doi:10.3969/j.issn.1674-3636.2013.03.436

浙西北热液型铅锌银多金属矿成矿特征与定量预测

王成彬[1,2],陈建国[1,2,3],张珍玉[4],肖　凡[1,2],杨　梧[1]

(1.中国地质大学(武汉)资源学院,湖北 武汉 430074;2.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;3.中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北 武汉 430074;4.江苏省地质调查研究院,江苏 南京 210018)

摘要:基于GIS空间分析技术,以MORPAS为平台,建立浙西北热液型铅锌银多金属矿多元空间数据库,在对本地区铅锌银多金属成矿规律研究的基础上,运用数理化的手段对与本地区成矿有关的地层、构造、岩浆岩、地球物理、地球化学等多元数据进行量化、分析建立本地区的找矿概念模型,利用证据权的方法进行成矿定量预测。通过分析,发现浙西北热液型铅锌银多金属矿与本地区的地层、岩浆、褶皱、断裂、重力、地球化学数据及其衍生变量具有密切关系。根据计算出的成矿有利度及其等值线图将研究区划分为18个靶区、2个成矿远景区。

关键词:热液型;铅锌银多金属;证据权法;MORPAS软件;定量预测;浙西北

中图分类号:P618.43;P618.44;P618.52　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1674-3636(2013)03-0436-08

0　引　言

扬子地台边缘地区是我国重要的多金属矿的富集区,在扬子地台的西南边缘、北缘以及东北缘都发现了一批具有热水喷流沉积(Sedex)和密西西比河谷型(MVT)特征的铅、锌多金属矿床(李智明,2007;朱建东等,2008)。近年来,浙西北找矿工作取得了巨大突破,淳安、衢州等地相继发现了一些中—大型规模的银铅锌多金属矿床,在其邻区安徽省境内也有类似的发现。因此,该区域有望发展成为中国华南地区一个新的银铅锌多金属成矿带。但目前来看,该区的地质及矿产勘查工作程度较低,区域内矿产资源潜力评价还处于空白。

通过总结浙西北区域成矿规律和典型铅锌银多金属矿矿床成矿模式,运用GIS技术,对浙西北区域内的铅锌银矿成矿综合信息进行分析,研究已有的地质、物探、化探、矿产等地质资料,对该区进行矿产资源预测评价研究,分析该区银铅锌多金属矿的找矿前景,为浙西北地区矿产资源进一步勘查和开发提供科学依据。

1　研究区矿产资源综述

研究区位于浙江省西北部,江山—绍兴断裂带北界,与皖南、赣西交界,面积约$2.142\ 6\times10^4\ km^2$。区内以怀玉山系及天目山系为主,北东走向,山势低缓,主要河系为富春江,北东流向。

浙西北地区在大地构造位置上属于新元古板块俯冲带,钦杭成矿带的东北段,此地区北接扬子板块,南邻华南板块,是中国南方大地构造单元江南造山带的重要地区(唐永成等,2010)。区域分布自元古代至中生代比较连续的地层,经历了多期次的构造岩浆活动,形成相对独特的地质构造格局(潘桂棠等,2009)。从成矿区带的划分上看属于长江中下游晚古生代—中生代铜、金、铁、铅、锌、硫成矿带和江南地块元古宙、中生代铜、钼、金、铅、锌成矿带的一部分(朱安庆等,2009)。

矿种资料统计表明,研究区内有铅、锌、银、钨、铋、汞、钴、金、钼、镍、锑、铁、硫、萤石等单矿种或多矿种矿床。矿床成因类型以矽卡岩型和具有MVT和Sedex特征的"扬子型"(李进学等,2011)等热液

收稿日期:2013-06-25;**编辑**:蒋艳

基金项目:"十二五"国家支撑计划课题(2011BAB06B08-2),中国地质调查局地质大调查项目(12120113089100,1212011120986)

作者简介:王成彬(1988—　),男,硕士研究生,研究方向为矿产勘查与评价,E-mail:wangcug@hotmail.com

矿床为主,矿床大多数与沉积建造具有很大的关系,像银山银多金属矿产出与蓝田组白云岩、硅质岩有密切关系。已探明的矿床(点)数为 310 处,主要矿产种类为铅、锌、银等多金属,其中已知矿床(点)为 69 处。近年来,本地区铅锌银多金属找矿有了重大突破,发现了一些中大型铅锌矿床,但地质矿产研究工作程度相对较低。为了更好地服务于地质找矿工作,笔者在现有工作的基础上选取铅锌银多金属作为本地区预测研究矿种,在对研究区各种成矿条件进行量化分析的基础上,对本地区的找矿前景作出定量预测分析。

2　成矿条件分析

区域成矿条件的研究即是通过对地质、地球物理、地球化学、遥感等数据处理与分析, 从中提炼出构造、岩浆岩和地层与成矿的关系, 进而结合地质调查的成果,来推断区域内有利于矿床产出的成矿条件组合(陈建平等,2011,2012)。通过搜集研究区内基础地质、矿产、地球物理、地球化学等多元数据,以 MORPAS 3.0 为平台建立浙西北银多金属矿成矿预测空间数据库。然后从地层、构造、岩浆岩以及地球物理和地球化学特征 5 个方面探讨、提取成矿有利因素。

2.1　区域地层与成矿

通过对研究区内已知的铅锌银等多金属矿床(点)进行统计分析(图 1),铅锌银等多金属矿床(点)出露地层有:中元古界(Pt_2)、震旦系(Z)、寒武系(Є)、奥陶系(O)、志留系(S)、石炭系(C)、侏罗系(J)。由图 1 可知,具规模的矿床主要分布地层为震旦系(Z),其次是寒武系(Є)、奥陶系(O)、志留系(S)、泥盆系(D),其他地层零星分布。

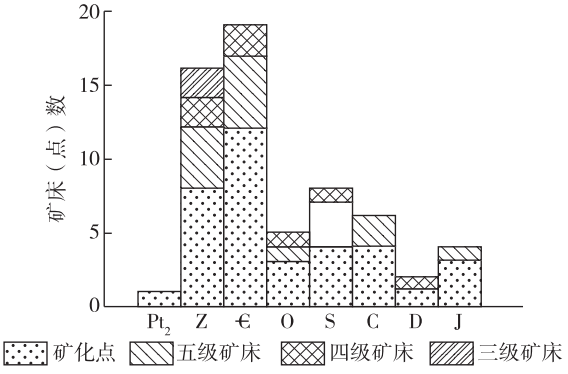

图 1　矿床(点)在地层中的分布情况统计

把不同时期的地层作为证据权因子计算其证据权重及其相关系数 C,得出震旦系地层 C 值为 1.085,寒武系地层 C 值为 1.729。侏罗系、前震旦系的 C 值为负,说明不利于成矿,因此选择震旦系、寒武系作为成矿的有利地层,综合构置“有利成矿地层”作为成矿预测的一个证据图层。

2.2　区域岩浆岩与成矿

燕山期侵入岩最为发育,占全省侵入岩的 90% 以上。从空间规律上看,铅锌矿点主要发育于燕山期花岗岩附近,几乎全部落在岩体周边(图 2)范围内。从时间规律上看,燕山期早期形成铁、铜、钼、铅、锌等矿床,儒洪、广山岩体接触带中矿石同位素为 143 ~ 152.3 Ma(K-Ar 法),与燕山早期侵入岩同位素年龄(197 ~ 136 Ma)一致(侯翠霞,2010)。晚期形成铅、锌、金、银等矿床,如八宝山金银矿年龄值为 80 ~ 100 Ma,与燕山晚期同位素年龄(119 ~ 70 Ma)一致(马瑞士,1965)。

燕山期重熔型花岗岩岩体侵入较浅,受 NE—NNE 向构造控制,单个岩体面积较小,从几到百余平方米不等。岩体沿印支褶皱核部或大断裂带侵入,主要在震旦—古生界地层中形成矽卡岩型、热液交代型、沉积热液改造型矿床,主要矿种为铁、铜、铅、锌、硫、萤石。

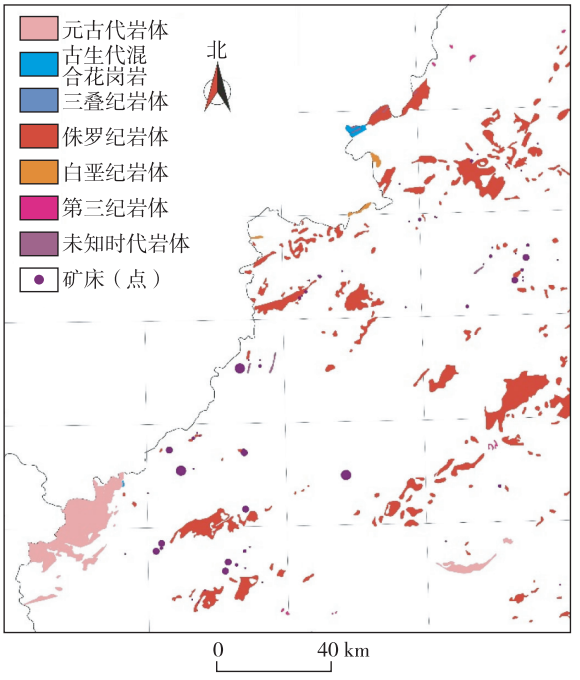

图 2　浙西北矿床(点)分布与岩体关系图

对不同时代岩体周边矿床(点)的统计以及对岩体的时代、距离缓冲区的证据权值及相关系数的计算分析,发现侏罗纪时代的岩体对于本地区的成矿最有利;距离岩体 2 km 时权重值最大(图 3)。

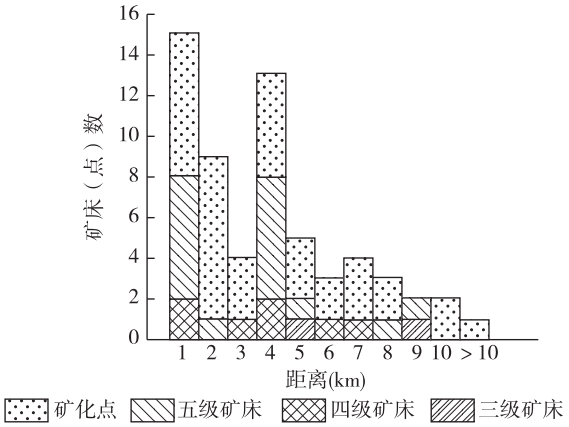

图 3 矿床(点)数与有利岩体距离关系

2.3 区域构造与成矿

2.3.1 褶皱构造与成矿 浙西北研究区的主要构造为北东向的褶皱和断裂。褶皱造山运动主要发生在晚晋宁期及华力西—印支期,分别形成基底和盖层褶皱。在后期燕山运动中,表现为北东向平缓开阔式褶皱及较强烈的块断和岩浆活动,这些褶皱带在一定程度上控制着铅锌矿的分布,如银山银铅锌多金属矿分布于鲁村—学川褶皱束中段,富阳上台门铁铅锌矿位于华埠—新登拗褶带北东端。通过对褶皱和银铅锌矿点的叠加分析,可以看出,主要是 NE 向晚期华夏系(印支期)褶皱控制成矿;通过对褶皱时代、褶皱轴线平均方位、褶皱轴线缓冲区计算分析,发现矿床(点)70% 发育在 NE 向晚期华夏系褶皱轴线 5 km 缓冲区内(图 4、图 5)。

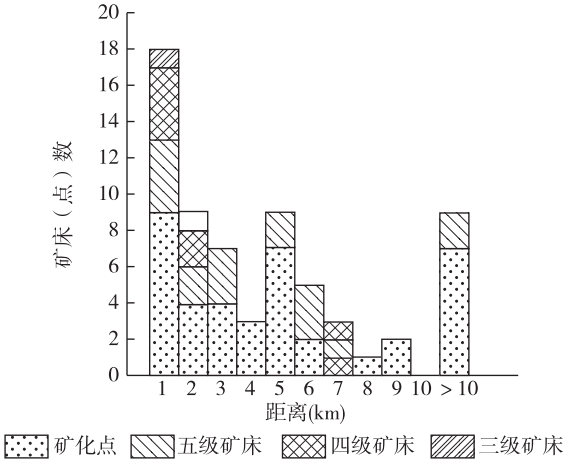

图 4 矿床(点)数与褶皱距离关系

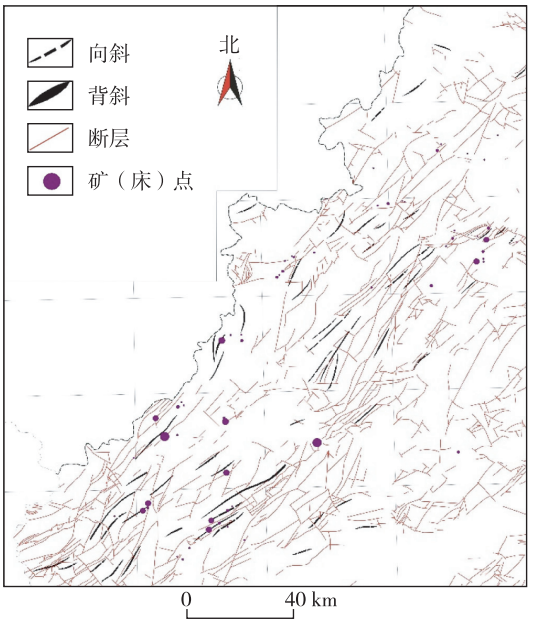

图 5 浙西北矿床(点)分布与构造关系图

2.3.2 断裂构造与成矿 江山—绍兴深断裂作为下扬子准地台与华南褶皱系两大构造单元的分界线,早期以推覆剪切为主,晚期为左行走滑为主,此深断裂与金、银成矿有密切的成因联系。由于皖浙赣断裂带地区构造演化的多期次,研究区内不同的断裂具有不同地质表象:新元古代晋宁期的 NE 向,早古生代加里东期为近 EW—NEE 向,晚中生代为 NNE 向(余心起等,2007)。

通过浙西北 50 万地质空间数据库中的断层线文件和该区银铅锌矿床(点)文件的叠加分析可以看出,研究区近 70% 的矿床均集中分布在断层 2 km 缓冲区(图 6),随着距离的增大,矿化程度逐步降

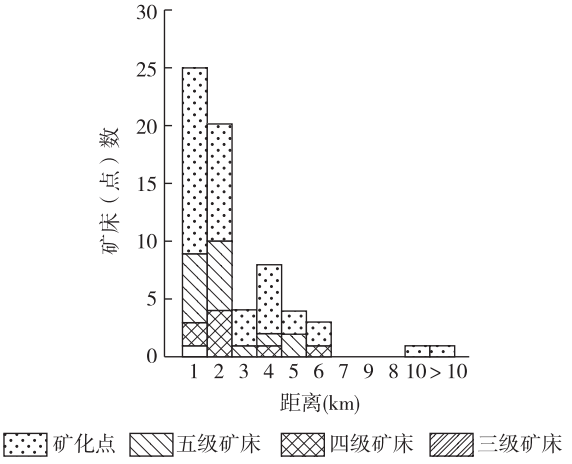

图 6 矿床(点)数与断层距离关系

低。并且距离为 2 km 的缓冲区 C 值最大,说明断裂 2 km 范围内为成矿有利地层。因此,选择 2 km 缓冲区作为预测的证据因子;统计研究区内断层 NEE、NNE、NNW、NWW 4 个走向方向与银铅锌矿床(点)的空间关系,发现矿床(点)分布明显受到断层走向控制,选为断层的 NEE 及 NNE 向作为有利的证据因子(图 7)。

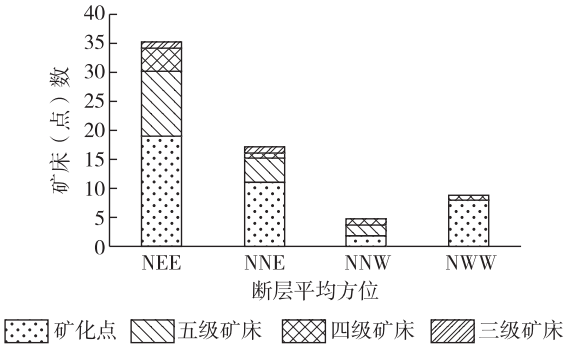

图 7　矿床(点)与断层平均方位的关系

断层条数反映了构造的复杂程度,从图 4 和表 1 中可以看出:断层条数为 3 ~5 条时,具有正权重值;当断层条数为 5 时,C 值最大。因此,选择断层条数 3 ~5 条为有利的证据因子。

表 1　断层条数的权值和相关系数

断层条数	W^+	W^-	C
0	-0.024	0.037	-0.061
1	0.040	-0.014	0.054
2	-0.337	0.024	-0.361
3	0.284	-0.010	0.294
4	0.572	-0.008	0.580
5	1.160	-0.013	1.173
6	-28.095	0.002	-28.097

2.4　区域地球物理场与成矿

热液型矿床在成矿过程中,成矿的动力以及物质来源一般都受岩体或构造的控制。岩体可以为成矿提供必要的动力以及物质来源,构造则为成矿提供了良好的导矿和储矿条件。通过对浙西北区域重力场和银铅锌矿床空间位置叠加分析,发现其有一定的对应关系:区内已知的矿床(点)一般分布在重力梯级带的转折端或圈闭环状重力异常内部和附近,如富阳县导岭铅矿、上台门铁铅锌矿位于 2 条等值线突然拉开部位,衢州洞口乡银坑铅矿位于圈闭的环状重力异常线上反映了中酸性岩体对矿床的控制作用;在高密度体内的异常区一般也对应着矿化密集区,如淳安大坑源银矿、桶湾铅矿、建德县白沙镇银矿均产于临安马金重力梯度密集带中段,这些线性构造特征在一定程度上反映了次级构造对矿床的控制作用。

在对重力场和铅锌银多金属矿空间分析结果的分析上,通过公式(1)计算重力一阶水平导数模来突出地球物理场与区域成矿的关系(图 8)。本地区的铅锌银多金属矿与导数模之间呈正态分布特征,大多数的矿床介于 5 ~10 之间。因此选择 5 ~10 的导数模区间作为证据权图层。

$$|\mathrm{Der}| = n \times \sqrt{A^2 + B^2} \tag{1}$$

式(1)中,$|\mathrm{Der}|$ 为水平倒数模,A、B 为方向互相垂直的水平导数,n 为系数,为了方便计算,选择 n = 10 000。

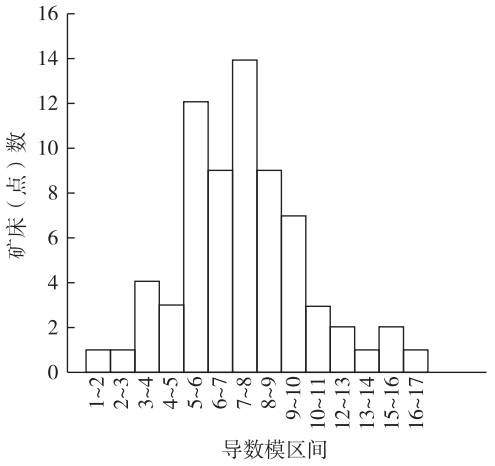

图 8　矿床(点)与重力的分布关系

2.5　区域地球化学特征与成矿

将水系沉积物所有元素作聚类分析,发现 Ag、As、Pb、Sb、Cu、Zn 这 6 种元素关系比较密切。若将这些单个元素直接作为证据图层,会违背“证据权法”所要求的条件独立性原则,需要对这些元素进行主成分分析,将多个变量通过线性变换,选出较少的重要变量(王力宾,2010),通过主成分分析发现 Ag、As、Sb、Pb 之间的相关性较大,Cu、Zn 相关性较大,对其主成分分析,取特征值大于 1,得到 FAC1、FAC2 2 个主因子;因子负载见表 2,FAC1 和 FAC2 分别代表 Ag-As-Sb-Pb 组合和 Cu-Zn 组合。选取因子得分均值加 2 倍方差作为异常下限(表 3),据此

将 FAC1 和 FAC2 的异常图转为 GRID 格式的二值图像,作为建立证据权模型的证据因子。

表 2 成矿元素因子负载

元素	FAC1	FAC2
Ag	0.361	0.016
As	0.405	-0.091
Cu	-0.193	0.556
Pb	0.250	0.083
Sb	0.418	-0.222
Zn	-0.092	0.498

注:提取方法:主成分分析法;旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法;构成得分

表 3 FAC1、FAC2 统计异常下限表

类型	FAC1	FAC2
均值(X)	-0.220	-0.090
标准差(S)	0.250	0.280
$X+1.0\times S$	1.020	1.210
$X+1.5\times S$	1.160	1.390
$X+2.0\times S$	1.309	1.603

3 银铅锌多金属矿床证据权概念模型

证据权法是一种基于 GIS 空间分析功能的多元信息综合模型,其本身是一种离散的多元统计方法,最初应用在医学诊断上。Agterberg 等(1993)对此方法进行了改进和完善,并引入矿产预测领域。“证据权”与找矿信息结合能够区分矿化有利地段和不利地段,利用确定矿产形成的后验概率来圈定研究区有利成矿部位,从而达到定量圈定和评价找矿靶区的目的。

找矿模型突出的是某类矿床的基本要素和找矿过程中具特殊意义的地质、物探、化探和遥感影像等特征及其空间变化情况,总结发展该类矿床的基本标志和找矿使用方法手段(张垚垚等,2010)。通过研究浙西北的地质背景、重力、地球化学特征,建立银铅锌多金属矿床的找矿概念模型(表 4)。

表 4 浙西北银多金属综合信息找矿概念模型

标志分类		信息显示
	地层	震旦系、寒武系地层
	构造	NE 向断裂和 NE 向晚华夏期的褶皱,尤其是 NE 向复式褶皱与脆韧性断裂交汇部位
	岩浆岩	燕山期花岗岩
地球物理	重力	重力梯度密集带、转折端,5~10 重力一阶导数模区间
地球化学	地球化学特征	Pb、Zn、Ag 水系沉积物地球化学元素异常

4 成矿信息的提取

4.1 证据权因子及其权重计算

研究区预测的目标矿种是铅、锌、银。将区内已知矿床(点)分为 1~6 级,由大到小 6 个规模等级,并依据区域找矿模型,从浙西北空间数据库中提取有利的找矿标志,作为证据权重模型计算的证据因子。通过计算分析选择:(1) 震旦系、寒武系。(2) 侏罗纪岩体 2 km 缓冲区。(3) 断层 2 km 缓冲区。(4) 断层的 NEE 及 NNE。(5) 断层条数 3~5 条为有利的证据因子。(6) NE 向晚期华夏系褶皱褶皱轴线的 5 km 缓冲区。(7) 5~10 重力一阶导数模区间。(8) 化探 FAC1 和 FAC2 的异常图转为 GRID 格式的二值图像作为证据权因子并计算其证据权值(表 5)。

表 5 综合有利证据证据层

变量	说明	W^+	W^-	C
地层	有利地层:震旦系、寒武系	0.767	-0.758	1.525
岩体	有利岩体缓冲区:侏罗纪花岗岩,缓冲区半径:2 km	0.622	-0.684	1.306
断层	断层缓冲区:2 km	0.044	-0.349	0.393
断层方位	断层平均方位:NE 向	0.288	-0.071	0.358
断层条数	断层条数 >2	0.442	-0.029	0.471
褶皱	有利褶皱缓冲区:晚期华夏系褶皱 5 km	0.686	-0.263	0.950
重力导数模	5~10	0.263	-0.756	1.018
FAC1	Ag-As-Sb-Pb 元素组合,异常下限取 1.309	1.790	-0.659	2.450
FAC2	Cu-Zn 元素组合,异常下限取 1.603	1.447	-0.164	1.611

4.2　证据权因子独立性检验

应用证据权模型进行成矿定量预测时要求各个图层具有条件独立性或者弱条件独立性(成秋明,2012),基于数据图层本身,许多学者提出的很多证据权因子检验的方法,例如逻辑回归加权方法(Agterberg,2011),校正加权模型(Deng,2009),Simple-krigeing 方程组求解法(Journel,2002),Tau 模型方法(Krishnan et al,2005),Nu 模型(Polyakova et al,2007),秩相关系数加权方法(张生元等,2009),增强证据权(成秋明,2012)。但作为一个成矿系统,在成矿的演化过程中,一般深大断裂会控制后生的沉积作用以及次一级的断裂活动,若断裂性质为张性甚至还会伴随着成矿物质的喷流;在地球化学场中,地球化学单元素异常以及组合异常之间存在的信息冗余;地层元素含量的高低也同样影响着地球化学场,等等。因此,在定量评价中选取的证据图层很难达到数学上的绝对独立性。对于非地质专业人员,可以根据上述基于数据图层本身进行证据权因子的检验选取;对于地质专业人员,可以根据本地区成矿的具体成矿规律以及矿床模型,在矿床模型转化为定量勘查模型的同时,合理选择地质上相对独立的成矿要素作为各种证据图层。

笔者在研究本地区成矿地质特征的基础上选择与成矿有利的地层、岩体、构造等要素作为证据图层,为了证明图层选择的合理性,对 9 个证据图层作因子分析,得到对 9 个因子的相关系数矩阵(表 6)。可以看出,各因子之间的相关性系数大部分小于 0.3, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计量为 0.658,表明各证据权图层之间相关性较差,可以选为证据因子。

表 6　因子相关系数矩阵表

证据图层	FAC1	FAC2	有利地层	断层条数	断层 2 km 缓冲区	断层方位	岩体 2 km 缓冲区	褶皱 5 km 缓冲区	重力导数模区间
FAC1	1.000								
FAC2	0.299	1.000							
有利地层	0.366	0.221	1.000						
断层条数	0.098	0.027	0.115	1.000					
断层 2 km 缓冲区	0.148	0.105	0.347	0.142	1.000				
断层方位	0.094	0.034	0.195	0.346	0.285	1.000			
岩体 2 km 缓冲区	0.115	0.097	0.077	0.052	0.374	0.102	1.000		
褶皱 5 km 缓冲区	0.182	0.109	0.216	0.064	0.305	0.144	0.014	1.000	
重力导数模区间	0.022	0.087	0.115	0.060	0.311	0.125	0.088	0.223	1.000

5　找矿靶区的圈定与评价

依据所建立的浙西北找矿证据权模型,计算各个成矿预测单元的成矿有利度(后验概率)。选取 0.08 作为有利度的阈值,共圈定找矿靶区 18 处(图 9)。靶区整体呈 NE 向空间展布,与本地区的构造地质格架基本类似,表明本地区的成矿受断裂及地层控制,与本地区的地质认知基本一致。

根据利用 MORPAS 证据权法圈出的成矿有利度(后验概率)得知,综合各种地质找矿因素,圈出 2 个找矿远景区。

5.1　开化—淳安远景区

远景区北段北侧为昌化—普陀断裂,以南为马金—乌镇断裂,总体上呈北东展布,属于鲁村—学川隆褶束和紫金尖—麻车埠构造单元的北段。区内主要出露前寒武系灰岩、泥岩、含碳质泥页岩以及奥陶粉砂质泥岩、硅质页岩等,其中前寒武碳酸岩和硅泥质岩为主要赋矿围岩。褶皱断裂构造较为发育,受昌化—普陀断裂和马金—乌镇断裂影响,在北部和东南部分别发育一系列次级近东西向、近南北向断裂。侵入岩主要为学川花岗岩、河桥花岗岩,岩体为粗粒、中粗粒、细中粒(斑状)黑云母花岗岩,沿断裂呈东西向分布。矿床(点)主要分布在黄石潭岩体周围,其中银山银铅锌矿为中大规模矿床。

远景区的中段东侧为马金—乌镇断裂和鲁村—麻车埠断裂,主要出露前寒武碳质硅质岩、泥页岩、灰岩,侵入晚侏罗世花岗岩、花岗闪长岩,其中大坑

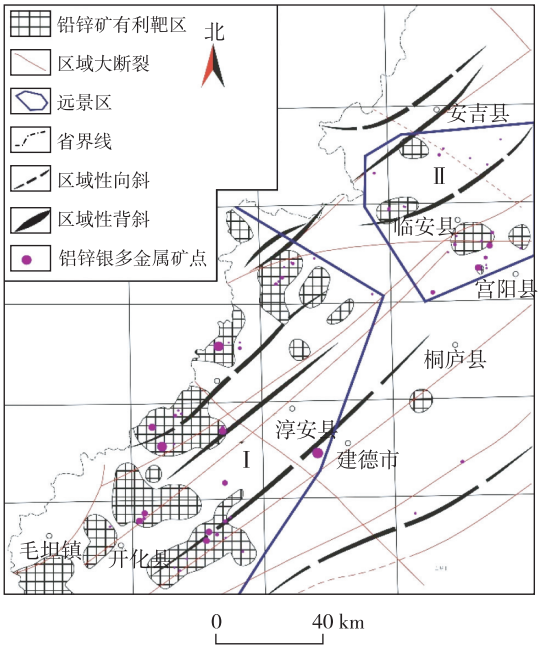

图 9 浙西北银铅锌多金属矿床找矿靶区及远景区划分

源银矿、银山庵银矿、大横山铅矿、大溪边铅矿为中小规模矿床,其余为矿化点。

远景区南段属于华埠—新登拗褶带,区内出露前寒武、志留、奥陶系地层,岩性为碳质硅质岩、泥岩、页岩、石煤、石英砂岩、砂岩、粉砂岩等。侵入晚侏罗世花岗岩、花岗斑岩,其中衢县银硐背铅矿、衢州市洞口乡银坑铅矿为小型矿床。

5.2 富阳—临安远景区

区内主要出露寒武系、奥陶系、志留系地层,地层岩性为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。条带状灰岩砂质白云岩、白云质砂岩、岩屑石英砂岩夹灰岩、白云质泥岩,侵入岩规模较小,主要为晚侏罗花岗岩、花岗闪长岩;其中导岭铅矿为小规模矿床,其余皆为矿点,大多数矿点不在圈定的靶区中,主要是由于建立的找矿证据权模型含矿地层选择的主要为震旦系和寒武系,而本远景区内的矿点的含矿地层与证据权模型中的成矿有利地层存在一定的出入。

6 结 论

(1)通过系统收集浙西北区域地质、重力、化探资料,在对该研究区地质背景深入研究的基础上,综合分析了各类地质因素对成矿的控制作用,进行了找矿标志的有利提取,以 MORPAS 软件为平台,使用证据权重方法,圈定银铅锌多金属靶区 18 个,成矿远景区 2 个。

(2)将远景图和已查明的矿床(点)叠加分析,发现矿床(点)大多数分布在高概率预测远景区,说明该方法在该研究区对银铅锌多金属矿产资源的预测具有较高的准确性。

(3)证据权法有利于实现控矿信息的横向(同类控矿信息或者同一图层,例如地球物理信息中的重磁信息)和纵向(不同类控矿信息或者不同图层,例如重磁异常信息和地球化学异常信息)的有机关联和集成,最终实现应用高度浓集的综合致矿信息圈定和评价找矿靶区,其解释更为直观;但由于模型方法本身的局限性在地质信息在与数学统计信息的转化过程中存在一定的信息损失与冗余,导致预测结果可能存在一定的误差。因此,在最终成矿远景分析时,要尊重客观地质认识事实。

7 致 谢

文中资料多来源于浙江省第一地质大队,在野外工作以及资料收集过程中得到了吴光明以及各位地质同仁的大力支持和帮助。在此深表感谢!

参考文献:

陈建平,董庆吉,郝金华,等. 2011. 基于 GIS 的证据权重法青海“三江”北段斑岩型钼铜矿产资源成矿预测[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 519 – 529.

陈帅奇. 2011. 浙西开化地区燕山期岩体特征及成矿背景研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).

陈建平,严琼,尚北川,等. 2012. 湖南黄沙坪地区铅锌矿床三维预测研究[J]. 地质学刊,36(3):243 – 249.

成秋明. 2012. 增强证据权 (BoostWofE) 新方法在矿产资源定量评价中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(6): 1976 – 1985.

侯翠霞. 2010. 浙西成矿带铜多金属矿床成矿预测[D]. 北京:中国地质大学(北京).

李智明. 2007. 扬子北缘及周边地区铅锌成矿作用与找矿方向研究[D]. 西安:长安大学.

李进学,侯满堂,朱增伍. 2011. 扬子地块北缘观音庵铅锌矿找矿模型及远景预测[J]. 陕西地质, 29(1): 1 – 9.

李泓明,郭俊,胡平. 2011. 大兴安岭南段火山机构与成矿作用[J]. 内蒙古科技与经济,(7): 57 – 58.

马瑞士. 1965. 浙西加里东地槽地质构造[J]. 南京大学学报:自然科学版,9(4):465 – 484.

潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1 – 16.

唐永成,曹静平,支利庚,等. 2010. 皖东南区域地质矿产评价[M]. 北京:地质出版社.

王力宾. 2010. 多元统计分析:模型、案例及 SPSS 应用[M]. 北京:经济科学出版社.

余心起, 江来利, 许卫, 等. 2007. 皖浙赣断裂带的界定及其基本特征[J]. 地学前缘, 14(3): 102 – 113.

朱建东,刘源骏,祝敬明,等. 2008. 扬子地台东北缘鄂西铅锌矿成因类型与地学思维[J]. 资源环境与工程, 22(3): 281 – 288.

朱安庆,张永山,陆祖达,等. 2009. 浙江省金属非金属矿床成矿系列和成矿区带研究[M]. 北京: 地质出版社.

张生元, 成秋明, 张素萍, 等. 2009,加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J]. 地球科学, 34(2): 281 – 286.

赵江南,陈守余,商伟. 2009. 基于 GIS 证据权重法在祁连山地区铜矿床成矿预测[J]. 地质找矿论丛,24(1): 41 – 46.

张垚垚,王长明,徐贻赣,等. 2010. 江西冷水坑银铅锌矿床综合找矿模型[J]. 金属矿山,(12):100 – 106.

AGTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F, CHENG Q M, et al. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[M]//DAVIS J C, HERZFEID V C. Computers in Geology: 25 years of progress. Oxford: Oxford University Press, 13 – 32.

AGTERBERG F P. 2011. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation [J]. Natural Resources Research, 20(2): 95 – 101.

DENG M F. 2009. A conditional dependence adjusted weights of evidence model[J]. Natural resources research, 18(4): 249 – 258.

JOURNEL A G. 2002. Combining knowledge from diverse Sources: An alternative to traditional data independence hypotheses [J]. Mathematical Geology, 34(5): 573 – 596.

KRISHNAN S, BOUCHER A, JOURNEL A G. 2005. Evaluating information redundancy through the tau model[M]// LEUANGTHONG O, DEUTSCH C V. Geostatistics Banff 2004. Netherlands: Springer, 1037 – 1046.

POLYAKOVA E I, JOURNEL A G. 2007. The Nu expression for probabilistic data integration [J]. Mathematical Geology, 39(8): 715 – 733.

Metallogenic characteristics and quantitative prediction of hydrothermal Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposits in northwest Zhejiang

WANG Cheng-bin[1,2], CHEN Jian-guo[1,2,3], ZHANG Zhen-yu[4], XIAO Fan[1,2], YANG Wu[1]

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Geological Survey Institute, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Multivariate spatial geo-database of Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposits of hydrothermal type in northwestern Zhejiang Province was established with MORPAS platform based on GIS spatial analysis technology. Based on the study of metallogenic rules for Pb-Zn-Ag polymetallic, the use of the multivariate data related with the mineralization in the area, such as strata, structures, magmatic rocks, geochemistry, geophysics and so on, the authors analyzed and established the mineral deposit prospecting model and made quantitative predication using weights of evidence. It was concluded that Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposits had a close relationship with local formation, magmatic, folds, faults, gravity, geochemistry and their derived variables. According to the ore-forming beneficial degree and contour map, the study area was divided into 18 metallogenic targets and two advantageous mineral prospects.

Keywords: Hydrothermal type; Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposits; Weights of evidence; MORPAS software; Quantitative prediction; Northwest Zhejiang