 变换生成 4 个主成分图像,选择具有构造识别意义的特征图像进行融合,再对 TM 主成分图像和航磁参量图像进行主成分分析,选择主分量生成 R, G, B 图像,该融合提高了深部构造地质信息的置信度。

(3) 像元加权融合:不考虑色度空间,任意几个不同特性影像融合时,像元对像元加权过程为: $I' = I_i \times P_i + I_j \times P_j + \dots + I_m \times P_m$, I' 为融合值, P_i, P_j, \dots 为每个影像需要强调的程度,可由相关系数确定。

3.1.2 基于特征的数据融合 特征级的数据融合是利用从信息源的原始信息中抽取的特征信息进行综合分析和处理,提取的特征信息应是原始信息的充分表示量或充分统计量,然后按特征信息对多源数据进行分类综合。

根据图像波谱数据的特点,可以利用小波对其进行频率域-空间域的变换,同一地区不同类型的影像,低频部分差别不大,高频部分相差很大,小波变换后在变换域具有分频特性,将影像做多层小波分解,融合过程为:先在确定的领域窗口内,在分辨率 2^j 下,分别对融合的影像数据统计均值和方差,然后确定子带和基带融合值,经小波逆变化重建图像。

3.1.3 基于判别水平的影像融合 基于类别的影像融合是一种高水平融合,首先使用统计模式识别提取各地物类型,通常使用最小风险的 Bayes 决策分类法,分类后,哪一大类选择哪些特征影像进行融合是分类融合中至关重要的一环,从统计学上分析,则是主要观察各类在特征影像中的类内离散度和类间离散度(孙家柄等,1998),根据可分性判据,选择最佳特征组合,在程序中利用逻辑判断语句打开最佳影像文件进行融合处理,或用专家系统中最简单的正推理法,依据专题选择特征进行融合。

加拿大地质局利用航磁资料、机载 γ 射线资料与 TM 图像资料结合,通过非监督分类成功地区分了火山岩和花岗岩岩相。利用钾元素的含量区分蚀变岩带,并依据较深的金伯利岩湖比较浅的冰山湖温度低的原则,在加拿大北部研究区利用 TM6 影像将其区分,利用航磁资料与图像叠加,根据超镁铁质的金伯利岩与航磁资料低值对应的原则,排除超镁铁质的金伯利岩,再用神经网络方法对融合资料进行分类,有效地圈定了潜在的含金金刚石成矿区(Kevin 等,1994)。

3.2 地质统计学与多元统计

地质统计学是充分考虑数据空间分布特性的统计学方法,是空间信息处理技术的两个方面(李裕伟,1998),可用于地学数据融合的各个阶段。前已述及,多源信息抽取后存入GIS数据库,针对GIS数据库进行融合,在成矿预测中的数据融合方法实际上包括统计单元的合理划分、控矿变量的构造,在构造好的变量上,建立预测的数学模型,即融合的中心,对结果验证后可以用于成矿预测、靶区的优化和圈定,在成矿预测中变量融合的方法主要有多元回归法、证据权法、信息量计算法、特征向量、数量化理论等,通常出现在数据融合的预处理阶段。

4 遥感信息与多源地学数据融合技术

地质特征、地球物理、地球化学和遥感等信息都

是区域地质及成矿作用不同侧面的反映,成矿信息的融合是必然的,目前大多数融合主要是在多源遥感信息之间进行,但还无法在图像处理中自动将非图像数据加入进去(齐清文等,2001),只可以借用多源遥感的原理方法进行图像对图像的融合。应当指出,目前处理多源地学信息的途径大多是基于GIS数据库的数据综合叠加,人们正在尝试应用图像处理技术对多源地学信息进行融合,因为图像即能形象地表达数据中不同级次的强度信息,又能直观显示场的二维结构特征,特别在对等值线图中反映不明显的微弱信息更具明显的效果(邹宗濂等,2000),以云南澜沧江地区铜矿预测为例,论述成矿预测中多源地学图像的融合流程(图2)。

(1)从物化探数据生成图像:物化探数据在空间结构上有网格化数据和不规则数据两种,对于网格

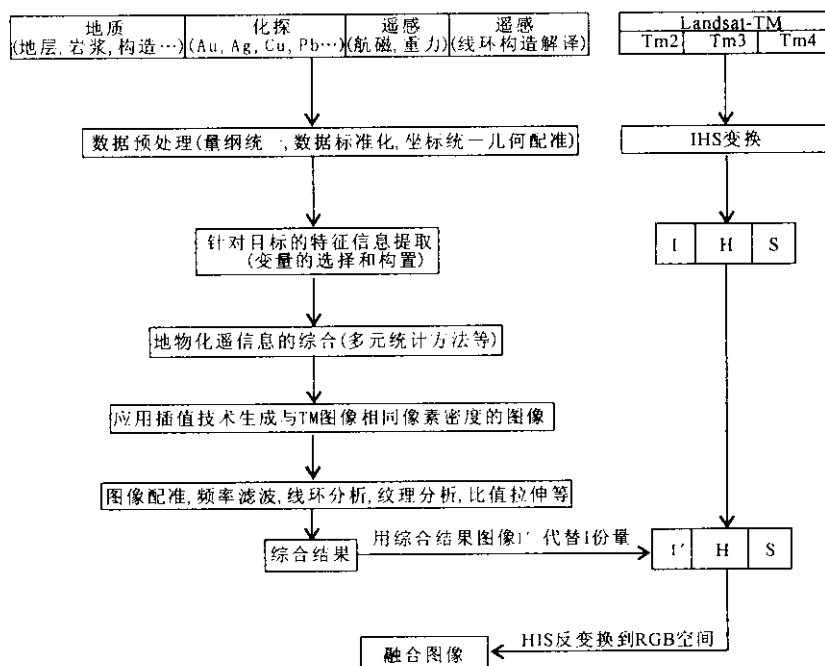


图2 遥感和多源地学数据融合流程示意图

Fig.2 Sketch map of image and multi-sources geologic data fusion procession

化数据,根据所需像素密度应用插值技术生成图像,插值的方法有双三次样条、双线性插值,后者是最简单实用的一种。假设网格纵横间距为 d ,四个角上的值为 a_{00} a_{01} a_{10} a_{11} ,则网格内坐标为 x y 的像素值为(刘宴森等,1994):

$$a_{xy} = a_{00}(d-x)(d-y) + a_{01}(d-x)y + a_{10}x(d-y) + a_{11}xy$$

经过插值后的图像可以是二值、灰度或彩色的,为了进一步处理,通常将其处理成灰度图像,根据具体应用,灰阶可以为16或256。

离散数据可以先进行网格化再插值,当然也可以直接用三角网插值(刘宴森等,1994)。对于矢量GIS地质数据,例如地层、岩性、断裂等,由于其属性的复杂性,可进行二次开发,按照属性意义生成图像(图3)。

(2)图像的配准和镶嵌:目前大多数GIS和图像软件都实现了这两项功能,基本原理是在两幅图像上找出若干个同名地物,利用坐标变换将需要配准的图像坐标变换为标准坐标,把分幅图像拼接为一幅图像,以便于下一步处理。



图 3 澜沧江地区铜资源分布预测图(灰度反色显示)

Fig.3 The favorable metallogenic strata of copper in Lancangjiang area

(3) 图像的地质专业化处理及信息提取: 基于地学目标对不同类型的空间数据进行各种预处理, 如遥感数据的光谱信息和空间信息提取、空间滤波、频率滤波、主成分分析、分形分析和纹理分析等处理方法, 对于物探数据进行专业化的化极、延拓、匹配滤波等数值处理, 提取目标体不同特征的结构信息(薛重生等, 1997)。地球化学数据处理的目的是找出化探异常区, 关键问题确定异常下限, 通过多种计算方法, 得到异常区的分布图像。

以上的处理结果只做灰阶处理, 以便于下一步的融合。

(4) 多源地学数据的融合: 成矿预测中所用的信息源有遥感信息和地、物、化探信息, 遥感信息具有高的光谱信息, 色彩鲜艳, 视域广, 直观性强和综合信息丰富的特点, 对地面地质特征(地层、岩性、构造等)、地形地貌和岩石裸露、水系分布均可直接提取(方洪宾等, 1998)。地质与物化探信息则对具体目标有指示能力, 后者可以看作一种影像的强度, 参与图像的融合。参与融合的地学图像可以是单一的, 也可以是经过数据初步处理的综合信息。本文尝试利用 TM 图像高光谱分辨率的特点与地质数据进行融合, 以期达到色彩与探测目标细节的结合, 由于 TM1、TM3、TM5 波段之间相关性不强, 而且排除了植被信息丰富的 TM4, 因此 TM1、TM3、TM5 合成图像能够反映岩性和构造(邓兆伦, 1994), 将其作为 3 个通道 R, G, B 采用 HIS 变换公式:

万方数据
$$\frac{1}{3}[I_R + I_G + I_B]$$

$$H = \text{tg}^{-1} \left[\frac{2I_R - I_G - I_B}{\sqrt{3}I_G - I_B} \right] + C$$
$$C = \begin{cases} 0 & I_G \geq I_B \\ \pi & I_G < I_B \end{cases}$$

$$S = \frac{\sqrt{6}}{3} \sqrt{I_R^2 + I_G^2 + I_B^2 - I_R I_G - I_R I_B - I_G I_B}$$

公式中 I, H, S 分别表示一像元的明度、色度和饱和度, I_R, I_G, I_B 分别是 R, G, B 波段像元的灰度值。

利用配准的含地质信息的图像 P , 将其做反差拉伸, 用 I_p 代替 I 进行 HIS 逆变换, 得到 R', G', B' 生成新的图像。由于此次预测图件是地层分布, 总体色调偏暗, 用 I_p 全部代替 I 会造成图像发暗, 也为了考虑结果数据的相关性, 因此, 利用以下公式进行变换:

$$I = (I_R + I_B + I_G) \sqrt{6} + I_p / 2$$

处理得到的结果图像可以揭示预测的目标分布, 并且色彩和纹理结构都很清晰, 地层、岩性、构造信息丰富。图 4 是利用 TM135 合成的遥感影像, 图 5 是用上述方法融合的预测图像, 可以看出, 铜有利成矿带区与断裂和环形构造基本吻合, 在没有断裂的预测区, 可以推断可能存在隐伏体, 从而达到揭示地表掩盖物的目的。



图 4 澜沧江地区 TM135 合成影像图

Fig.4 A composite image of TM135 of Lancangjiang area

5 结论

数据融合技术在成矿预测工作处理海量多源数据上无疑有很大的优势, 将提高预测的准确性, 但数据转化为图像后, 地学信息的样本少, 存在模糊性特



图 5 澜沧江地区 TM135 合成影像与
铜分布预测融合影像

Fig. 5 A image fused by TM135 and image of favorable
strata of copper in Lancangjiang area

点,在与遥感影像融合时还存在很多问题。地学信息表达的机理和形式还不如遥感图像那样研究的透彻。地质、物化探等数据本身的影像机制及其与遥感图像数据的相关性是制约融合算法研究的关键,在研究和实践应该得到充分重视。

参 考 文 献

- 邓兆伦. 1994. 遥感与地学数据综合分析技术在长白山地区寻找隐伏矿的应用研究. 国土资源遥感, 1(19): 9~14.
- 方洪宾, 李志中. 1998. 遥感化探信息综合分析在地质找矿中的应用研究. 国土资源遥感, 4(38): 33~36.
- 龚元明, 萧德云等. 2001. 多传感器数据融合在自控垂钻检测系统中的应用. 地球科学, 26(5): 524~527.
- 胡光道, 陈建国等. 1998. 金属矿产资源评价分析系统设计. 地质科技情报, 17(1): 45~49.
- 李裕伟. 1998. 空间信息技术的发展及其在地球科学中的应用. 地学前缘, 5(1~2): 335~340.
- 刘宴森, 余金生等. 1994. 基于图像处理技术的矿产预测综合分析系统. 物化探计算技术, 16(1): 22~28.
- 马洪超, 胡光道. 1979. 地学数据融合技术综述. 地质科技情报, 18(1): 97~101.
- 齐清文, 裴新富. 2001. 多源信息的集成与融合及其在遥感制图中的优化利用. 地理科学进展, 20(1): 36~43.
- 孙家柄, 刘继琳等. 1998. 多源遥感影像融合. 遥感学报, 2(1): 47~50.
- 薛重生, 傅小林. 1997. 遥感与地球物理数据的融合处理及地质应用. 地质科技情报, 16(增刊): 35~42.
- 肖克炎, 张晓华等. 2000. 矿产资源 GIS 评价系统. 北京: 地质出版社.
- 肖克炎, 朱裕生等. 1999. 矿产资源评价中的成矿信息提取与信息综合技术. 矿床地质, 18(4): 379~384.
- 张满郎, 郑兰芬. 1996. Landsat TM 和 JERS-1 SAR 数据在金矿探测中的应用研究. 环境遥感, 11(4): 260~266.
- 邹宗濂, 王润生. 2000. 桐柏山-大别山地区物化探资料的图像处理和地质构造分析. 物化与化探, 24(6): 438~446.

References

- Deng Zhaolun. 1994. A study of comprehensive analysis technique of remote sensing and geoscience data for searching hidden ore bodies in Changbai Shan Region. Remote Sensing for Land & Resources, 1(19): 9~14 (in Chinese).
- Fang Hongbin, Li Zhizhong. 1998. The application of integration of remote sensing and chemical exploration information analysis to studying geological mineral deposit predication. Remote Sensing for Land & Resources, 4(38): 33~36 (in Chinese with English abstract).
- Gong Yuanming, Xiao Deyun et al. 2001. Application of mutisensor data fusion techniques in automatic vertical drilling detecting system. Earth Science, 26(5): 524~527 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guangdao, Chen Jianguo. 1998. Design of the metallic mineral resources assessment and analysis system. Geological Science and Technology Information, 17(1): 45~49 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuwei. 1998. Development of spatial information technology and its application in geosciences. Earth Science Frontiers, 51(1~2): 335~340 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanmiao, Yu Jinsheng et al. 1994. Synthetic analysis system for mineral resources predication based on images. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 16(1): 22~28 (in Chinese).
- Kevin P. 1994. Canad Applies New Processing Technology to "old" Data in Mining Exploration Project. Earth Observation, 5(5): 34~36.
- Ma Hongchao, Hu Guangdao et al. 1999. Overview of geo-data fusion technique. Geological Science and Technology Information, 18(1): 97~101 (in Chinese with English abstract).
- Qi Qingwen, Pei Xinfu et al. 2001. Integration and fusion of multi-source information and its optimized using in RE image based mapping. Progress in Geography, 20(1): 36~43 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiabing, Liu Jinlin et al. 1998. Multi-source remote sensing image data fusion. Journal of Remote Sensing, 2(1): 47~50 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chongsheng, Fu Xiaolin et al. 1997. Fusion processing of remote sensing and geophysical data and ITS application in geology-an example in Shangrao area. Geological Science and Technology Information, 16(Sup): 35~42 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Keyan, Zhang Xiaohua et al. 2000. Minerals resources assessment system by GIS. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Xiao Keyan, Zhu Yusheng et al. 1999. The extraction and indtegration technology of minerogenic information in mineral resources assessment. Mineral Deposit, 18(4): 379~384 (in Chine with English abstract).
- Zhang Manlang, Zheng Lanfen. 1996. Research on gold mine exploration applying landst TM and JERS-1 data. Enviroment Remote Sensing, 11(4): 260~266 (in Chinese with English abstract).
- Zou Zonglian, Wang Runsheng. 2000. The image processing and geotectonic analysis of geophysical and geochemical data of Tongbaishan-Dabieshan area. Geophysical & Geochemical Exploration, 24(6): 438~446 (in Chinese with English abstract).