

DOI: 10.12401/j.nwg.2022018

## 矿产资源潜力评价方法对比及其发展趋势探讨

张津瑞<sup>1,2,3</sup>, 陈华<sup>4</sup>, 任军平<sup>1,2,\*</sup>, 魏振环<sup>3</sup>, 孙凯<sup>1,2</sup>, 胡鹏<sup>5</sup>,  
吴大天<sup>6</sup>, 古阿雷<sup>1,2</sup>, 孙宏伟<sup>1,2</sup>, 左立波<sup>1,2</sup>, 董津蒙<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170; 3. 中钢集团天津地质研究院有限公司, 天津 300181; 4. 贵州省地质矿产勘查开发局一一五地质大队, 贵州 贵阳 551400; 5. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 6. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 矿产资源潜力评价是预测一个地区矿产资源找矿潜力的评价方法, 先后经历 3 个阶段: 探索和应用阶段、快速发展阶段及信息化阶段。笔者梳理了“三步式”、证据权、预测普查组合、成矿系列、地质异常、综合信息预测、地球化学块体和非线性预测等 8 种矿产资源潜力评价理论或方法, 通过相关应用实例阐述其实用性, 分析了国内外应用潜力评价方法获取的研究成果, 总结其发展趋势。其中, “三步式”和证据权是目前使用较为广泛的方法, 成矿系列则是国内研究的热点。随着科学技术的进步以及数学地质的不断发展, 矿产资源潜力评价已步入信息化阶段, 三维深部预测将是未来潜力评价重点发展方向。

**关键词:** 三步式; 证据权; 成矿系列; 三维深部预测; 潜力评价; 成矿预测

中图分类号: P62

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0292-14

### Mineral Resource Assessment Methods Comparison and Its Development Trend Discussion

ZHANG Jinrui<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hua<sup>4</sup>, REN Junping<sup>1,2,\*</sup>, WEI Zhenhuan<sup>3</sup>, SUN Kai<sup>1,2</sup>, HU Peng<sup>5</sup>,  
WU Datian<sup>6</sup>, GU Alei<sup>1,2</sup>, SUN Hongwei<sup>1,2</sup>, ZUO Libo<sup>1,2</sup>, DONG Jinmeng<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Southern African Mining Research Institute of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Sinosteel Tianjin Geological Academy Co., Ltd, Tianjin 300181, China; 4. 115 Geological Brigade, Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 551400, Guizhou, China; 5. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 6. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110000, Liaoning, China)

**Abstract:** The mineral resource assessment is an evaluation method to predict the prospecting potential of mineral resources in a region. It goes through three stages: exploration and application stage, rapid development stage and information stage. This paper sorts out eight theories or methods for mineral resource assessment, including "Three-Part Form", "Weights of Evidence", prospecting prediction complex, metallogenic series, geological anomalies, comprehensive information prediction, geochemical block and nonlinear prediction, illus-

收稿日期: 2021-12-12; 修回日期: 2022-08-15; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发计划课题“环太平洋和非洲成矿域战略性矿产信息及成矿规律(2021YFC2901804)”, 中国地质调查局项目“南部非洲国际合作地质调查(DD20221801)”、“莫桑比克-坦桑尼亚钨钴钛矿资源调查(DD20201150)”和“非洲中东部大型铜-钴资源基地评价(DD20190439)”项目联合。

作者简介: 张津瑞(1999-), 男, 硕士研究生, 从事矿产资源潜力评价。E-mail: 982263219@qq.com。

\* 通讯作者: 任军平(1980-), 男, 正高级工程师, 从事地质矿产勘查与研究。E-mail: rjp2333@126.com。

trates the practicability of the theory or method through relevant application examples, analyzes the research results obtained by the application of potential evaluation methods at home and abroad, and summarizes their development trends. "Three-Part Form" and "Weights of Evidence" are widely used methods, and the metallogenic series is a hot spot in China. With the advancement of technology and the development of mathematical geology, the evaluation of mineral resource assessment has entered the stage of informatization, and 3D deep prediction may be the major development direction of resource assessment in the future.

**Keywords:** Three-Part Form; Weights of Evidence; minerogenetic series; 3D deep prediction; mineral resource assessment; metallogenic prediction

矿产资源潜力评价的目的是掌握一个国家或地区矿产资源现状和科学评价未查明矿产资源潜力(叶天竺等, 2010)。其任务是应用已有地、物、化、遥等资料, 在分析研究区地质背景、研究总结成矿规律、划分成矿区(带)、建立区域(或矿田、矿床)的成矿模式或矿床成矿模型的基础上, 基于现代化信息处理技术, 从海量的地学探测数据中提取“诊断性”找矿信息, 进而建立区域评价预测模型和数字找矿模型, 定量圈定不同类别的预测区, 估算资源量, 划定资源量级别, 并提出地质找矿工作部署及建议(陈永清等, 2008; 叶天竺等, 2010; 王世称, 2010)。

目前, 国内外常用的资源潜力评价理论或方法包括三步式(Three-Part Form)、证据权(Weights of Evidence)、预测普查组合(Prospecting Prediction Complex)、成矿系列、地质异常、综合信息成矿预测、地球化学块体以及非线性预测理论等8种。上述理论或方法经多个地质类大学、研究所和地勘单位的运用, 均取得了很好的找矿效果。随着地表矿及浅部矿的减少, 寻找隐伏矿及深部矿将成为找矿重点方向, 矿产资源潜力评价将会发挥更加重要的作用。笔者通过相关应用实例对8种评价方法进行阐述, 对比分析了国内外应用潜力评价方法获取的研究成果, 并总结其发展趋势, 以期为同行提供参考。

## 1 矿产资源潜力评价发展现状

从矿产资源潜力评价发展过程来看, 可以大致分为3个阶段: 探索和应用阶段、发展阶段及信息化阶段、

(1)探索和应用阶段: 20世纪50~70年代之间, Allais于1957年提出了矿产资源潜力定量评价模型, Harris于1965年建立了地质条件与矿产资源量的矿产评价模型, Agterberg于1974年建立了矿产资源潜

力评价的逻辑模型(朱裕生, 1984)。在中国则是数学地质的的发展推动了资源潜力评价的发展(朱裕生, 1999)。这个阶段以建立潜力评价定量评价模型为主, 矿产资源潜力评价开始蓬勃发展。

(2)发展阶段: 20世纪80~90年代, 矿产资源潜力评价相关理论与方法在全球发展起来。1976年在挪威洛恩举行的国际地质对比计划(IGCP98专题)中, 国际地球科学联合会提出的单位区域价值估计法、体积估计法、丰度估计法、德尔菲估计法、矿床模拟法和综合方法等6种资源预测标准定量方法, 在地质数据收集、处理和应用标准化进程中具有里程碑意义。代表性的成果如Harris编著的《矿产资源评价》等。中国矿产资源潜力评价起步较晚, 1995年首次建立了中大比例尺矿床统计预测专家系统(MILASP)(李新中等, 1995)。

(3)信息化阶段: 20世纪90年代以来, 随着科学技术的发展, 地理信息系统(GIS)得到广泛应用, 其技术被引入到矿产资源潜力评价中。美国、加拿大和澳大利亚等国家率先将GIS与潜力评价结合, 美国地质调查局启动了美国国土资源评价计划(CUSMAP), 加拿大地调局提出基于GIS的证据加权模型, 澳大利亚地调局建立矿产省的GIS集(薛顺荣, 2001)。在中国GIS技术的应用与研究是从90年代开始蓬勃发展, 吴信才等在20世纪90年代研制出了具有国产专利的MapGIS软件, 胡光道在应用方面开发了基于MAPGIS的金属矿产资源评价分析系统(MORPAS)(赵鹏大, 1999); 王世称(2000)开发了基于MAPGIS的综合信息矿产资源预测系统(KCYC)以及肖克炎开发基于MAPGIS的矿产资源评价系统(MRAS)(肖克炎, 2000)。进入21世纪, 随着科学技术的进步和数学地质的的发展, 更多研究方法进入潜力评价领域, 如深度学习、人工智能算法、地质大数据和3D技术等, 其中深度学习利用多层神经网络方法, 是大数据与地

球科学研究的热点。

## 2 理论方法及其应用

笔者对三步式、证据权、预测普查组合、成矿系列、地质异常、综合信息成矿预测、地球化学块体以及非线性预测理论等8种潜力评价理论或方法及其应用范例进行系统总结。

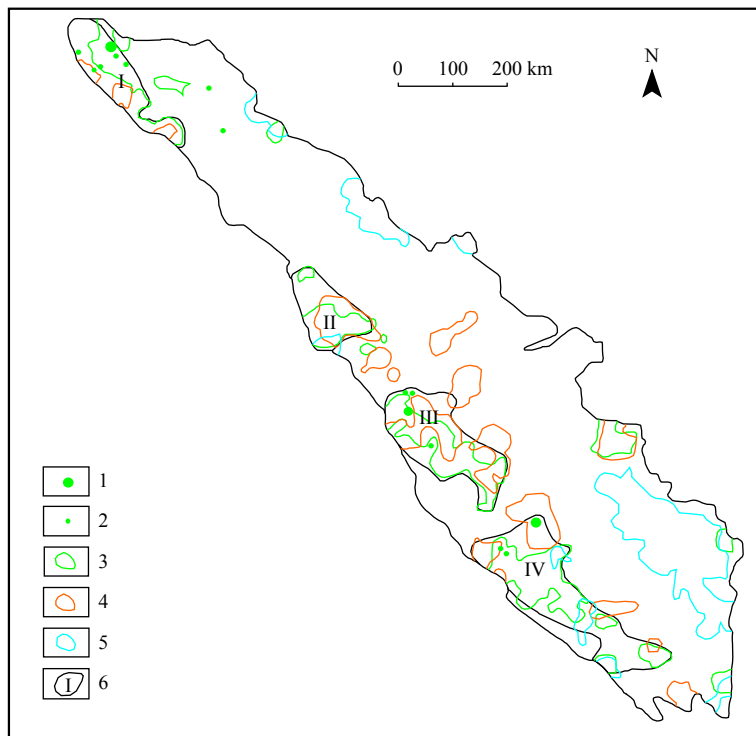
### 2.1 “三步式”评价方法

“三步式”评价方法兴起于美国并得到广泛使用,该方法从1975年开始探索,到20世纪90年代形成较为完善的方法体系。该评价方法主要包括3方面内容:①根据矿床的类型圈定所要预测的找矿可行性地段。②运用品位-吨位模型估算可能发现矿床的金属资源量,推断矿石特征。③评估成矿远景区内矿床的个数,计算远景区潜在资源量其实质就是将矿床的品位-吨位模型与矿床个数相结合(Singer, 1993; 王银宏等, 2006)。

使用“三步式”评价方法要先建立地质模型,地质模型包括品位-吨位模型(Grade-tonnage models)、矿床描述模型(Descriptive mineral deposit models)和矿

床成因模型(Mineral deposit genesis models)。其次是要进行地质、物探、化探、遥感和相关资料的收集、分析,根据这些资料编制圈定远景区的地质底图。远景区圈定后还需要进行优化,剔除不符合要求的区域范围,最后是估算远景区内可能的矿床个数(Singer, 1993, 2001)。

美国地调局于2010年通过“三步式”评价方法对非洲中部加丹加(Katanga)盆地新元古代罗安(Roan)群铜资源量进行了评估,研究区中铜的平均估算值为1.68亿t,其评价结果表明该地区寻找铜矿资源的潜力很大(Zientek et al., 2014, 孙凯等, 2022)。目前,卡莫阿-卡库拉铜矿(Kamoa-Kakula)实现的找矿突破充分肯定了前期预测的成果。胡鹏等(2020)利用“三步式”对印度尼西亚苏门答腊岛铜多金属矿产进行潜力评价研究(图1),系统分析Au、Ag、Cu、Pb、Zn等69种元素变化特征、分布特征以及富集规律,归纳总结其成矿规律,圈定找矿战略选区,并使用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法估算出苏门答腊岛地区斑岩型铜(钼)矿在90%预测概率下资源总量为铜2300万t、伴生钼38万t,表明该地区铜资源有巨大的找矿潜力。地质上经常出现成矿类型共生的现象,使用



1. 大中型铜钼矿床; 2. 小型铜钼矿床; 3. Cu化探异常; 4. Au化探异常; 5. Mo化探异常; 6. 成矿远景区以及编号

图1 印度尼西亚苏门答腊岛斑岩铜(钼)成矿远景区(据胡鹏等, 2020修改)

Fig. 1 Porphyry copper (molybdenum) metallogenic prospective area in Sumatra, Indonesia

“三步式”评价方法,会出现圈定不同类型矿种重复的现象,使得预测工作更加复杂,这是“三步式”评价方法需要解决的问题(肖克炎等,2006)。

## 2.2 预测普查组合方法

预测普查组合方法是由前苏联克里夫佐夫(A·И·Кривцов)为首的地质学家创立,指在地质勘探过程中按照循序渐进的原则,把整个地质勘探工作阶段的方法、标志和对象结合成一体的评价方法。按照预测普查组合方法实施地质勘探工作,可从成矿带和成矿区的预测到成矿有利地段的评价,即按“对象-标志-方法”3要素进行找矿系统评价。针对地质勘查工作的每个阶段,在一致性和循序渐进原则的基础上,为每个阶段规定预测和普查的对象,并确定这些对象的标志,提出最佳的组合方法及应用的合理顺序。该方法适用于查明成矿区、成矿带、有利地段和潜在矿区不同尺度的评价工作(何庆先等,1988)。该方法在俄罗斯巴什基尔自治共和国发现了波多利斯克(Podolsk)含铜黄铁矿矿床,同时利用该方法协助古巴制定了发展矿物原料基地的长期计划(何庆先等,1988)。

## 2.3 证据权法

Agterberg(1988)首次将证据权引入矿产预测评价领域,证据权与贝叶斯(Bayes)准则及条件概率相结合,通过对地质、物探、化探和遥感等地学信息图层的加权叠加复合成不同的证据权图层,计算成矿权重,分析和总结找矿模型,预测远景区,达到定量圈定和评价找矿靶区的目的。证据权在GIS环境下具有简便、直观、易实现等优点,将矿产定量评价与GIS空间分析进行了有机结合,目前已成为较为完善的基于GIS模拟的潜力评价方法。

Cheng和Agterberg于1999年提出了模糊证据权(Fuzzy Weights of Evidence),模糊证据权不仅仅考虑到了二值变量,而且考虑了证据的多类别,利用条件模糊概率、模糊概率给中间类别的模糊成员分配函数,替代了传统的二元、三元模式(Cheng et al., 1999)。张生元等(2009)为了消除和减弱当证据层不满足条件独立性假设,提出了逐步证据权模型和加权证据权模型,在云南个旧锡铜矿产资源预测中表明这2种新的模型对减弱证据层不满足条件独立性假设所产生的影响是有效的。成秋明(2012)提出了增强证据权(BoostWoE)方法,其模型由于不要求证据图层之间具备独立性,克服了证据权模型的缺陷,提高预测的

精度,并利用GeoDAS软件对加拿大北部热液型金矿进行资源预测,结果表明增强证据权模型相对于普通证据权模型放松了条件独立性要求,是传统证据权模型的扩展模型。Liu等(2019)应用结构方程模型(SEM)对用于计算后验概率的普通证据权方法进行修正,通过对加拿大新斯科舍省(Nova Scotia)热液金矿床预测的实例研究,结果表明新方法优于普通证据权重法。

刘江涛等(2021)应用证据权模型首次评估了厄立特里亚全国发现金矿床的概率(图2),其国家未发现储量在10%的概率为471.5 t,30%的概率为227.6 t,65%的概率为60.4 t,这对厄立特里亚进一步找矿工作具有一定参考价值。邓军等(2021)通过模糊证据权模型,选取广西卡林型金矿和破碎带蚀变金矿,圈定了金成矿有利地段,对该地区进一步找矿工作有重要参考意义。滕菲等(2021)运用证据权法对河北丰宁地区银铅锌多金属矿进行潜力评价,划分除了三级成矿远景区39处,为进一步找矿预测工作提出了新思路。Fu等(2021)对厄立特里亚金矿床从地质、成矿、地球化学和遥感等方面利用基于GIS证据权新方法圈定Ewanet地区金矿床远景成矿区,表明在19%的研究区内预测了83%的现有矿点,值得进一步的矿产勘探。Tao等(2021)基于证据权重和模糊逻辑方法对新疆东天山红海(Honghai)进行了三维远景建模,并利用红海矿床的地质模型和成矿模型生成三维预测图,结果表明位于红海矿床南部为高远景区,是未来矿床勘探优先目标。

总之,证据权的原理就是把每一种成矿信息看成二值证据图层,每个证据图层对成矿预测的贡献由该证据图层的取值状态(“1”或“0”)权重来表示,因其具有简便和易实现等优点,现已成为使用较为广泛的潜力评价方法。

## 2.4 成矿系列

1975年,程裕淇等提出了“成矿系列”学说,随后发表的“初论矿床的成矿系列问题”一文全面阐述了矿床的成矿系列概念(程裕淇等,1979),对成矿系列一些问题进行补充、修改和讨论,并对华南岭南地区中生代岩浆活动进行了成矿系列划分(程裕淇等,1983)。陈毓川等先后提出了成矿系列的序次与命名(陈毓川等,2006)及矿床的自然分类(陈毓川等,2015),并论述了成矿系列的时空范围、组成与演化及其对找矿的指导意义(陈毓川等,2016)。王登红等



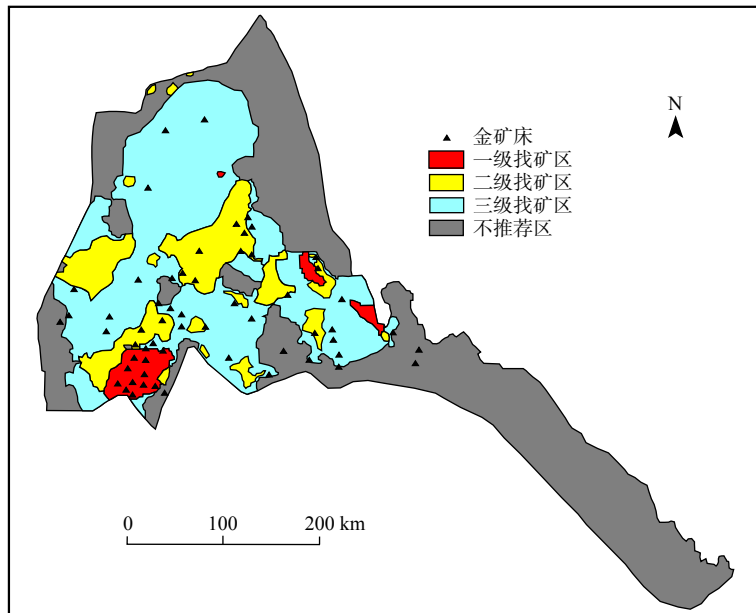


图2 厄立特里亚金矿床预测图(据刘江涛等, 2021 修改)

Fig. 2 Prediction map of gold deposits in Eritrea

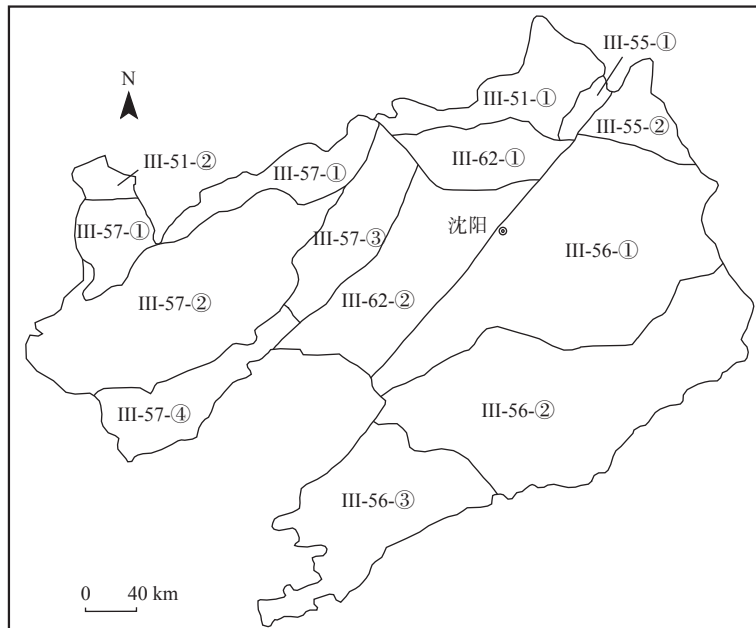
(2020)对成矿系列问题进一步研究并提出矿床成矿系列组;陈毓川等(2020)论述地球思维成矿并提出矿床学研究趋势与内容:矿床成因及其过程研究、四维时空中区域成矿研究、战略性矿产研究和矿产预测。陈毓川等(2022)在《八论矿床的成矿系列》一文中提出6次序的成矿系列序次,推动了成矿系列学术思想进一步发展。先后经过40多年不断研究与探索,已形成了中国四时段成矿体系及全国各时段的矿床成矿系列,研究了各成矿区(带)、成矿省及全国的区域成矿规律,从《初论矿床的成矿系列问题》一文发表40年来(程裕淇等, 1979),有关矿床成矿系列的论文、报告千余篇(王登红等, 2020)。

秦锦华等(2020)以湖南水口山为例,探讨其成矿规律与成矿系列,结果表明水口山矿床类型和矿种类型十分丰富,进一步找矿方向应集中于深部-浅部花岗闪长岩体Cu金属矿床的勘查,深部和外围矽卡岩型Fe、Cu、Pb、Zn多金属矿床的勘探。郑有业等(2021)对西藏冈底斯西段银锡铜多金属矿开展潜力评价研究,划分冈底斯西段与晚三叠世弧岩浆岩有关的铜金等6大成矿系列,评价其资源的潜力,其中朱诺—罗布真、查个勒—诺仓2个矿集区有巨大找矿前景,为该带进一步找矿勘查工作提供决策依据。何友宇等(2022)对衡阳盆地及周缘铜多金属矿开展研究,划分衡阳盆地以铜为主的成矿系列,其中涉及与沉积作用和与构造-岩浆作用有关的2个矿床成矿系列组合,

与第四纪表生地质作用有关的Mn(Fe)、砂金、砂锡、离子吸附型稀土元素、高岭土、砖瓦黏土和砂石等6个成矿系列,花岗岩风化壳中的离子吸附型稀土元素矿床等13个成矿亚系列,找矿方向集中在岩体外接触带、深大断裂交汇部位、斑岩体顶部、不整合面和岩体转换部位。刘俊等(2022)对藏东类乌齐-左贡成矿带进行构造演化与成矿作用研究,按其成矿时代、地质背景、成矿作用及成矿元素组合划分了印支期晶质石墨矿等6个成矿系列。袁和等(2022)对辽宁省金矿成矿规律进行总结(图3),运用成矿系列理论揭示金矿动力演化机制,将辽宁省内金矿分为3个成矿系列组合与6个成矿系列,为辽宁省金矿研究提供参考。成矿系列预测可以寻找同一系列的其他矿床,但是应用该理论需要对研究区有全面地了解,如区域地质演化历史、成矿作用、矿床时空分布规律和成矿系列模式等有深入研究才能进行(侯翠霞等, 2010)。

## 2.5 地质异常理论

地质异常理论是赵鹏大(1991)院士提出,该理论目前广泛应用于矿产勘查实践和矿产预测,并在应用中发挥着重要的作用。地质异常泛指与周围总体地质特征有明显差异的地区,包括地质、物探、化探和遥感等各类异常的总和。将地质异常矿体定位预测归纳为“5P”圈定,分别是成矿可能地段、找矿可行性地段、找矿有利地段、矿产资源潜在地段和矿体远景地段(赵鹏大等, 1999)。“三联式”成矿预测则以



III-51-①. 通辽科尔沁盆地煤油气Ⅳ级成矿亚带; III-51-②. 库里吐-汤家仗子Ⅳ级成矿亚带; III-55-①. 山门-乐山成矿亚带; III-55-②. 吉中成矿亚带; III-56-①. 铁岭-靖宇成矿亚带; III-56-②. 营口-长白山成矿亚带; III-56-③. 瓦房店成矿亚带; III-57-①. 内蒙隆起东段成矿亚带; III-57-②. 燕辽成矿亚带; III-57-③. 北镇成矿亚带; III-57-④. 马兰峪-绥中成矿亚带; III-62-①. 法库 Au 煤硅灰石Ⅳ级成矿亚带; III-62-②. 辽河石油、天然气Ⅳ级成矿亚带

图 3 辽宁省金矿成矿系列(据袁和等, 2022 修改)

Fig. 3 Metallogenic series of gold deposits in Liaoning Province

圈定各类地质异常为基础,以成矿多样性及矿床谱系为指导,三方面紧密结合(赵鹏大, 2002)。

基于地质异常理论,夏庆霖等(2021)对内蒙古新达来草原覆盖区钨铜多金属矿进行定量预测(图 4),利用 S-A 分形模型对研究区信息进行识别和提取,并利用风险与回报分析进一步降低勘查风险,建立该地区地质异常与钨铜金属矿的联系,其中 25 个矿床(点)分布于回报值正值区域,并最终圈定出找矿有利地段,为进一步找矿工作提供依据。肖文进等(2021)对哈密黑山金矿进行研究并对其进行找矿预测,结果表明该矿区深部及两侧、南区和北区有较好的找矿前景。地质异常理论以地质为基础,但也存在对地球物理异常的多解性,地球化学异常“弱、小、无”异常怎样获取找矿信息的问题。

## 2.6 综合信息成矿预测

20 世纪 80 年代,王世称(2010)根据国内地质工作的特点,提出了综合信息成矿预测理论与方法。综合信息成矿预测理论体系由综合地质找矿模型、地质-数学转换模型、资源预测模型和成果表达模型构成,其中综合地质找矿模型以地质体或矿产资源体为单元,地质信息是其基础,研究主要内容则是地质、地

球物理、地球化学和遥感信息以及它们之间规律,从而达到找矿的目的;地质-数学转换模型主要采用数学方法将地质模型转换成数学模型,并对矿产资源体和地质体集合进行分类研究;资源预测模型实质上是综合找矿模型的定量化模型,通过各种数学方法建立的定位和定量资源预测模型;成果表达模型即综合信息矿产预测结果的具体表现(王世称, 2010)。

综合信息成矿预测理论实质上是运用数学模型对物化遥异常及其产出的地质背景进行综合定量评价,其基本方法是建立找矿模型,通过模型实现预测,而模型的建立包括以下 3 方面:①成矿模式的研究,主要开展成矿规律和控矿条件的研究。②总结综合性的找矿标志,重点是地质异常的研究,确定能区分各种地质体的不同标志。③在以上工作基础上,通过所预测的研究对象,研究综合标志的关联和综合信息的模式化(肖志坚, 2010)。

赵震宇等(2004)在综合信息成矿理论指导下开展金矿床综合信息矿产预测,结果表明陕南地区的金矿具有共生和伴生的控矿因素,可视为同一成矿母体。王立功等(2017)在研究崮山地区成矿地质条件和成矿规律的基础上,对研究区地质、物探、化探和遥感

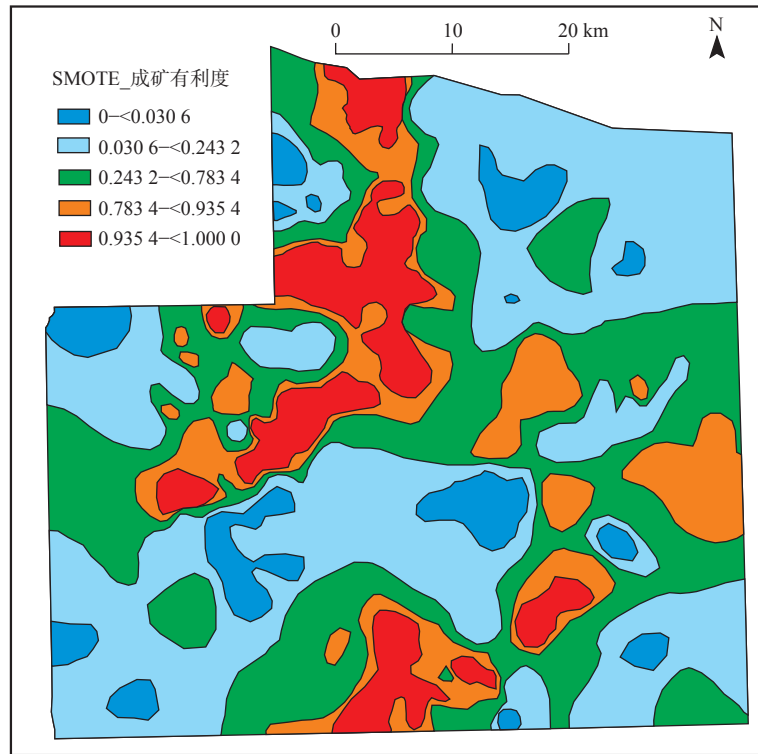


图4 基于SMOTE数据集的随机森林方法提取的综合地质异常(据夏庆霖等, 2021修改)

Fig. 4 Comprehensive geological anomalies extracted by random forest method based on SMOTE dataset

等地质多源信息进行综合分析,厘定成矿标志,并利用多源信息量法对研究区进行了综合信息成矿定量预测评价,为进一步找矿工作奠定基础。孙莉等(2018)对铝土矿进行资源潜力评价,结果表明,中国铝土矿主要矿床类型为沉积性、堆积型和红土型。同时,中国铝土矿可分为18个成矿区带,其中山西断隆成矿带和华北陆地南缘成铝区等是重要的沉积型铝土矿成矿区,桂西南是重要的堆积型铝土矿成矿区,雷州半岛-琼北是重要的红土型铝土矿成矿区;采用矿床模型综合信息预测方法,圈定铝土矿预测区,在1000 m深度以浅仍有较大的找矿潜力,其中河南、山西、广西和贵州等省资源潜力较大,为中国铝土矿勘查提供指导方向。王海芹等(2018)收集胶东地区地质数据、地球物理、地球化学和遥感等金矿找矿的综合信息,利用数学方法建立矿产预测评价模型,并圈出A级成矿靶区31处、B级成矿靶区55处和C级成矿靶区36处,对随后该地区研究具有重要参考意义。刘同等(2020)基于综合信息找矿理论,对格尔木市分水岭北地区进行铜金矿找矿预测,圈出找矿靶区8处,为之后研究提供依据。毕明丽(2020)以临江市东港地区开展多金属综合信息深部预测,采集金属、矿产以及遥感等信息,建立统一坐标系下的GIS信息库,

并支持深部向量机矿产预测,其实验结果表明成矿预测精度等优于传统方法。综合信息法避免了单一找矿方法的片面性,在开展隐伏矿或难以识别矿床有很大优势,目前综合信息法常常与证据权方法结合使用,有更好的效果。

## 2.7 地球化学块体

地球化学块体概念是谢学锦院士提出的,将面积大于和等于地球化学省范围的巨大岩块定义为“地球化学块体”。基本思路是地壳内存在宽阔的套合地球化学模式的谱系,表明地球中存在富含各种金属的地球化学块体。地球化学块体方法是研究元素的套合模式,追踪成矿元素浓集轨迹,筛选异常,圈定找矿靶区。地球化学信息是最直接的找矿信息,地球化学块体的理论与方法为勘查地球化学、矿床学与成矿学提供了新的研究思路(谢学锦,2002)。

Wang等(2007)在东天山圈出超过1000 km<sup>2</sup>的地球化学块体18处,其中6处地球化学块体与已知矿集区对应,在新圈定12处的地球化学块体中有3处发现了锌矿床,为地球化学块体预测新的矿集区提供依据。向文师等(2019)应用地球化学块体方法对厄立特里亚金矿进行潜力评价,圈定地球化学块体4个,区域异常7个,预测出厄立特里亚境内金资源量为371.7 t。

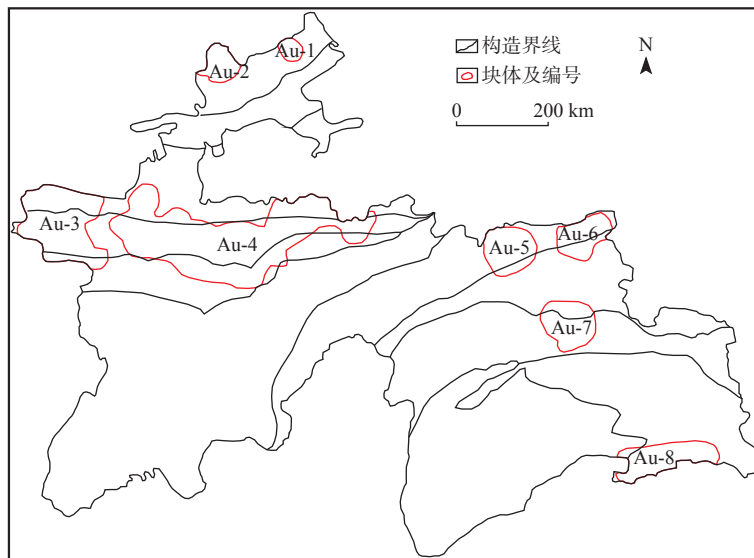
许逢明等(2019)利用地球化学块体方法对马达加斯加全岛铬资源进行潜力评价研究,获得了马达加斯加全岛铬地球化学块体分布图,并对全岛铬进行潜力预测,按500 m深度预测铬的资源潜力为19 739万t。徐善法等(2020)利用中国水系沉积物地球化学填图成果,以秦岭-大别山为界,中国南北地区U含量值存在明显差异,其中全国圈出面积大于1 000 km<sup>2</sup>地球化学块体79处,有3个面积超过100 000 km<sup>2</sup>的地球化学域,最终圈定铀找矿远景区33处,与火山岩型(主要分布在中国东南沿海一带,其中赣-杭火山岩成矿带是主要成矿带)、花岗岩型(主要分布在南方,在西北的龙首山、北秦岭也有少量分布)、碳硅泥岩型(主要分布在南秦岭成矿带、江南成矿带和华南成矿)和砂岩型(中新世代的沉积盆地,归属于西太平洋和新天山两大成矿体系)4种铀成矿类型有关。范堡程等(2020)以地球化学块体理论为指导(图5),从地球化学块体角度对塔吉克斯坦金矿资源潜力进行预测,共圈定金地球化学块体8处,结果表明塔吉克斯坦金资源潜力巨大,认为塔吉克斯坦南天山地区有寻找世界级金矿的潜力。地球化学块体以地球化学信息为直接找矿标志,筛选异常,从而圈定找矿靶区。

## 2.8 非线性预测理论

成秋明(2003)建立的非线性矿床模型实现了对难识别的矿产资源评价的可能性,并介绍了“奇异分

析”和“广义自相似性”2种新理论。通过对加拿大北部Gowganda地区矿产进行预测,结果表明非线性矿床模型对难识别矿床的潜力评价是有效的。成秋明(2006)介绍“奇异性-广义自相似性-分形谱系”等概念和模型,采用该理论开发的地学非线性空间信息GeoDAS GIS技术,达到预期效果。成秋明(2007)提出了成矿过程作为奇异性过程的命题,探讨成矿过程奇异性、广义自相似性、自组织临界性等非线性特征的联系。成秋明等(2009)应用非线性理论,采用局部奇异性分析方法圈定了局部地球化学异常(图6),反映了个旧东西区致矿地球化学异常的分布,结果表明圈定的找矿靶区具有明显的找矿意义,同时也表明了非线性理论和GIS为矿产资源潜力评价提供了新方法和思路。2016年,非线性矿产预测理论方法创立与应用进行了科技成果登记,其主要包括创立非线性矿产预测理论、建立非线性矿产预测新方法并研发GeoDAS软件同时产生广泛应用,获得巨大的经济效益(成秋明等,2016)。

柏坚(2010)以滇东南为实例,探讨非线性矿床模型在矿产预测中的应用,在研究过程中应用非线性模型做了有益的尝试。王佳营等(2019)应用非线性理论和模糊证据权对内蒙古达拉庙钨多金属矿进行矿产预测研究,并利用GeoDAS GIS平台开展找矿信息的识别和提取,利用模糊证据权法圈定成矿远景区,



Au-1.卡拉马扎尔东金地球化学块体; Au-2.卡拉马扎尔西金地球化学块体; Au-3.泽拉夫尚西金地球化学块体;  
Au-4.泽拉夫尚东金地球化学块体; Au-5.穆克苏伊金地球化学块体; Au-6.卡拉库里北金地球化学块体;  
Au-7.中帕米尔金地球化学块体; Au-8.东南帕米尔金地球化学块体

图5 塔吉克斯坦 Au 地球化学块体分布图(据范堡程等, 2020 修改)

Fig. 5 Distribution map of Au geochemical blocks in Tajikistan



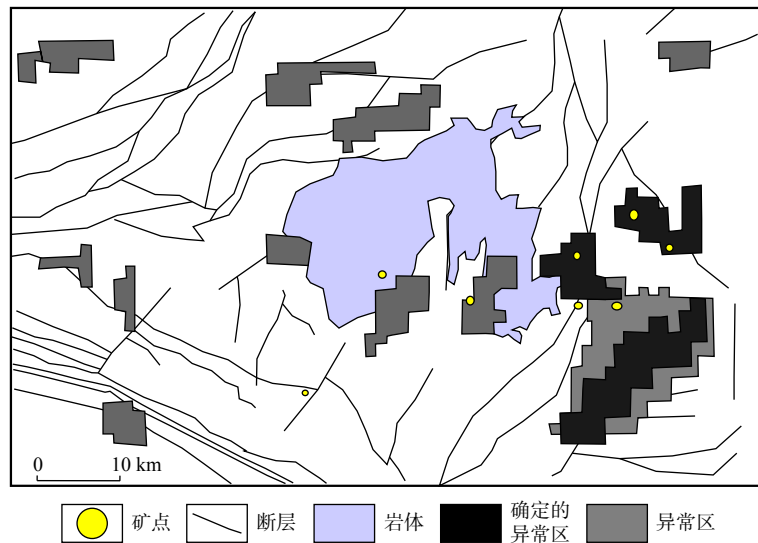


图6 采用局部奇异性方法圈定的As异常区(据成秋明, 2009修改)

Fig. 6 As anomalous area delineated by local singularity method

其中I级远景区4个、II级远景区8个、III级远景区13个。非线性预测理论使用大量的数学方法对物探、化探以及遥感信息进行挖掘,比较侧重信息提取过程的研究,随着各种矿产资源开发和利用,越来越多难以识别的矿床出现,非线性理论会在潜力评价过程中发挥更加重要的作用。

### 3 评价方法对比及其发展趋势

#### 3.1 评价方法对比分析

“三步式”评价方法主要特征是品位-吨位模型的使用,“三步式”存在的问题是不同类型矿床或矿种圈定远景区过程中出现重复现象,使得预测结果复杂化。

预测普查组合方法的主要特征是“对象-标志-方法”3要素进行系统评价,从而达到圈定远景区的目的。

证据权方法须满足以下条件:每个控矿地质因素必须条件相互独立;控矿因素必须是面对象,矿床对象是点对象;控矿区是勘探程度高的地区,能最大限度获得找矿信息。模糊证据权法与普通证据权有差别:证据因子能进行空间分析;证据因子间条件相互独立且能覆盖研究区绝大部分;连续变量,能在(0,1)连续取值。

矿床的成矿系列通过以下3个方面进行成矿预测:①以矿床成矿模式在同一地质构造内进行预测。

②在工作程度高的地区,通过已建立的成矿系列的矿床类型组合及时空分布规律,在工作程度低的地区,按“全位成矿、缺位找矿”的方法进行成矿预测。⑤成矿系列与综合信息成矿预测结合。

地质异常会出现对地球物理异常的多解性的问题,以及地球化学异常“弱、小、无”等异常怎样获取信息的问题。

综合信息法避免了单一找矿方法的片面性,在开展隐伏矿或难以识别矿床有很大优势。

地球化学块体以地球化学信息为直接找矿标志非线性预测理论使用大量的数学方法对物探、化探以及遥感信息进行挖掘,比较侧重信息提取过程的研究。

以上列出相关理论或方法的局限性需要使用者小心应对,从而避免预测结果出现较大误差。同时,在条件较充足的情况下,建议尝试多种方法开展研究,并对结果进行对比。

#### 3.2 发展趋势探讨

通过对以上矿产资源潜力评价方法或理论的总结,归纳其发展趋势如下:

(1)矿产资源潜力评价往信息化、数字化方向发展,同时数学地质的发展带来潜力评价理论与方法的不断发展。越来越多新方法新理论如深度学习、人工智能算法和地质大数据引入矿产资源潜力评价领域。中国地质调查局部署建设了“国家地质大数据共享服务平台——地质云”,“地质云”是集计资源、数

据资源、应用系统为一体的综合性地质信息服务平台,是中国地质调查局践行大数据战略、数字中国战略的重要举措。

(2)三维深部预测是未来发展方向。随着地表及浅部矿产资源的减少,寻找隐伏矿和深部矿成为主要的找矿方向(肖克炎,2020)。深部预测与传统预测方法不同,不具备相应成矿预测的条件,其主要以高精度地球物理探测和已知区钻探工作建立的三维地质模型为主(宋明春等,2021)。随着科技的发展,成矿理论从二维扩展到了三维,相关理论与方法也逐渐走向成熟和完善(袁峰,2019)。

(3)目前,中国矿产勘查形式严峻,矿产资源供给问题仍是目前制约中国经济发展的重要因素,而勘查对象转向隐伏矿及深部矿,找矿难度增加,成本提高,找矿突破更多依赖科技的投入,矿产资源潜力评价面临比以往更为艰巨的任务,因此加强成矿规律以及成矿预测的研究对资源潜力评价十分重要。跨学科知识引入推动资源潜力评价的发展,当前各个学科都正在进入高度综合时期,跨学科研究显得更加重要。

## 4 结论

(1)矿产资源潜力评价的发展阶段主要分为20世纪50~70年代之间的探索和应用阶段、20世纪80~90年代初的快速发展阶段和20世纪90年代以来的信息化阶段。信息化阶段矿产资源潜力评价的主要特征是与GIS深度融合,随着数学地质的发展,如深度学习、人工智能算法和地质大数据也引入到了潜力评价。

(2)通过对“三步式”、证据权、预测普查组合、成矿系列、地质异常、综合信息预测、地球化学块体、非线性预测理论理论或方法的阐述,总结相关理论或方法的特点。其中,成矿系列理论在国内研究较多,是目前国内的研究热点方向,国内其他潜力评价理论与方法的发展也受到其影响,同时“三步式”和证据权方法在国内外应用最为广泛,证据权作为一种评价模型,常常也会与其他理论或方法结合使用。矿产资源潜力评价是在对其他学科知识兼收并蓄、创新的基础上发展起来的,必将随着各种矿产资源潜力评价方法与理论的丰富而不断完善。

(3)矿产资源潜力评价的发展趋势:①往数字化、信息化发展。②深部预测在潜力评价中会占据重要

地位。这需要进一步深入研究各种成矿理论,揭示成矿作用的规律,才能更加准确地把握潜力评价的发展方向,推动潜力评价理论与方法的不断发展与完善,更好地指导实际工作。

## 参考文献(References):

- 柏坚.非线性数学地质模型研究及在滇东南金矿成矿预测中的应用[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
- BAI Jian. Application of Nonlinear Geomathematical Geology Models to Mineral Resources Prospectivity Mapping for Gold Deposits in Southeast YunNan, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010.
- 毕明丽.多金属矿产综合信息区域深部成矿预测——以临江市东港地区靶区预测为例[J].科学技术与工程,2020,20(15):5942-5947.
- BI Mingli. Deep metallogenic prediction of polymetallic mineral comprehensive information area: taking target area prediction of Donggang district in Linjiang City as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 5942-5947.
- 陈永清,陈建国,汪新庆,等.基于GIS矿产资源综合定量评价技术[M].北京:地质出版社,2008.
- CHEN Yongqing, CHEN Jianguo, WANG Xinqing, et al. Quantitatively Integrated Assessment Techniques for Mineral Resources Based on GIS[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- 陈毓川,裴荣富,王登红.三论矿床的成矿系列问题[J].地质学报,2006,(10):1501-1508.
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong. On Minerogenetic (Metallogenetic) Series: Third Discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 2006,(10):1501-1508.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等.八论矿床的成矿系列[J].地质学报,2022,96(01):123-130.
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits(VIII)[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(01):123-130.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等.矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J].地球学报,2016,37(05):519-527.
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al. Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series (V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(05):519-527.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等.论地球系统四维成矿及矿床学研究趋向——七论矿床的成矿系列[J].矿床地质,2020,39(05):745-753.
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al. Four-dimen-

- sional metallogeny in earth system and study trends of mineral deposits: A discussion on minerogenetic series (VII)[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(05): 745–753.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 等. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题[J]. *矿床地质*, 2015, 34(06): 1092–1106.
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits (IV)[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(06): 1092–1106.
- 成秋明, 李文昌, 夏庆霖, 等. 非线性矿产预测理论方法创立与应用[Z]. 湖北: 中国地质大学(武汉), 2016-01-01.
- CHENG Qiuming, LI Wenchang, XIA Qinglin, et al. Establishment and application of nonlinear mineral prediction theory and method[Z]. Hubei: China University of Geosciences (Wuhan), 2016-01-01.
- 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2009, 34(02): 232–242.
- CHENG Qiuming, ZHAO Pengda, CHEN Jianguo, et al. Application of Singularity Theory in Prediction of Tin and Copper Mineral Deposits in Gejiu District, Yunnan, China: Weak Information Extraction and Mixing Information Decomposition[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2009, 34(02): 232–242.
- 成秋明. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法[J]. *地学前缘*, 2007, 14(05): 42–53.
- CHENG Qiuming. Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: new theories and methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(05): 42–53.
- 成秋明. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J]. *地球科学*, 2006, 31(03): 337–348.
- CHENG Qiuming. Singularity-Generalized Self-Similarity-Fractal Spectrum(3S) Models[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2006, 31(03): 337–348.
- 成秋明. 非线性矿床模型与非常规矿产资源评价[J]. *地球科学*, 2003, 28(04): 445–454.
- CHENG Qiuming. Non-Linear Mineralization Model and Information Processing Methods for Prediction of Unconventional Mineral Resources[J]. *Earth Science*, 2003, 28(04): 445–454.
- 成秋明. 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)*, 2012, 42(06): 1976–1984.
- CHENG Qiuming. Application of a Newly Developed Boost Weights of Evidence Model (BoostWofE) for Mineral Resources Quantitative Assessments[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(06): 1976–1984.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 初论矿床的成矿系列问题[J]. *中国地质科学院院报*, 1979, (00): 32–58.
- CHENG Yuqi, CHEN Yuchuan, ZHAO Yiming. Preliminary Discussion on the Problems of Minerogenetic Series of Mineral Deposits[J]. *Bulletin Chinese Acad. Geo. Sci.*, 1979, (00): 32–58.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 等. 再论矿床的成矿系列问题[J]. *中国地质科学院院报*, 1983, (02): 1–64+134–135.
- CHENG Yuqi, CHEN Yuchuan, ZHAO Yiming, et al. Further Discussion on the Problems of Minerogenetic Series of Mineral Deposits[J]. *Bulletin Chinese Acad. Geo. Sci.*, 1983, (02): 1–64+134–135.
- 邓军, 战明国, 周伟金, 等. 基于模糊证据权法的广西典型金矿矿产定量预测[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(03): 374–390.
- DENG Jun, ZHAN Mingguo, ZHOU Weijin, et al. Quantitative prediction of mineral resources in typical gold deposits in Gusngx, China using a fuzzy weights of evidence method[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(03): 374–390.
- 范堡程, 张晶, 孟广路, 等. 地球化学块体理论在塔吉克斯坦金资源潜力预测中的应用[J]. *西北地质*, 2020, 53(01): 138–145.
- FAN Chengbao, ZHANG Jing, MENG Guanglu, et al. Application of Geochemical Blocks Theory in the Prediction of Gold Resource Potential in Tajikistan[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(01): 138–145.
- 何友宇, 南小龙, 覃金宁, 等. 衡阳盆地及周缘铜多金属矿成矿系列与找矿新突破[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(05): 1775–1785.
- HE Youyu, NAN Xiaolong, QIN Jinning, et al. Metallogenic series and prospecting breakthrough of copper-polymetallic deposits in the Hengyang Basin and its periphery[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(05): 1775–1785.
- 何庆先等. 苏联矿产预测与预测普查组合[M]. 地质矿产部情报研究所, 1988.
- HE Qingxian, et al. Combination of mineral prediction and prediction census in the Soviet Union[M]. Institute of information, Ministry of Geology and mineral resources, 1988.
- 侯翠霞, 刘向冲, 张文斌, 等. 成矿预测理论与方法新进展[J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 953–960.
- HOU Cuixia, LIU Xiangchong, ZHANG Wenbin, et al. New method and theory of metallogenic prediction[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6): 953–960.
- 胡鹏, 张海坤, 曹亮, 等. 印度尼西亚苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿产资源定量评价[J]. *矿床地质*, 2020, 39(05): 867–878.
- HU Peng, ZHANG Haikun, CAO Liang, et al. Quantitative assessment of porphyry copper (molybdenum) mineral resources in

- Sumatra, Indonesia[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(05): 867–878.
- 李新中, 赵鹏大, 胡光道. 基于规则知识表示的模型单元选择专家系统的实现[J]. *地球科学*, 1995, 20(02): 173–178.
- LI Xinzhong, ZHAO Pengda, HU Guangdao. Expert system for model until selection based on rule knowledge presentation[J]. *Earth Science*, 1995, 20(02): 173–178.
- 刘同, 刘传朋, 康鹏宇, 等. 基于GIS的格尔木市分水岭北地区铜金矿综合信息找矿预测[J]. *西北地质*, 2020, 53(03): 295–307.
- LIU Tong, LIU Chuanpeng, KANG Pengyu, et al. GIS-based comprehensive information prospecting prediction of Cu-Au deposit in Fenshuilingbei area, Gulmud City[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(03): 295–307.
- 刘江涛, 吴发富, 李福林, 等. 基于证据权模型的厄立特里亚金矿资源潜力评价[J]. *地质学报*, 2021, 95(04): 1292–1305.
- LIU Jiangtao, WU Fafu, LI Fuling, et al. Quantitative evaluation of Eritrea gold resources potential based on the weighe of evidence model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 95(04): 1292–1305.
- 刘俊, 李文昌, 周清, 等. 藏东类乌齐-左贡成矿带构造演化与成矿作用[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(01): 88–104.
- LIU Jun, LI Wenchang, ZHOU Qing, et al. Tectonic evolution and mineralization of the eiwuqi-Zogang metallogenic belt[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(01): 88–104.
- 秦锦华, 王登红, 陈毓川, 等. 矿田尺度成矿规律与成矿系列研究——以湖南水口山为例[J]. *地质学报*, 2020, 94(01): 255–269.
- QIN Jinhua, WANG Denghong, CHEN Yuchan, et al. Research on metallogenetic regularity and metallogenetic series in ore fields—a case study from the Shuikoushan ore field, Hunan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 94(01): 255–269.
- 宋明春, 周明岭, 鲍中义, 等. 胶东深部金矿三维成矿预测及巨大的资源潜力[J/OL]. *金属矿山*, 2021: 1–18.
- SONG Mingchun, ZHOU Mingling, BAO Zhongyi, et al. 3D Metallogenetic Prediction of Deep Gold Deposits for Jiaodong Peninsula and Its Huge Resource Potential[J/OL]. *Metal Mine*, 2021, 1–18.
- 孙凯, 张航, 卢宜冠, 等. 中非铜钴成矿带地质特征与找矿前景分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 103–120.
- SUN Kai, ZHANG Hang, LU Yiguan, et al. Analysis on geological characteristics and prospecting potential of the Central African Cu-Co metallogenetic belt[J]. *Geology in China*, 2022, 49(1): 103–120.
- 孙莉, 肖克炎, 姜德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. *地学前缘*, 2018, 25(03): 82–94.
- SUN Li, XIAO Keyan, LOU Debo. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(03): 82–94.
- 滕菲, 彭丽娜, 孟庆龙, 等. 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[J]. *华北地质*, 2021, 44(01): 21–26.
- TENG Fei, PENG Lina, MENG Qinglong, et al. Applying weight of evidence to predict Ag-Pb-Zn potentiality in Fengning region, Hebei[J]. *North China Geology*, 2021, 44(01): 21–26.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题[J]. *地质学报*, 2020, 94(01): 18–35.
- WANG Denghong, CHEN Yuchuan, XU Zhigang, et al. Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series(VI)[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 94(01): 18–35.
- 王海芹, 陈莉, 刘继梅, 等. 山东胶东金矿综合信息矿产预测[J]. *上海国土资源*, 2018, 39(04): 107–111.
- WANG Haiqin, CHEN Li, LIU Jimei, et al. Comprehensive data regarding mineral prediction for gold mining in the Jiaodong area, Shandong province[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2018, 39(04): 107–111.
- 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拉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.
- WANG Jiaying, ZHANG Xiaojun, YAO Chunling, et al. Application of nonlinear theory and fuzzy weights of evidence method in metallogenetic prediction for Mo polymetallic deposits in the Dalaimiao grassland-covered area, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 42(03): 174–184.
- 王利功, 黄昊, 施亮亮, 等. 崮山地区金多金属矿综合信息成矿预测[J]. *中国矿业*, 2017, 26(S2): 170–175.
- WANG Ligong, HUANG Hao, SHI Liangliang, et al. Gold polymetall multipurpose information metallogenetic prognosis in Xiaoshan region[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(S2): 170–175.
- 王世称, 陈永良, 夏立显. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- WANG Shicheng, CHEN Yongliang, XIA Lixia. Theory and method of comprehensive information mineral prediction[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- 王世称. 综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J]. *地质通报*, 2010, 29(10): 1399–1403.
- WANG Shicheng. The new development of theory and method of synthetic information mineral resources prognosis[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(10): 1399–1403.
- 王银宏, 严光生, 翟裕生. 三部式潜在矿产资源定量评价与蒙特卡罗模拟[J]. *中国矿业*, 2006, 15(06): 14–17.



- WANG Yinong, YAN Guangsheng, ZHAI Yusheng. Three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources and Monte Carlo simulation[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(06): 14–17.
- 夏庆霖, 赵梦余, 王孝臣, 等. 基于地质异常的内蒙古新达来草原覆盖区钨铜多金属矿产定量预测[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 56–66.
- XIA Qinglin, ZHAO Mengyu, WANG Xiaochen, et al. Quantitative prediction of molybdenum-copper polymetallic mineral resources in the Xindalai grassland-covered area of Inner Mongolia based on geological anomalies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 56–66.
- 向文帅, 姜军胜, 赵凯. 应用地球化学块体法评价厄立特里亚金矿资源潜力[J]. *中国矿业*, 2019, 28(12): 176–182.
- XIANG Wenshuai, JIANG Junsheng, ZHAO Kai. The application of geochemical block methods to gold resource assessment in Eritrea[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(12): 176–182.
- 肖克炎, 丁建华, 刘锐. 美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述[J]. *地质论评*, 2006, 52(06): 793–798.
- XIAO Keyan, DING Jianhua, LIU Rui. The Discussion of Three-Part Form of non-fuel Mineral Resource Assessment[J]. *Geological Review*, 2006, 52(06): 793–798.
- 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 等. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- XIAO Keyan, ZHANG Xiaohua, WANG Silong, et al. GIS evaluation system of mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- 肖克炎. “深部综合信息矿产资源预测评价” 专辑特邀主编寄语[J]. *地球学报*, 2020, 41(02): 130–134.
- XIAO Keyan. Guest Editor's Preface to the “Prediction and Assessment of Deep Mineral Resources Based on Integrated Geoinformation” [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(02): 130–134.
- 肖文进, 张忠义, 侯朝勇, 等. 新疆哈密黑山金矿物化探异常特征及找矿预测[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(07): 1587–1594.
- XIAO Wenjin, ZHANG Zhongyi, HOU Chaoyong, et al. Geophysical and geochemical anomaly characteristics and prospecting prediction of Heishan gold deposit in Hami, Xinjiang, China[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(07): 1587–1594.
- 肖志坚. 基于空间信息网络的长江中下游矿产资源评价方法[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010.
- XIAO Zhijiang. The appraise method of mineral resources in middle-lower reaches Changjiang River based on Spatial Information Grid[D]. Wuhan: China University of Geoscience (Wuhan), 2010.
- 谢学锦, 刘大文, 向运川, 等. 地球化学块体——概念和方法学的发展[J]. *中国地质*, 2002, 29(03): 225–233.
- XIE Xuejin, LIU Dawen, XIANG Yunchuan, et al. Geochemical blocks – Development of concept and methodology[J]. *Geology in China*, 2002, 29(03): 225–233.
- 徐善法, 王学求, 张必敏, 等. 中国轴地球化学块体与远景区划分[J]. *地球学报*, 2020, 41(06): 785–796.
- XU Shanfa, WANG Xueqiu, ZHANG Bimin, et al. China's Uranium Geochemical Blocks: Implications for Delineation of Uranium Prospective Areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(06): 785–796.
- 许逢明, 吴大天, 周永恒, 等. 基于地球化学块体概念的马达加斯加全岛铬资源潜力评价[A]. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集[C], 2019: 736–738.
- XU Fengming, WU Datian, ZHOU Yongheng, et al. Evaluation of chromium resource potential in Madagascar based on the concept of geochemical blocks[A]. Abstracts of the 17th Annual Meeting of the Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry[C], 2019: 736–738.
- 薛顺荣, 胡光道, 丁俊. 成矿预测研究现状及发展趋势[J]. *云南地质*, 2001, 20(04): 411–416.
- XIU Shongrong, HU Guangdao, DING Jun. The current situation and development trend of metallogenetic prognosis[J]. *Yunnan Geology*, 2001, 20(04): 411–416.
- 叶天竺, 肖克炎, 成秋明, 等. 矿产定量预测方法[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- YE Tianzhu, XIAO Keyan, CHENG Qiuming, et al. Quantitative prediction method of mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- 袁峰, 张明明, 李晓晖, 等. 成矿预测: 从二维到三维[J]. *岩石学报*, 2019, 35(12): 3863–3874.
- YUAN Feng, ZHANG Mingming, LI Xiaohui, et al. Prospectivity modeling: From twodimension to three-dimension[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(12): 3863–3874.
- 袁和, 王登红. 辽宁省金矿成矿规律及成矿系列[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(02): 73–82.
- YUAN He, WANG Denghong. Metallogenic regularity and series of gold deposits in Liaoning Province[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(02): 73–82.
- 张生元, 成秋明, 张素萍, 等. 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(中国地质大学学报)*, 2009, 34(02): 281–286.
- ZHANG Shengyuan, CHENG Qiuming, ZHANG Suping, et al. Weighted Weights of Evidence and Stepwise Weights of Evidence and their Applications in Sn-Cu Mineral Potential Mapping in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2009,

- 34(02): 281–286.
- 赵鹏大, 陈永清, 刘吉平, 地质异常成矿预测理论与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- ZHAO Pengda, CHEN Yongqing, LIU Jiping, Theory and practice of geonomaly in mineral exploration[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学, 1991, 16(03): 241–248.
- ZHAO Pengda, CHI Shundu. A Preliminary view on Geological Anomaly[J]. Earth Science, 1991, 16(03): 241–248.
- 赵鹏大, 孟宪国. 地质异常与矿产预测[J]. 地球科学, 1993, 18(01): 39–47+127.
- ZHAO Pengda, MENG Xianguo. Geological Anomaly and Mineral Prediction[J]. Earth Science, 1993, 18(01): 39–47+127.
- 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(05): 482–489.
- ZHAO Pengda. “Three-Component” Quantitative Resource Prediction and Assessments: Theory and Practice of Digital Mineral Prospecting[J]. Earth Science, 2002, 27(05): 482–489.
- 赵震宇, 王世称, 孟令顺, 等. 陕南地区金矿床综合信息预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(02): 287–291.
- ZHAO Zhenyu, WANG Shicheng, MENG Lingshun, et al. Synthetic information prediction of the gold mineral resources in southern Shaanxi Province[J]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 2004, 34(02): 287–291.
- 郑有业, 次琼, 高顺宝等. 西藏冈底斯西段银锡铜多金属成矿系列与找矿方向[J]. 地学前缘, 2021, 28(03): 379–402.
- ZHENG Youye, CI Qiong, GAO Shunbao, et al. The Ag-Sn-Cu polymetallic minerogenetic series and prospecting direction in the western Gangdese belt, Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(03): 379–402.
- 朱裕生. 矿产资源评价方法学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- ZHU Yusheng. Introduction to mineral resources evaluation methodology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- 朱裕生. 矿产资源潜力评价在我国的发展[J]. 中国地质, 1999, (11): 31–33+23.
- ZHU Yusheng. Development of mineral resources assessment in China[J]. Geology in China, 1999, (11): 31–33+23.
- Agterberg F P, Gradstein F M. Recent developments in quantitative stratigraphy[J]. Earth Science Reviews, 1988, 25(1): 1–73.
- Cheng Qiuming, Agterberg F P. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping[J]. Natural Resources Research, 1999, 8(1).
- Fu Changliang, Chen Kaixu, Yang Qinghua, et al. Mapping gold mineral prospectivity based on weights of evidence method in southeast Asmara, Eritrea[J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 176: 104143.
- Liu J, Cheng Q. A Modified Weights-of-Evidence Method for Mineral Potential Prediction Based on Structural Equation Modeling[J]. Natural Resources Research, 2019, 28: 1037–1053.
- Singer D A. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources [J]. Nonrenewable Resources, 1993, 2(2): 69–81.
- Singer D A, Menzie W D, Sutphin D M, et al. Mineral deposit density—An update[A]. In: Schulz K J, ed. Contributions to global mineral resource assessment research[M]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 2001, 1640: A1–A13.
- Tao J, Yuan F, Zhang N, et al. Three-Dimensional Prospectivity Modeling of Honghai Volcanogenic Massive Sulfide Cu–Zn Deposit, Eastern Tianshan, Northwestern China Using Weights of Evidence and Fuzzy Logic[J]. Mathematical Geosciences, 2021, 53: 131–162.
- Wang Xueqiu, Shen Wujun, Zhang Bimin, et al. Relationship of Geochemical Blocks and Ore Districts: Examples from the Eastern Tianshan Metallogenic Belt, Xinjiang, China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 116–123.
- Zientek M L, Bliss J D, Broughton D W, et al. Sediment-Hosted stratabound copper assessment of the Neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga Basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia[M]: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–T, 2014: 162.