

“三联式”成矿预测新进展

赵鹏大, 陈建平, 张寿庭

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要:随着信息技术的发展,矿产勘查已步入数字化、量化研究的新阶段。“三联式”成矿预测以地质异常分析为基础,以成矿多样性分析与矿床谱系研究为指导,将地质异常、成矿多样性及矿床谱系 3 方面量化研究紧密结合形成矿产预测及定量评价的切入点,是实现“数字找矿”的创新探索。文中对“三联式”成矿预测的基本理论进行了论述,结合在固体矿产和油气资源预测评价中的最新研究成果,重点论述了“三联式”成矿预测中的地质异常动态演化解析思路和“5P”靶区逐步逼近法。研究认为:不同时期地质异常各自包含的矿产类型、组合特征与资源潜力等均有明显差异,应用地质异常动态演化的解析思路与方法,有效提取与相应成矿事件密切相关的致矿地质异常,是提高预测成果科学预见性的关键。并且,随着“三联式”成矿预测研究的不断深入,找矿信息由少到多,找矿范围由大到小,靶区级别由低到高,找矿成功概率逐步增大,勘探风险逐步降低。“5P”靶区圈定,从 1P 到 5P 依次研究目标内涵增大、外延减小、预测对象(矿产种类及成因类型)渐趋明确。

关键词:地质异常;成矿多样性;矿床谱系;“三联式”成矿预测;“5P”靶区逐步逼近法

中图分类号:P612 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2003)02-0455-09

1 成矿预测的新阶段

在找矿难度日益增大的今天,如何提高找矿效果一直是国内外地质学者关注的焦点问题之一。有两方面的工作一直在不间断地进行:一是加强成矿地质理论和实验研究,深入了解各类矿床形成的环境和条件以及矿床分布规律及产出特征;二是加强找矿技术方法研究,进一步查明指示矿床存在的各种标志和现象,有针对性地开发识别、获取、加工、分析和解释海量找矿信息的手段、工具和软件。在这当中,引人注目的是成矿预测和资源定量评价理论与方法的研究取得很大的进展。成矿预测及资源定量评价是将上述两个方面研究工作紧密结合的系统科学。它以综合地质研究为基础,以矿床模型或地质异常为依据,以成矿地质场、地球物理场、地球化

学场、生物场及遥感影像场的有用数据为背景,以数学模型、经济技术环境评价模型为工具,以地质分析、计算机科学计算和模拟为手段,以发现成矿远景区为目标,以验证其可靠性、发现矿床并做出评价为最后结果。所以成矿预测及资源定量评价涉及地质、数学、经济、技术、环境、社会、法律、政治等广泛学科交叉领域。

信息技术的广泛应用是当今科学技术迅速发展最重要推动力之一,也是现代科学技术的基本特征和标志。应该说,成矿预测与资源评价是地质科学中应用定量方法和信息技术较早的领域之一。加拿大著名数学地质及资源评价学家 F·P·阿格特伯格在 1970 年发表的“地质学的多变量预测方程”^[1]一文,就论述了成矿预测需在地区趋势的偏差基础上进行,而不能基于原始数据。1972 年他与其他作者发表了《加拿大地盾艾比提比地区铜锌潜力的数学地质评价》^[2]一文,提出了基于地质与物探数据对区域内未发现矿产定量估计的方法并编制了 1:50 万铜锌发现概率等值线图。美国著名资源评价学家 D·P·哈里斯于 1984 年出版了专著《矿产资源评价》^[3]阐述了矿产资源潜力分析的概念、方法与实例。但早在 1965 年,他的博士论文《多元统计分析

收稿日期:2003-03-19;修订日期:2003-03-22

基金项目:中国地质调查局项目(200110200009);国家自然科学基金项目(40072030);教育部博士点基金项目(20010491007)

作者简介:赵鹏大(1931—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国地质大学校长,主要从事矿产普查与勘探学和数学地质学研究。

在矿产勘查中的应用》^[4]可能是最早的资源定量评价多元统计应用方面的文献。美国学者 J·C·格里菲思《资源勘查的网格划分与成功比》(1966)^[5]及 J·M·波特布尔的《特征分析在矿产勘查中的应用》(1971)^[6]等著作也是资源定量勘查评价较早期的范例。我国矿产资源定量预测与评价始于 1976 年^[7], 经过了矿床统计预测阶段(1976—1990), 基于“求异”理论的资源定量预测与评价阶段(1990—2000), 发展到现今的“数字找矿”新阶段^[8]。

“三联式”资源定量预测与评价理论及方法^[9]的提出是实现数字找矿的一种新探索。数字找矿要求更广泛地应用定量方法和信息技术。与找矿有关的各个主要方面, 包括找矿地区各种成矿信息的识别和查明、各种矿化特征的多样性分析以及矿化时空分布规律的研究等, 都应该实现数字化、量化、模型化、可视化及网络化。不仅如此, 找矿工作的组织与管理, 找矿对象(矿种)的市场需求与竞争力评价, 找矿项目的矿业权价值估计与转让等等, 都应实现信息化。全面信息化是成矿预测进入新阶段的基本标志。

2 三联式成矿预测及数字找矿模型

笔者近 10 年来先后开展了“地质异常”、“成矿多样性”与“矿床谱系”等问题的研究, 这些问题不是孤立的, 而是密切相关的, 三者的结合构成一种现代成矿预测的新理论或新思路, 我们称之为“三联式”成矿预测。成矿是地质过程中的小概率事件, 也是地质异常事件。因此, 地质异常分析是从区域上有效识别、提取包含成矿事件各类地质异常(异常圈定), 成矿多样性分析是根据成矿地质特征在所有异常中筛选出成矿地质异常并评价预测单元内所有可能存在的矿产及其有利度(缩小靶区), 矿床谱系分析是根据成矿规律从成矿地质异常和各类矿产中梳理出区域成矿体系(指导预测)。

2.1 三联式成矿预测

众所周知, 自 19 世纪 30 年代, C·莱伊尔提出“将今论古”的现实主义原则以来, “相似类比”一直是地质学研究所遵循的基本方法原理, 在矿床学和矿产勘查领域表现为各种成矿模式和找矿模型的研究和应用。我们熟知“相似的成矿地质条件下可能有类似(相同)的矿床产出”, 由此而来的“同一成矿域(区、带)”、“相同构造背景”、“相同岩浆条件”、“相

同沉积环境”以及“相似的控矿因素”、“相似的元素组合”、“曾经见到的成矿部位”、“已有的成矿系列”, 等等, 总之, 一切可能的“共性”(相似)特征都可能成为“预测”(类比)的依据。应当肯定, 模式(型)思维对传统矿产勘查具有指导作用, 而且在指导国内外找矿人的长期实践中取得了不可磨灭的功绩。但是, 对于具有“点型分布”的矿床, 以及当研究区不存在已知矿床作为模式进行“相似类比”时, 什么样的理论可以用来指导我们的找矿预测呢^[10]?

地质异常是在不同地质历史时期地球各圈层相互作用和演化发展的产物。地质异常形成的地质时代、构造背景、地质环境和岩石类型决定了异常的性质及其赋存的矿产资源种类和规模。随着地质历史的演化, 早期形成的地质异常也将随着演变。因此, 地质异常及其产物具有空间和时间上的演化序列。所有与成矿有关的地质特征, 包括在成矿条件与控矿因素、空间与时间, 都表现为地质演化过程中的地质异常事件, 在地壳范围内应是一种特殊的地质异常空间, 这类异常称为“致矿地质异常”。因此, 查明地质异常是成矿预测的基础、找矿的前提、选择靶区的依据。系统地应用地质异常理论及相应的方法, 使不同层次的成矿预测研究有机地结合成为一个整体^[11]。

多样性是复杂系统中客观事物外在表现的基本特征, 它是系统内部各种因素自身演化与外部环境影响相结合的结果。生态环境恶化使生物多样性受到严重威胁已成为当今人们关注的热点, 对于无机界的矿床同样由于成矿物质自身的演化与外在地质环境的影响相结合而有多多样性表现。长期以来, 人们更多关注“成矿专属性”问题, 例如, 岩浆岩成矿专属性的研究曾在指导找矿中发挥了重要作用。然而, 成矿专属性只是成矿多样性的一种特例或表现形式之一, 成矿多样性则具有更普遍和更基本的意义^[12]。

成矿多样性的某种规律性序列表现就是矿床的一种谱系, 矿床的规律性序列可以表现在成因上、规模上、成分上、数量上、质量上以及它们的组合上, 但最基本地是表现在成矿时间上和成矿空间上的“有序性”和“成套性”。矿床空间分布的规律序列构成矿床的空间谱系, 从宏观上, 矿床空间分布受大地构造特征的控制。除大地构造、沉积环境、成矿深度控制矿床空间分布的有序性外, 具体含矿构造特征的变化, 成矿温度压力的变化, 成矿阶段的序次演化以

及成矿后的次生变化等都可以造成矿床的水平或垂直分带。这种分带有时表现为不同矿种或不同矿种组合的交替,有时为不同成矿元素或矿物组合及矿石类型的变换,或可能是不同成因类型和不同形态类型的分带。这种分带性一般存在于不同规模的矿化空间,如洲际尺度的太平洋成矿带,即可分为以Cu-Mo-Au矿化为主的内带和以W-Sn矿化为主的外带,但通常见于矿田、矿床或矿体范围内,查明由此形成的矿床空间谱系对于大比例尺的局部预测往往具有重要指导意义。

从成矿角度分析,在同一成矿时期,矿床可以形成于不同空间部位;反之,也可以在同一空间部位有不同时期形成的矿床迭加或改造。但更多是不同时期形成的矿床产于不同的空间部位。所以,在一个地区进行成矿预测及评价时,还要分析它们的时间、空间和成因序列、建立矿床的时间谱系、空间谱系及与两者相关的成因谱系。因此,这种分析是以不同尺度和不同类型的地质异常分析为基础,从中找出制约成矿多样性与成矿谱系的地质动力-结构构造-物质组分-成因序次等方面的原因,为区域成矿的科学预测与全面评价提供必要信息。

2.2 数字找矿模型

地质假说及理论的可检验性及可证明性的实现是一个很复杂很困难的问题。现在除少数地质作用和现象可以在实验室模拟重现加以证明外,更多的是依靠预测结果的实现,推断现象的出现等实践结果的检验,然而大量地质推断是无法通过有限的、局部的、短暂的实践加以检验的,如对一个地区矿产资源的估计,某种矿床形成的成因假说,对地质构造发展演化历史的解释等等。因此,正确的数学模型的建立有可能在解释、预测、检验及控制各种现象和过程中发挥更有效的作用。

量化研究是地球科学与通过符号和高度结构化的定律所描述的系统化模型的结合,旨在揭示地球系统的实质,把该系统用强有力的符号表示出来,这种符号使得量化具有实际意义。对于区域成矿预测的分析研究,我们需要将传统矿床地质从定性(部分定量)研究到全面量化分析,从单学科研究到多学科、多层次(空中、地面、地下)的综合集成,从文本、图件的表达达到图、文、声、像以及可视化分析处理的综合表述方式,从单一的专项研究(生产)目标到适用于不同层次需求多用户交互式,从封闭型资料管理到信息集成、资源共享以及分级查阅。我们

从简单的现象描述开始,每一个矿化现象描述了区域内一种可能的元素超常富集的存在,反映了区域内可能存在的成矿作用的一种表现,这是一个区域成矿多样性的单因素(单变量)定量表征。在这个过程中,不是根据区域已有的成矿模式去对比分析区内所(新)发现的矿(化)点,而是将区内所有(包括新发现的)矿化现象都看成可能的成矿线索,根据控矿要素和成矿条件客观、系统地归纳整理。这种成矿多样性的定量表述可以用来归纳总结出区域上相互独立的矿床(点)的共同特征,这实际上表明成矿多样性分析包含着“相似对比”的模型分析所能得到的区域成矿信息。

成矿地质信息的数字化、量化是地质异常识别与提取的重要基础,通过对矿源、运矿、聚矿、赋矿异常的分析来确定成矿可能区带、找矿可行地段和找矿有利部位,有效地通过地质异常、物探异常、化探异常、遥感异常圈定与匹配相互佐证与深化成矿信息,力求从全球性、区域性、局部性到显微地质异常的系统分析加大成矿预测的成功概率。

矿化特征的数字化、量化是成矿多样性分析与评价的关键步骤,它是在区域矿种、矿床类型(成因、工业形态类型)矿集区范围、矿床规模、矿化强度、成矿深度多样性及数字化基础上,查明区域地质背景场、地球化学场、地球物理场、遥感影像场多样性及成矿多样性表现,建立地质多样性与成矿多样性函数联系。

区域成矿规律的数字化、量化是矿床谱系分析的理论核心,通过区域成矿时间序列分析建立成矿时代谱系,通过区域成矿空间趋势分析建立空间谱系,通过区域矿化成因演化序列建立矿床成因谱系,最终通过矿床谱系的综合分析建立区域成矿模式。

当成矿多样性的定量表征积累到一定程度(当然这是需要一个很长的时间来完成),我们可以通过不同矿化现象的相互关系分析建立区域矿床谱系。由于区域成矿地质特征的差异使得矿床谱系的表达繁简不同,除了反映的成矿时间、空间和成因特征外,谱系不同结构上的某一位置本身又可能包含了次一级的亚谱系(反映规模、产状、矿石、组构等),从而构成自底向上(pyramid)的“复式谱系”。矿床谱系的表达形式、所揭示的成矿规律以及由此所具有的预测区域成矿事件和区域矿床分布的能力等是一个复杂的体系,这可能是因为它所揭示的区域元素

富集规律是第一层次的,而控制这种富集的成矿规律是受到如原始地壳的不均一性、区域构造岩浆活动以及地下深部物质带入带出等诸多因素影响的第二、第三层次的成因规律。显然,这种复杂结构很难凭借定性综合和经验推理而简单得到,也正是因为这种复杂性决定了反映区域矿床谱系信息的多样性和复杂性,决定了区域矿床谱系的研究需要凭借定量地学与“3S”技术,处理分析海量的信息数据,进而从中“提取”出自底向上的“复式谱系”。

3 地质异常时空演化与成矿的关联分析

地质异常分析是“三联式”成矿预测之基础,从矿产预测评价的“优化评价”准则^[13]而论,以动态演

化的观点进行地质异常分析和致矿地质异常圈定,具有十分重要的意义。

以滇西北地区为例,根据研究区域喜马拉雅亚旋回的构造演化特征,综合考虑地层建造、接触关系、岩浆活动等因素,以喜马拉雅运动第一、二、三幕为界,可将该区喜马拉雅亚旋回的地质异常演化进一步划分为4个亚旋回,它们在成矿等方面各具特色(图1)。

为深化揭示研究区地质异常的时空演化特征,根据上述4个亚旋回,进一步确定了4个相应的地质异常构造层,然后,从最新的地质异常构造层的研究入手,通过层层剥离的方法逐步恢复和揭示早期地质异常的结构特征。图2是以单位面积内的时代岩性数来定量标度的研究区地质异常时空演变特征。

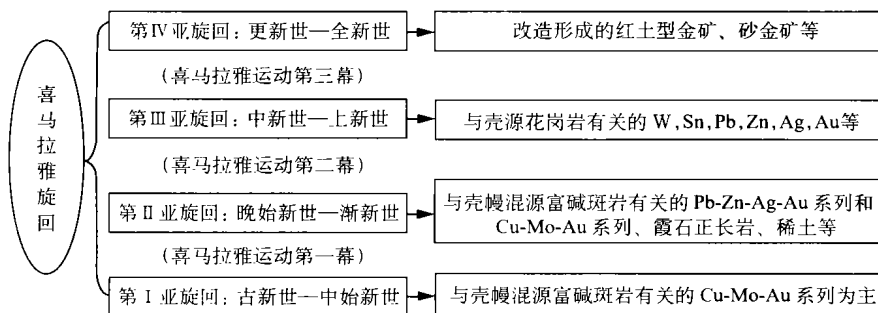


图1 滇西北喜马拉雅期地质异常演化及其与岩浆作用相关的主要矿产类型

Fig. 1 Geo-anomalous evolution and the main mineral types related with magmatites of the Himalayan period in northwestern Yunnan

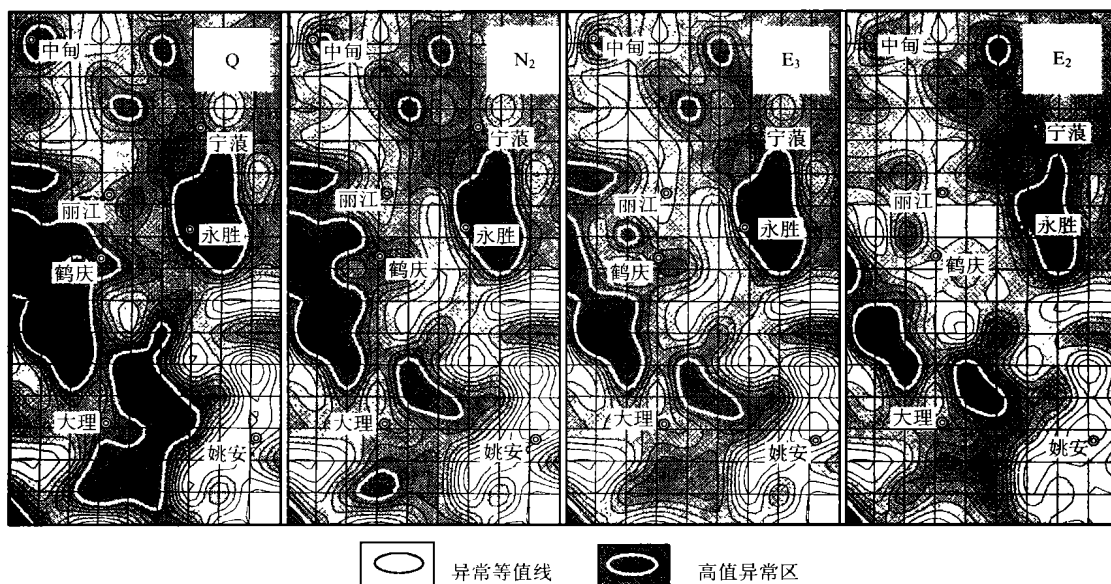


图2 滇西北喜马拉雅期地质异常时空演化特征

Fig. 2 Temporal and spatial evolution of geo-anomalies of the Himalayan period in northwestern Yunnan

由图 2 可见,喜马拉雅运动第一幕奠定了滇西北地区地质异常的基本格架,晚期地质异常是对早期地质异常的继承和叠加改造,并总体表现为:由早到晚地质异常体渐趋增多,异常强度规模增大,异常体形态逐趋复杂。结合研究区不同时期的主要矿产类型特征可知,所圈定的不同时期地质异常各自包含的矿产类型、组合特征与资源潜力等均有明显差异,其中,晚期地质异常的矿产内涵包括:早期形成的矿产,晚期地质作用对早期矿产改造的产物,晚期新生的矿产。因此,在地质异常与成矿关联分析以及致矿地质异常圈定过程中,应用地质异常动态演化的解析思路与方法,在成矿多样性与成矿谱系研究基础上,有效提取与相应成矿事件密切相关的致矿地质异常,是提高预测成果科学预见性的关键。

4 “5P”靶区逐步逼近法与滇西北重晶石矿带的发现

随着“三联式”成矿预测研究的不断深入,找矿

信息由少到多,找矿范围由大到小,靶区级别由低到高,找矿成功概率逐步增大,勘探风险逐步降低。这是“5P”地段(成矿可能地段:probable ore-forming area;找矿可行地段:permissive ore-finding area;找矿有利地段:preferable ore-finding area;资源潜在地段:potential mineral resources area;矿体远景地段:perspective orebodies area)逐级圈定的预测方法(简称“5P”靶区逐步逼近法)。

“5P”地段的前 3“P”,一般属中—小比例尺成矿预测范畴;后 2“P”则属大比例尺成矿预测范畴,是对预测靶区(找矿有利地段)的深化剖析。在“三联式”成矿预测中,“5P”靶区逐步逼近法的靶区内涵逐渐增大、外延逐渐减小。近期,我们在开展“三联式”成矿预测示范研究中(中国地质调查局项目, No. 200110200009),以滇西北喜山期构造—岩浆热事件为切入点,运用“5P”靶区逐步逼近法,预测发现并初步查证了一极具资源潜力的重晶石矿带。现以此为例,将研究思路、技术措施和预测成果概述如下(表 1)。

表 1 滇西北喜山期岩浆岩相关矿产预测“5P”靶区逐步逼近法一览表

Table 1 The approach of “5P” target delineation for forecasting minerals related with magmatites of the Himalayan period in northwestern Yunnan

“5P”	研究思路、技术措施与靶区圈定方法	比例尺	预测成果*
成矿可能地段	深大断裂和幔隆拗曲过渡带是该区喜山期富碱斑岩及相关矿产的主导性控岩控矿地质异常。以 1:100 万地质图为基础,综合应用物探重磁资料和遥感影像推测的深大断裂及地壳深部构造信息。预测变量采用二态赋值,运用特征分析法确定单元成矿优益度,圈定成矿可能地段	1:100 万	1P 靶区集中分布于扬子地台西缘、松潘—甘孜褶皱带与昌都—思茅褶皱带 3 大构造单元的接合地带
找矿可行地段	在 1P 基础上,以 1:50 万地质矿产图为基础,综合遥感解译资料,根据地质异常、成矿多样性和矿床谱系研究结果,选择 SN, NE, NW 向断层、断层交叉点、遥感蚀变环、富碱斑岩为预测变量,运用信息法确定单元成矿优益度,圈定找矿可行地段	1:50 万	根据成矿优益度值的大小及展布规模,圈定找矿可行地段 I 级靶区 4 个、II 级靶区 14 个
找矿有利地段	选择 2P 的 I 级靶区(宁蒗—永胜地区)进行示范研究。以 1:20 万地质矿产图为基础,分别按 Cu-Mo-Au, Pb-Zn-Ag 系列和重晶石系列进行预测。其中,重晶石成矿明显受含矿岩系 Zbd 和构造岩浆热事件双重控制;选择断裂构造、斑岩体、矿化蚀变、含矿地层、Ba-P 组合化探异常为预测变量,运用特征分析法确定预测单元成矿有利度,圈定找矿有利地段	1:20 万	分别圈定找矿有利地段:斑岩型 Cu-Au-Mo 类 4 个,热液型 Pb-Zn-Ag-Au 类 5 个,改造型重晶石类 6 个
资源潜在地段	示范研究,选择 3P 重晶石类预测靶区之一(宁蒗巴打湾地区)进行实地剖析,在成矿多样性与矿床谱系研究的同时,应用 X 射线荧光分析方法,建立重晶石矿化 Ba 元素异常的 X 荧光特散比定量预测评价模型,圈定资源潜在地段	1:1 万	确定 Zbd ² 顶层为沉积型和改造型重晶石矿潜在地段, Zbd ¹ 厚层白云岩段是层控脉型矿的潜在地段
矿体远景地段	采用大比例尺的地物化综合方法: XRD 进行 Ba 元素含量的定量分析与矿化异常体定位-定量评价 ^[14] 、VLF-EM 对构造矿化低阻带(尤指层控脉型矿体)进行空间定位预测、工程验证与样品测试分析等,开展隐伏—半隐伏矿体预测评价	1:1 000	发现并初步查证具工业利用价值的多成因类型重晶石矿产地 5 处,构成一具特大型潜力的重晶石矿带

* 预测成果中还有与喜山期富碱斑岩相关的 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au 等矿产,在此未予一一阐述。

上述研究中,从1P到5P依次研究目标内涵增大、外延减小、预测对象(矿产种类及成因类型)渐趋明确,以重晶石矿带发现为例,依次为:与喜山期岩浆岩相关的矿产(1-2P)密切相关(斑岩-热液型 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au 等)、间接相关(在早期沉积基础上受喜山期构造岩浆热事件改造的重晶石矿等)的矿产(3P),多成因类型的重晶石矿床(4P),沉积型、改造型、层控脉型及风化型重晶石矿体(5P)。表2是近期发现的不同类型重晶石矿的基本情况。

5 油气地质异常分析

近年来,我们探讨了地质异常理论在油气勘查与评价中的应用,油气生成于各种控烃要素有效匹配的区域,油气被圈闭于具有显著变化的地质界面

处,油气充填于显著不连续空间内。这类区域、界面和空间显然都属于地质异常,即油气地质异常是指:“在成分、结构上与周围环境明显差异的含油气地质体或地质组合体。我们把油气地质异常当作是一个场或是一个系统来进行研究,进一步则需要将其当作一个复杂系统,从整体上、动态上、各种结构的相互关系上来分析、描述,揭示出其中(系统)的有关本质属性和内在规律性。由此预测油气地质异常变化趋势、分析出油气地质异常的形成规律、解决实际问题。”^[15]

油气地质异常研究,是按照地质异常致矿 → 构造物质组合控矿 → 物化探异常示矿 → 综合信息和组合方法找矿的研究思路,采用以结构分析为主导,将多元信息场(重、磁、电异常场、地球物理场)定量化分析和地质异常的时空结构分析与地质空间构

表2 新发现滇西北重晶石矿带不同地段成矿特征

Table 2 Metallogenic characters of barite ore belt newly discovered in northwestern Yunnan

产地名称	产出特征	成因类型	矿石品位(BaSO ₄ %)
马路塘	层状-透镜状矿体,块状、斑杂状矿石	沉积-改造型	89.54%~97.77%
大槽子	层状-透镜状矿体,块状、层纹状、斑杂状矿石	沉积-(改造)型	80.62%~98.76%
昔腊坪	透镜状-脉状矿体,块状、角砾状、脉状矿石(目前仅见矿体浅部)	层控脉型	34.14%~97.36%
猪场	透镜状-脉状矿体,块状、角砾状、脉状矿石	沉积-改造型	52.85%~98.90%
永宁坪	层状矿体,块状、层纹状矿石	沉积型	27.60%~74.54%

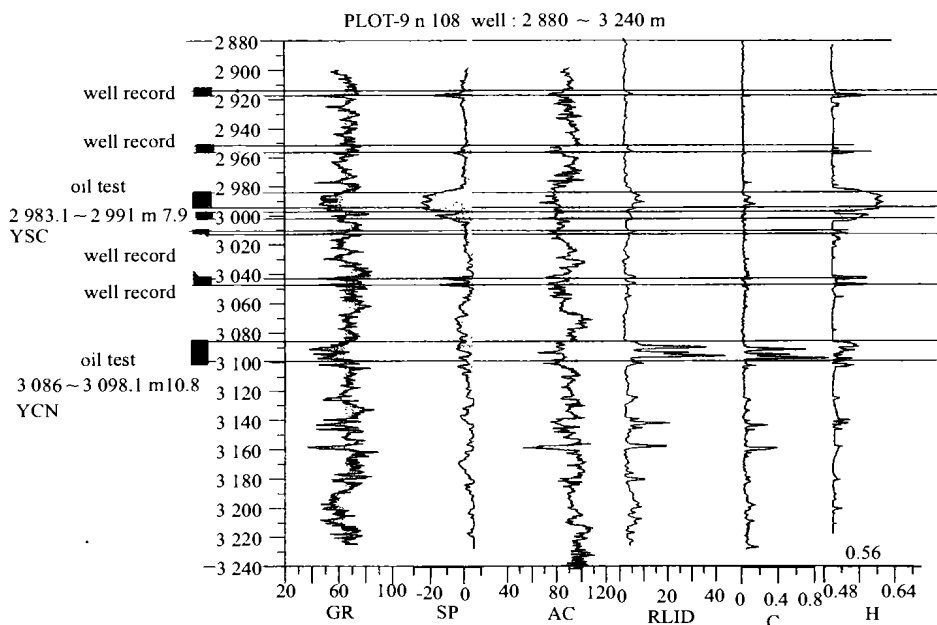


图3 某油田测井参数与地质异常值对比

Fig. 3 Contrast between logging parameters and geo-anomalous values in some oil field
AC:自然伽马; GR:自然电位; SP:视电阻率; RLID:声波时差 C:地质异常复杂度 H:组合场

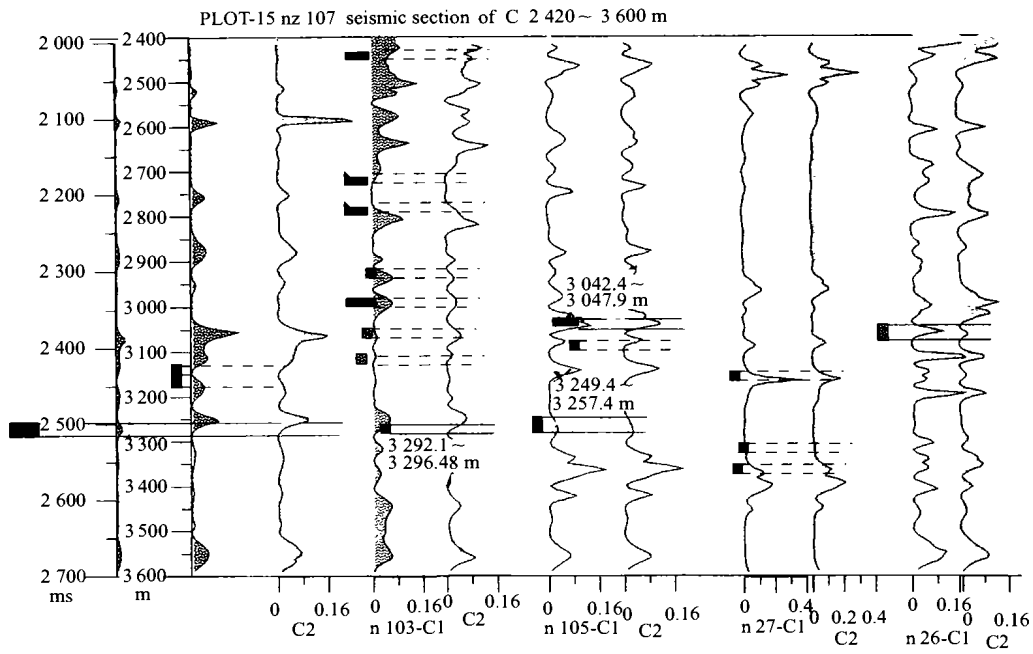


图 4 某油田过井复杂度剖面与油气显示对比分析

Fig. 4 Contrast between evidences of oil and gas and geo-anomalous complexities in the crossing sections of wells in some oil field

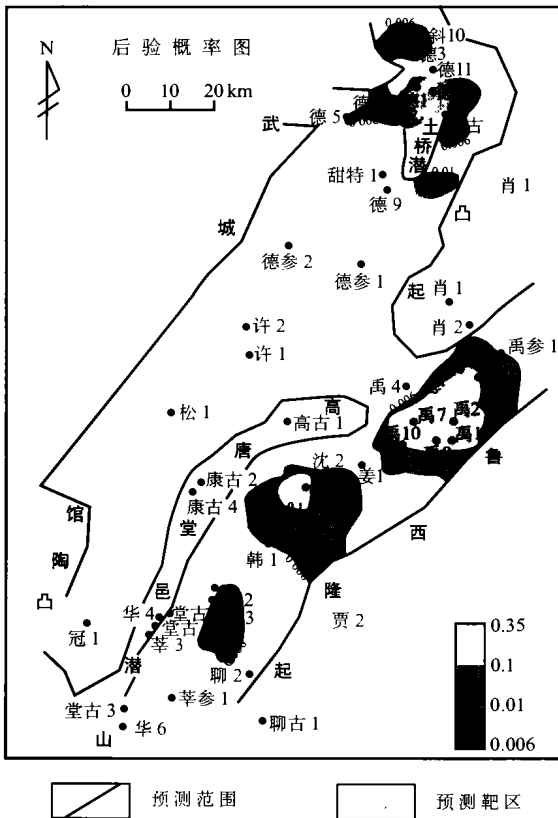


图 5 区 m 域油气地质异常有利地带预测图
Fig. 5 Prognostic chart of the preferable areas of geo-anomalies of oil and gas

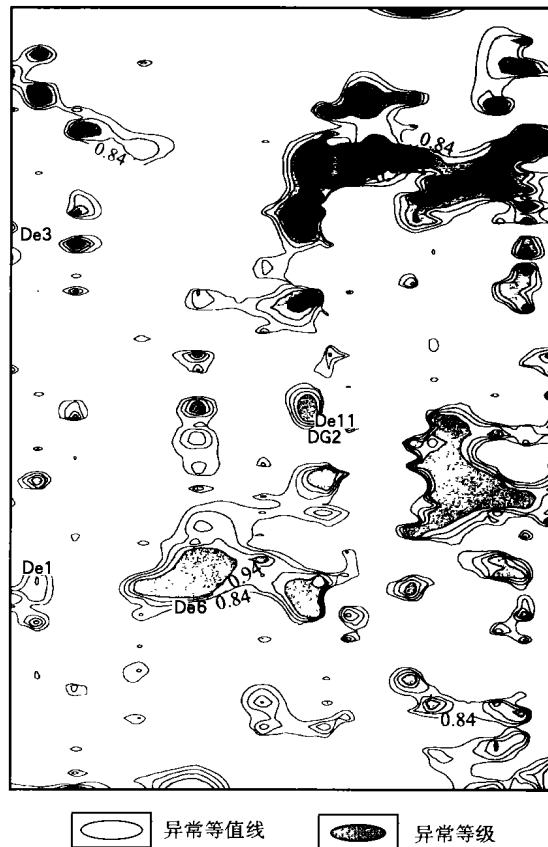


图 6 工区沙三 2 层油气异常分布图
Fig. 6 Distribution of geo-anomalies of oil and gas of the Es³⁻² layer in study area

造形态分析相结合的预测分析方法,即是从多元信息有效数据提取,到地质异常量化分析,到异常时空结构分析研究与矿体定位空间耦合的关系厘定,直到成矿体定位预测^[16]。

要解决以上问题,就要对多元信息进行有效提取,进行定量分析解释,认清局部地质异常的结构特征,进而揭示出地质异常的时空结构特征。然后,研究本地区各地质体与构造在动力和空间上的关联性和对应匹配情况,研究地质异常场、物化探异常场与构造结构和地质层位规律的对应耦合^[17]。

因此,油气地质异常是查明指示油气生成与就位(圈定)有利空间的重要手段与方法。我们根据油气勘查的特点,系统开发了油气地质异常定量分析方法和技术系统,应用于实际研究中取得了较为满意的效果。针对各类参数(一维、二维或三维),包括各种地质观测数据、录井数据、物、化探数据等,对其进行定量分析,例如组合熵计算,复杂度、相似度计算,分维数计算等查明各种地质、物化探参数的变异特征,包括变异性质、变异程度、变异结构,最终查明并圈定出变异界线与变异空间。对一维参数划出变异界线,对二维参数圈出变异范围,对三维参数定出变异空间。图3是根据一维测井参数自然伽马(AC)、自然电位(GR)、视电阻率(SP)和声波时差(RILD)计算出的地质异常复杂度(C)和组合熵(H)的对比分析结果,反映出高的部位含油饱和度大,组合熵高的渗透率强。图4是根据地震剖面瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位计算的复杂度二维剖面,反映出油气显示区段对应于复杂度曲线表现出低值背景上的高值异常,且地质异常特征总体趋势稳定。

在实例研究中,我们以常规测量和解释数据为基础,从地震、测井和地球化学等不同类型的相关数据分析入手,提取与表征和油气生成变化相关的新信息、新特征作为研究目标,用地质异常的定性分析、定量分析方法,识别和圈定地质异常,完成“5P”地段圈定的研究,即随着研究程度的不断深入和预测靶区的不断缩小,圈定出:油气资源可能地段(1P),油气发现可行地段(2P),油气资源有利地段(3P)如图5所示,潜在油气资源体地段(4P)如图6所示,以及油气矿体远景地段(5P)。最终得到区域油气藏地质异常综合信息模型,由此对油气地质异常的分布规律进行预测评价,选中靶区勘探目标并对进一步的勘探生产提出相关建议与分析研究。

References[参考文献]:

- [1] AGTERBERG F P. Multivariate prediction equations in geology[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1970 (2): 319-324.
- [2] AGTERBERG F P. Geomathematical evaluation of copper and zinc potential in the Abitibi area of the Canadian shield [A]. *Geological Survey of Canada Paper 71-41*[C]. 1972, 55.
- [3] HARRIS D P. *Mineral Resources Appraisal—Mineral Endowment, Resources, and Potential Supply: Concept, Methods, and Cases* [M]. New York: Oxford University Press, 1984.
- [4] HARRIS D P. *An Application of Multivariate Statistical Analysis of Mineral Exploration* [D]. University Park, Pennsylvania: Pennsylvania State University, 1965.
- [5] GRIFFITHS J C. *Grid Spacing and Success Ratios in Exploration for Natural Resources. in Mineral Experimental Station* [M]. Special Publication No. 1. University Park, PA: Pennsylvania State University, 1966.
- [6] BOTBOL J M. *An Application of Characteristic Analysis to Mineral Exploration, Proceedings of 9th International Symposium on Techniques for Decision-Making in the Mineral Industry* [M]. Montreal, Canada: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 12. 1971, 12: 92-99.
- [7] ZHAO Pengda. Statistics and prediction of iron ore deposit in Ningwu area [A]. *Florilegium of Ningwu Volcanic and Iron Ore Conference* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1978 (in Chinese). [赵鹏大. 宁芜地区铁矿床统计预测 [A]. 宁芜火山岩铁矿床会议选集 [C]. 北京: 地质出版社, 1978.]
- [8] ZHAO Pengda. “Three-step” quantitative forecasting and assessment of resource—theory of digital exploration and discussion on practice [J]. *Earth Science*, 2002, 27 (5): 482-489 (in Chinese). [赵鹏大. “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, 2002, 27 (5): 482-489.]
- [9] ZHAO Pengda, CHEN Jjianping, CHEN Jianguo, et al. Introduction to “Three-step” Digital Mineral Prospecting and assessment [A]. *Proceedings of the International Symposium* [C]. 2001, 1-5.
- [10] CHEN Jianping, ZHANG Shouting, TANG Jun, et al. Theoretical consideration to quantitative forecasting of nontraditional mineral resource [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17 (2): 342-348 (in Chinese). [陈建平, 张寿庭, 汤军, 等. 非传统矿产资源定量预测的理论思考 [J]. 地球物理学进展, 2002, 17 (2): 342-348.]
- [11] ZHAO Pengda. Geology anomaly and forecasting on mineral

- forming[A]. *Theory and Methods of Present Mine and Resource Exploration Assessment* [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. 98-106(in Chinese). [赵鹏大. 地质异常与成矿预测[A]. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京: 地震出版社, 1999. 98-106.]
- [12] ZHAO Pengda, CHEN Jianping, CHEN Jianguo. On diversity of mineralization and the spectrum of ore deposit[J]. *Earth Science*, 2001, 26(2): 111-117(in Chinese). [赵鹏大, 陈建平, 陈建国. 成矿多样性与矿床谱系[J]. 地球科学, 2001, 26(2): 111-117.]
- [13] ZHAO Pengda, CHI Shundou, LI Zhimin, et al. *Theory and Methods of Mine Exploration* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001. 1-245(in Chinese). [赵鹏大, 池顺都, 李志民, 等. 矿产勘查理论与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001. 1-245.]
- [14] ZHANG Shouting, DING Yimin, ZHU Chuangye, et al. The application of X-ray fluorescence method to the study of rules of miner formation[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1992, 19(2): 104-110(in Chinese). [张寿庭, 丁益民, 朱创业, 等. X射线荧光方法在成矿规律研究中的应用[J]. 成都理工大学学报, 1992, 19(2): 104-110.]
- [15] ZHAO Pengda, TANG Jun, CHEN Jianping, et al. Oil geology anomaly and non-traditional petroleum resource and exploration research[J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38(2): 1-5(in Chinese). [赵鹏大, 汤军, 陈建平, 等. 油气地质异常与非传统油气资源勘探研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 1-5.]
- [16] ZHAO Pengda, TANG Jun, CHEN Jianping, et al. Discussion on oil geology anomaly in petroliferous basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(4): 439-443(in Chinese). [赵鹏大, 汤军, 陈建平, 等. 初论含油气盆地油气地质异常[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(4): 439-443.]
- [17] ZHAO Pengda, TANG Jun, CHEN Jianping, et al. Formation of Bikou fault block Longmen Mountains and restoration of its original spatial position[J]. *Geology in China*, 2002, 29(3): 286-290(in Chinese). [赵鹏大, 汤军, 陈建平, 等. 龙门山壁口断裂的形成与空间归位研究[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 286-290.]

THE NEW DEVELOPMENT OF “THREE COMPONENTS” QUANTITATIVE MINERAL PREDICTION

ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, ZHANG Shou-ting
(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Stimulated by the exceeding progress of information technology, the development of mineral exploration has entered a new period of digitization and quantification. The “Three Components” approach of mineral prediction is suggested as a new approach to the “digital mineral prospecting”, which is based on the geo-anomaly analysis, directed by the research on the diversity of mineralization and on the spectrum of mineral deposits. Close combination of these three aspects of quantitative study makes a new starting point to the digital prospecting. In this paper, the basic theories of the “Three Components” approach of mineral prediction have been discussed. In addition, based on the new achievements in the studies on the prediction and assessment of solid minerals and gas-oil resources, we have centered our discussion on the thought of analysis of geo-anomaly evolution and on the “5P” method for approaching the target area in the “Three Components” approach of mineral prediction.

Key words: geo-anomaly; diversity of mineralization; spectrum of mineral deposits; “Three components” mineral prediction; the approach of “5P” target delineation