

文章编号 10258-7106 (2008) 05-0638-09

潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统设计与应用*

田赤英¹, 李德平^{2,3**}, 周怀阳², 周 宁¹, 杨群慧², 杜德文⁴, 程永寿⁵

(1 中国大洋矿产资源研究开发协会办公室, 北京 100860; 2 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 3 湖南师范大学资源环境学院 GIS 研究中心, 湖南 长沙 410081; 4 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 5 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘 要 文章简要介绍了赤道东北太平洋 Clarion-Clipperton 海区多金属结核矿床产出的大地构造位置和结核空间分布特点。根据该海区多金属结核的成因特点, 预测该海区潜在多金属结核矿床的分布, 对潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统进行了需求分析和系统设计。采用 Microsoft 公司的 Visual Basic 6.0 和 RSI 公司的 IDL 6.0 编程语言及 Microsoft 公司的 Access 数据库, 选用 ESRI 公司的 MapObjects 2.3 GIS 组件, 对该软件系统的“文件”、“查询”、“图层管理”、“查明资源”、“潜在资源”、“工具”、“浏览”、“帮助”等 8 大功能进行了编程实现。系统运用于国际海底区域研究“十五”专项课题“基于 CC 区的多金属结核矿床地质模型”研究中, 获得了该区查明资源估算量、潜在资源位置 and 数量等预测成果。

关键词 地质学; 多金属结核; 资源评价; GIS 预测系统; Clarion-Clipperton 海区

中图分类号: P618.3; P628

文献标志码: A

Design and application of prognostic system to potential polymetallic nodule deposits based on GIS

TIAN ChiYing¹, LI DePing^{2,3}, ZHOU HuaiYang², ZHOU Ning¹, YANG QunHui²,
DU DeWen⁴ and CHENG YongShou⁵

(1 China Mineral Resources R&D Association, Beijing 100860, China; 2 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3 College of Resources & Environment Science, GIS Research Center, Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan, China; 4 No. 1 Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, Shandong, China; 5 National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract

The geotectonic position and spatial distribution of polymetallic nodule deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone of the Northeastern Tropical Pacific Ocean are described in brief in this paper. According to the genetic characteristics of nodules in the sea area and in view of meeting the demands of potential nodule deposit prognosis, the authors made both the requirement analysis and the design of the prognostic system for potential polymetallic nodule deposits based on such GIS. 8 function modules as File, Query, Layer Management, Discovered Resources, Undiscovered Resources, Tools, Browse and Help, which were implemented by programming with Microsoft Visual Basic 6.0 and RSI IDL 6.0 programming languages, Microsoft Access database and

* 本文得到中国大洋协会国际海底区域研究“十五”专项课题(DY105-01-02-02)、国家自然科学基金项目(40406010)和中国科学院边缘海地质重点实验室和广州地球化学研究所项目(MSLG04-9)的联合资助

第一作者简介 田赤英, 女, 1958 年生, 高级工程师, 主要从事大洋矿产资源方面的研究。Email: tianchiying@163.com

** 通讯作者 李德平, 男, 1964 年生, 副教授, 主要从事 GIS 应用开发和矿产资源评价方面的研究。Email: Lideping106@yahoo.com.cn

收稿日期 2008-02-13; 改回日期 2008-05-07。张绮玲编辑。

ESRI MapObjects 2.3. The system was applied to the “Tenth Five-Year-Plan” oceanic project of “Clarion-Clipperton Fracture Zone-based Geological Models of Polymetallic Nodules” and, as a result, such assessment results as discovered resources, potential sites and amounts of undiscovered resources were obtained.

Key words: geology, polymetallic nodule, resource assessment, GIS, prognosis, system, Clarion-Clipperton Fracture Zone

大洋海底多金属结核因含丰富的 Mn、Cu、Co、Ni 等金属资源,而成为近年国际海洋资源领域的研究热点(何高文等,2006)。目前,国际海底管理局(International Seabed Authority,简称 ISA)正在开展赤道东北太平洋 CC 区(Clarion-Clipperton Fracture Zone,克拉里昂-克里帕顿断裂区,简称 CC 区)多金属结核矿床地质模型的建立工作(ISA,2005),为该海区未调查区域的潜在结核资源预测提供科学依据。为了积极参与国际海底管理局的此项活动,充分发挥中国作为国际海底管理局 A 组理事国的影响和作用,中国海洋矿产资源开发协会(COMRA)组织国内有关单位设立了国际海底区域研究“十五”专项‘基于 CC 区的多金属结核矿床地质模型’课题,通过该项目的研究,取得了较好的研究成果。

地理信息系统(Geographical Information System,简称 GIS)技术在矿产资源预测领域的应用越来越普及(陈述彭等,1999;Asadia et al.,2001;赵鹏大,2002;李德平等,2002;2003;2004;陈建平等,2005),取得了大批研究成果(肖克炎等,1999;付海涛等,2005)。其与决策支持系统(Decision Support System,简称 DSS)技术及人工智能(Artificial Intelligence,简称 AI)技术的融合,大大增强了 GIS 的决策支持功能(Gomes et al.,2002),由此诞生了 SDSS(Spatial Decision Support System)(Matthews et al.,1999;Li et al.,2004;张芳等,2006;李德平等,2007),主要用于辅助人们对分布于地理空间中的事物进行决策。成矿预测过程中主要通过对地质证据(地质、地球物理、水化学、地球化学和遥感等证据)的分析研究,识别和圈定成矿有利区(靶区)。由于各种地质因素及矿床都具有地理空间属性及空间相关性,因此,成矿预测过程也是一个典型的空间决策过程。

虽然 ArcGIS、MapInfo、MapGIS、SuperMap 等商用 GIS 平台提供了较强的通用 GIS 功能,但其空间决策推理功能相对较弱(肖克炎等,2003)。为了配合‘基于 CC 区的多金属结核矿床地质模型’国际海底区域研究‘十五’专项的顺利实施,本文针对 CC 区

多金属结核矿床地质模型的特点,运用现代软件工程思想,通过潜在多金属结核矿床预测的需求分析,基于 GIS 技术,融合 DSS 和 AI 技术,对潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统进行设计,并利用 Microsoft Visual Basic 6.0 编程语言和 ESRI MapObjects 2.3 GIS 组件,选用 Access 数据库,结合 RSI 公司的 IDL 6.0,对该系统进行了编程实现,旨在为 CC 区潜在多金属结核矿床预测提供研究平台。

1 CC 区多金属结核地质特点

1.1 大地构造位置

CC 区位于东北太平洋海盆,处于克拉里昂平移断层与克里帕顿平移断层的夹持部位,西起夏威夷海岭和莱恩海岭,东至东太平洋海隆,属于太平洋板块的一个中间块体(图 1),是迄今为止发现的全球多金属结核最富集的海域。根据 CC 区的大量测深资料,区内地形起伏变化较大,水深 2 700~5 500 m,以海底平原为主,约占总面积的 55%(张伯普等,1995),平原水深 5 000 m 左右,其内分布有海山、海丘、洼地、线状海隆、海沟、海槽等。

1.2 多金属结核空间分布

CC 区多金属结核分布于克拉里昂平移断层与克里帕顿平移断层的夹持部位,呈 NEE 向展布,是目前全球大洋多金属结核最富集的地区。在该海区内,多金属结核分布很不均匀,在西部(145~157°W)、中部(130~144°W)和东部(120~127°W),多金属结核覆盖率达 50% 以上,品位 $w(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni})$ 一般为 1.80%~2.50%。CC 区东部、中部多金属结核分布比较稳定,东部的多金属转换丰度较高,而西部较低(图 2)。西部多金属结核品位变化较小。

多金属结核丰度随海底地形变化而变化,海底地形地貌对多金属结核的丰度、品位和分布具有明显的控制作用。已发现的多金属结核主要分布于深海丘陵区,其次分布于海山海丘区,而在海山区分布较少。CC 区多金属结核丰度为 0.1~29.3 kg/m²,平均为 6.33 kg/m²。

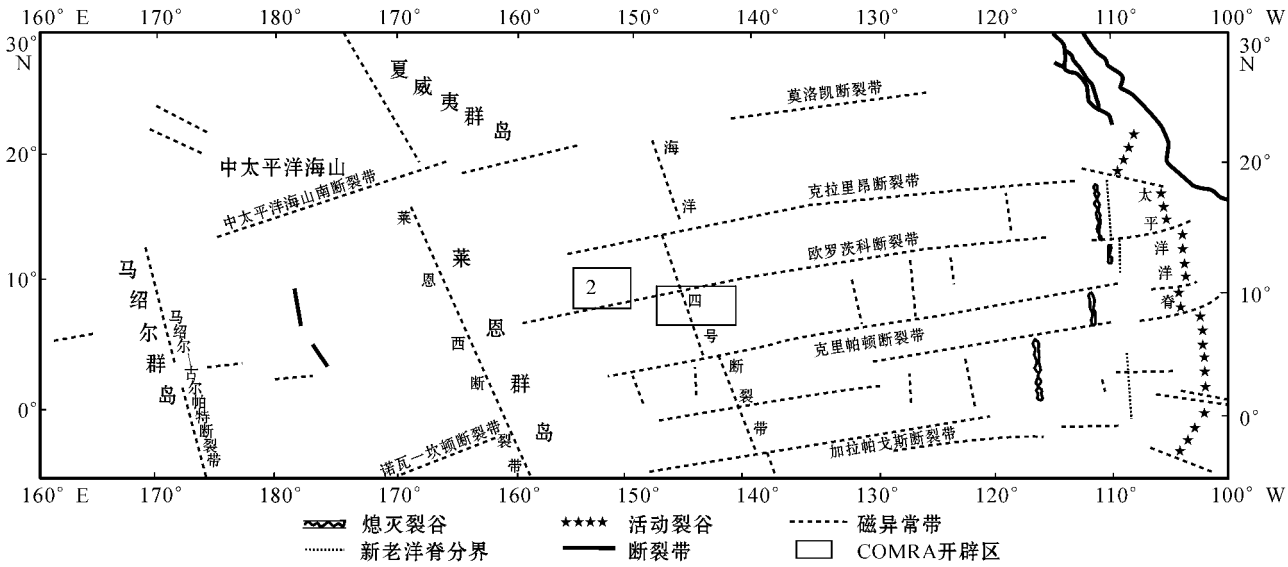


图 1 东太平洋及 CC 区大地构造简图(引自张伯普等,1995)

Fig. 1 Geotectonic sketch map of the East Pacific and Clarion-Clipperton Fracture Zone (After Zhang et al. , 1995)

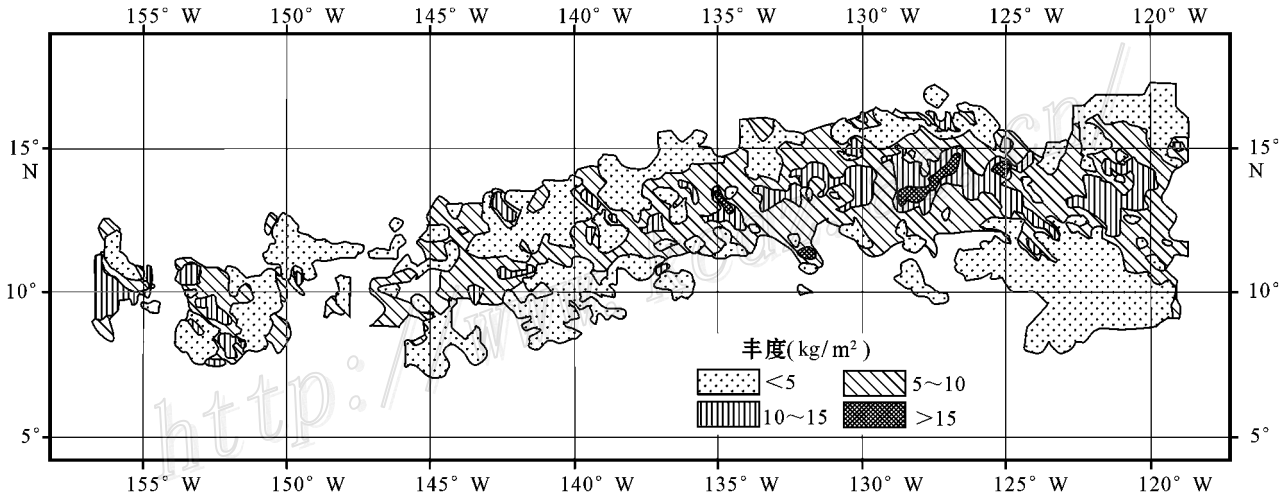


图 2 CC 区已查明的多金属结核资源丰度分布图(据 Kazmin,2003 修改)

Fig. 2 Abundance distribution of discovered polymetallic nodules in the Clarion-Clipperton Fracture Zone (modified after Kazmin,2003)

2 系统需求分析

潜在矿床预测,是利用已知矿床的产出特点,从已知到未知,预测未知区域潜在矿床的可能产出部位(陈毓川,1999)。除 7 个国家或地区已查明的少部分区域外(图 2),在 CC 区的广大区域内(110~160°W,0~20°N),存在大面积的未勘探地区。通过利用各个国家或地区已勘探区的调查成果,找寻各地质因素与多金属结核矿床的成因关系,建立该地

区多金属结核矿床的地质模型,预测未勘探地区的矿床潜力,成为 ISA 建立 CC 区多金属结核矿床地质模型的初始驱动力。

本文介绍的潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统主要面向国际海底区域研究专项课题‘基于 CC 区的多金属结核矿床地质模型’的需要,为该地区的潜在多金属结核矿床预测提供软件平台。

2.1 系统主要目标

遵照有关计算机软件开发的国家规范,紧密结合已建立的结核矿床地质模型,运用先进的面向对

象程序设计及组件集成思想,利用可视化编程语言 Visual Basic 6.0,集成 GIS 组件 MapObjects,选用 Access 数据库,结合 RSI 公司的 IDL 6.0,融合 DSS 和 AI 模型技术,自主设计与开发具有中国自主知识产权的、运行于 Windows 平台的结核矿床 GIS 预测系统软件。根据软件开发流程,通过系统需求分析、系统设计、编码、集成测试等工作,实现模型 GIS 管理系统。软件设计与开发中,充分考虑与其他软件系统的数据互操作性,预留与国际海底管理局 CC 区结核矿床地质模型的数据交换接口。

地理信息系统技术与决策支持技术的有效结合,能够很好地对结核及其各种控矿因素的空间特征进行分析与研究(Asadia et al.,2001 ;Chen,2004)。本文研究设计与开发的矿床 GIS 预测系统,要求囊括 CC 区所有数字化内容,主要完成对 CC 区结核资料进行综合管理和实现预测评价 2 项主要目标,并能够参与国际海底管理局 CC 区结核地质模型的数据交换。它不但是资源空间模型和评价模型的工作平台,而且可实现对该区结核资源的动态管理与评价。

2.2 系统主要功能需求

为了实现前述系统主要目标,系统主要功能需求如下:

- (1) 数据管理与查询
在同一地理坐标系下,主要管理 COMRA 开辟区和 CC 区的有关图件资料及其元数据,为数据查询、结核成矿规律研究及资源评价提供数据基础。
- (2) 查明资源估算
主要依据国内外调查获取的站位数据(COMRA 开辟区 1 606 个站位,CC 区 3 708 个站位),对 COMRA 开辟区和 CC 区的已查明结核资源进行估算,主要估算结核的 Mn、Cu、Co、Ni 等多金属资源品位、丰度及资源量。查明资源估算采用“距离加权”、“普通克里格”等方法。
- (3) 潜在资源空间位置决策
主要依据地质模型研究得出的找矿标志和已发现的结核矿床赋存空间位置,对 CC 区未调查的地区进行潜在结核矿床空间位置预测,预测其成矿的有利程度。潜在资源空间位置决策采用目前国内外广泛运用的“证据权法推理”(Agterberg et al.,1993 ;1999 陈建平等,2005)、“罗吉斯蒂回归推理”(Agterberg, et al.,1993 ;1999 ;Cheng et al.,1999)、“模糊逻辑推理”(Carranza et al.,2001 ;曹殿华等,2006)、“RBF 人工神经网络推理”等空间决策方法(Harris et

al.,2003 ;Porwal et al.,2003 ;罗定贵等,2003 ;李德平等,2007)。

(4) 潜在资源数量决策

主要依据地质模型研究得出的找矿标志和已发现的结核矿床的 Mn、Cu、Co、Ni 等多金属资源品位和丰度数据,对 CC 区未调查的地区进行结核矿床 Mn、Cu、Co、Ni 等多金属资源品位、丰度及资源量预测。潜在资源数量决策采用“数量化理论 I”数量决策方法。

(5) 地质模型管理

主要管理 CC 区的多金属结核区域成矿模型和矿床成矿模型,为潜在资源评价提供地质依据。

(6) 软件使用说明

主要提供如何使用本地质模型 GIS 管理系统的操作帮助信息。

3 系统设计与实现

3.1 开发工具与开发模式

目前,计算机软件开发领域已进入面向对象的时代。相对于传统的过程式程序设计,面向对象的程序设计思想更接近于现实世界和思维世界,它将现实世界与思维世界需要处理的对象抽象为计算机中被处理的对象(李师贤等,2005)。笔者在该矿床预测系统的开发中,采用面向对象的程序设计思想,开发平台选用 Microsoft 公司 Visual Basic 6.0 和 RSI 公司的 IDL 6.0,数据库选用 Microsoft 公司的 Access,GIS 组件选用 ESRI 公司的 MapObjects 2.3。开发过程中,利用 Microsoft Visual Basic 6.0 提供的控件、类库(Class)进行集成开发(图 3)。

3.2 软件开发方法

计算机软件工程中,在软件的整个生命周期中,软件原型法是一种常用的软件开发方法(毕硕本等,

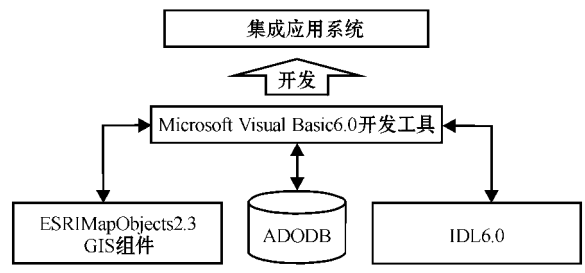


图 3 系统开发模式示意图

Fig. 3 Sketch map of the system development model

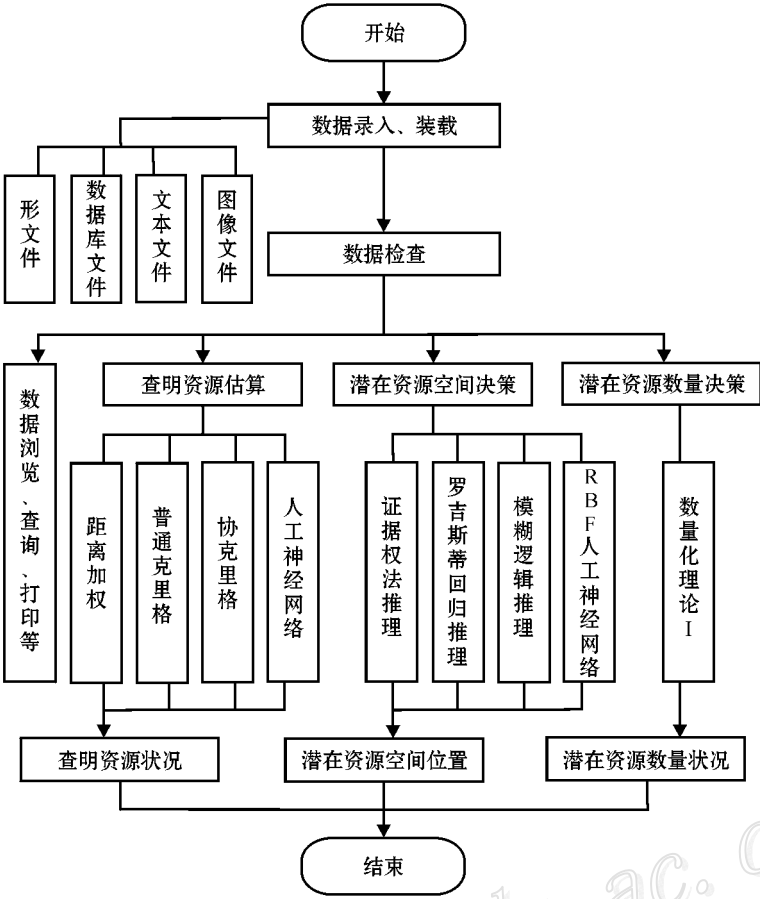


图 4 系统工作流程图

Fig. 4 Flow chart of the system operation

2003)。在软件开发过程中,软件原型是软件的一个早期可运行版本,它反映最终系统的部分重要特性。在获得一定需求后,首先进行数据分析,再按统一的数据编码和存储方式,通过快速分析构造出一个小型的软件系统,满足试算应用的基本要求,然后根据试算情况对原型加以改进,随着不断试验、纠错、使用、评价和修改,获得新的原型版本。如此周而复始,逐步完善需求,不断提高质量,从而获得具有独立应用结构、可实际应用的软件系统。本研究的软件开发模型即采用软件原型法。

3.3 系统工作流程

从 COMRA 开辟区站位原始数据到查明资源评价,从 CC 区和 COMRA 开辟区原始数据、地质证据图层到潜在资源空间决策和数量决策,系统具有完整的工作流程(图 4)。

3.4 系统实现

在 Microsoft Visual Basic 6.0 平台下,利用 ESRI MapObjects 提供的相关组件与方法,通过系统编码、

测试,实现了潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统的 8 大功能(鉴于篇幅原因,不在此详述),达到了获得查明资源状况、潜在资源空间位置、潜在资源数量状况的目的(图 5)。

4 系统应用

运用国内外近 40 年在 CC 区远洋勘查的 3 708 个调查站位数据和该海区的区域调查数据,利用上述实现的潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统的相关功能模块进行推理计算,获得了该区资源状况、潜在资源空间位置和数量状况等研究成果。鉴于篇幅,本文仅介绍运用该系统证据权法推理决策模块和罗吉斯带回归推理决策模块进行潜在资源空间决策的应用实例。

通过 CC 区结核成矿规律研究可知,CC 区多金属结核的控矿因素较多,如 结核的几何大小、形态、矿物、年龄和生长速率,核心的大小和成分,水深、古

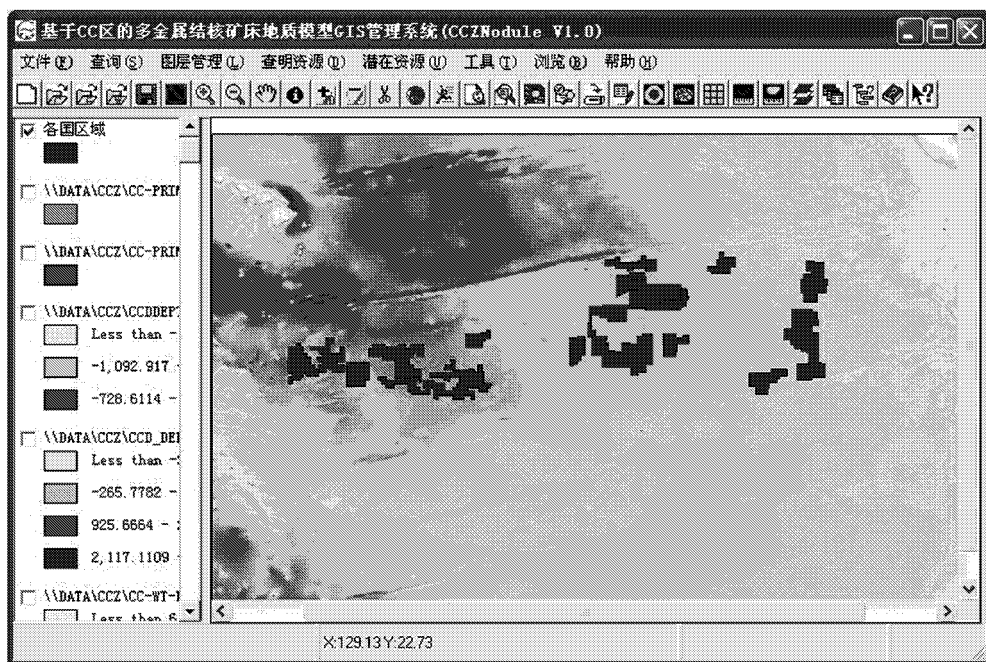


图 5 系统主界面

Fig. 5 Main interface of the system

水深和海底地形,碳酸盐补偿深度(CCD),海水成分,底流和古海流,水-沉积物界面氧化还原电位,下伏沉积物的成分、厚度和年龄,沉积剖面的地热梯度,碎屑或化学沉积作用和生物生产力,海底生物活动,火山、热液和构造活动等。但是,根据矿床空间位置决策建模过程中输入的控矿因素必须满足整个研究区域的技术要求,同时考虑到能够收集到的资料情况,在本文矿床空间位置决策研究中,最终选择的主要原始数据包括:已发现矿床的空间分布及其丰度和品位、海底沉积物类型、初级生物生产力、CCD及水深、海底地貌类型等。

为便于进行潜在资源位置预测,结合已有资料的勘查网度,将整个CC区划分为 $15' \times 15'$ 的网格,共划分出16 000个网格单元。已勘查的3 708个调查站位数据位于其中的2 776个网格单元中,其他13 224个网格为未勘探单元,这些未勘探单元即是潜在资源空间决策的目标地区。

利用上述实现的潜在多金属结核矿床GIS预测系统,选用上述CC区海底沉积物类型、初级生物生产力、CCD及水深、海底地貌类型等4个主要控矿地质证据图层数据及已查明矿床图层数据,分别选取证据权法推理模块和罗吉斯蒂回归推理法模块,对CC区潜在多金属结核矿床空间位置进行了预测评

价,获得了较好的预测成果(图6、图7)。

从图6和图7中可以看出,后验概率高值区位于研究区的中部和北部,该区域为有利于潜在多金属结核矿床产出的地区,而南部、西南部及东部区域后验概率较低,该区域为不利于潜在多金属结核矿床产出的地区。

通过对比图6和图7,可以明显地看出,两种方法推理决策的结果完全相同。虽然两种方法推理决策的后验概率值不同,但5个分布区间的空间分布完全相同。这印证了两种方法的可行性,决策结果是可信的。

另外,将已查明的矿床分布区(图2)与图6和图7进行对比分析,可以看出,已查明的矿床分布在后验概率的高值和较高值区间,说明该方法的预测结果没有遗漏掉已发现的矿床。另外,由于作为已知矿床图层的图2制作于2003年,那时德国还未向ISA提出合同区,德国近年提出的合同区未包括在图2中。因此,可将近年德国在该地区申请的合同区作为该预测结果的验证区。将德国的合同区投影到图6和图7中,同样,德国的合同区也分布于该高值区间。这样,无论是作为研究模型的已知矿床(图2),还是后来德国的合同区,它们都分布于预测结果的后验概率高值区,这种吻合关系说明运用证据权

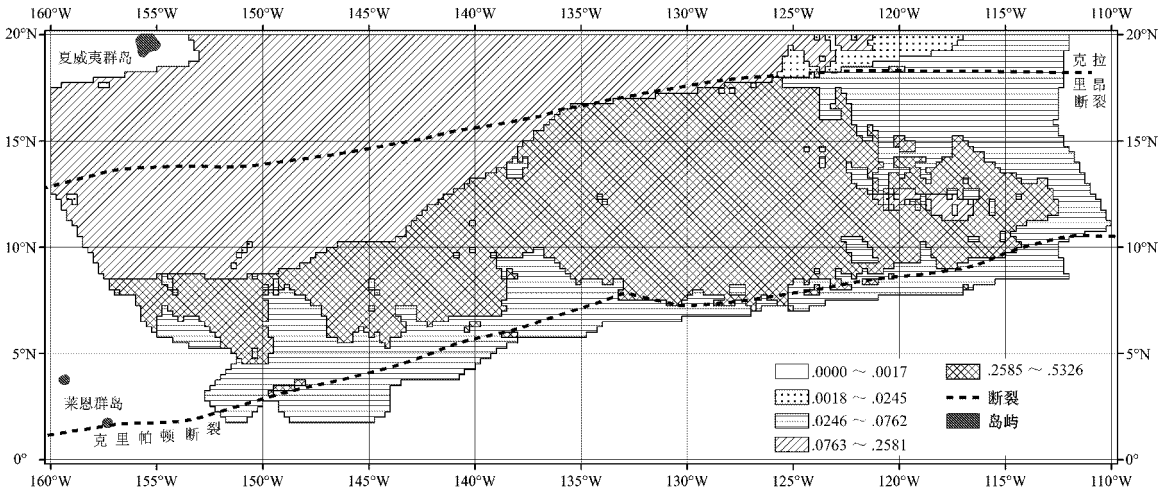


图 6 证据权法预测的 CC 区多金属结核资源产出的后验概率分布图

Fig. 6 Distribution of the posterior probability of nodule deposits by the Weight of Evidence Modeling method in the Clarion-Clipperton Fracture Zone

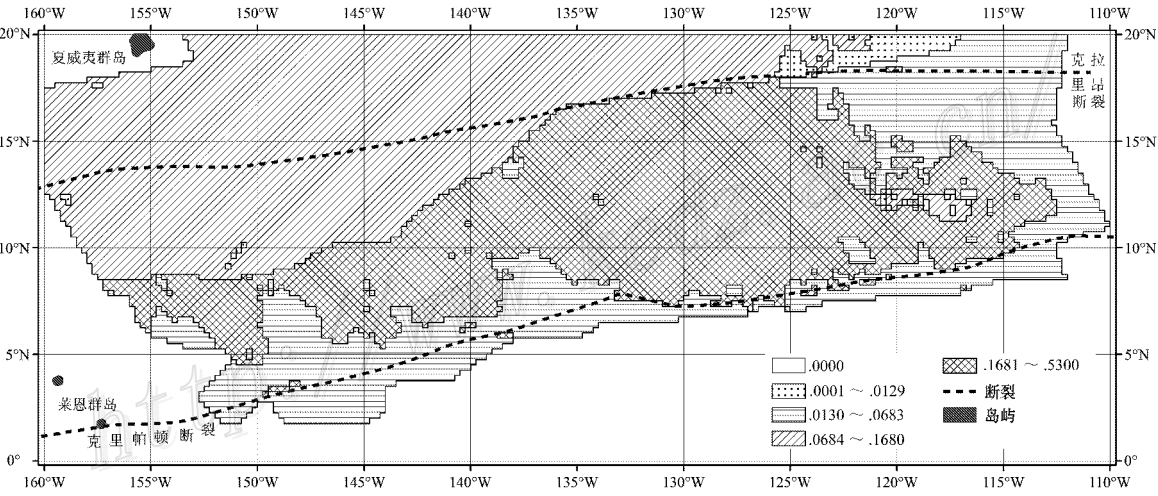


图 7 罗吉斯蒂回归推理法预测的 CC 区多金属结核资源产出的后验概率分布图

Fig. 7 Distribution of the posterior probability of nodule deposits by the Logistic Regression Analysis method in the Clarion-Clipperton Fracture Zone

法和罗吉斯蒂回归推理进行多金属结核潜力靶区空间决策具有较高的可信度,预测结果具有较高的可靠性。

综合分析上述 2 种空间决策方法的预测成果,根据后验概率的不同区间,可将该区多金属结核成矿潜力区分为 3 类级别(图 6、图 7):① I 级潜力区:高值区(格网区域),位于克拉里昂平移断层与克里帕顿平移断层的夹持部位,呈 NEE 向展布,为最有希望寻找多金属结核矿床的地区;② II 级潜力

区 次高值区(斜线区域),为较有希望寻找多金属结核矿床的地区;③ III 级潜力区:中值区(横线区域),为有希望寻找多金属结核矿床的地区。

5 结论与讨论

通过上述的系统设计与实现,潜在多金属结核矿床 GIS 预测系统软件得到了实现,并很好地应用于国际海底区域研究“十五”专项课题‘基于 CC 区

的多金属结核矿床地质模型”中。利用课题的研究成果和相关图表数据,对 CC 区已勘探地区进行了查明资源估算,对 CC 区未勘探地区进行了潜在资源空间位置预测,并对其潜在资源量进行了预测,达到了该预测系统的设计目的。

由于该预测系统主要针对国际海底区域研究“十五”课题‘基于 CC 区的多金属结核矿床地质模型’的需求进行设计,因此在功能方面存在一定的局限性。鉴于潜在矿床预测问题存在许多共性,在该系统设计与实现中,兼顾了系统的普适性。在该系统的基础上,对相关功能进行一定的完善和升级后,该矿床预测系统可广泛应用于各类矿床的预测中。

志 谢 在本项目研究中,得到了 ISA 多金属结核建模专家组 Kazmin、YubKo、Morgan 等人的数据的支持,得到了 ISA 法律和技术委员会委员李裕伟研究员的指导 参加本项目研究的成员还有 :吕文正、彭利生、张富元、韩喜球、何高文、朱克超、林荣澄等。在此一并致谢。作者还要感谢审稿人和编辑对本文提出的宝贵修改意见。

References

Agterberg F P, Bonham-Carter G F and Cheng Q M. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[A]. In : Davis J C and Herzfeld U C, ed. *Computers in Geology : 25 years of progress* [C]. New York : Oxford Univ. Press. 13-32.

Agterberg F P and Bonham-Carter G F. 1999. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration[A]. *Proc. 28th Interna. Symp. Computer Applications in the Mineral Industries* [C]. Golden, Colorado. 483-490.

Asadia H H and Hale M. 2001. A predictive GIS model for mapping potential gold and base metal mineralization in Takabarea, Iran [J]. *Computers & Geosciences*, 27 : 901-912.

Bi S B, Wang Q and Xue X H. 2003. Principles and methodologies of GIS software engineering [M]. Beijing : Science Press. 1-648 (in Chinese).

Carranza E J M and Hale M. 2001. Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines [J]. *Natural Resources Research*, 10 : 125-136.

Cao D H, Wang A J, Guan Y and Chen J. 2006. Position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc based on fuzzy logic [J]. *Mineral Deposits*, 25 (2) : 199-206 (in Chinese with English abstract).

Chen J P, Wang G W, Hou C B and Tan G X. 2005. Quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on GIS in northern

segment of Three River (Sanjiang) Region, Southwest China [J]. *Mineral Deposits*, 24 (1) : 15-24 (in Chinese with English abstract).

Chen S P, Lu X J and Zhou C F. 1999. Introduction to geophysical information system [M]. Beijing : Science Press. 1-240 (in Chinese).

Chen Y C. 1999. Theories and Methodologies for exploration and assessment to mineral resources at the present age [M]. Beijing : Seismic Press. 1-560 (in Chinese).

Chen Y C. 2004. MRPM - Three Visual Basic programs for mineral resource potential mapping [J]. *Computers & Geosciences*, 30 : 969-983.

Cheng Q and Agterberg F P. 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping [J]. *Natural Resources Research*, 8 : 27-35.

Fu H T and Wang E D. 2005. Application of GIS to metallogenic prognosis : Case study of Yangjiazhangzi ore field [J]. *Mineral Deposits*, 24 (6) : 684-691 (in Chinese with English abstract).

Gomes E G and Lines M P E. 2002. Integrating geographical information systems and multi-criteria methods : A case study [J]. *Annals of Operations Research*, 116 : 243-269.

Harris D, Zurcher L, Stanley M, et al. 2003. A comparative analysis of favorability mappings by weights of evidence, probabilistic neural networks, discriminant analysis, and Logistic regression [J]. *Natural Resources Research*, 12 : 241-255.

He G W, Sum X M, Yang S X, Xue T, Sun C B, Shi G Y, Zhang M and Hang H Q. 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of polymetallic nodules in CC zone, east Pacific Ocean [J]. *Mineral Deposits*, 25 (2) : 164-174 (in Chinese with English abstract).

International Seabed Authority. 2005. Summary of meeting of representatives of contractors and ISA experts : Establishment of a Geological Model of the Polymetallic Nodules in the Clarion Clipperton Zone, 25-27 May 2005, Kingston, Jamaica. Eleventh session, Legal and Technical Commission, ISA. Kingston, Jamaica [C]. 15-26 August, 2005.

Kazmin Y B. 2003. Geology of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) - existing geologic information in respect of polymetallic nodules in the CCZ [A]. In : Meeting of workshop to develop a geological model of the Clarion-Clipperton polymetallic nodule deposits, Fiji islands [C]. May 13-20, 2003, held by International Seabed Authority.

Li D P and Chen B S. 2002. Development trend of geomathematics in 21st century [A]. In : Hunan Geology Society and Hunan Bureau of Land and Natural Resources, ed. *The new development of Hunan geoscience* (No. 2) [C]. Changsha : Hunan Science & Technology Press. 269-272 (in Chinese).

Li D P. 2003. Status and development trend of geomathematics at the present age [A]. In : Hunan Geology Society, ed. *The advanced progress of Hunan geoscience* (No. 3) [C]. 44-47 (in Chinese).

Li D P. 2004. Study on UraPower V2.0 which is a software for geo-technical-economic assessment to in situ leaching sandstone type of uranium deposits [A]. In : Symposium on annual meeting of China Society of Natural Resources in 2004 [C]. 1051-1052 (in Chinese).

- Li D P, Cao L, Wang L P, Fan L T and Fan S Y. 2007. Study on application of spatial decision support system in predicting potential areas of mineral resources [A]. In: Hunan Geology Society, ed. The advanced progress of Hunan geoscience (No. 6) [C]. Changsha: Hunan Map Pub. House. 159-166 (in Chinese with English abstract).
- Li S X, Li W J, Zhou X C, Li H X and Lin Y. 2005. Base of object-oriented programming (Version 2) [M]. Beijing: Higher Education Press. 1-488 (in Chinese).
- Li Y, Shen Q and Li H. 2004. Design of spatial decision support systems for property professionals using MapObjects and Excel [J]. Automation in Construction, 13: 565-573.
- Luo D G, Guo Q and Wang X J. 2003. Simulation and prediction of underground water dynamics based on RBF neural network [J]. Acta Geoscientia Sinica, 24(5): 475-478 (in Chinese with English abstract).
- Matthews K B, Sibbald A R and Craw S. 1999. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: Integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 23: 9-26.
- Porwal A, Carranza E J M and Hale M. 2003. Artificial neural networks for mineral-potential mapping: A case study from Aravalli province, Western India [J]. Natural Resources Research, 12: 155-171.
- Xiao K Y, Zhu Y S, Zhang X H, Song G Y and Chen Z H. 1999. The extraction and integration technology of minerogenic information in mineral resources assessment [J]. Mineral Deposits, 18(4): 379-384 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Wang Y Y, Xue Q W, Zhang S T and Huang W B. 2003. Assessment system of copper deposit digital model of China [J]. Mineral Deposits, 22(4): 425-429 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B P, Chen S Y, Wang G N, et al. 1995. Characteristics of geotectonics in the middle Pacific [A]. In: Liang D H and Zhang B P, ed. Research issues about polymetallic nodules in the middle Pacific (2) [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-95 (in Chinese).
- Zhang F, Bian J M, Tang J, Liu F Y, Zhao J H and Feng L. 2006. The design of groundwater resources management and decision-support system in Liaohe oil field area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 36(Supp.): 33-38 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D. 2002. "Three-Component" quantitative resource prediction and assessments: Theory and practice of digital mineral prospecting [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 27(5): 482-489 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕硕本, 王 桥, 徐秀华. 2003. 地理信息系统软件工程的原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社. 1-648.
- 曹殿华, 王安建, 管 烨, 陈 江. 2006. 基于模糊逻辑的中甸岛弧斑岩型铜矿定位预测 [J]. 矿床地质, 25(2): 199-206.
- 陈建平, 王功文, 侯昌波, 唐菊兴. 2005. 基于 GIS 技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价 [J]. 矿床地质, 24(1): 15-24.
- 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 1999. 地理信息系统导论 [M]. 北京: 科学出版社. 1-240.
- 陈毓川. 1999. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法 [M]. 北京: 地震出版社. 1-560.
- 付海涛, 王恩德. 2005. GIS 技术在成矿预测中的应用实例——以杨家杖子矿田为例 [J]. 矿床地质, 24(6): 684-691.
- 何高文, 孙晓明, 杨胜雄, 薛 婷, 宋成兵, 石贵勇, 张 美, 韩喜球. 2006. 东太平洋 CC 区多金属结核铂族元素 (PGE) 地球化学及其意义 [J]. 矿床地质, 25(2): 164-174.
- 李德平, 陈宝树. 2002. 21 世纪数学地质学科发展趋势 [A]. 见: 湖南省国土资源厅、湖南省地质学会编. 湖南地学新进展 (2) [C]. 长沙: 湖南科学技术出版社. 269-272.
- 李德平. 2003. 当今数学地质学科的进展与发展趋势 [A]. 见: 湖南省地质学会编. 湖南地学新进展 (3) [C]. 44-47.
- 李德平. 2004. 砂岩型铀矿资源地浸地质技术经济评价软件 U-raPower V2.0 研究 [A]. 见: 中国自然资源学会 2004 年学术年会论文集 [C]. 1051-1052.
- 李德平, 曹 丽, 王利平, 范立亭, 范少云. 2007. 空间决策支持技术在矿产资源潜力区预测中的应用研究 [A]. 见: 湖南省地质学会编. 湖南地学新进展 (6) [C]. 长沙: 湖南地图出版社. 159-166.
- 李师贤, 李文军, 周晓聪, 李宏新, 林 瑛. 2005. 面向对象程序设计基础 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社. 1-488.
- 罗定贵, 郭 青, 王学军. 2003. 基于 RBF 神经网络的地下水动态模拟与预测 [J]. 地球学报, 24(5): 475-478.
- 肖克炎, 朱裕生, 张晓华, 宋国耀, 陈邦辉. 1999. 矿产资源评价中的成矿信息提取与综合技术 [J]. 矿床地质, 18(4): 379-384.
- 肖克炎, 王勇毅, 薛群威, 张寿庭, 黄文斌. 2003. 中国铜矿数字矿床模型评价系统的开发 [J]. 矿床地质, 22(4): 425-429.
- 张伯普, 陈圣源, 王公念, 等. 1995. 太平洋中部地质构造特征 [A]. 见: 梁德华, 张伯普, 主编. 太平洋中部多金属结核研究文集 (二) [C]. 北京: 地质出版社. 1-95.
- 张 芳, 卞建民, 汤 洁, 刘凤英, 赵军海, 封 灵. 2006. 辽河油田地下水资源管理决策支持系统的设计 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 36(增刊): 33-38.
- 赵鹏大. 2002. "三联式" 资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 482-489.