

证据权法在河北丰宁地区银铅锌多金属矿成矿预测中的应用

滕菲^{1,3}, 彭丽娜^{1,3}, 孟庆龙², 邢怡^{1,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国石油大港油田勘探开发研究院, 天津 300270;

3. 中国地质调查局华北地质科技创新中心, 天津 300170)

摘要: 本文在综合分析丰宁地区银多金属矿成矿特征的基础上, 对区内可能的各种控矿要素进行了深入研究。以ArcGIS为平台, 运用证据权法进一步提取出地层、构造、岩体、重磁等10种证据权因子, 计算后验概率, 并依据SRC曲线进行分级, 分界点值依次为0.000 023(先验概率值)、0.000 265、0.003 965, 由此划分3级成矿远景区39处。研究成果为丰宁地区下一轮的找矿预测工作提出了新的思路。

关键词: 丰宁地区; ArcGIS; 证据权法; 成矿预测

中图分类号: P612

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2021)01-0021-06

丰宁地区地处华北陆块北缘的多金属成矿带, 该区多金属找矿工作已经开展的相当深入, 前人积累了丰富的数据资料, 也取得了大量的找矿成果^[1-3]。进一步的攻深找盲工作对多专业信息的综合研究提出了更高要求。当前, 与GIS技术结合的找矿预测方法有很多种, 包括代数方法、模糊逻辑神经网络、秩相关分析、判别分析、聚类分析和证据权法等, 其应用大大提高了矿产资源预测与评价的效率^[4-9]。相较其它方法, “证据权”法基于二值图像, 其运行可由数据驱动、亦可专家干预, 具有实用、灵活等优势, 是国际地学领域使用的一种重要找矿预测方法。目前国内不同专家、学者对一些主要成矿区带、矿床进行了基于证据权法的矿产资源预测工作, 均取得了良好的找矿效果^[10-15]。丰宁地区尚未开展过此类区域性的综合找矿预测工作。本文以此为契机, 充分收集区内地质、物化遥等多源地学信息, 建立地质找矿空间“网格数据模型”, 主要采用相似类比的方法建立预测模型, 结合对典型探矿地质条件和地质异常的综合分析^[16-19], 利用证据权法开展综合找矿预测。

1 区域地质背景

丰宁地区处于华北陆块北缘的EW向燕辽多金属成矿带与NNE向上黄旗-乌龙沟多金属成矿带的

交切复合部位。以丰宁-隆化断裂带为界, 南北两分为华北北缘隆起带及燕辽中元古裂谷带两个构造单元。构造格局以东西、北北东-北东为主, 控制了区内中生代火山-沉积盆地的展布。与成矿相关的中生代侵入岩多分布在火山带外缘的隆起部位, 如千层背、窟窿山等, 或产于火山岩盆地的浅成-超浅成侵入体, 如丰宁白草、东猴顶、牛圈子坝等。早前寒武纪地层作为盆地基底, 主要出露有单塔子岩群和红旗营子岩群。红旗营子岩群主要分布于丰宁-隆化断裂带上及其北侧, 空间上呈近东西向展布。这套岩系Ag、Pb、Zn、Cu、Mo等元素的丰度值高。形成大量的铅锌银、钼矿床, 如: 蔡家营、牛圈-营房铅锌银矿、撒岱沟门钼矿等大型矿床。许多和中生代岩浆活动有关的铅锌银、钼矿床也都产于红旗营子群残块周围, 是本区多金属矿的主要矿源层^[20]。受环太平洋构造域影响, 区内中生代造山运动强烈, 诱发了大规模中、酸性火山喷发, 岩浆侵入活动, 成为本区最重要的成矿爆发期^[21]。其中以下白垩统张家口组火山岩及燕山期浅成-超浅成侵入岩与区内银多金属成矿关系最为密切(图1)。

2 成矿有利信息提取

笔者结合对区域上典型矿床的综合研究, 依据

收稿日期: 2019-10-30

资助项目: 中国地质调查局项目“燕山-太行成矿带丰宁和天镇地区地质矿产调查(DD20160042)”

作者简介: 滕菲(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 毕业于吉林大学数字地质专业, 现主要从事应用地球物理研究, E-mail: 77128889@qq.com。

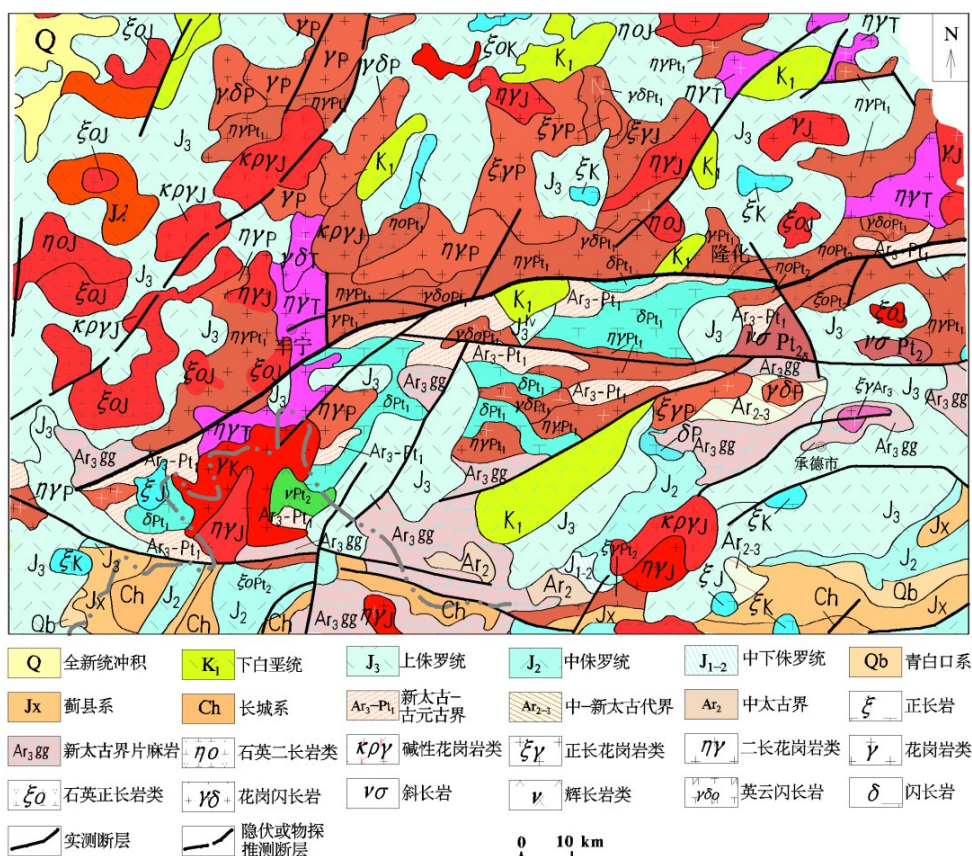


图1 丰宁地区地质简图

Fig.1 Geological map in Fengning region

成矿地质条件和找矿标志^[22-26],初步建立找矿预测模型,基于MAPGIS平台,从已建立多元地质信息数据库中提取岩石、地层、构造、重磁、化探、遥感等多个成矿有利要素层。根据不同要素与已知矿产地空间关系,对部分要素进行不同方向缓冲分析,并研究该要素与已知矿床(点)的关联程度^[27]。

2.1 有效证据因子提取方法

基于找矿预测模型,研究初步提取的各个证据因子的权重值及其与响应因子的相关程度,其相关参数包括: W^+ 、 W^- 、 C 、 $S(C)$ 等。权重 W^+ 表示当前证据因子中某一特定类别存在时,对响应因子的影响程度;权重 W^- 表示当前证据因子中某一特定类别不存在时,对响应因子的影响程度。对比值 C 是度量响应因子与证据因子之间相关性的有效依据。学生化对比值 $Stud(C)$ 是度量对比值 C 的显著性水平的有效证据(表1),可以由如下公式计算得到:

$$Stud(C) = \frac{S(C)}{\sqrt{S(W^+) + S(W^-)}}$$

上式中, $S(C)$ 、 $S(W^+)$ 、 $S(W^-)$ 依次表示对比值 C 、权重 W^+ 、权重 W^- 相应的方差。各个证据因子的权

重方差可以依据如下公式计算得到:

$$S(W_j^+) = \frac{1}{N(B_j \cap D)} + \frac{1}{N(B_j \cap \bar{D})}$$

$$S(W_j^-) = \frac{1}{N(\bar{B}_j \cap D)} + \frac{1}{N(\bar{B}_j \cap \bar{D})}$$

在要求研究区单元面积至多仅能包含一个矿床(点)的前提下, D 为含有一个矿床(点)的单元数,即已知矿床(点)数。 B_j 为证据因子 j 在研究区范围内存在的单元数。因此, $Stud(C)$ 可以作为进一步筛选、提取有效证据因子的衡量指标。

在 ArcSDM 的 Weights of Evidence (WofE) 模块中,依据 Calculate Weights 功能,可以计算上述相关参数。一般地,根据 $Stud(C)$ 将证据因子划分为四类:主要影响因子(值大于 1.96)、参与评价的重要影响因子(值介于 1.28 ~ 1.96 之间)、参与评价的次要影响因子(值介于 0.542 ~ 1.28 之间)、以及非影响因子(值小于 0.542)。

2.2 有利岩石、地层信息

区内基底最下部变质岩系和张家口组酸性、中酸性火山-次火山岩系是区内陆相火山岩型银(铅锌)矿床主要的矿源层。而中生代同熔型和重熔型

表1 学生化对比值 $S(C)$ 与对比值 C 显著性水平的对应关系
Table1 Relativity between $Stud(C)$ and the important degree of C

$S(C)$	0.253	0.542	0.842	1.282	1.645	1.96	2.326	2.576
C 的显著性水平	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995

花岗岩属重要的成矿母岩。

区内银(多金属)矿床(点)多产于白垩系张家口组(火山岩盆地)地层边缘隆起区。因此选取其外边界进行缓冲分析,采用ArcSDM中WofE模块的Calculate Weights功能,计算不同缓冲距离下该要素对于已知铅锌银矿床(点)的权重,选取对比值 C 为最大值时的外缓冲范围(2 km)作为进一步用以研究的成矿预测要素(图2)。进行二值化处理,计算其证据因子响应度。计算结果显示(表2)该要素的 $Stud(C)$ (等于1.292 3)显著性水平90%~95%,且对比值(等于0.366 2)、权重(等于0.243 2)均可接受。因此,该要素适合作为最终参与成矿后验概率计算的证据因子。

同理筛选出新太古界单塔子群、早元古界红旗营子群地层要素(主要重熔变质岩系)1.5 km 以内的外缓冲范围、中生代中酸性侵入岩要素在2 km 以内的缓冲范围作为最终参与成矿后验概率计算的证据因子。

2.3 构造信息

区内构造格局受EW向基底构造丰宁-隆化及NNE向上黄旗-乌龙沟等深大断裂控制,区内北北



图2 张家口组(火山岩)地层缓冲与矿产关系图
Fig.2 Relationship between Zhangjiakou strata buffers and minerals

表2 张家口组(火山岩)地层证据因子响应度
Table 2 Responsivity of Zhangjiakou strata evidence- $gene$

CLASS	C	$S(C)$	$Stud(C)$	W	$S(W)$
背景区	-0.366 2	0.283 4	-1.292 3	-0.123	0.174 1
缓冲区	0.366 2	0.283 4	1.292 3	0.243 2	0.223 6

东、北西西两组密集发育的断裂构成明显的棋盘格构造,这一规律与地球化学场中的Pb、Zn等元素的异常分布和地球物理场异常排列完全吻合,异常的高强度主要出现在断裂交叉部位即棋盘格构造的交点上。棋盘格控矿模式明显,而火山机构和火山盆地又受控于棋盘格构造。矿床往往产于火山断陷盆地一侧(如牛圈银(金)矿)^[28],或围绕火山机构呈环状分布^[29](千佛寺Pb、Zn、Ag矿点)。笔者提取区内已知地质构造,并将基于重磁-遥感综合推断的线性构造要素(断裂)作为补充,综合形成本区线性构造预测要素图层。根据成矿相关度的计算结果,选取区内线性构造0.9 km缓冲范围作为参与进一步研究的证据因子。

2.4 重磁异常信息

重磁异常为地质构造解释提供了依据,同时重磁异常梯级带作为异常高低变化的过渡带,往往反映了断裂构造或岩石与地层等的接触带,与找矿关系十分密切^[30-33]。据此,笔者依据研究区1/20万重力资料,1/5万航磁资料分别对研究区的重磁异常梯级带进行了提取,分别计算0.1~3.5 km(以0.1 km递增)不同缓冲半径下重磁异常梯级带要素对比值。根据对比值 C 为最大值原则,确定航磁梯级带在1.8 km内的缓冲(图3)、重力梯级带2.3 km内的缓冲(图4)作为进一步用以研究的成矿预测要素。统计结果表明落入重、磁异常梯级带的矿产地分别为37个和50个,占研究区矿床总数的67%和90%。从统计结果可以看出中比例尺重力资料更多反映了区域的构造格局,大比例尺航磁资料局部细节更丰富,对寻找铅锌银矿更为有利。

2.5 化探、遥感异常信息

Ag、Pb、Zn是研究区最主要的异常元素,呈明显



图3 航磁梯级带缓冲与矿产关系图
Fig.3 Relationship between aeromagnetic gradient buffers and minerals



图4 重力梯级带缓冲与矿产关系图

Fig.4 Relationship between gravity gradient buffers and minerals

的带状展布。这些元素异常与北东向和北西向断裂构造密切相关,均与已知矿床(点)对应吻合。这些元素异常强度高、规模大,套合清晰明显,浓集中心显著,规模大,是一组与热液成矿有关的元素组合,是本区的主要成矿元素^[34-35]。鉴于化探异常的直接指示作用,笔者未对单元素异常进行缓冲分析,而直接二值化,计算其证据因子响应度(图5)。计算结果表明,Ag、Pb、Zn异常要素适合作为最终参与成矿后验概率计算的证据因子。

在对区内遥感信息分析提取的基础上,笔者对研究区羟基蚀变异常、铁染蚀变异常进行二值化处理,进行与矿床(点)关联程度的分析计算,权重W、对比值C等各项参数指标较低,因此确定该要素并不适合作为最终参与成矿后验概率计算的证据因子。

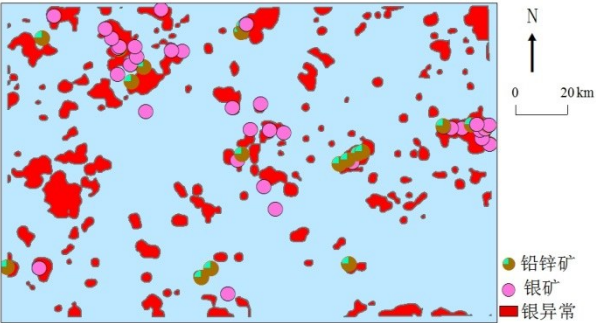


图5 银地球化学异常与矿产关系图

Fig.5 Relationship between Ag geochemical anomalies and minerals

3 基于证据权模型的多元综合信息成矿预测

3.1 成矿证据因子分析

根据前文分析成果,最终确定研究区银多金属矿成矿预测的证据因子归纳如表3。

表3 银多金属矿成矿预测证据权重参数表

Table 3 Evidence-weight values of each evidence layer

证据专题因子	面积/km ²	含矿床(点)数	对比值C	权重W
张家口组地层2 km缓冲	6 821.57	20	0.366 2	0.243 2
老地层1.5 km缓冲	1 845.51	14	1.417 2	1.193 9
线性构造0.9 km缓冲	8 996.7	27	0.484 1	0.266 6
基底构造1.5 km缓冲	9 316.88	38	1.317 9	0.573 4
中生代侵入岩2 km缓冲	10 152.46	34	0.821 6	0.376 2
铅化探元素异常	2 230.93	32	2.655	1.831
锌化探元素异常	976.44	22	2.775 7	2.282 7
银化探元素异常	3 476.66	41	2.957 1	1.635 2
重力梯级带1.8 km缓冲	9 621.04	37	1.172 2	0.514 6
航磁梯级带2.3 km缓冲	4 951.8	50	4.109 8	1.479 9

3.2 证据权法进行找矿远景评价

依据上述总结的研究区铅锌银成矿预测证据权模型,基于各个证据专题因子的证据响应度,利用ArcSDM中的WofE模块的Calculate Response功能,计算成矿后验概率。基于成矿后验概率,利用ArcSDM中的WofE模块的Area frequency Table功能,计算研究区铅锌银成矿预测的成功率曲线(Success-Rate Curve, SRC),从而为成矿后验概率进行分级提供依据。依据SRC曲线(图6),将后验概率分为四级(即成矿不利、成矿可行、成矿较为有利、成矿有利),分界点值依次为0.000 023(先验概率值)、0.000 265、0.003 965,由此划分3级成矿远景区(图7)。

总体来看,成矿后验概率结果较好的体现了区内矿产地分布趋势—以上黄旗断裂带及隆化断裂带为主要矿集区,预测远景区与已知矿产地也有较好的对应关系,部分预测结果与已知矿产地或化探异常存在3~4 km的偏移,初步分析预测结果体现了物探预测要素对深部地质体的反映,为进一步开展深部找矿提供了有利信息。

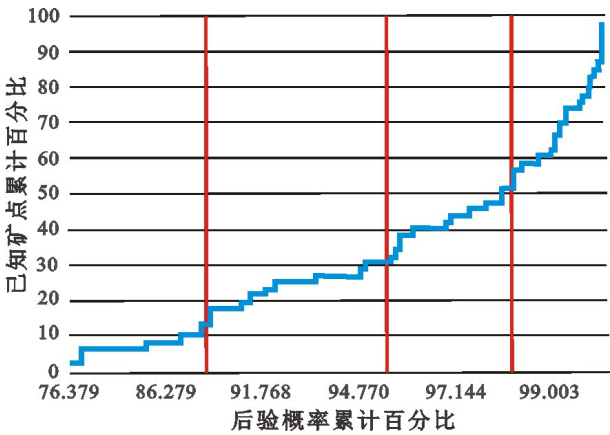


图6 成功率曲线图

Fig.6 Success-Rate Curve map

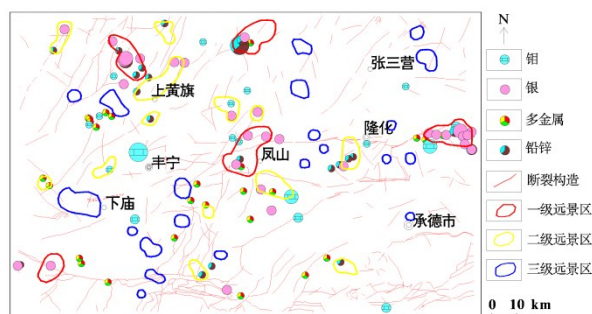


图7 丰宁地区银、铅锌矿远景区划图

Fig.7 Distribution of ore prospecting of Ag, Pb and Zn metal deposits

4 结论

(1)证据权重法预测模型是根据已知矿床(点)与各种控矿成矿要素之间的条件概率来确定每种预测要素的权重值,然后推广到全区,其原理简单而且易于实现。通过 ArcSDM 系统与证据权法的结合,对大量多源信息进行优化综合处理,提高了成矿预测工作效率和准确性。

(2)丰宁地区处在多金属成矿带交切复合部位,其地质找矿研究程度较高,矿产地分布多,物化探资料丰富,符合数据驱动证据权法的各项工作条件。预测结果涵盖了区域内大部分铅锌银矿产地,有较高可信度。部分预测结果与已知矿产地或化探异常存在一定空间位置偏移,是下一步深部找矿工作的重点。

参考文献:

- [1] 毛德宝,钟长汀,陈志宏,等.华北地块北缘中段铅锌银矿床成矿作用讨论[J].前寒武纪研究进展,2002,(02):105-112.
- [2] 李俊建,燕长海,谢汝斌,等.华北地台重要成矿区带成矿区划及其特征[J].前寒武纪研究进展,2002,(Z1):129-135.
- [3] 权恒,韩庆云.燕辽地区多金属、金、银成矿与远景[M].地质出版社,1991.
- [4] 向运川,任天祥,杨竹溪.开发利用地理信息系统(GIS)综合分析地学信息进行矿产预测[J].物探与化探,1996,(01):1-13.
- [5] 肖克炎,张晓华,陈郑辉,等.成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J].物探化探计算技术,1999,(03):223-226.
- [6] 赵鹏大,孟宪国.地质异常与矿产预测[J].地球科学,1993,(01):39-47+127.
- [7] 葛咏.地学数据集成及空间决策支持的方法与应用[J].地球信息科学,2006,8(1):223-226.
- [8] 肖克炎,葛艳.成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J].物探化探计算技术,1999,21(3):223-226.
- [9] 张健挺,邱友良.人工智能和专家系统在地学中的应用综述[J].地理科学进展,1998,17(1):44-51.
- [10] 严冰,阳正熙,王小春.证据权法在四川宁南地区铅锌成矿预测中的应用[J].世界地质,2005,(03):253-258.
- [11] 陈永清,夏庆霖,黄静宁,等.“证据权”法在西南“三江”南段矿产资源评价中的应用[J].中国地质,2007,(01):132-141.
- [12] 刘汉栋,王巧云,李秀章,等.基于GIS证据权法的焦家金成矿带综合信息成矿预测[J].中国矿业,2015,24(S1):251-257.
- [13] 杨茂森,黎清华,杨海巍.GIS支持下的证据权法在胶东金矿集中区预测中的应用[J].地球学报,2005,(05):103-107.
- [14] 刘亚洲,申维.基于GIS的证据权法在铁力-二股地区铅锌多金属矿床预测中的应用[J].地质与勘探,2018,54(01):59-68.
- [15] 王佳营,张晓军,姚春亮,等.非线性理论和模糊证据权方法在内蒙古达来庙草原覆盖区钼多金属矿产预测中的应用[J].地质调查与研究,2019,42(03):174-184.
- [16] 许洪才,申宗义,李新华,等.河北省沽源地区矿产成矿规律与找矿方向[J].地质调查与研究,2016,39(04):260-272.
- [17] 毛德宝,钟长汀,陈志宏,等.冀北铅锌银矿床成矿地质要素的结构分析[J].地球科学—中国地质大学学报,1999,24(5):464-467.
- [18] 毛德宝,胡小蝶,等.华北陆块北缘中段大型超大型银矿床含银铅锌矿床控矿机制及定位预测研究报告[R].天津地质矿产研究所,2000,1-210.
- [19] 章百明,赵国良,马国玺,等.河北省主要成矿区带矿床成矿系列及成矿模式[M].石油出版社,1996.
- [20] 李江海,钱祥麟,谷永昌.华北克拉通古元古代区域构造格架及其板块构造演化探讨[J].地球科学—中国地质大学学报,1998,23(3):230-235.
- [21] 沈保丰,李俊建,翟安民,等.地壳演化和成矿耦合—以华北陆块北缘中段为例[J].前寒武纪研究进展,2001(01):9-16.
- [22] 毛德宝,钟长汀,武永平,等.冀北北岔沟门铅锌多金属矿床地质特征及成因[J].地质调查与研究,2005(04):228-239.
- [23] 胡小蝶,沈保丰,毛德宝,等.冀北蔡家营铅锌矿床成因探讨[J].地质调查与研究,2005,(04):221-227.
- [24] 陈志彬.冀北北岔沟门银多金属矿的控矿因素[J].地质调查与研究,2008,(01):1-5.
- [25] 辛建伟,李永刚.冀北银矿成矿规律及成矿模式探讨[J].地质找矿论丛,2007,22(4):259-262.
- [26] 王金贵,张鑫全,张子轩,等.内蒙古煤油沟铜多金属矿综合找矿模式的研究[J].地质调查与研究,2018,41(01):75-81.
- [27] 滕菲,张燕,张素荣,等.利用证据权重法进行综合信息矿产资源预测—以大兴安岭北部地区为例[J].地质调查与研究,2014,37(04):269-273+287.
- [28] 任树祥,贾正海.河北省区域成矿规律及矿产预测成果汇总报告[R].河北省地质调查院,2013.

- [29] 郑国庆, 范素英, 等. 河北省矿产资源潜力评价遥感资料应用成果报告[R]. 河北省遥感中心, 2013.
- [30] 张亚东, 刘俊长, 等. 河北省矿产资源潜力评价重力资料应用研究成果报告[R]. 河北省地球物理勘查院, 2013.
- [31] 董杰, 肖金平. 河北省矿产资源潜力评价航磁资料应用研究成果报告[R]. 河北省地球物理勘查院, 2013.
- [32] 荣幸. 重磁资料在准格尔旗地区地质构造解释中的应用[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(04):315-320.
- [33] 刘桂梅, 林星, 徐新学, 等. 新疆西昆仑东段 1/5 万航磁异常特征及找矿方向浅析[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(02):127-133.
- [34] 陶龙, 张莎莎, 兰学毅, 等. 1/5 万重磁勘查在安徽宣城覆盖区地质找矿中的应用探索[J]. 中国地质, 2019, 46(4):894-905.
- [35] 师淑娟, 宫进忠. 河北省矿产资源潜力评价化探资料应用研究成果报告[R]. 河北省地球物理勘查院, 2013.

Applying weight of evidence to predict Ag-Pb-Zn potentiality in Fengning region, Hebei

TENG Fei^{1,3}, PENG Li-na^{1,3}, MENG Qing-long², XING Yi^{1,3}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. China Petroleum Exploration and Development Research Institute of Dagang, Tianjin 300270, China; 3. North China Center for Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: Based on the analysis of the metallogenetic characteristics of the Ag-Pb-Zn deposits in Fengning region, many kinds of ore-controlling factors have been analyzed and abstracted. Using the Evidence Weight Method (EFW), ten kinds of evaluation factors, such as stratigraphic anomaly, magmatic rock anomaly, rupture and structure anomaly, and gravity and aeromagnetic anomaly, were selected for EWM analysis. According to the Success-Rate Curve, the value of posterior probability were classified into three grades. The demarcation points in turn are 0.000 023, 0.000 265 and 0.003 965. Totally 39 potential areas are delineated in three grades. The results indicate that the EWM is effective and thus contributes to the evaluation of Fengning Ag-Pb-Zn resources.

Key words: Fengning region; ArcGIS; weight of evidence; mineral resource prognosis

Logging responsive characteristics of formation lithology from Nenjiang Formation to Taikang Formation in southern Daqing Placanticline

SUN Da-peng^{1,2,3}, TANG Chao^{1,3}, WEI Jia-lin^{1,3}, ZENG Hui^{1,3}, CHEN Jun⁴, XIAO De-fu⁴

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
2. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hohhot 010020, China
3. Laboratory of Non-fossil Energy Minerals, Tianjin Center of China Geological, Tianjin 300170, China
4. 224 Brigade Company Limited of Sino Shanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the logging work, this paper classifies and statistics the rock density, resistivity, natural gamma and acoustic time difference parameters of the Taikang Formation, Mingshui Formation, Sifangtai Formation and the fifth Member, Nenjiang Formation in the southern end of Daqing Placanticline. With the increase of depth, the apparent resistivity of the whole formation and the density increase, and the parameters of different lithology become smaller. Based on the geological logging results and strata responsive characteristics, the intersection map of lithology identification in the survey area is established. On basis of the logging curve morphology, in combination with the development characteristics of formation lithology, the stratigraphic sedimentary facies are identified. It is considered that the sedimentary facies are consistent with the characteristics of floodplain alluvial facies in Taikang Formation, shallow lake facies in Mingshui Formation, meandering river facies in Sifangtai Formation, and static water muddy sedimentary in the fifth member of Nenjiang formation. The relationship between natural gamma and quantitative gamma is discussed.

Key words: Daqing Placanticline; sandstone-type uranium mineralization; well logging response; lithologic identification