

基于 SRTM 的重砂矿化信息提取方法

——以中甸地区为例

曹殿华¹⁾ 王安建¹⁾ 管 焯²⁾ 王高尚¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘 要 本文对可覆盖我国全境的 3 arc. s (~90 m) SRTM 数据进行重砂矿化信息提取方面应用前景分析, 解释了 SRTM 数据来源、精度、数据类型及预处理方法, 认为 SRTM3 数据的精度可以初步满足 1:5 万~1:100 万尺度成矿预测的需要。在 GIS 中进行了中甸地区汇水盆地的自动提取, 结果与基于地形图人工绘制的基本相同, 大大提高了工作效率。在 GIS 中以汇水盆地为单元进行重砂矿物异常的取值, 对于中甸地区斑岩型铜矿床的找矿预测, 包含成矿元素及伴生元素 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 的重砂矿物对找矿具有直接的指示意义, 各矿物分类中各种矿物的组合越复杂、含量越高, 其指示矿化存在的意义越大, 以此可做为异常综合评价的准则。在 GIS 中基于该预测评价准则采用模糊逻辑模型进行了异常的综合, 完成了模糊成员权重赋值和重砂矿物示矿综合模糊推理网络构建, 计算得到的汇水盆地重砂综合异常图很好地反应了已知矿区的分布, 并提供了较多的新异常区, 为与其他学科关联的综合分析和野外检查提供了方便。因为夕卡岩型铜矿品位相对高、富矿多、矿物组合相对复杂, 且红山矿床剥蚀程度相对较高, 因此模糊示矿概率高。该区要寻找斑岩型铜矿, 具有中级模糊示矿概率(0.5~0.8)的汇水盆地异常要引起重视。经野外检查, 发现普上和地苏嘎两处斑岩型铜矿的矿化新区。

关键词 SRTM; 重砂; GIS; 模糊逻辑; 中甸地区

中图分类号: P624

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)01-121-06

The Extraction of Mineralization Anomalies from Heavy Placer Mineral Data Based on SRTM: A Case Study of the Zhongdian Area

CAO Dianhua¹⁾ WANG Anjian¹⁾ GUAN Ye²⁾ WANG Gaoshang¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract The 3 arc seconds SRTM data, i. e. , the DEM data covering whole China, are useful to the prognosis of mineral resources. This paper deals with the acquisition means, accuracy, data type and preprocessing technique. The accuracy of SRTM can satisfy the requirement of metallogenic prognosis on the scales from 1:50,000 to 1:1,000,000. Based on the D8 algorithm, the catchments in Zhongdian area can be extracted in GIS, and the result is similar to that obtained from the drawn geographical map. The numeralization of the heavy placer mineral map was carried out for each catchment. As for the prognosis of porphyry copper deposits in Zhongdian area, the heavy placer minerals which contain such elements as Cu, Au, Ag, Pb and Zn can show mineralization directly. The more complex the mineral assemblage and the higher the content, the more probable the existence of mineralization, and this can be used as the criterion of data integration. According to the criterion, the fuzzy logic membership value was given and the fuzzy inference network was designed

本文由国家科技攻关计划课题(编号 2001BA609A-05, 2003BA612A-05)、国家 973 课题(编号 2002CB412607)和国家科技支撑计划课题(编号 2006BAB01A07, 2006BAB01B05)联合资助。

收稿日期 2007-03-31; 改回日期 2007-07-04。责任编辑 刘志强。

第一作者简介: 曹殿华, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事矿产资源勘查评价研究, 通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号, 电话 010-68999655; E-mail: dianhuacao@gmail.com。

on GIS software. The calculation results are in accord with the distribution of the known deposits and show some new significant catchments. Differing from the Hongshan skarn copper deposit, the Pulang and Xuejiping porphyry copper deposits are situated in intermediate fuzzy logic probability (0.5~0.8), which might be controlled by grade, mineral assemblage, and denudation. The catchments with intermediate fuzzy logic probability (0.5~0.8) are important to search for porphyry copper deposits. Some new porphyry copper ore spots were discovered in Pushang and Disuga during the field work.

Key words SRTM; heavy placer mineral; GIS; fuzzy logic; Zhongdian area

重砂异常提取与分析是矿产资源预测评价的一个重要内容,研究重砂异常的空间分布规律及其与区域地质体和地质构造之间的内在联系,对揭示区域成矿规律具有重要意义。重砂异常的源区为原生矿或含矿岩体,其分散展布受汇水盆地和水系的控制。因此,水系及汇水盆地分布特征对于重砂异常的综合分析有着重要的作用。长期以来,水系及汇水盆地分布图都是在地形图或遥感图像上进行人工的绘制,工作量很大。数字高程模型(DEM)是地球表面地形地貌的数字表达与模拟(Summerfield, 2000),基于DEM可以进行水系及汇水盆地的自动提取(Moore, 1996)。实际应用中,获取高精度的DEM数据较为困难,目前常用的获取DEM数据的方法有2种:①用航天、航空SAR遥感的干涉测量或光学遥感重复观测建立立体像对来提取DEM;②用现有地形图扫描数字化等高线,获取高程数据生成DEM。目前,用高程数据生成的DEM精度高于立体像对生成的DEM,但是处理方法比较费时。受云和缺乏光照等因素的影响,基于光学遥感立体像对提取的DEM数据获取困难,覆盖范围有限。在公众可以免费获得全球陆地接近80%区域、精度达到90m的“航天飞机雷达地形测量任务”(SRTM, Shuttle Radar Topography Mission)DEM数据之前,能覆盖全球的DEM数据的精度都不高,例如30 arc. s的GLOBE数据,由多种数据源生成,各种数据源的精度和数据处理方法都存在差异,全球精度不一致(Rabus et al., 2003)。因此,充分发挥SRTM数据的作用对于矿产资源预测评价工作具有重要意义。

基于GIS的综合方法可有效地促进矿产资源的勘查评价(Moon et al., 1991; Bonham-Carter, 1994; Venkataraman et al., 1997)。20世纪90年代初,模糊逻辑方法开始被应用于矿产资源勘查(An et al., 1991; Moon et al., 1991),目前该模型已被成功地应用于对多种类型矿床的勘查评价(An et al., 1991; Carranza et al., 1999; D'Ercole et al., 2000; Knox-Robinson et al., 1997; Knox-Robinson, 2000)。

模糊逻辑模型能够较精确的表达预测人员的判断,并且按照预测人员的逻辑进行推理,将多种示矿信息进行有效综合(曹殿华等, 2006)。

西南三江中段中甸地区是我国重要的铜多金属成矿带,特别是随着普朗大型斑岩型铜矿床的发现而备受关注,在该区进行勘查新区的寻找和矿床定位预测方法的试验研究具有十分重要的意义。本文将简要介绍可覆盖我国全境的SRTM数据的特点、精度及基于SRTM数据的水系及汇水盆地的自动提取方法,然后以汇水盆地为单位,在GIS上基于模糊逻辑方法对重砂异常进行综合,从而得到汇水盆地重砂综合异常图。

1 SRTM数据特点与处理方法

1.1 SRTM数据特点

SRTM由美国航空航天局(NASA)、美国国家图像测绘局(NIMA)以及德国与意大利航天机构共同合作完成,2000年2月,通过装载于“奋进号”航天飞机的干涉成像雷达在11d(2000.2.11~2000.2.22)234h的全球性作业,获取地球表面从北纬60°至南纬56°间陆地地表80%面积、数据量高达12Tbit的三维雷达数据,然后通过对接收到的雷达信号进行处理,生成高精度的数字高程模型。目前公布的SRTM数据是由NASA“喷气推进实验室”(JPL, Jet Propulsion Laboratory)地面数据处理系统(GDPS)通过对C波段雷达信号进行处理来完成的。公开发布的SRTM数字高程产品包括3种不同分辨率的DEM数据:SRTM1覆盖范围仅仅包括美国大陆,其空间分辨率为1 arc. s;SRTM3数据覆盖全球,空间分辨率为3 arc. s;SRTM30数据同样覆盖全球,分辨率是30 arc. s。由于利用雷达技术获取地面高程数据技术本身的限制,SRTM原始DEM数据中存在较多的数据缺失区域和异常点,因此美国国家图像测绘局又对JPL生产的SRTM数据进行了一定的后期处理,经过处理的“version 2”版本(又称“Finished”版本)SRTM数据与原始SRTM数

据相比,在数据质量上有了很大改进。

SRTM 数据的设计误差:对于 90% 的数据,垂直绝对高度误差小于 16 m,相对高度误差小于 10 m,绝对地理误差小于 20 m,相对地理误差小于 15 m。通过与可获得的“地面真值”(ground-truth)对比,在欧亚大陆 SRTM 的绝对地理误差是 8.8 m,绝对高度误差是 6.2 m,相对高度误差是 8.7 m,精度超过了设计要求,推测相对地理误差也符合要求(Rodriguez et al., 2005)。

世界各国纷纷开展了对 SRTM3 地形数据质量的评估,通过与局部 DTM 数据的比较,其符合程度还是令人满意的(Denker, 2004; Marti, 2004)。李爽等(2005)选择河北省涿鹿县与怀来县做为研究区进行了 SRTM3 和中国国家基础地理信息中心生产的 1:50000 DEM(NFGIS-DEM)比较研究,结果显示 SRTM3 在总体精度上具有较高的可信度。

SRTM3 包括两种数据类型:

(1) LP DAAC(Land Processes Distributed Active Archive Center) 通过 ftp 发布的数据;

(2) EDC(EROS Data Center)通过 DVD 和 SDDS(Seamless Data Distribution System)发布的数据。

两种数据都是从 SRTM1 数据经重采样后得到的。但是 EDC 的数据通过选择 SRTM1 数据 3×3 数据点的中心点值作为每个点的值,而 LP DAAC 的数据是取 SRTM1 数据 3×3 个数据点的平均值作为每个点的值。LP DAAC 的数据通常被认为是较好的数据产品,所采用的取平均值的方法尽管损失水平分辨率,能够降低雷达方法获取的高程数据的高频噪音,减小斑点的影响,提高辐射测量值的精度。另外,从前面介绍的数据的处理方法我们可以知道,SRTM3 数据每点的地理精度与 SRTM1 数据一致。

因此,覆盖我国全境的 3 arc. s SRTM 数据的空间精度可以初步满足 1:5 万~1:100 万尺度的成矿预测的需要,对于区域矿产资源评价有着非常广阔的应用前景。

1.2 水系和汇水盆地的自动提取方法

基于 DEM 的水系和汇水盆地自动提取的核心技术是路径算法(Desmet et al., 1996),路径算法描述地表物质(如水、沉积物、营养成分等)在地形单元之间从高到低的传输和流动。迄今为止,DEM 上已提出了多种路径算法如 D8(O' Callaghan et al., 1984)、DEMON(Costa-Cabral, 1994)、Dinf(Tar-

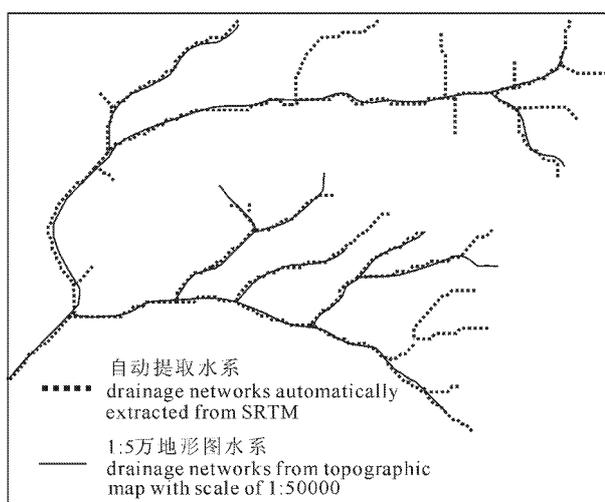


图 1 基于 SRTM 自动提取水系和 1:5 万地形图水系对比
Fig. 1 Comparison between stream network from SRTM and topographic map

boton, 1997)、多流向算法(Freeman et al., 1991; Quinn et al., 1991)、随机八方向算法(Fairfield et al., 1991)、多级骨架化算法(Meisels et al., 1995)等等。这些算法也成功集成到各类 GIS 软件、水文分析软件中如 ArcGIS、GRASS、TOPMODEL(Brasington et al., 1998)、TAPES-G(Wilson et al., 2000)等。其中 D8 算法是一种典型的单流向算法,该算法首先由 O' Callaghan 等(1984)提出并得到了广泛应用。该算法是根据栅格 DEM 单元格和周围相邻 8 个单元格之间的最大坡度方向来确定水流方向。该方法的优点是算法简单,易于实现,算法执行效率高;缺点是在平缓地区会产生平行水流,不能模拟分流,而且会将二维的流路简化为一维,将二维的单元格看作是 0 维的点源。但是,在地势陡峭的山区流域,水系易于提取, D8 方法提取的水系与地形图基本相同(魏国等, 2006)。

中甸地区具有深切地形,地势陡峭,相对高差大的地貌景观特点,水系和汇水盆地易于提取,因此本文采用基于 D8 方法建立的 ARCGIS 中的水文分析模块来提取研究区的水系和汇水盆地。采用研究区范围 SRTM3 作为主要输入数据,首先要进行数据填充、镶嵌和格式转换处理,然后进行水系和汇水盆地的提取。本文提取的水系和汇水盆地分布图见图 1,经与 1:5 万地形图水系对比吻合较好,说明在中甸地区 SRTM3 数据可以应用于 1:5 万尺度的矿产资源预测评价中所需的水系和汇水盆地提取。

表 1 汇水盆地重砂矿物含量分级模糊逻辑赋值
Table 1 Fuzzy logic memberships for content levels of heavy placer minerals in each catchment

主要元素	各矿物含量分级模糊逻辑赋值			
	1	2	3	4
Cu	0.25	0.5	0.75	1
Pb	0.25	0.5	0.75	1
Zn	0.25	0.5	0.75	1
Au	0.25	0.5	0.75	1
Ag	0.25	0.5	0.75	1
W	0.25	0.5	0.75	1
Sn	0.25	0.5	0.75	1
Mo	0.25	0.5	0.75	1
Bi	0.25	0.5	0.75	1
Hg	0.25	0.5	0.75	1
Sb	0.25	0.5	0.75	1
As	0.25	0.5	0.75	1

2 基于模糊逻辑的重砂矿物矿化信息提取及其在中甸地区的应用

中甸地区位于中国西南三江中段义敦岛弧的南端,是印支晚期甘孜—理塘洋壳向西大规模俯冲形成的岛弧岩浆岩带(杨岳清等,2002;侯增谦等,2003)。区内矿产资源丰富,具有斑岩型铜矿的巨大找矿前景。本次研究在 SRTM 数据自动提取的汇水盆地地图基础上进行重砂异常的综合。所采用的重砂数据为 1:5 万重砂测量用符号法标注的成果图,即在取样点旁侧只标注有用矿物的主要元素符号,同时标注含量分级(共 4 级)。

2.1 矿物分类及示矿意义

对于中甸岛弧带斑岩型铜矿床的找矿预测,包含成矿元素及伴生元素 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 的重砂矿物对找矿具有直接的指示意义。而高温热液型矿物(以 W、Sn、Mo、Bi 等为主要元素的矿物)或低温热液型矿物(以 Hg、Sb、As 等为主要元素的矿物)的存在指示了矿化蚀变系统的存在。同时存在高温与低温矿物组合,只存在高温矿物组合或低温矿物组合,都可能发现大型矿床。通常,各矿物分类中各种矿物的组合越复杂、含量越高,其指示矿化存在的意义越大,以此可做为异常综合评价的准则。

2.2 基于模糊逻辑的异常综合

Zadeh(1965)是模糊逻辑的创立者,他提出了布尔数学体系集合论的扩展,将二元扩展到多值。他的模糊逻辑集合论是一种广义的经典集合论,是对非精确性的极好表述。Kauffman(1985)和 Zimmermann(1985)定义了模糊集合和模糊隶属关系。模糊逻辑是传统的布尔逻辑的超集,布尔逻辑集合既可

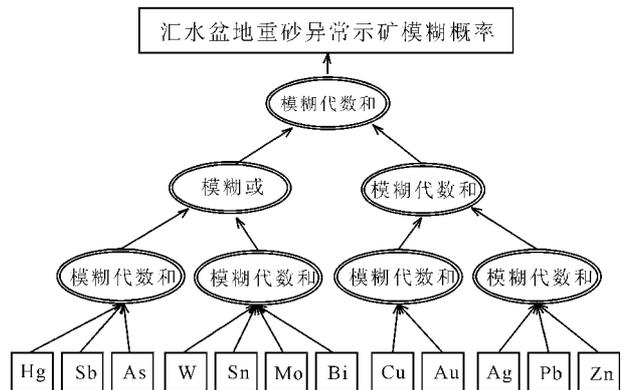


图 2 基于汇水盆地的重砂矿物综合模糊推理网络图

Fig. 2 Fuzzy logic inference network for integration of heavy placer mineral data in each catchment

以是真,也可以是假,而模糊集合可以具有部分的这种隶属关系。模糊集合的成员用 0~1 之间的连续数值表示,0 表示假,1 表示真,大于 0 小于 1 的实数表示假与真之间的真的程度(真度),值越大则真度越高。

取汇水盆地内的包含的各采样点中各重砂矿物含量分级的最高级做为该汇水盆地该种矿物的含量分级。将各级分别除以最高级 4 所得结果做为该矿物含量分级示矿模糊逻辑权重值(表 1)。Bonham-Carter (1994) 与 An 等(1991) 讨论了 5 种可被用于整合矿产资源预测的运算:“模糊与”、“模糊或”、“模糊代数积”、“模糊代数和”与“模糊 GAMMA”。根据矿物分类及示矿意义,选择“模糊或”和“模糊代数和”进行数据的整合,从而建立重砂矿物示矿综合模糊推理网络(图 2)。“模糊或”被定义为:

$$\mu_{combination} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (1)$$

$\mu_A(\mu_B, \mu_C, \dots)$ 是指图层 A(B, C, ...) 某一点的模糊集合成员值。与布尔逻辑的逻辑“或”(逻辑并集)相似,图层上任意点输出的结果受该点所有输出图层模糊集合成员值的最大值控制。适用于支持假设存在的证据较少,任何证据的存在都充分支持假设的情况。

“模糊代数和”被定义为:

$$\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (2)$$

μ_i 是指第 i 个图层的模糊集合成员值, $i = 1, 2, \dots$ 。结果总是大于或等于最大的模糊成员值,所以效果是“增加”的,输出结果比任何输入证据更加支持假设。但其增加的效果自动受模糊成员的最大值 1.0 限制,永远不会超过 1.0。通过推理计算,得到中甸地区重砂矿物模糊示矿概率分布图(图 3)。

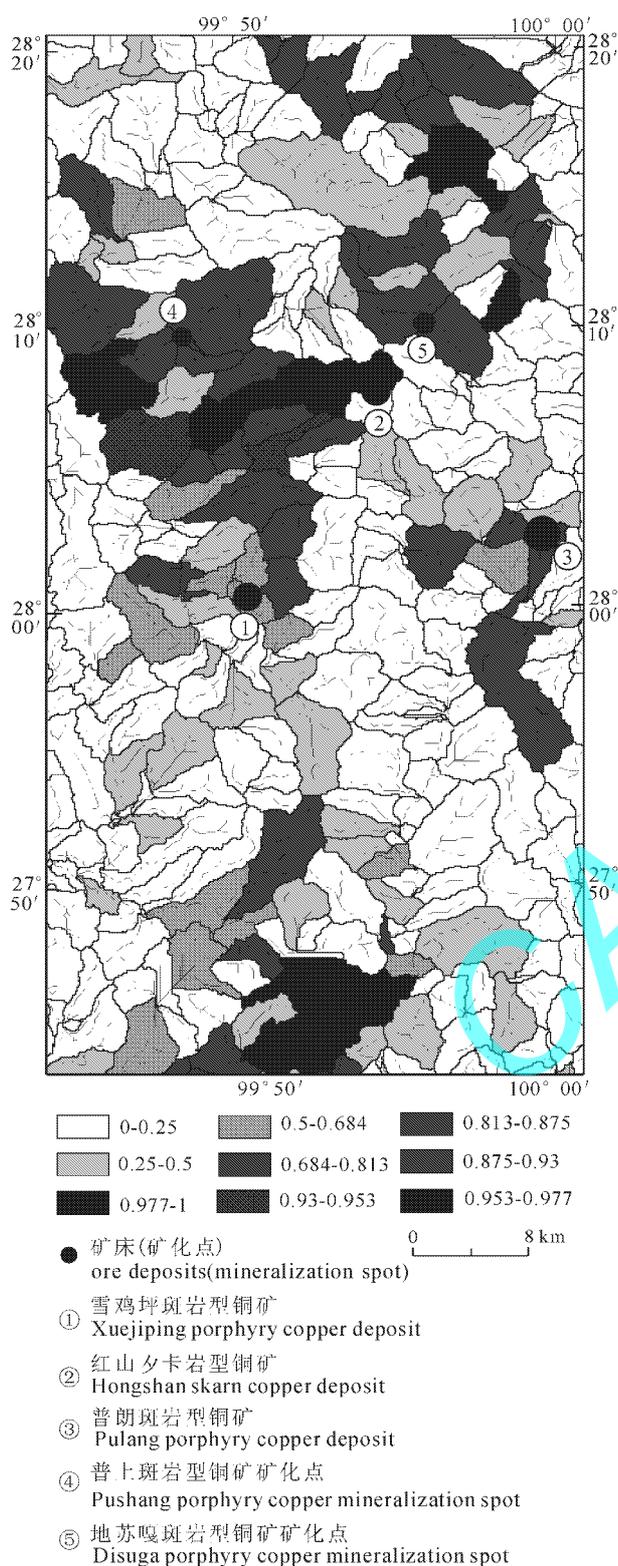


图 3 基于汇水盆地的重砂矿物模糊示矿概率分布图
Fig. 3 Fuzzy membership map showing mineralization potential based on heavy placer mineral data in each catchment

2.3 重砂异常找矿指示性评价

计算得到的汇水盆地重砂综合异常图很好地反

应了已知矿区矿化的分布,但是红山中型夕卡岩型铜矿的重砂矿物组合最复杂、含量相对较高,对应的模糊示矿概率较高,而普朗大型斑岩型铜矿与雪鸡坪中型斑岩铜矿的重砂矿物组合较简单、含量相对较低,模糊示矿概率相对较低,其原因是因为夕卡岩型铜矿品位相对高、富矿多、矿物组合相对复杂,且红山矿床剥蚀程度相对较高,因此模糊示矿概率高。所以,该区要寻找斑岩型铜矿,中级的异常要引起重视,如图模糊示矿概率为 0.5~0.8 的汇水盆地要特别引起注意。经野外检查,发现普上和地苏嘎两处斑岩型铜矿的矿化新区。

3 结语

(1)覆盖我国全境的 SRTM3 数据的精度可以初步满足 1:5 万~1:100 万尺度的成矿预测的需要,对于区域矿产资源评价有着非常广阔的应用前景。

(2)在 GIS 中基于 SRTM3 自动提取的水系和汇水盆地与基于地形图人工绘制的基本相同,大大提高了工作效率。

(3)对于中甸岛弧带斑岩型铜矿床的找矿预测,包含成矿元素及伴生元素 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 的重砂矿物对找矿具有直接的指示意义。高温热液型矿物或低温热液型矿物的存在指示了矿化蚀变系统的存在。同时存在高温与低温矿物组合,只存在高温矿物组合或低温矿物组合,都可能发现大型矿床。各种矿物的组合越复杂、含量越高,其指示矿化存在的意义越大,以此可做为异常综合评价的准则。基于该预测评价准则建立重砂矿物示矿综合模糊推理网络可以完整表达预测人员的逻辑思路。

(4)计算得到的汇水盆地重砂综合异常图很好地反应了已知矿区矿化的分布。因为夕卡岩型铜矿品位相对高、富矿多、矿物组合相对复杂,且红山矿床剥蚀程度相对较高,因此模糊示矿概率高。该区要寻找斑岩型铜矿,具有中级模糊示矿概率(0.5~0.8)的汇水盆地异常要引起重视。经野外检查,发现普上和地苏嘎两处斑岩型铜矿的矿化新区。

参考文献

曹殿华,王安建,管焱,陈江. 2006. 基于模糊逻辑的中甸岛弧斑岩型铜矿定位预测. 矿床地质, 25(2): 199~206.
侯增谦,杨岳清,王海平,曲晓明,吕庆田,黄典豪,吴宣志,余金杰,唐绍华,赵金花. 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统. 北京:地质出版社, 345.
李爽,姚静. 2005. 数字地形模型数据产品特点与评估分析. 地理科学进展, 24(6): 99~108.
杨岳清,侯增谦,黄典豪,曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩

浆成矿系统. 地球学报, 23 (1):17~24.

魏国, 姜海, 黄介生, 赵微. 2006. GIS 环境下基于 DEM 的流域分析. 中国农村水利水电, (10):12~16.

References

- An P, Moon W M, Rencz A. 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27: 1~11.
- Brasington J, Richards K. 1998. Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. *Computer & Geosciences*, 24(4):299~314.
- Bonham-Carter G F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. New York: Pergamon Press, 398.
- CAO Dianhua, WANG Anjian, GUAN Ye, CHEN Jiang. 2006. Position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc based on fuzzy logic. *Mineral Deposits*, 25(2): 199~206 (in Chinese with English abstract).
- Carranza E J, Hale M, Mangaoang J C. 1999. Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines. *Natural Resources Research*, 8(2): 165~173.
- Costa-Cabral M C, Burges S J. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30 (6):1681~1692.
- Denker H. 2004. Evaluation of SRTM3 and GOTOP30 Terrain Data in Germany. in Jekeli C, Bastos L, Fernandes J (eds.), *Gravity, Geoid and Space Missions-GGSM 2004*. Berlin: Springer, 218~223.
- D'Ercole C, Groves D I, Knox-Robinson C M. 2000. Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation, *Australian Jour. Earth Sciences*, 47(5): 913~927.
- Desmet P J J, Govers G. 1996. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implication for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information science*, 10(10):311~331.
- Fairfield J, Leymarie P. 1991. Drainage networks from grid elevation models. *Water Resources Research*, 27(5):709~717.
- Freeman T G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computer & Geosciences*, 17(3):413~422.
- HOU Zhengqian, YANG Yueqing, WANG Haipin, QU Xiaomin, LÜ Qintian, HUANG Dianhao, WU Xuanzhi, YU Jinjie, TANG Shaohua, ZHAO Jinhua. 2003. Collision-orogenic processes and mineralization systems of the Yidun arc. Beijing: Geol. Pub. House, 345 (in Chinese).
- Knox-Robinson C M, Wyborn L A. 1997. Towards a holistic exploration strategy: using Geographic Information Systems as a tool to enhance exploration. *Australian Jour. Earth Sciences*, 44(4): 453~463.
- Knox-Robinson C M. 2000. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralization potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia, *Australian Jour. Earth Sciences*, 47(5): 929~942.
- Kauffman A, Gupta A. 1985. *Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- LI S, Yao J. 2005. A characteristics and assessment Analysis of DEM products. *Progress in Geography*, 24(6): 99~108 (in Chinese with English abstract).
- Marti U. 2004. Comparison of SRTM Data with the National DTMs of Switzerland. *Proceeding of GGSM 2004*, Porto.
- Moon W M, Chung C F, An P. 1991. Representation and Integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Geoinformatics*, 2(2): 177~182.
- Moore I D. 1996. Hydrological Modeling and GIS. In Goodchild M F, Steyaert L T, Parks B O, Johnston C, Maidment D, Crane M, Glendinning S (eds). *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Fort Collin, CO: GIS World Books, 143~148.
- O'Callaghan J F, Mark D M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics, and Image Processing*, 28:323~344.
- Quinn P F, Beven K, Chevallier P, Planchon O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. In Beven K J, Moore I D, eds, *Terrain analysis and Distributed modelling in Hydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 63~83.
- Rodriguez E, Morris C S, Belz J E, Chapin E C, Martin J M, Daffer W, Hensley S. 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143.
- Rabus B, Eineder M, Roth A, Bamler R. 2003. The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 241~262.
- Summerfield M A (ed). 2000. *Geomorphology and Global Tectonics*. London: John Wiley & Sons, 1~367.
- Tarboton D G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 32(2):309~319.
- Meisels A, Raizman S, Karnieli A. 1995. Skeletonizing a DEM into a drainage network. *Computer & Geosciences*, 21(1):187~196.
- Venkataraman G, Madhavan B, Ratha B, Banglani S. 1997. Integration of geological and geophysical data for the identification of sulfide mineralised zones in Rajpura Dariba Belt, Rajasthan. *Intern. Jour. Remote Sensing*, 6(6):1221~1232.
- WEI Guo, JIANG Hai, HUANG Jieshen, ZHAO Wei. 2006. Watershed Analysis Based on DEM in GIS Environment. *China Rural Water and Hydropower*, (10): 12~16.
- Wilson J P, Gallant J C. 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley & Sons, U K.
- YANG Yueqing, HOU Zhenqian, HUANG Dianhao, QU Xiaomin. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian island arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23 (1):17~24 (in Chinese with English abstract).
- Zadeh L H. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338~353.
- Zimmermann H J. 1985. *Fuzzy set theory and its application*. Boston: Kluwer-Nijhoff. 363.