

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.05.015

印度洋中脊多金属硫化物矿产资源定量预测与评价

邵珂^{1,2}, 陈建平^{1,2}, 任梦依^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 国土资源与高新技术研究中心, 北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083)

摘要:大洋钻探资料证实, 现代海底多金属硫化物分布范围广泛、储量大, 是具有巨大开发潜力和远景的海底矿产资源。根据水深、地质构造、扩张速率、地球物理以及火山地震等区域性调查数据, 分析了印度洋中脊多金属硫化物成矿地质条件、控矿因素和地球物理异常信息, 提取了9项找矿证据因子, 建立了区域找矿有利条件组合模型。运用证据权重法, 对印度洋中脊多金属硫化物资源进行了基于数据驱动的定量预测与评价。研究认为, 最有利区(I类)占工区面积的29.77%, 比较有利区(II类)占18.12%。

关键词:多金属硫化物矿床; 数据驱动; 证据权重法; 成矿预测; 印度洋中脊

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)05-0125-09

海底热液多金属硫化物是继深海锰结核、富钴结壳之后又一具有巨大开发潜力和远景的海底矿产资源。多金属硫化物富含铜、锌、铁、金、银等金属元素, 资源量巨大, 单个矿体的储量可达 $1\times 10^8\text{ t}$, 已成为世界各国竞相勘探的重点。2011年7月, 中国大洋协会获得了西南印度洋 $1\times 10^4\text{ km}^2$ 多金属硫化物的专属勘探权和优先商业开采权。根据国际海底管理局的章程, 到2015年勘查区预选50%的面积, 2019年再放弃50%的面积, 到2021年只能保有25%的面积的勘探开采权。为此开展了评价、筛选等研究工作。

深海硫化物资源因其特殊的海洋环境和成矿条件, 调查和实地勘探难度很大。经过40多年的研究, 依据海底表面的观测以及大洋钻探数据, 人们对海底热液多金属硫化物的资源潜力取得了一些基本认识。在前人工作的基础上, 把成矿地质条件和控矿因素与地球物理场信息结合, 建立了印度洋中脊海底热液多金属硫化物矿床找矿有利因子组合模型, 开展成矿预测, 缩小了可能的找矿目标区, 实现了大区域海底多金属硫化物资源的快速预测, 为西南印度洋海底多金属硫化物资源的进一步勘查、开发以及区域放弃工作提供了科学依据。

1 研究区概况

印度洋是地球上的第三大洋, 也是地球上最年轻的大洋, 面积约为 $7411.8\times 10^4\text{ km}^2$, 约占世界海洋总面积的20%, 平均水深3 872.4 m。印度洋中脊大体上位于印度洋中部, 整体上分三支, 呈“入”字型展布, 由西北印度洋海脊、西南印度洋海脊和东南印度洋海脊组成, 并在罗德里格斯岛(Rodriguez)附近连接构成三联点($25^{\circ}32'S, 70^{\circ}02'E$)(图1)。西南分支向西绕过非洲大陆与大西洋中脊相接; 东南分支向东南进入太平洋, 在新西兰和南极洲之间与东太平洋中隆相连; 向北延伸的印度洋中脊一直进入亚丁湾, 与红海断裂和东非大裂谷相连。

研究区范围包括整个印度洋区域(图1), 地理坐标: $10^{\circ}N\sim 60^{\circ}S, 10^{\circ}E\sim 150^{\circ}E$ 。

印度洋中脊热液活动区主要处于洋中脊的轴部地形高地、转换断层以及洋脊与断层交汇部位等环境中。基底岩石主要由玄武岩、橄榄岩和辉长岩等组成, 产出频度、规模、位置和产状与海底扩张速率、岩浆供给、构造、裂隙和围岩性质等密切相关。研究区内已知的热液喷口43个, 也是成矿的远景目标区(图1中蓝色五星处)。西南印度洋洋脊半扩张速率为 $0.7\sim 0.9\text{ cm/a}$, 属于超慢速扩张洋脊, 是洋中脊热液成矿作用研究程度较低的区域, 也是当前研究热点。

基金项目:中国大洋协会“十二五”重大项目(DY125-11-R-02)

作者简介:邵珂(1991—), 女, 硕士生, 地质工程专业, E-mail: 914709527@qq.com

收稿日期:2014-10-13; **改回日期:**2014-12-24. 文凤英编辑

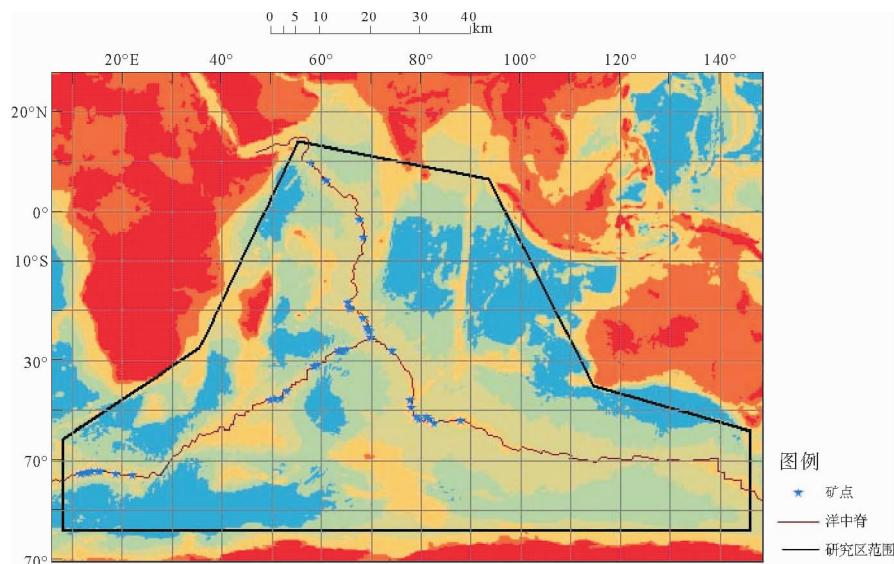


图1 印度洋洋中脊及热液喷口分布示意图

Fig. 1 Sketch map showing the location of Mid-Indian Ridge and hydrothermal vents

2 数据驱动模型法

矿产资源预测的基本方法大致可以分为两类：数据驱动和知识驱动。在工作程度较高，数据信息比较丰富的地区可以采用数据驱动的方法。在没有已知矿床或矿床较少的情况下，信息主要是通过地球物理数据及遥感地质数据的间接推断而来，矿床模型仅以地学专家的概念想法的方式存在，这时就只能采用以知识库为基础的系统，即知识驱动的方法。

所谓数据驱动是指依赖于客观数据的过程。这里的数据是指那些通过测量获得的比较准确的可量化的信息，特别是与已知矿床有关的信息。数据驱动的优点是比较客观，人为影响比较小，缺点是过分依赖数据，将数据的缺乏等同于有利条件的缺乏^[1]。

目前在世界海底发现的多金属硫化物矿床一般分布在大洋中脊、弧后扩张中心、火山岛弧等构造环境，其中洋中脊是全球发现热液矿点最多的构造环境^[2]。

洋中脊是地幔对流上升形成的，也是洋壳的发源地。洋中脊的地壳热量相当大，是地热的排泄口，并有火山活动，地震活动也很活跃。洋中脊多金属硫化物矿床的形态、类型和规模等特征主要受洋中脊的地形、构造背景以及岩浆特征等因素所控制^[3-4]。

深部岩浆活动形成的岩浆房为多金属硫化物成矿提供了热源和矿物质元素，是热液系统的主要驱

动；断裂构造和围岩结构可为上升的热液流体和下渗的冷海水提供足够的空间和通道。海底沉积物为海底稳定热液对流系统的形成提供了良好的圈闭盖层以及成矿物质来源。火山活动和构造活动是产生热源和对流路径、允许热液循环的先决条件，是热液活动和硫化物沉积形成的完美温床^[5]。而火山喷发的频率可以对洋脊地形的连续性、轴部高温热液的聚集程度和相关的热液矿化作用产生重要影响^[6]。热液活动所处海水水深的不同会改变热液成矿物质沉淀的物理化学条件^[7]。

通过对洋中脊地区多金属硫化物热液区的成矿地质背景和成矿机制分析以及洋中脊多金属硫化物区的标志特征及其指标，如水深特征^[8]、重力与磁性等地球物理异常特征^[9]、构造特征等，建立了研究区的洋中脊热液硫化物矿床预测的有利条件组合模型（表1），根据有利条件组合模型就可以对研究区热液多金属硫化物矿床进行相应的成矿有利信息提取，并用于未知区的预测。

本次硫化物资源预测采用基于数据驱动的证据权重法。证据权重法是由加拿大数学地质学家Agterberg提出的一种地学统计方法^[10-11]，通过对与矿产形成相关的地学信息的叠加分析来进行矿产远景区的预测。其中的每一种地学信息都被视为成矿远景区预测的一个证据因子。首先根据已知矿点与证据因子之间的统计关系赋予各证据因子权重值^[12-13]，然后根据贝叶斯概率对不同证据因子按其权重值进行综合分析，最终生成预测结果图。

表 1 印度洋中脊热液多金属硫化物矿床找矿有利条件组合模型

Table 1 The pattern of favorable prospecting conditions for polymetallic sulfide mineral deposits along Central Indian Ocean ridge

控矿因素及地球物理场信息	找矿预测因子	特征变量
地形条件	水深条件	有利水深范围
	有利构造部位	构造缓冲区
	断层交汇部位	优益度异常区间
地质条件	断裂发育密集程度	等密度异常区
	构造对称特征	构造中心对称度异常区
地球物理场信息		重力异常区间
	矿床区的重磁信息	磁力异常区间
火山、地震信息	火山地震密度	有利的火山地震密度区间

3 找矿有效信息综合分析

找矿信息综合分析是指利用已有的资料,如水深信息、地球物理信息、构造信息、地震火山数据等,对研究区已知的热液区进行分析研究,通过对这些资料的进一步分析处理和信息挖掘,建立它们在空间位置上的相互关系,得到与热液硫化物矿床矿化、成矿相关的控矿因素和与此表现出的异常地质信息,提取找矿有利参数,以便开展区域矿床的分析与预测工作。

3.1 水深

海水是一种非常复杂的多组分水溶液,呈弱碱性,主要有钠、镁、钙、钾、锶等阳离子,氯根、硫酸根、碳酸根、碳酸氢根、溴根、氟根等阴离子。海底热液富含铜、铁、锌,还有少量的铅、银、金、钴等金属元素和其他一些微量元素以及甲烷、氢气、硫化氢等气体。热液流体在通道以及喷出海底后都会与海水接触并进行能量和物质上的交换,热液中的成矿元素因为温度、压力、pH 值等环境条件的变化在喷口及附近或者流体与海水接触面附近发生沉淀。另外,在海水通过海底裂隙下渗时,因为深部岩浆房的热量以及高压环境形成热液,海水中的大量阴离子、阳离子会与岩石中的金属元素发生交代、置换等反应,导致岩石元素发生迁移和富集,最终形成含矿热液。

海底热液活动的水深分布范围跨度很大,但通过对洋中脊构造环境热液矿点的水深数据统计分析可以发现,洋中脊构造环境中热液活动的水深主要集中在 2 000~4 000 m,水深在 3 000 m 左右的洋中脊构造环境发现热液矿点数最多。因为,通常位于水深 3 000 m 的典型热液喷口流体的温度为 350

℃,流体刚好处于该水深环境具有的压力所对应的沸点之下^[6]。比如,在印度洋中脊 Melville 断裂带以东洋脊,轴部的 Mount Jourdanne 热液区(27°51'S, 63°56'E)位于新火山脊顶,水深大约 2 940 m。

海水深度的不同,热液喷口的压力也不同,深度越大,压力也越大,水的沸点也越高,不同的水深环境具有不同的物理化学条件,从理论上以及实际统计分析数据可以看出海底多金属硫化物热液区的分布与海水深度存在着很大的关系^[12-14]。

把研究区内收集到的水深数据与热液区进行叠加分析(图 2、图 3),发现印度洋热液区集中分布在 2 553~3 354 m 的水深范围内,这与全球大洋已知热液活动区或者热液点的统计区间 2 000~4 000 m 比较接近。因此,水深条件可以作为证据权重因子之一,水深 2 553~3 354 m 作为有利条件组合。

3.2 地球物理场

地球物理成矿信息主要是指重力信息与磁力信息。重磁异常信息能较好地揭示深部地质构造的特

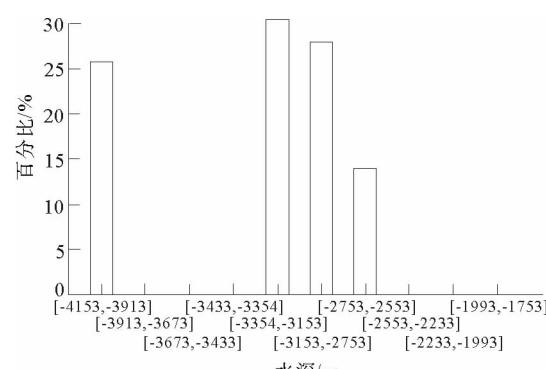


图 2 水深与矿点统计

Fig. 2 Statistical graph of water depth and mineral occurrence

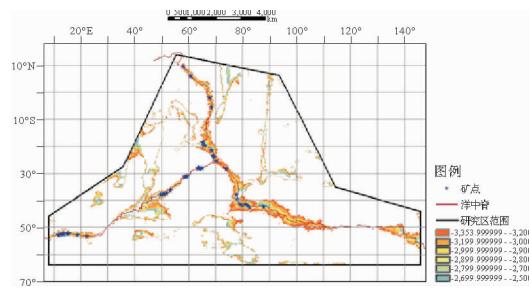


图3 水深有利区与矿点叠合

Fig. 3 Congruent map of favorable water depth area and mineral occurrence

征,因此被广泛地应用于基础地质研究和资源评价中。

3.2.1 重力信息

海底热液多金属硫化物中主要包含黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿以及磁黄铁矿等,其围岩和基岩主要为大洋玄武岩,或被沉积物覆盖。黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等矿床的密度均比玄武岩和沉积物覆盖层密度大。因此多金属硫化物区的重力异常特征在剩余基底布格重力异常上多表现为局部重力高异常,这是重力勘探在热液硫化物矿床勘探中的一个重要找矿标志。

重力资料来自美国国家地球物理数据中心(NGDC),为大地水准面处的自由空气重力异常,分辨率为 $32' \times 6'$,精度>2 mGal。对数据进行筛选并插值,获得研究区自由重力异常。研究区自由重力值范围为-262~+270 mGal。对自由重力数据进行网格化,运用矩形滑动窗口平均法,对数据平滑处理,并在此基础上求导(水平方向 0° 、 45° 、 90° 、 135° 导数)。与矿点叠加后发现研究区内与多金属硫化物矿产有关的重力异常区间为[12.2, 2.706] mGal。

对研究区剩余重力异常进行成矿有利区间提取分析,发现矿点主要落在[-20, 20]区间内,具有比较好的叠合关系。因此重力异常和剩余重力异常可以作为证据权重因子。

3.2.2 磁力

年轻洋壳的磁化强度主要是由喷发的玄武熔岩引起的,这是由富含铁的钛磁铁矿颗粒产生的剩余磁化强度引起的。形成海底热液喷发系统的流体呈酸性,极易与富钛磁铁矿发生蚀变,从而降低地壳岩石的磁铁矿含矿量,甚至降低为0。因此海底热液喷发系统可能位于孤立的蚀变地壳的下方,该蚀变地壳的磁化强度较未发生蚀变的地壳要低。低磁化强度是磁法勘探在热液硫化物勘探中的一个重要找

矿标志^[15]。

磁力资料来自美国国家地球物理数据中心(NGDC),分辨率为 $2'$,综合利用卫星、海洋、航空和地面磁测而成。对数据进行筛选、网格化得到研究区磁异常图。研究区磁异常值范围为-252~+441 nt。对磁异常数据进行进一步的数据网格化,对数据求导(水平方向 0° 、 45° 、 90° 、 135° 导数)。将矿点与磁力异常信息叠加统计,发现研究区内与多金属硫化物矿产有关的磁力异常区间为[-32, 0] nt。因此,磁异常可作为成矿预测的证据因子之一。

3.3 构造

海底断裂构造与成矿的关系极为密切,它是热液活动区最重要的导矿和容矿通道,对热液硫化物的形成起着重要的控制作用。从理论上讲,海底多金属硫化物成矿的一个必要条件就是断裂系统的发育,这是海水、热液循环、岩浆供应的必要条件之一。洋底的线性构造越发育,对热液硫化物矿床的成矿作用越有利。

对断裂构造进行定量信息提取发现,82.5%的热液区集中分布在构造等密度起始值为[0.625, 1.563]的范围内(图4、图5),68%的矿点集中分布在构造中心对称度为[0.078, 0.313]的范围内(图6、图7),78%的矿点集中分布在构造优益度为[0.635, 2.5]的区间范围内(图8、图9)。因此,可将构造等密度区间[0.625, 1.563]、优益度区间[0.635, 2.5]、中心对称度区间[0.078, 0.313]作为找矿有利区域。

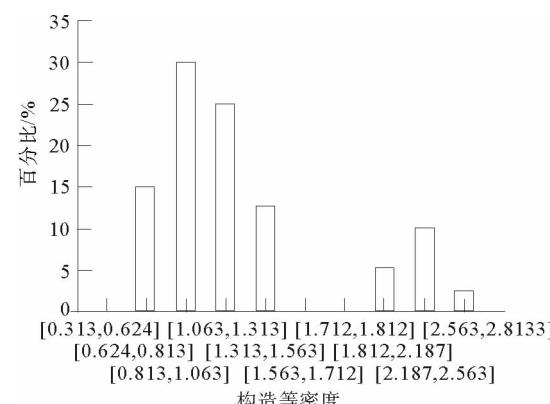


图4 构造等密度与矿点统计

Fig. 4 Statistical graph of tectonic isodensity and mineral occurrence

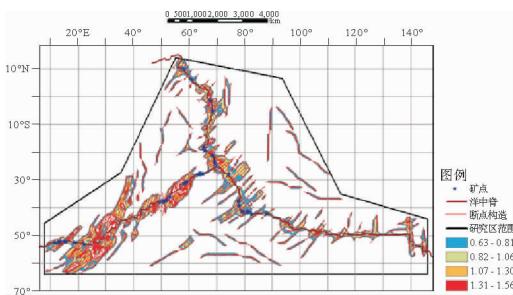


图5 构造等密度有利区与矿点构造叠合

Fig. 5 Congruent map of favorable tectonic isodensity area, mineral occurrence and structure

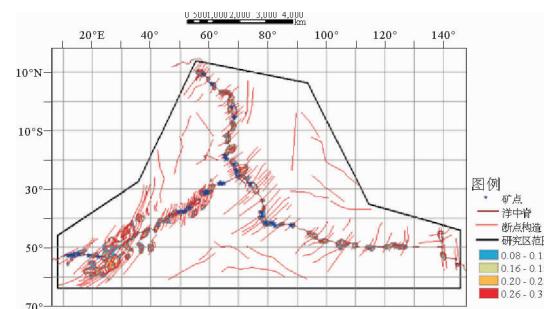


图9 构造优益度有利区与矿点构造叠合

Fig. 9 Congruent map of favorable tectonic advantage area, mineral occurrence and structure

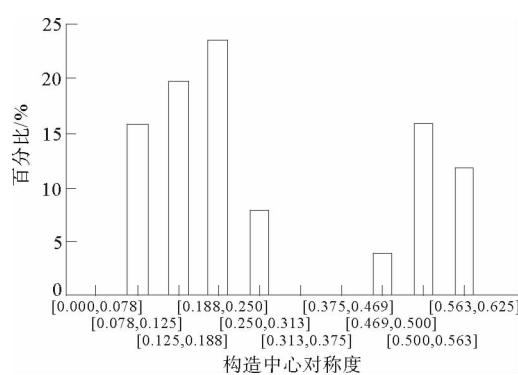


图6 构造中心对称度与矿点统计

Fig. 6 Statistical graph of tectonic central symmetry and mineral occurrence

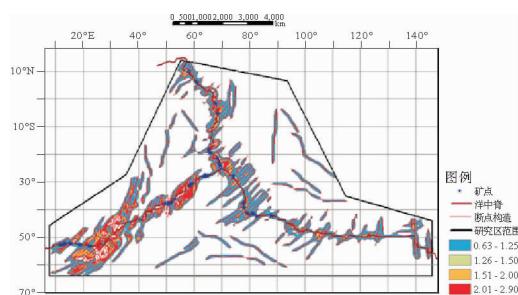


图7 构造中心对称度有利区与矿点构造叠合
Fig. 7 Congruent map of favorable tectonic central symmetry area, mineral occurrence and structure

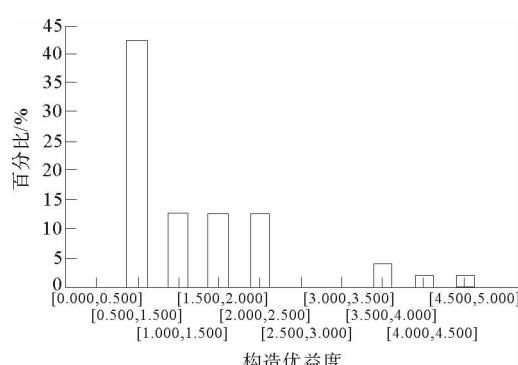


图8 构造优益度与矿点统计

Fig. 8 Statistical graph of tectonic advantage and mineral occurrence

研究区内的众多断裂不但为含矿热液提供了运移通道,也为成矿物质聚集沉淀提供了有利的场所,从而成为有利的成矿部位。笔者通过做半径为 20 km 的断裂缓冲区,将线性要素转换为面状要素,同时反映出断裂要素对成矿的影响范围,在 20 km 的范围内,断裂控制了 100% 的已知多金属硫化物矿点。因以,将断裂缓冲区 20 km 作为研究控矿构造的重要指标,从而参与证据权重法运算。

3.4 地震火山

海底的地震、火山活动都与区域的地壳活动息息相关,地震与火山活动意味着区域地壳活动的活跃程度,指示区域上有断裂构造,有岩浆活动。断裂构造和岩浆活动是控制海底热液活动最关键的因素,是产生热源和对流路径、允许热液循环的先决条件^[16]。

每一次的地震、火山活动都伴随着旧烟囱的倒塌、新烟囱的形成。地震、火山活动间接地指示了海底热液系统,不少海底热液系统就位于海底火山群上。因此,地震与火山数据是找矿预测的一个重要指示因子。

海底火山地震中心点监测资料来自美国国家海洋与大气管理局(NOAA),数据时间为 1950—2013 年,包含震级大于 5 级的监测数据。对地震点数据进行点密度处理,然后叠加热液活动区进行分析,发现点密度[1,2]的区间集中了所有的热液活动区。因此可以将地震、火山点密度作为成矿有利预测因子。

4 区域硫化物资源预测

采用基于数据驱动的证据权重法,在建立的区域矿床预测有利条件组合模型基础上,开展印度洋

中脊海底热液多金属硫化物矿床的预测工作。

4.1 区域矿床预测有利条件组合模型

根据成矿因素和地球物理场信息综合分析结果,按照4大找矿因素,提取9项有利因子,建立区域上有利成矿预测模型(表2):水深最有利的范围为[2 553,3 354] m,断裂缓冲区20 km内,构造优益度异常区间[0.625,2.5],等密度异常区间[0.625,1.563],构造中心对称度异常区间[0.078,0.313],重力异常区间[12.2,24.706] mGal,剩余重力异常区间[−20,20] mGal,磁异常区间[−32,0] nt,火山地震点密度区间[1,2]。

4.2 证据权重法预测模型建立

证据权重法预测模型是根据已探明或已知矿点与各种控矿、成矿以及地球物理场因子之间的条件概率来确定每种因子的权重值,然后对全区进行预测、评价^[17-18]。其实现过程包括:划分成矿单元、先

验概率的计算、证据因子权重值的确定、证据因子独立性检验以及后验概率的计算。最后,根据后验概率值即可生成综合成矿远景图。

在运用证据权重法进行权值计算之前,首先需要对研究区进行统计单元的划分,单位划分对最终成矿预测精度的影响很大^[19]。本次研究按照55 km×55 km对整个工区进行网格单元划分,然后根据已知矿点的资料计算出每个预测因子的证据权重值(表3)。

由表3可以看出:(1)水深、构造中心对称异常区、地震火山点密度异常因子的成矿相关度均超过了3.5,证明三参数是最重要的找矿标志;(2)重力异常、剩余重力异常以及构造优益度因子的成矿相关度均在2.0以上,等密度异常区的成矿相关度1.991 296,接近2.0,说明了四参数与成矿关系密切;(3)断裂20 km缓冲区的成矿相关度低于1,说明关联程度相对较低。

表2 印度洋中脊海底热液多金属硫化物矿床找矿有利条件组合

Table 2 The combination of favorable prospecting conditions for polymetallic sulfide mineral deposits along Central Indian Ocean Ridge

控矿因素及异常地质信息	找矿预测因子	特征变量	特征值
地形条件	水深条件	有利水深	有利水深范围[2553,3354]m
	有利构造部位	构造缓冲区	断裂20 km缓冲区
	断层交汇部位	优益度异常区间	优益度[0.625,2.5]
	断裂发育密集程度	等密度异常区	等密度[0.625,1.563]
地质条件	构造对称特征	构造中心对称度异常区	中心对称度[0.078,0.313]
	重磁成矿有利分析	重力异常区间	重力异常[12.2,24.706] mGal
		磁力异常区间	剩余重力异常[−20,20] mGal
地球物理场信息	火山地震信息	有利火山地震密度区间	磁异常[−32,0] nt
火山地震信息		火山地震点密度区间	火山地震点密度区间[1,2]

表3 各证据因子权重值

Table 3 Weights of evidence factors

证据因子类型	证据因子	存在权重值(W ⁺)	缺失权重值(W ⁻)	成矿相关度(C)
地形条件	水深	1.572 633	−2.300 752	3.873 385
	断裂20 km缓冲	0.976 322	0.000 000	0.976 322
	优益度异常区	2.563 472	0.000 000	2.563 472
	中心对称度异常区	2.719 682	−1.080 465	3.800 147
构造条件	等密度异常区	1.913 062	0.000 000	1.913 062
	重力异常区	1.169 874	−1.517 959	2.687 833
	剩余重力异常区	0.633 840	−1.843 787	2.477 627
地球物理条件	磁力异常区	0.294 081	−1.697 215	1.991 296
	地震火山点密度异常	1.974 477	−1.545 584	3.520 061
火山地震信息				

4.3 预测结果与讨论

根据建立的印度洋地区的证据权重模型, 应用 MAPGIS 平台和 MOPAS 地质统计分析方法, 以及 MRAS 中的证据权模块^[20], 对印度洋区域海底多金属硫化物资源进行了定量预测与评价, 计算出各个预测单元的成矿有利度(以成矿的后验概率值来表示)(图 10、图 11)。共划分为 5 个级别: I 类区

为最有利区域, 后概率值区间为 $\geq 0.95 \sim 1.0$, 占工区面积的 29.77%; II 类区为比较有利区域, 后概率值区间为 $\geq 0.90 \sim 0.95$, 占工区面积的 18.12%; III 类区为中等有利区域, 后概率值区间为 $\geq 0.80 \sim 0.90$, 占工区面积的 20.26%; IV 类区为较差区域, 后概率值区间为 $\geq 0.30 \sim 0.80$, 占工区面积的 22.74%; V 类区为无潜力区域, 后概率值区间为 0 ~ 0.30, 占工区面积的 3.08%, 其他为无效区域。

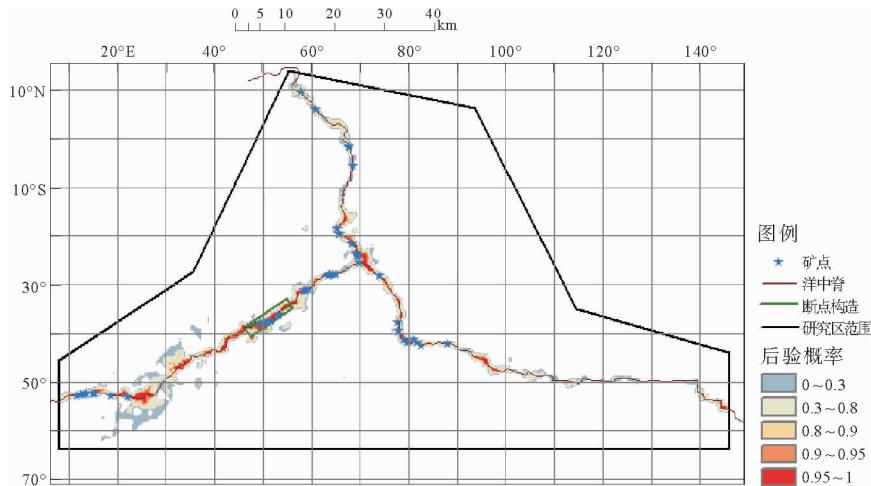


图 10 印度洋中脊地区预测后验概率

Fig. 10 Metallogenetic posterior probability map of mid-Indian Ridge

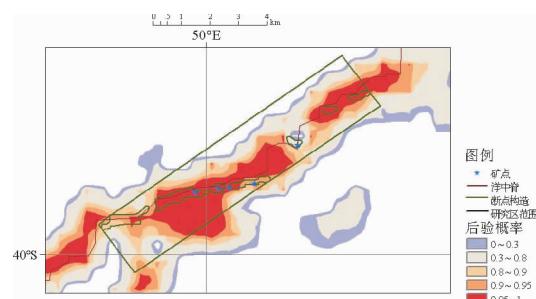


图 11 西南印度洋合同区潜力分级预测结果

Fig. 11 Prediction results of potential levels in contract area of southwest Indian Ocean

按照后验概率相对大小分级赋色, 得到研究区海底热液多金属硫化物矿床的后验概率图(图 10)以及合同区潜力分级预测结果图(图 11)。可清晰地显示出研究区成矿远景区的分布特征。从图中可以看出, 3 个已知的热液矿点处在预测的 I 类区, 1 个已知的矿点处在 II 类区, 说明预测结果具有较高可信度。同时也表明, I 类区和 II 类区是成矿的有利区域, 也是近期突破的重点目标区。

5 结论

(1) 在全面分析印度洋水深、地质构造、扩张速度、火山地震等环境地质条件对多金属硫化物成矿作用的影响及在矿床评价预测中的指示作用, 并根据对地球物理场信息的分析, 筛选出了 9 项证据因子, 建立了区域找矿有利条件组合模型。选择的各因子均具有空间属性, 并且与矿点具有空间或成因上的联系, 也符合证据权重法的使用条件, 最终得到了比较好的效果。

(2) 海底多金属硫化物矿床成矿规律复杂, 影响因素多, 目前的勘探程度低, 前期评价采用基于数据驱动的证据权重法, 考虑因素多, 克服了依靠研究人员的经验找矿的不足, 研究结果更加客观、可靠。

(3) 印度洋中脊虽然是慢速扩张的洋中脊, 但多金属硫化物矿资源也十分丰富, 预测结果是 I 类区占合同面积的 29.77%, II 类区占合同面积的 18.12%, 为下一步缩小勘探目标区提供了依据。

参考文献 (References)

- [1] 刘因,王金锋,刘辉.GIS成矿预测的数据驱动与知识驱动分析[J].安徽地质,2003,13(2):126-129.[LIU Yin, WANG Jinfeng, LIU Hui. Problem of process driven by data and knowledge in metallogenic prognosis[J]. Geology of Anhui, 2003,13(2):126-129.]
- [2] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits [J]. Geology, 2011, 39(12): 1155-1158.
- [3] Small C. Global systematics of mid-ocean ridge morphology [C]// Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges. Buck W R, Delaney P T, Karson J A, et al. AGU Geophysical Monograph, 1998; 106: 1-26.
- [4] Carbotte S, Scheirer D S. Variability of Ocean Crustal Structure Created along the Global Mid-ocean Ridge[M]. Hydrogeology of the Oceanic Lithosphere. Davis E E, Elderfield H, Cambridge University Press, 2004: 59-107.
- [5] Mendel V, Sauter D, Parson L, et al. Segmentation and morphotectonic variations along a super slow-spreading center: The Southwest Indian Ridge (57°E-70°E) [J]. Marine Geophysical Researches, 1997, 19(6): 505-533.
- [6] Fouquet Y. Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans? [M]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1997, 355: 427-441.
- [7] 高爱国. 海底热液活动研究综述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(1): 103-110. [GAO Aiguo. Summarizing on the study of hydrothermal activities on the seafloor[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(1):103-110.]
- [8] 别风雷,李胜荣,侯增谦,等. 现代海底多金属硫化物矿床[J]. 成都理工学院学报,2000,27(4):335-342. [BIE Fenglei, LI Shengrong, HOU Zengqian, et al. Polymetallic sulfide deposits at modern seafloor:an overview[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(4):335-342.]
- [9] German C R, et al. Hydrothermal activity along the southwest Indian ridge[J]. Nature, 1998, 395 (6701): 490-493.
- [10] Agterberg F P, Bonham Charter G F, Cheng Q, et al. Weights of evidence and weighted logistic regression for mineral potential mapping: Computers in Geology [M]. Cambridge: Oxford University Press, 1993:13-32.
- [11] Agterberg F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. Nonrenewable Resources, 1992, 1(1): 39-50.
- [12] 夏建新,李畅,马彦芳. 深海底热液活动研究热点[J]. 地质力学报,2007,13(2):179-191. [XIA Jianxin, LI Chang, MA Yanfang. Deep-sea hydrothermal activity:a hot research topic [J]. Journal of Geomechanics, 2007,13(2): 179-191.]
- [13] 赵鹏大. 矿床统计预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. [ZHAO Pengda. Statistical Prediction of Mineraldeposit [M]. Beijing: Geological Press, 1994.]
- [14] 景春雷. 海底热液多金属硫化物成矿区域地质背景与控矿因素分析[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2012. [JING Chunlei. Analysis on the Regional Geological Background and Ore-controlling Factors of Submarine Hydrothermal Sulfide [D]. Qingdao: The first Institute of Oceanography, SOA, 2012.]
- [15] 孟祥君,张训华,刘怀山,等. 中国东部海区磁异常特征及其地質解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34 (3): 67-74. [MENG Xiangjun, ZHANG Xunhua, LIU Huaishan, et al. The magnetic anomaly pattern in The Eastern China Seas and its geological interpretation[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(3):67-74.]
- [16] Mendel V, Sauter D. Seamount volcanism at the super slow-spreading Southwest Indian Ridge between 57°E and 70°E [J]. Geology, 1997, 25:99-102.
- [17] 陈永清,汪新庆,陈建国,等. 基于 GIS 的矿产资源综合定量评价[J]. 地质通报,2007,26(2):141-149. [CHEN Yongqing, WANG Xinqing, CHEN Jianguo, et al. GIS-based integrated quantitative assessments of mineral resources[J]. Geological Bulletin of China, 2007,26(2):141-149.]
- [18] 刘世翔. 薛林福, 郑瑞卿, 等. 基于 GIS 的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2007,37(5):889-894. [LIU Shixiang, XUE Linfu, QIE Ruiqing, et al. An application of GIS-Based weights of evidence for gold prospecting in the Northwest of Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007,37(5): 889-894.]
- [19] 刘星,胡光道. 应用 MOPAS 系统证据权重法进行多源信息成矿预测——以澜沧江段地区为例[J]. 地质与勘探,2003, 39(4):65-68. [LIU Xing, HU Guangdao. Applying evidence weight model of MOPAS system to process multi-source information for predicting minerals resources-example from the southern Lancangjiang area [J]. Geology and Prospecting, 2003,39(4):65-68.]
- [20] 李健,丁成武,陈建平,等. 基于 GIS 的证据权重法的甘肃北部连东段海相火山岩型铅锌矿床成矿预测评价[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2012,48(4):14-19. [LI Jian, DING Chengwu, CHEN Jiangpin, et al. Metallogenic prognosis of marine volcanic type lead-zinc resources in metallogenic belt of northern Qilian based on GIS weight of evidence[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2012,48(4): 14-19.]

QUANTITATIVE PREDICTION AND EVALUATION OF POLYMETALLIC SULFIDE MINERAL DEPOSITS ALONG THE CENTRAL INDIAN OCEAN RIDGE

SHAO Ke^{1,2}, CHEN Jianping^{1,2}, REN Mengyi^{1,2}

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 2. Institute of Land Resources and High Techniques, China University of Geosciences(Beijing),100083, China/Beijing Key Laboratory of Research and Exploration of Land Resources, Beijing 100083)

Abstract: The Ocean Drilling Program has proven that the large quantity of seafloor polymetallic sulfide, which is widely distributed in the ocean, has great potential for exploitation. Based on the regional geological data, such as water depth, geological structure, sea flow spreading rate, geophysics, volcanism and earthquake, the authors scrutinized the metallogenetic conditions, ore-controlling factors and geophysical anomalies of the polymetallic sulfide deposits along the Central Indian Ocean Ridge. We extracted 9 evidence factors and established a model of regional ore deposits, and adopted the weights of evidence method to predict and evaluate the polymetallic sulfide along the Central Indian Ocean Ridge. The favorable prospecting areas were delineated by the values of posterior probability. The results of the research will provide a scientific basis for the future exploration and utilization of polymetallic sulfide in Indian Ocean.

Key words: weights of evidence; polymetallic sulfide deposits; data-driven method; metallogenetic prediction; Central Indian Ocean Ridge