

科学找矿工作的探索

——兼述战略性矿产找矿工程

朱裕生¹⁾, 梅燕雄¹⁾, 魏然^{1)*}, 王嘉玮¹⁾, 李静²⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2)有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012

摘要: 科学找矿是发现矿床和矿产勘查过程的总称, 在我国已探索了四十余年。它是应用当代有效的成矿学理论, 从各类资料和数据(地、物、化、遥)中提取信息, 研究区域成矿规律, 圈定不同级别的成矿区带(I—V级), 在成矿信息浓集区带或地段, 说明潜在矿床的地质条件, 判定矿床类型, 指明寻找未发现矿床的标志, 部署矿产勘查后进而发现了矿床, 公认它是矿产勘查学科各环节有机联系的系统流程。科学找矿引领地质找矿的重大突破, 促进矿产勘查工作的现代化。我国已通过矿产区划构建了科学找矿内容的基本格架, 在“新一轮固体矿产普查”、“矿产勘查跨世纪工程”、“矿产资源调查评价”和“找矿突破战略行动纲要”(又称“三五八”行动纲要)的实践中进行探索。获取的找矿成果证明, 科学找矿要以矿床成矿系列、矿产预测理论和成矿信息为指导; 矿产远景区划、地质资料的数据处理和提取成矿信息、编制矿产预测和矿床勘探系列图件是手段; 研究典型矿床, 建立区域的和矿床的成矿模式、总结区域成矿规律、圈定矿产预测远景区和找矿靶区、部署矿产勘查工作是发现矿床的科学支撑; 矿产勘查有效机制将科学找矿各个环节的内容实现有机联接, 组成获取找矿和矿床勘探成果的基本段, 概括为“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”, 直至今日, 探索工作已获得很好的找矿效果。在未来的“战略性矿产找矿行动(2021—2035年)”实施过程中, 用科学找矿的思路构建矿产勘查新格局。

关键词: 矿产区划; 区域成矿规律; 战略性矿产; 成矿信息; 矿产勘查; 科学找矿内容; 找矿突破

中图分类号: P628 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.083101

The Exploration of Scientific Prospecting Work: A Discussion on Strategic Mineral Prospecting Project

ZHU Yu-sheng¹⁾, MEI Yan-xiong¹⁾, WEI Ran^{1)*}, WANG Jia-wei¹⁾, LI Jing²⁾

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012

Abstract: Scientific prospecting is the general term for discovering mineral deposits and mineral exploration processes, which has been studied for more than 40 years in China. It applies effective temporal metallogenic theories and derives ore-forming information from all kinds of data and material to study the metallogenic regularity and subsequently delineate regions and belts at levels (I–V). In the regions or belts with abundant mineralization information, illustrating the geological setting of potential deposits, determining the deposit types and identifying the characteristics of undiscovered ore deposits enable some findings after deployment of mineral exploration. Scientific prospecting can be regard as a systematic processing involving disciplines connection in mineral exploration. It has led to breakthrough in prospecting and modernizes related work in the field. Based on

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221696; DD20221695; DD20190379; DD20160346)资助。

收稿日期: 2022-11-15; 改回日期: 2023-08-13; 网络首发日期: 2023-09-06。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 朱裕生, 男, 1937年生。研究员。主要从事区域成矿学、矿产区划、矿产勘查、矿产预测等方面的理论研究和地质找矿方法的探索。E-mail: Zhu Yusheng chy@163.com。

*通讯作者: 魏然, 女, 1983年生。博士, 助理研究员。主要从事矿物学及矿床成因研究。E-mail: weiranyspa@126.com。

the projects of “A new round of solid mineral census”, “Mineral exploration cross-century project”, “Mineral resources survey and evaluation Project” and “The program of action for prospecting breakthrough strategy”, we are exploring the scientific connotation of scientific prospecting after the framework established through the division of mineral resources. It indicates that scientific prospecting should regard metallogenic series and metallogenic system theories as the theoretical instruction. The means of scientific prospecting include taking division of metallogenic prospecting, processing, extracting information of the geological data and compiling maps of mineral exploration and metallogenic prospecting. Deservedly, there is an implementation sequence of discovering mineral deposits included in scientific prospecting, from studying of typical mineral deposits, establishing metallogenic model, analyzing ore forming regularity, delineating mineral prospecting area and finally to deploying exploration work. Mineral exploration have combined all above and gotten achievement on ore prospecting and deposit exploration. These are labelled as the “three theories”, “two systems”, and “two technologies”, which will guide future mineral exploration work “Strategic mineral exploration action [2021–2035]”.

Key words: mineral resource division; regional metallogeny; strategic mineral resources; metallogenic information; mineral exploration; scientific prospecting; prospecting breakthrough strategy

科学找矿是应用有效的成矿学理论、汇集矿产勘查资料、研究成矿规律、划分成矿区带、开展矿产预测、编制矿产勘查系列图件、部署矿产勘查工作、引领地质找矿突破的流程。自我国有地质工作的历史记载开始,地质找矿始终摆在首要位置,特别是20世纪80年代开始,全国正式开展科学找矿的探索工作,至今达四十余年的历史。通过科学找矿的探索,构建了科学找矿的基本格架,引领了地质找矿的连续突破、促进矿产勘查工作的理论化、智能化和高效益,引领我国矿产勘查工作进入世界领先地位。

1 矿产勘查的历史和现状

20世纪20年代成立中央地质调查所以后,提出煤、油和金属、非金属矿产勘查的方针,地质部于1952年成立,先后提出主要矿种勘查、石油会战、铁矿会战、铬铁矿会战、重点矿种勘探等指导原则,自“六五”(1980年)开始,全国开展矿产区划工作,以“矿产区划”成果为资料依据,部署矿产勘查工作,开拓了科学找矿探索和研究工作,至今达四十余年历史,取得“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”等实用成果。

依托第一轮矿产区划(1979—1985年)、第二轮矿产区划(1992—1995年)、“中国成矿体系与区域成矿评价”研究(1999—2004年,以下简称“成矿体系”)、第三轮矿产区划(2007—2014年)、整装勘查(2009—2014年)、矿产资源潜力动态评价(2016—2019年)进行的科学找矿探索取得的成果已经受“新一轮普查”(1980—1999年,其间开展过“一轮”、“二轮”区划)、“国土资源大调查”(2000—2009年,进行“成矿体系”研究和开展“三轮”区划)、“找矿突破战略行动”(“358”工程,2011—

2020年,开展“三轮”区划、“整装勘查”、“动态评价”)、《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》四项中长期地质找矿实践的检验,取得地质找矿连续突破的事实证明:我国矿产勘查的理论水平跃居世界前列、使用的矿产勘查技术先进、矿产勘查的科技含量不断提升,认定“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”是先进、适用的,是《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实施的科学技术支撑和有效途径。将在“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”基础上,实现我国矿产勘查工作的理论化、智能化和高效益的新格局。

2 资料和数据

资料(矿产地质资料、数据处理的软件系统)及相关的矿产地质数据是部署矿产勘查的基础资料和实施地质找矿的依据。科学找矿涉及基础地质学(矿床地质学、新一代的“区域地质志”、区域成矿学)、方法地质学(矿产普查、矿产勘探、地球物理勘探、地球化学勘探、遥感地质、地质制图、信息技术等)和有关的软件系统(方法地质学各学科使用的数据处理子系统的专业软件和MRAS系统平台包含的MAP-CAD、MAPGIS及其他众多绘图软件等;简称“二个系统”)。复杂多样的资料和数据必须建立数据库,在科学找矿探索过程中,借用地质云平台进行数据处理和分析研究,从中提取、浓缩、综合成矿信息、优选找矿靶区(最小面积、最大含矿率),排删无效信息,转化为找矿标志,或控矿要素(其全过程属“信息论”,本文暂不论及)。在有效的区域(或矿床)成矿学理论(矿床成矿系列理论、板块构造与矿床的成矿理论)指导下(程裕淇等1979,1983),编制矿产勘查的系列图件(尺度不等的矿产地质图、成矿规律图、勘查靶区分布图、矿产勘查部署建议图、矿集

区分布图、超大型和大型矿床分布图等),开展矿产预测,应用预测成果部署矿产勘查工作,转化后纳入地质找矿计划(年度的、五年计划的、国家和勘查部门的中长期规划),实施找矿和勘探工作,直到发现矿床和增扩资源储量。以上的事实指明,资料和数据在找矿和勘探工作中始终起到基础性和继承性的作用,显示导向功能。由此提出在地质找矿全过程中,汇集的资料和数据必须达到矿种、矿产地、空间、时间、科研成果五方面全覆盖,在“信息论”的指导下,应用“二个系统”的软件进行数据处理、综合分析,阐明区域成矿规律、锚定找矿靶区的空间位置、引领矿产勘查部署建议的制订,是实现地质找矿连续突破的资料依据和技术方法基础。

3 成矿规律研究及其研究内容

成矿规律研究是科学找矿的关键内容。研究内容随着矿产勘查程度的提高不断调整,逐步趋于完善的过程。我国的成矿规律研究历史悠久,早在1800年前,我国总结了“上有丹砂者,下有黄金;上有慈石者,下有铜金;上有陵石者,下有铅锡赤铜;上有赭者,下有铁;此山之见荣者也”(宋叔和,1989),这是我国古代对成矿规律的初始见解。

国际上用“Metallogen”一词叙说金属矿床的成因和成矿作用的关系,广义地理解为“成矿规律”(P. 鲁蒂埃,1990)。20世纪初,我国首先提出“成矿系列”的概念(翁文灏,1920),阐述过矿床分布的时、空关系(谢家荣,1936)。1946年,谢家荣先生编制了“中国区域矿产分布图”(1:500万)(存于原中国地质科学院资料室)。20世纪40年代,我国对成矿规律研究已取得重大进展,开创了用成矿规律图表达成矿规律研究成果的新形式,成为当时的示范案例。

新中国建立后,1952年8月地质部成立,以地质找矿为重点,举国家之力,快速发展。首先发现克拉玛依和柴达木冷湖油田,建立十大钢铁基地及其他矿产基地(中国地质调查局,2016)。随着找矿工作的飞速发展,成矿规律研究快速进展,1961年制定了“综合普查工作条例”,阐明矿床的时、空分布规律,建立矿床成矿模式(陈毓川和朱裕生,1993),是成矿规律研究的重大进展。

1979年,“初论矿床的成矿系列问题”(程裕淇等,1979)发表后,是我国成矿研究转折的标志。从此以后,应用我国独创的矿床成矿系列理论指导成矿规律的研究,打破了矿床时、空分布规律的基本骨架,将矿床形成过程中产生的各类成矿作用及其演化轨迹纳入成矿规律研究范畴,从此矿床成矿规律研究内容拓宽到矿床的时、空分布规律和成矿

作用演化轨迹三个方面,组成当代我国矿床成矿规律研究的基本内容,把我国矿床成矿规律研究推向新阶段(陈毓川等,2006,2015,2016,2020,2022)。

科学找矿的探索的四十余年中,始终以区域成矿学和矿床成矿系列理论为指导;汇集资料,建立数据库;以产出的矿床实体为依据、划分成矿区带为手段,叙明各级成矿区带空间范围内的成矿地质构造背景;依托划定的矿床成矿系列,阐明矿床的时、空分布规律,揭露成矿作用的演化轨迹;总结控矿要素和找矿标志,编制不同尺度的成矿规律图,导入矿产预测理论(“就矿找矿”、“理论找矿”、“缺位预测找矿”),进行矿产预测(朱裕生,2006);用文字和图件(矿产地质图、成矿规律图、矿产勘查部署建议图、找矿靶区优选图、区域成矿谱系图)直观表达成矿规律的研究成果和找矿靶区的空间分布状态,阐明成果转化应用途径后,提出矿产勘查部署和保护环境的建议,纳入矿产勘查计划后,实施地质找矿和矿床勘探,达到发现矿床和增扩资源储量的目的。

4 划分成矿区带

“成矿区带”凝集各类成矿地质作用的信息,包含有地质历史中出现的各类“成矿地质构造事件”的记录,当前尚可追踪成矿地质构造背景演变的过程;在矿产预测中是多元成矿信息转化为矿产资源量专用的地质单元;在成矿规律研究中是矿床定位的地质空间;在部署矿产勘查工作中是勘查、引导找矿突破和发现矿床的目标区。“成矿区带”自身的这些“功能”,在科学找矿探索过程中得到全部验证和应用,确立了各级“成矿区带”在科学找矿中的特殊地位。在我国成矿区带的划分采用五分法(I、II、III、IV、V):I级-成矿域、II级-成矿省、III级-成矿区或带、IV级-成矿亚带(或亚区)、V级-矿田。科学找矿探索过程中,I、II、III级全国(含海域)统一划定(图1),组成陆、海一体化的统一平台,并统一了各级成矿区带的内涵(陈毓川,1999a;徐志刚等,2008;朱裕生,2006)。

(1) I级成矿域

I级-“成矿域”是地幔起伏构成的全球构造单元(米·依·伊齐克松,1985),如太平洋成矿域(地幔隆起区)。在地质找矿探索过程中认定它是在造山与构造运动过程中,一个“构造-成矿旋回”时段内,进行壳、幔物质交换的四维空间(朱裕生,2006)。“构造-成矿旋回”的发生,及其由他引发的各类成矿作用造就了成矿物质的迁移和富集,形成各类矿床。矿床是壳、幔物质交换结果的地质记录之一。用块状硫化物矿床形成的区域成矿地质背景的实例

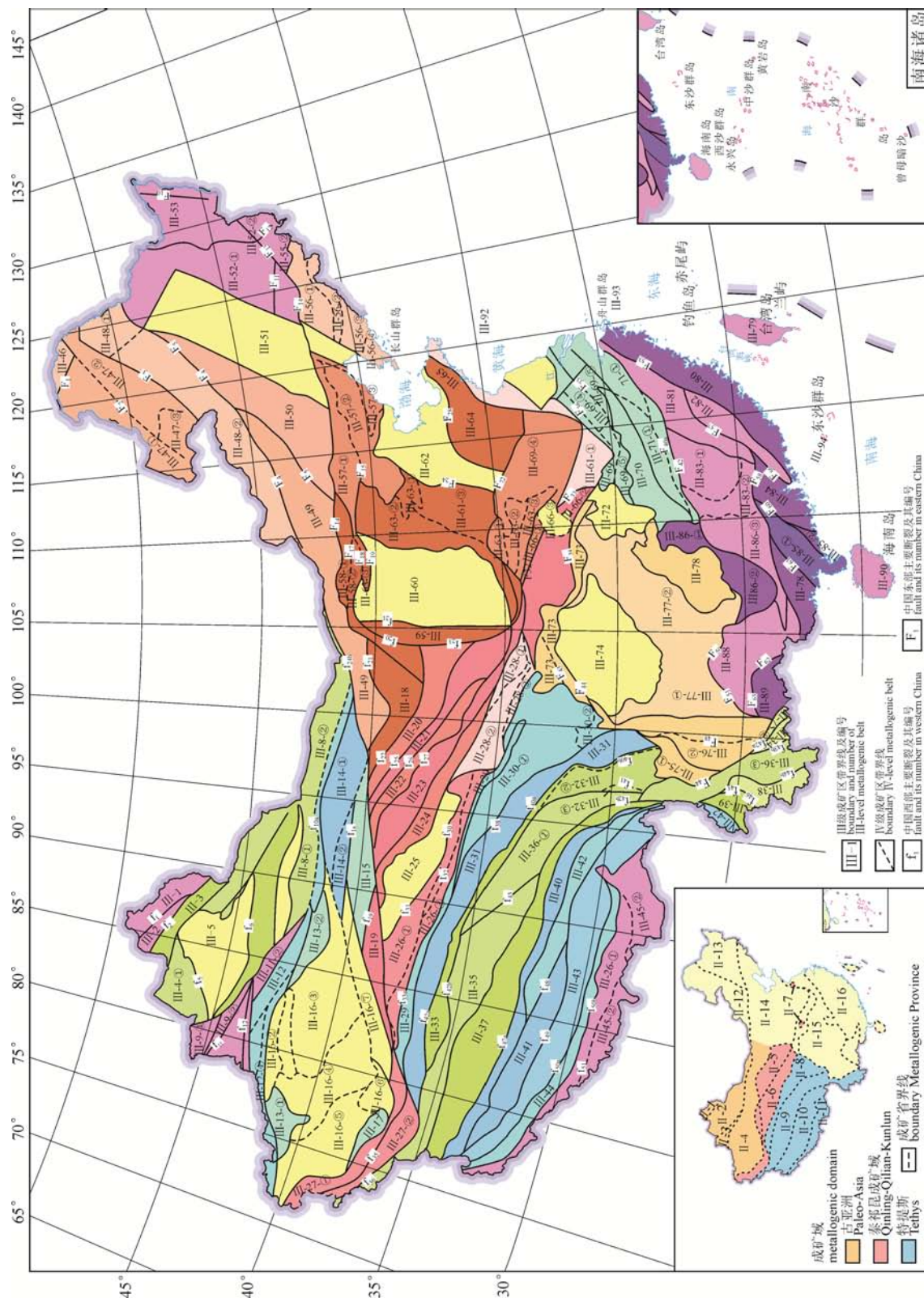
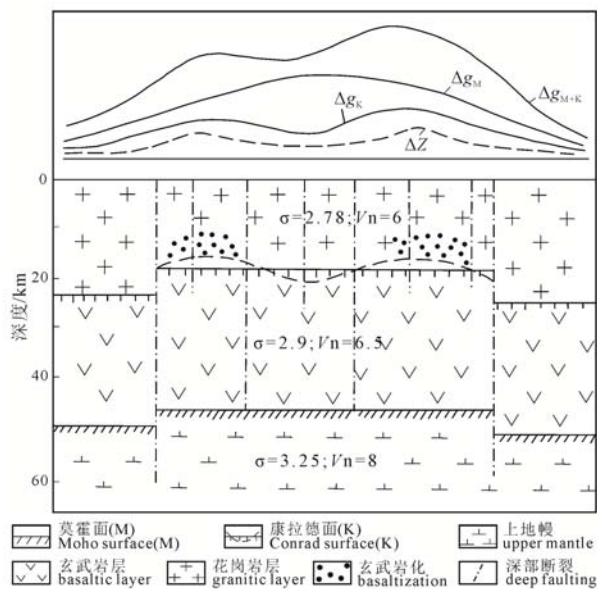


图 1 中国 I、II、III 级成矿区带划分图(据徐志刚等, 2008 修改)
Fig. 1 Map of metallogenic zoning in China (modified from XU et al., 2008)

与其对应的多元地质成矿信息(图 2)剖析“成矿域”(I 级)的地壳结构和发生的成矿作用(朱裕生等, 1997)。在地幔超深断裂限定的 I 级成矿域范围内(图 2), 地球壳层由上地幔、玄武岩层(下地壳)和上地壳三层组成(图 2, 图 3)。I 级成矿域范围内地球的壳层中, 上地幔上隆, 莫霍面(M)和康拉德面(K)抬升, 玄武岩上侵(图 2 的超深断裂夹持区内); 与其对应的莫霍面(M)重力影响曲线(Δg_M)、莫霍面(M)重力和康拉德面(K)重力影响合成曲线(Δg_{M+K})的异常区与莫霍面(M)抬升一致, 是幔隆地质构造事件的地球物理场特征; 磁场垂直分量曲线(ΔZ)和康拉德面(K)重力影响曲线(Δg_K)异常背景上出现的次级异常区与康拉德面(K)上方的玄武岩上侵的位置一致, 属壳、幔物质交换地质事件的历史记录。图 2 和图 3 标定的地壳结构和地球物理场特征, 属地幔的隆、凹结构, 与成矿域(I 级)对应。由此可见, 由地幔物质巨大的不均一性引起的莫霍面起伏、是与全球构造单元相对应的成矿有利地区, 据此确定成矿域(I 级)是对地幔物质不均一性和上地幔构造单元的划分, 与全球构造单元相对应。根据成矿域(I 级)的内涵(图 4), 我国划定以下四个成矿域(I 级):



ΔZ —磁场垂直分量曲线; Δg_M —莫霍面(M)重力影响曲线;
 Δg_K —康拉德面(K)重力影响曲线; Δg_{M+K} —莫霍面和康拉德面
 重力影响合成曲线; σ —密度/(g/cm³);
 V_n —岩石中波的传播速度/(km/s)。

ΔZ —vertical component of magnetic field curve; Δg_M —Moho
 surface (M) gravity influence curve; Δg_K —Conrad surface (K)
 gravity influence curve; Δg_{M+K} —Moho surface (M) and gravity
 influence c composite curve; σ —density/(g/cm³);
 V_n —velocity of the wave in the rock/(km/s).

图 2 成矿域(I 级)的地质结构与多元信息匹配略图
 (朱裕生等, 1997)

Fig. 2 Sketch map of geological structure and multivariate information matching in metallogenic zoning (level I)
 (from ZHU et al., 1997)

“太平洋成矿域”(图 4 的地幔隆起区)、“古亚洲成矿域”(图 4 的地幔稳定区)、“特提斯成矿域”(图 4 的地幔凹陷区)和“秦祁昆成矿域”(图 4 的地幔隆、幔凹过渡区)。总之, 成矿域(I 级), 又称全球成矿区带, 是对地幔物质巨大的不均一性的分割、是与全球构造单元相对应的成矿有利地区。

(2) II 级成矿省

成矿省(II 级), P.鲁蒂埃(1990)定义为与大地构造单元(造山地槽或副地槽)相对应的、受大地构造旋回控制的地质单元为 II 级成矿省, 它与大地构造的一级构造单元或跨越不同大地构造单元的“构造-岩相带”展布的地区内, 产出特定矿化类型的成矿地质构造单元, 康拉德面起伏(K)限定的空间范围就是 II 级成矿省的位置(图 5)。

图 5 的莫霍面(M)处于稳定状态, 其上的康拉德面(K)呈起伏不稳定状态, 内部由玄武岩层、花岗岩层、玄武岩化体(是壳、幔物质交换的地质事件)和地表表层(内部产出似花岗岩侵入体和含矿有利区)组成。磁场垂直分量(ΔZ)、康拉德面(K)重力影响异常(Δg_K)和下古生代基底面重力和康拉德面合成影响($\Delta g_{K+\Phi}$)曲线同形、同升降(图 5), 反映了花岗岩层、玄武岩化地质体, 地表表层内物质的不均一性, 与含矿有利区, 对应的 ΔZ 、 $\Delta g_{K+\Phi}$ 、 Δg_{Φ} 异常峰值区, 强度骤增, 反映了壳、幔物质强烈交换和某些元素的高度富集。成矿省(II 级)是康拉德面(K)起伏和基底构造层组成的上地壳物质的不均匀性的划分。康拉德面(K)的起伏的地球物理场, 指示了地壳物质的不均匀性, 是区域地质学划分构造单元和成矿省(II 级)界线的直接依据。成矿区带划分的实际操作中, 利用区域构造单元的成矿地质构造

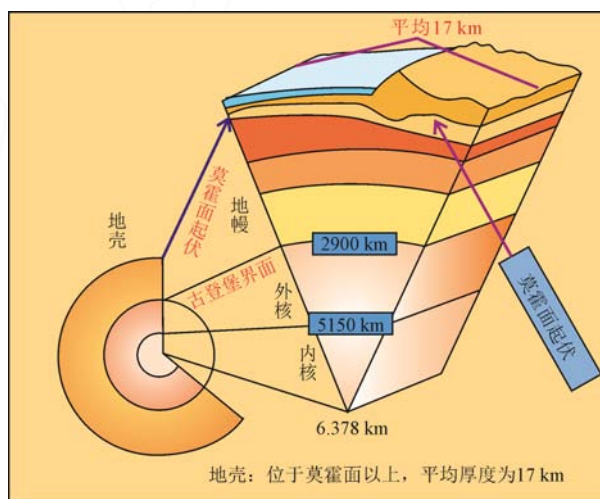


图 3 地球内部结构和层圈分布图(中国地质调查局, 2019)
 Fig. 3 Schematic diagram of the earth's interior structure and stratigraphic distribution
 (from China Geological Survey, 2019)

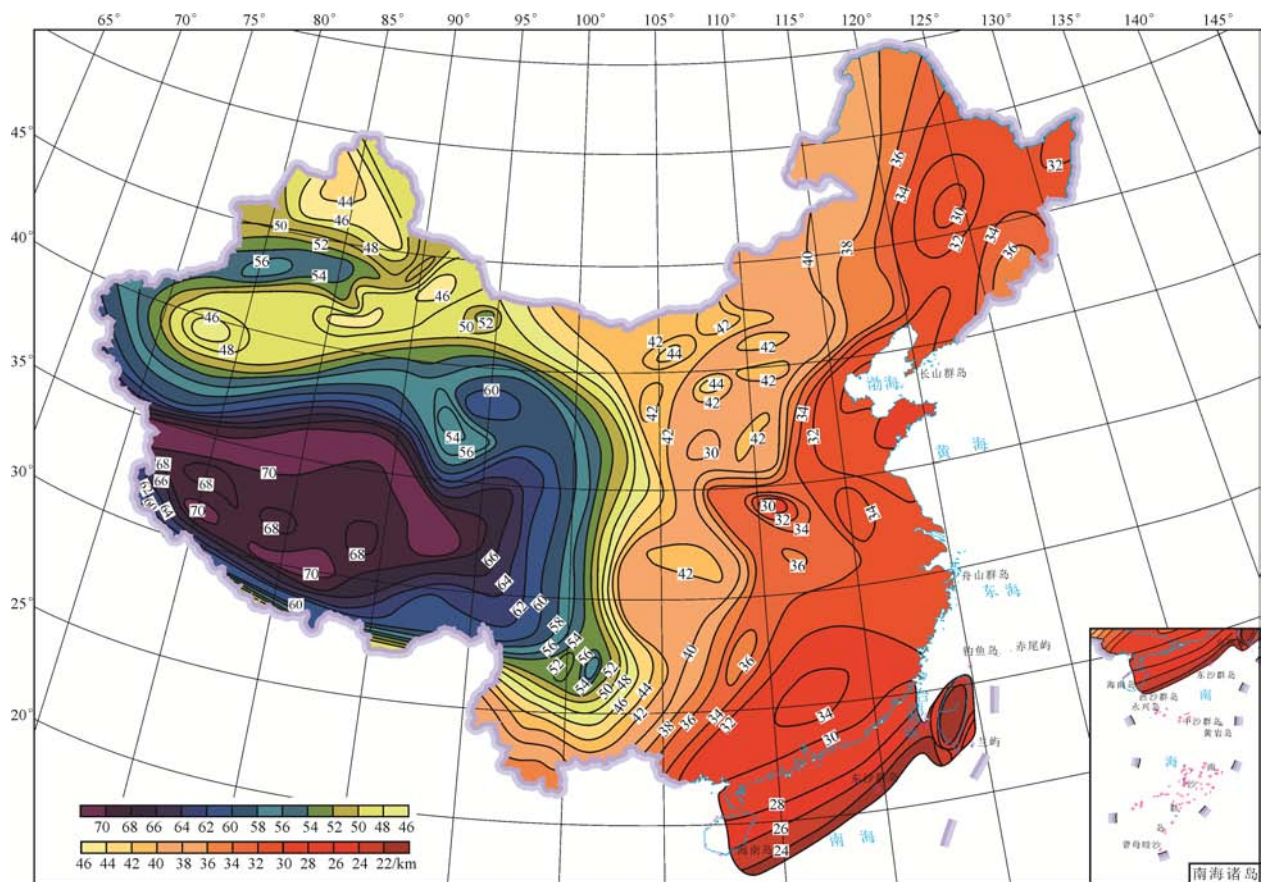


图4 中国莫霍面深度示意图(陈毓川等, 2007)

Fig. 4 Sketch map of the Moho depths in China (from CHEN et al., 2007)

背景、康拉德面(K)起伏(图5)和对应的地质多元信息三种地质要素,在成矿域(I级,图2)范围内划分成矿省(II级)。一个成矿域(I级)空间范围内划分出若干个成矿省(II级)。

由此可见,成矿省(II级)是在壳、幔物质强烈交换和元素高度富集的特定空间,对地壳物质不均一性的分割,往往与大地构造的二级构造单元对应,它是成矿信息浓集的地区,成矿省(II级)必然是矿产勘查的有利空间。总之,成矿省(II级)是对地壳物质不均匀性的分割,在多个地质构造-成矿旋回驱动下,造就地壳物质交换、成矿元素富集和成矿元素组合的差异划分的成矿有利地区,展示了成矿作用的发生和成矿信息的丰富程度。

经科学找矿四十余年的探索,确认成矿省(II级)的内涵是符合矿产勘查的实际,如华南成矿省与扬子成矿省的地壳物质有巨大的差异(朱裕生, 2006)。据成矿省(II级)的内涵,我国陆、海疆域划定17个成矿省(图1)。

(3) III级成矿区带

成矿区带(III级),一般用“构造-成矿带”表达。P.鲁蒂埃(1990)认为,它是与一定的地槽或地台构造相关的成矿带。在我国将III级成矿区带作为研究成矿规律、部署矿产勘查工作的成矿地质空间。

在图6的多元成矿信息清楚地标出 $\Delta g_{\Phi+K}$ (基底面和康拉德面重力影响合成曲线)和 $\Delta g_{\Phi+K+A}$ (基底、康拉德面(K)和地壳地层重力影响合成曲线)属基底构造的地球物理场特征; $\Delta g_{\Phi+K+A}$ 和 Δg_n 在区域背景场上的局部负异常显示了花岗岩侵入区的特征; ΔZ (磁场垂直分量曲线)的局部异常显示了成矿有利区内的成矿信息。

成矿区带划分的实际操作中,III级成矿区带是在II级成矿区带范围内圈出的次一级的、成矿信息高度浓集的地区,受统一的成矿地质构造背景控制,发育着以一个构造-成矿旋回为主、其他地质构造-成矿旋回为辅、在特定的区域内受地质成矿作用的支配形成特定的矿床类型组合和矿种组合集中产出的成矿有利区。在我国的陆、海疆域内划定94个III级成矿区带(图1)。

(4) IV级成矿亚带

成矿亚带(IV级)在矿产区划工作中统一名称是“成矿亚带”(又称“矿田分布区”,朱裕生, 1984)。

经四十余年的勘查实践和研究(统称为“科学找矿探索”)认为,IV级-成矿亚带是在III级成矿区(带)统一的成矿地质构造背景上,由于控矿地质条件、产出的矿床成因类型、成因类型组合的不同,进一步圈出矿床集中产出的区段(朱裕生等, 2007),如长

江中下游 Cu-Au-Fe-Pb-Zn-(Sr-W-Mo-Sb)-硫铁矿-石膏成矿带(III-69)中的“安庆—铜陵—繁昌 Cu-Fe-Pb-Zn-Ag-Au-硫铁-石膏成矿亚带”。

(5) V 级矿田

(V 级)矿田,是指有利赋矿岩类的分布区,区内必须产出二类或二类以上成因类型(包括相应矿种组合)的矿床。我国在第一轮矿产区划工作(1979)中将矿田看作总结成矿规律、发现矿床有利的地质空间(何贤杰等, 2013)。通过科学找矿的探索, 共同认为矿田(V 级)是在相似地质环境支配下, 受有利成矿地质因素中同类成矿因素控制, 赋存有成因相似、空间密切联系、特定矿床成因组合(含矿种组合)的一组矿床密集产出的地区。如“安庆—铜陵—繁昌 Cu-Fe-Pb-Zn-Ag-Au-硫铁-石膏成矿亚带”中的“铜官山矿田”。

经过四十余年的探索证实, 成矿区带的五分法(I、II、III、IV、V)是科学找矿的有效途径(朱裕生等, 1997; 陈毓川, 1999a, 2011; 陈毓川等, 2007); 在矿产勘查工作中, 全国统一划定 I、II、III 级

成矿区带(徐志刚等, 2008), 实现了陆、海成矿规律的整体研究和选取有找矿突破前景的勘查靶区(最小面积、最大含矿率)部署矿产勘查工作, 明确地勘费的投向, 是提高找矿效益战略手段。

5 科学找矿认识的发展

科学找矿的探索工作是在矿产区划和矿产勘查过程中进行的, 矿产区划工作刻划探索的内容; 矿产勘查工作获取探索成果, 两者紧密结合组成科学找矿工程和科学找矿理论(朱裕生, 1993)。我国的矿产查工作与矿产区划工作一样, 是分阶段实施的, 探索工作在两者结合的整体层面实施后必然会取得探索成果。在 1979 年前, 按国民经济发展的五年计划进行找矿勘探工作, 自 1979 年起我国在矿产勘查领域开展双规制, 即国民经济的中长期发展目标和五年计划的找矿勘探工作并行进行。矿产区划工作按国民经济的中长期发展目标实施, 矿产

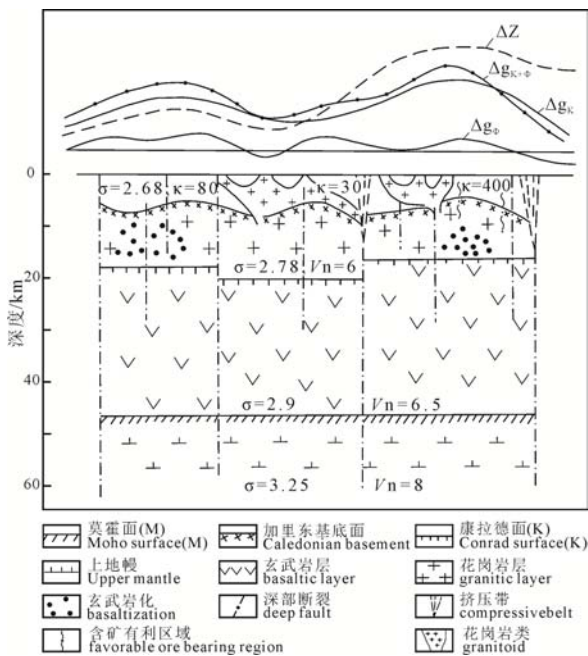


图 5 成矿省(II 级)的多元信息和地质结构略图 (朱裕生等, 1997)

Δg_0 —下古生代基底面重力影响曲线; Δg_K —康拉德(K)面重力影响曲线; Δg_{K+0} —康拉德面(K)重力和下古生代基底面重力影响合成曲线; ΔZ —磁场垂直分量曲线; σ —密度/(g/cm³); V_n —岩石中波的传播速度/(km/s); κ —磁化率。

Δg_0 —Lower Paleozoic basement gravity influence curve;
 Δg_K —Conrad surface (K) gravity influence curve;
 Δg_{K+0} —Conrad surface (K) gravity and Lower Paleozoic basement gravity influences composite curve;
 ΔZ —vertical component curve of magnetic field; σ —density/(g/cm³);
 V_n —velocity of the wave in the rock/(km/s);
 κ —magnetic susceptibility.

Fig. 5 Sketch map of the metallogenic province (level II) with multivariate information and geologic structure (from ZHU et al., 1997)

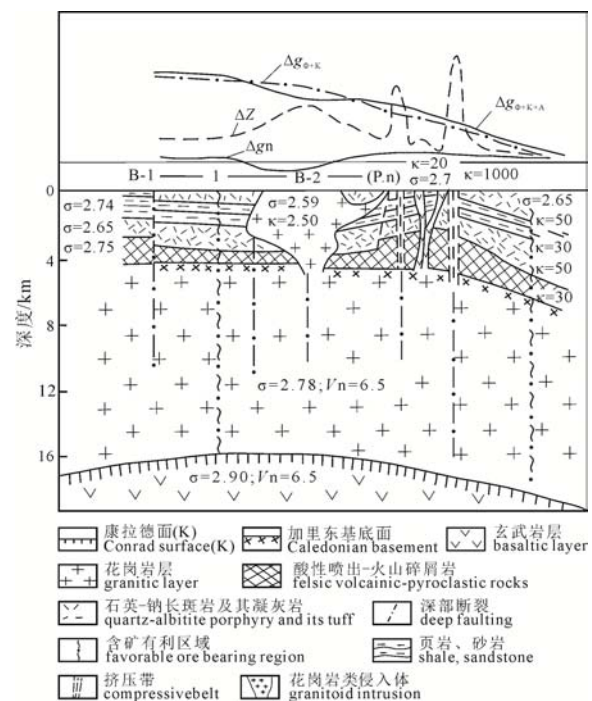


图 6 III 级成矿区带地质多元信息和地质结构略图 (据朱裕生等, 1997)

Δg_n —激发极化率影响曲线; ΔZ —磁场垂直分量曲线;
 Δg_{0+K} —康拉德面和下古生代基底面重力影响合成曲线;
 Δg_{0+K+A} —基底、康拉德面(K)和地壳地层重力影响合成曲线科学找矿; σ —密度/(g/cm³); V_n —岩石中波的传播速度/(km/s); κ —磁化率。

Δg_n —excitation polarization influence curve; ΔZ —vertical component curve of magnetic field; Δg_{0+K} —Conrad and Lower Paleozoic basement surface gravity influence the resultant curve;
 Δg_{0+K+A} —basement, Conrad face (K) and Upper Paleozoic strata gravity influence the resultant curve; σ —density/(g/cm³);
 V_n —velocity of the wave in the rock, km/s;
 κ —magnetic susceptibility.

Fig. 6 Multivariate geological information and geological structure sketch of the level III mineralization zones (from ZHU et al., 1997)

区划成果转化纳入矿产勘查工作的五年计划或年度计划,统称为“矿产勘查部署建议”(朱裕生等,2000)。

科学找矿的探索工作已经历了六个阶段的实践和检验(第一、二、三轮矿产区划,“成矿体系”研究,整装勘查,矿产资源潜力动态评价);矿产勘查工作与国民经济中长期规划同步实施,概括为四项中长期矿产勘查规划(“新一轮普查”、“国土资源大调查”、“找矿突破战略行动”或“358”工程、《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》);区划成果是编制中长期矿产勘查规划关键的资料依据(何贤杰等,2013;武广和朱裕生,2016;王嘉玮和朱裕生,2019),其中的矿产预测成果纳入矿产勘查部署建议、或转入找矿和矿床勘探计划。四项中长期矿产勘查规划的实践证明,科学找矿探索成果不断引领地质找矿的连续突破;三项内容匹配组成了我国的矿产勘查部署和矿床勘探计划结合的科学找矿工程,达到持续更新科学找矿理论目的(朱裕生,2006);直至当前,科学找矿的探索促使我国矿产勘查的科技含量不断提升,矿产勘查技术和理论连续更新,跃居世界前列(朱裕生等,2016);在未来的矿产勘查工作中,科学找矿和探索工作,仍然是《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实施的科技支撑和关键内容。

(1)新一轮普查

①新一轮普查实施起步阶段(1980—1999年)

新一轮普查的目标任务是利用十五年左右的时间,即20世纪末,了解我国矿产资源全貌,实行区域展开、重点突破、开辟找矿新领域、寻找新矿种、发现新的矿产地,提供一批具有战略意义的后备勘探基地;开拓西部、发展中部、稳定东部;必须依靠科学技术的进步,依靠成矿学理论指导矿产勘查(温家宝,1985)。

新一轮普查期间,是科学找矿探索工作的开端、第一轮矿产区划成果转化应用的开端。以第一轮矿产区划圈定的21个重点成矿区带为背景(图7),布置全国和东、中、西三个地区“七五”期间的普查找矿工作(温家宝,1985)。

“七五”结束时,新发现矿产地907处,其中超大型和大型矿床152处(平均每年发现12.7处)、中型321处、小型434处,已知矿床扩大40处,取得地质找矿的重大突破,获得很好的找矿效果(朱裕生,2006)。

新一轮普查地质找矿突破的事实证明,应用成矿区带部署矿产勘查工作明确了地勘费的投向、提高了找矿效益(武广和朱裕生,2016)。

②“固体矿产勘查跨世纪工程”实施阶段

“固体矿产勘查跨世纪工程”属国家级战略性矿产资源勘查计划(中国地质调查局,2016)。

1992—1995年间开展第二轮矿产区划,目的是引领急缺矿种的找矿突破。在第二轮矿产区划工作中科学找矿的探索工作获得创新性的进展,主要是应用计算机技术从地、矿、物、化、遥资料中提取成矿信息、优选找矿靶区,将第二轮矿产区划成果编制“固体矿产勘查跨世纪工程”和“矿产资源调查评价工程”(“国土资源大调查纲要”)。

第二轮矿产区划结束时,全国共圈定1208个成矿远景区,划分26个重点勘查区(带),优选出具有找矿突破前景的93个勘查靶区,编制了“固体矿产勘查跨世纪工程部署图”。

经“九五”勘查工作查证,共发现矿产地109处,其中超大型、大型矿床56处,中型矿床17处,小型矿床36处,又一次获得地质找矿的重大突破(朱裕生等,2007)。

编制矿产预测系列图件,成矿远景区优选,其成果转化为矿产勘查工作的验证对象,是科学找矿探索的关键内容。

(2)“矿产资源调查评价工程”

“矿产资源调查评价工程”是国土资源大调查“一项计划、四项工程”之一。目的是摸清我国矿产资源家底,缓解世纪之交的能源、固体矿产的供需矛盾。

编制“矿产资源调查评价工程”是在“新一轮普查”成果基础上、“中国成矿体系与区域成矿评价”新理论为指导,用科学找矿的新思路编就了“矿产资源调查评价工程”(起草人王保良处长、朱裕生研究员)。“矿产资源调查评价工程”提出勘查的主攻矿种,矿产部署向国家战略性矿产、西(含中)部、资源潜力大的地区倾斜的战略决策;要实现西藏喜马拉雅、西南三江、塔里木成矿省找矿的重大突破;以科研为先导,研究矿床成因、总结成矿规律、完善矿产预测新理论和预测方法、应用信息技术,创立适合矿产勘查工作的成矿学新理论。

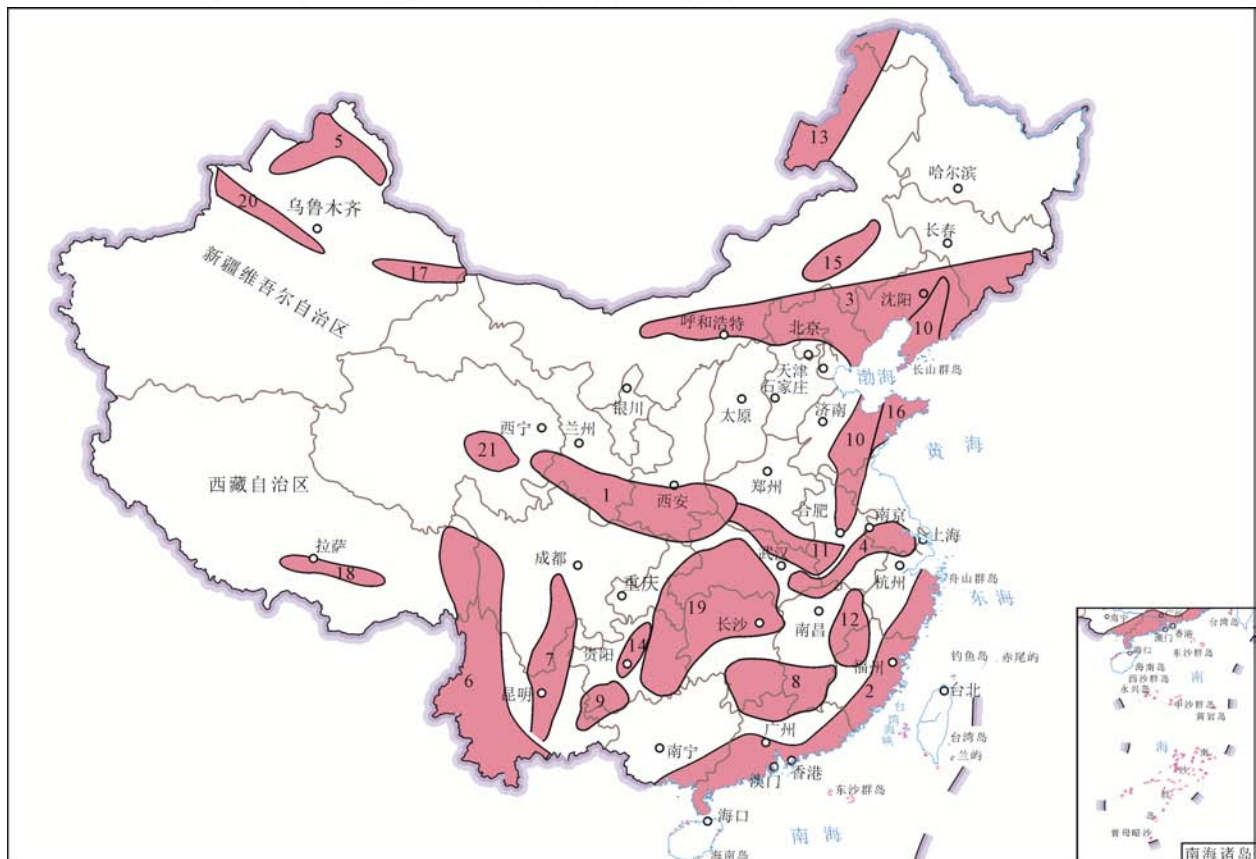
实施过程中,在全国划定16个成矿省(Ⅱ级)、初设置80个Ⅲ级成矿区带,后期为94个Ⅲ级成矿区带(图1)、初期设置16个重要成矿区带,后期增至34个重要成矿区带(图8);应用成熟的靶区优选方法列出214个勘查靶区(图9),共同组成“矿产资源调查评价工程”的主体内容(朱裕生等,1999),为矿产勘查费用的投入提出有效的地质空间。在实施的十二年间共设置项目1200余个(朱裕生等,2013),完成钻探进尺160余万米,投入总经费达40亿元(中国地质调查局,2010)。

“矿产资源调查评价工程”(1999—2010年)结束时,发表了“国土资源大调查矿产资源调查评价成果集成”(中国地质调查局,2010)。

国土资源大调查于 2010 年完成, 全国建成十大新的战略资源接替基地, 在成矿区带内新发现矿产地 907 处, 其中超大型大型矿床 152 处; 矿化点 1100 处、化探异常 2.6 万处、高精度磁异常 2400 多个(中国地质调查局, 2010), 达到了“矿产资源调查评价工程”(1999—2010 年)预期的目的。

在这期间, 科学找矿的探索工作取得全面进展, 在矿产勘查实践中形成中国成矿体系新理论(陈毓川等, 2007), 发展了矿产预测的异相定位、矿床成

矿系列“全位成矿”和“缺位预测”、多元信息“类比求同”、地质体“对等求异”四项理论(朱裕生, 2006), 成功探索了从多元勘查资料中识别成矿信息的方法, 完善了找矿靶区优选方法(何贤杰等, 2013), 在 MAPGIS 平台上编制矿床成矿系列、矿产预测、找矿靶区优选图(图 9), 研制成功矿产资源 GIS 评价系统(肖克炎等, 2000)等。这些内容组合成科学找矿的基本框架, 也为未来的矿产勘查提供技术支撑。



- 1—秦岭—巴山金、银、铅锌、铜成矿带; 2—浙闽粤沿海铜、金、银、铅锌、优质高岭土成矿带; 3—中朝准地台北缘铅锌、银、金、硼、磷成矿带; 4—长江中下游铜、金、铁、硫铁矿成矿带; 5—新疆准噶尔盆地西北缘铜、金、镍成矿带;
 - 6—西南三江中南段金、铜、钾盐、铅锌、银、锡成矿带; 7—西昌—滇中铅锌、铜、磷成矿带; 8—南岭中段铅锌、银、磷成矿带;
 - 9—黔桂滇相邻区金、银、磷成矿带; 10—郯庐断裂两侧金刚石成矿带; 11—桐柏—大别金、银、铅锌成矿带;
 - 12—赣东—浙西铜、银、铅锌、金成矿带; 13—得尔布干银、金、铜成矿带; 14—黔中—黔北铝土矿成矿带;
 - 15—巴林左旗—乌兰浩特铅锌、铜、银成矿带; 16—胶东金、银成矿带; 17—东天山铜、金、镍成矿带;
 - 18—藏南(即雅鲁藏布江)铜、金、铬成矿带; 19—扬子陆块中西段锰、磷、金刚石成矿带;
 - 20—西天山金、铜成矿带; 21—青海鄂拉山—德尔尼铜、金成矿带。
- 1—Au, Ag, Zn-Pb, Cu metallogenic belt in Qinling-Bashan; 2—Cu, Au, Ag, Zn-Pb high quality kaolin metallogenic belt in Zhejiang, Fujian and Guangdong coastal areas; 3—Zn-Pb, Ag, Au, B, P metallogenic belt in north edge of the Sino Korea platform; 4—Cu, Au, Fe, FeS metallogenic belt in Middle and Lower Yangtze River; 5—Cu, Au, Ni metallogenic belt in Northwest edge of Xinjiang Junggar Basin;
- 6—Au, Cu, K, Zn-Pb, Ag, Sn metallogenic belt in mid-south section of the three-river in Southwest China;
- 7—Zn-Pb, Cu, P metallogenic belt in Xichang-Dianzhong; 8—Zn-Pb, Ag, P metallogenic belt in central Nanling Mountains;
- 9—Au, Ag, P metallogenic belt in Guizhou, Guangxi, Yunnan and adjacent regions; 10—Adamas metallogenic belt on the side of the Tanlu Fault; 11—Au, Ag, Zn-Pb metallogenic belt in Tongbai-Dabie; 12—Cu, Ag, Zn-Pb, Au metallogenic belt in Eastern Jiangxi-Western Zhejiang;
- 13—Ag, Au, Cu metallogenic belt in Derbugan; 14—Monohydrallite metallogenic belt in Central Guizhou-Northern Guizhou;
- 15—Zn-Pb, Cu, Ag metallogenic belt in Balin Left Flag-Ulanhot; 16—Au, Ag metallogenic belt in Eastern Shandong;
- 17—Cu, Au, Ni metallogenic belt in East Tianshan; 18—Cu, Au, Cr metallogenic belt in Brahmaputra region;
- 19—Mn, P, Adam metallogenic belt in the middle and western section of Yangtze landmass;
- 20—Au, Cu metallogenic belt in West Tianshan; 21—Cu, Au metallogenic belt in Orashan-Derny, Qinghai.

图 7 新一轮普查全国重要成矿区(带)矿产勘查工作部署图(朱裕生, 2006)

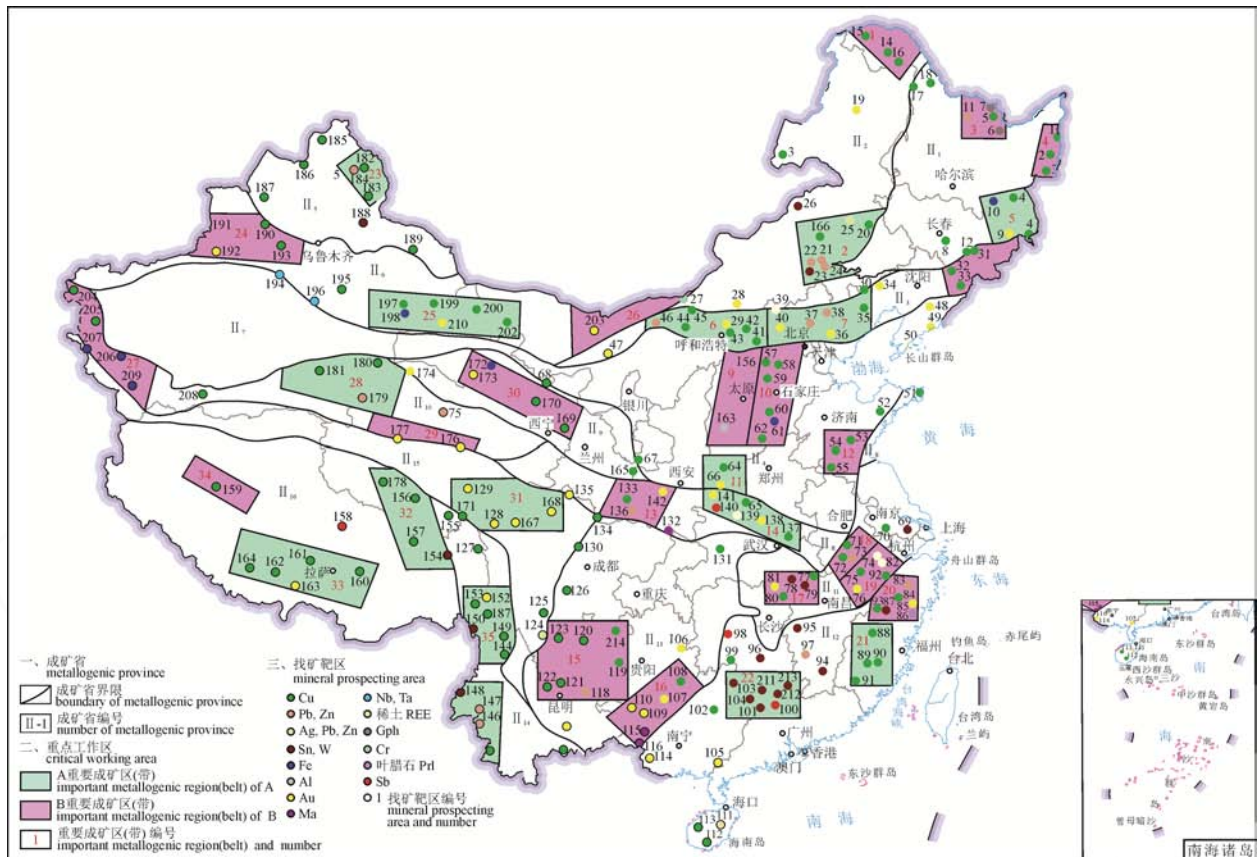
Fig. 7 Deployment diagram of a new round important ore-forming belt mineral exploration (from ZHU et al., 2006)

(3) “找矿突破战略行动”

“找矿突破战略行动纲要”(简称“358”工程, 2011—2020年)是国家级计划(国办发[2011]57号)。

“358”工程是矿产勘查的总纲, 内容有整装勘查(2009—2014年, 含地质找矿大讨论)、重要矿产勘查(含矿产资源潜力评价)、老矿山找矿(韦昌山等, 2020)、矿产资源综合利用等内容。在十年的矿产勘查工作中, 石油、天然气十年新增资源量分别为101亿吨、6.85万亿 m^3 , 约占新中国成立以来查明

总量的25%、45%, 发现玛湖、庆城等17个亿吨级大油田和安岳、苏里格、塔里木盆地博孜一大北等21个千亿 m^3 级大气田、塔里木盆地顺北十亿吨级超深断溶体油气藏。页岩气勘探开发取得长足进展, 川南气田年产量达到117亿 m^3 , 涪陵气田年产量达到67亿 m^3 ; 发现沁水千亿 m^3 级煤层气田。石油、天然气新发现23个亿吨级大油田和28个千亿方级大气田, 非油气矿产新形成32处资源基地、284项优秀成果(2021年3月1日《中国矿业报》), 取得



- 1—大兴安岭北端漠河—塔河成矿区; 2—大兴安岭东南段成矿区; 3—黑龙江北部萝北成矿区; 4—黑龙江虎林—饶河成矿带;
 - 5—延吉—东宁成矿区; 6—华北陆块北缘西段成矿带; 7—华北陆块北缘中段成矿带; 8—华北陆块北缘东段成矿带;
 - 9—晋中—晋北成矿区; 10—太行山东缘成矿带; 11—豫西北—晋南成矿区; 12—辽东—胶东成矿带; 13—陕甘川成矿区;
 - 14—武当—桐柏—大别成矿带; 15—川滇黔相邻区成矿区; 16—黔桂川相邻区成矿区; 17—雪峰古陆成矿区; 18—长江中下游成矿带;
 - 19—江南古陆成矿区; 20—闽浙成矿区; 21—闽西南成矿区; 22—南岭成矿区; 23—新疆阿勒泰成矿带; 24—新疆西天山成矿带;
 - 25—新疆东天山成矿带; 26—内蒙古乌拉特后旗成矿带; 27—新疆西昆仑成矿带; 28—祁曼塔格成矿带; 29—东昆仑成矿带;
 - 30—祁连成矿带; 31—川西北阿坝—青海玉树成矿带; 32—昌都—杂多成矿带; 33—冈底斯—藏南成矿带; 34—班公湖—改则成矿带。
- 1—the northern edge of Daxing'anling Mohe-Tahe metallogenic region; 2—Southeast section of Daxing'anling metallogenic region; 3—Luobei metallogenic region in north of Heilongjiang; 4—Hulin-Raohe metallogenic belt in Heilongjiang; 5—Yanji-Dongning metallogenic region; 6—Western section of the northern margin of North China block metallogenic belt; 7—Middle section of the northern margin of North China block metallogenic belt; 8—Eastern section of the northern margin of North China block metallogenic belt; 9—Jinzhong-Jinbei metallogenic region; 10—Eastern edge of Taihang Mountain metallogenic belt; 11—Northwest Henan-south Shanxi metallogenic region; 12—Liaodong-Jiaodong metallogenic belt; 13—Shaanxi-Gansu-Sichuan metallogenic region; 14—Wudang-Tongbai-Dabie metallogenic belt; 15—Adjacent area of Sichuan, Yunnan and Guizhou metallogenic region; 16—Adjacent area of Guizhou and Sichuan metallogenic region; 17—Xuefeng archicontinent metallogenic region; 18—Middle and lower Yangtze River metallogenic belt; 19—Jiangnan old land metallogenic region; 20—Fujian-Zhejiang metallogenic region; 21—Southwest of Fujian metallogenic region; 22—Nanling metallogenic region; 23—Altay, Xinjiang metallogenic belt; 24—West Tianshan, Xinjiang metallogenic belt; 25—East Tianshan of Xianjiang metallogenic belt; 26—Urad Back Banner of Inner Mongolia metallogenic belt; 27—West Kunlun of Xinjiang metallogenic belt; 28—Qimantag metallogenic belt; 29—East Kunlun metallogenic belt; 30—Qilian metallogenic belt; 31—Aba in Northwest of Sichuan-Qinghai Yushu metallogenic belt; 32—Changdu-Zaduo metallogenic belt; 33—Gangdise-south of Xizang metallogenic belt; 34—Bangonghu-Gaize metallogenic belt.

图8 “矿产资源调查评价工程”设置的全国重要成矿区带分布图(朱裕生等, 2000)

Fig. 8 Important metallogenic belt distribution diagram of the “Mineral Resources Survey and Evaluation Project” (from ZHU et al., 2000)

④设制“战略性矿产勘查过程中动态评价和成果跟踪”专项,它是已有成果转化的关键措施,又是保证《战略性矿产找矿行动(2021—2035)》工程实现连续突破和提高矿产勘查效益的管理措施。



⑤《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实施必须依靠科学技术的进步,以成矿学理论为指导,实施战略性新一轮矿产区划,达到陆海一体化;应用先进的勘查技术方法进行超深勘探和三维立体预测,寻找地质找矿新的突破口;在国家环境保护框架内,实现绿色勘探;应用高科技人才和培养一批矿产勘探专业团队,实现地质找矿的全面突破。

6 科学找矿的理论体系

发现矿床是矿产勘查工作的头等任务。有些国家、成矿区带或特定区域内,一次又一次部署矿产勘查工作,始终将发现矿床视为矿产勘查工作首要任务。通常地质找矿人员根据已知矿床特征与成矿地质构造环境的关系部署矿产勘查工作,在有些区段找到了矿床,但在另一些区段按同样的认识部署矿产勘查工作后屡屡落空,有时在意想不到的区段内偶然地发现了矿床,尤其在隐伏矿床勘查工作中,投入众多的勘查工作量和资金,找矿效果不佳,这样的现象屡见不鲜。实施科学找矿有可能排除干扰、缩小目标、瞄准目的物、动用有效的技术手段,在较短的时间内,用较少的勘查工作量,发现矿床,完成阶段性的矿产勘查任务。按科学规律部署勘查工作、发现矿床的操作过程在新一轮普查工作开展前是不正规的,自1979年开展矿产区划工作以后改变旧规则,采用新规定,不断提高科学找矿的水平,提高矿床的发现率。

1979年国家地质总局提出以“地质-找矿为中心”,按“东部挖潜、开拓西部、发展海域、陆海并举”的方针,实现找矿突破(温家宝,1985);同年开展的第一轮矿产区划工作时,要求“划分成矿区带、研究成矿规律、开展矿产预测、指导普查找矿(中国地质科学院成矿远景区划室,1991)。两者的内容都是“找矿”、目的是发现矿床。总而言之,“找矿”需要科学理论,矿产勘查工作应用新技术,用发现矿床高效益的要求构建科学找矿的完整体系,从此开展了科学找矿的探索工作。四十余年探索过程,逐步形成了一套理论体系和可操作的方法系统,主要内容是:

(1)三项理论:①矿床成矿系列理论和区域成矿学理论体系;②矿产预测理论;A,“就矿找矿”理论,以“矿集区”为资料依据;B,“理论找矿”,通过划定的成矿区带锚定找矿靶区;C,矿床成矿系列的“全位成矿”和“缺位预测理论”;③信息论。

(2)二个系统:①方法地质学各学科使用的数据处理子系统;②智能化成矿信息提取(浦志伟和朱裕生,1993)和众多绘图软件(MAP-CAD、

MAPGIS)组成的MRAS系统(肖克炎等,2000)。

(3)二项技术:①数据库技术;②矿产勘查先进的技术装备。

科学找矿除“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”的主体结构外,有关三维立体预测,立体找矿、立体勘探,智能化找矿等是科学找矿未来探索的内容。

7 认识和讨论

7.1 认识

从建立数据库,进行矿产预测,直到发现矿床,进行勘探的整个过程中都存在科学理论和技术方法提高的实际问题,我国采用科学找矿探索的战略思路,持续探索已达四十余年的探索,获取如下的新认识。

(1)科学找矿的内容随着矿产勘查程度的提高而内容不断完善,通过四十余年的探索,目前归纳为“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”;

(2)矿床成矿系列和区域成矿学理论是科学找矿的理论基础,经“新一轮普查”、“国土资源大调查”、“找矿突破战略行动”、《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》“四个勘查时段”的检验,获得地质找矿的连续突破,找矿效益不断提高,证实“三项理论”、“二个系统”、“二项技术”是实用和有效的,普遍认为是我国在矿产勘查中使用现代成矿学理论,采用高技术、在大数据平台运行,实现地质找矿突破的有效手段。

(3)资料和数据在找矿和勘探工作中始终起到基础性和继承性的作用,显示导向功能。在现代的地质找矿工作中,以数据库为基础,在大数据平台上运行操作和决策。建设的数据库必须达到矿种、矿产地、空间、时间、科研成果五方面全覆盖,在地质云平台上,按“信息论”的原理,应用“二个系统”的软件进行数据处理、综合分析,阐明区域成矿规律、锚定找矿靶区的空间位置、引领矿产勘查部署建议的制订,是实现地质找矿连续突破的资料依据和技术方法基础。

(4)成矿规律研究是阐明区域矿产形成的成矿地质构造背景、矿床形成的时、空分布规律和成矿作用演化轨迹三个方面内容,在理论上支撑了“四个勘查时段”(“新一轮普查”、“国土资源大调查”、“找矿突破战略行动、战略性矿产找矿行动”)的矿产勘查工作的实施,在今后的矿产勘查过程中,必须强化成矿规律的研究,创造新内容(王登红等,2014),为《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实施注入新的活力。

(5)成矿区带(I、II、III、IV、V)决定区域矿产和矿床的空间位置,是地质资料和数据转化为预测资源量概念的有效地质单元,在科学找矿工作中具有举足轻重的地位,I、II、III、IV、V的五级划分法(中国地质地质科学院成矿远景区划室,1991),组成了成矿规律研究的关键内容,又是最小面积、最大含矿率圈定找矿靶区的科学依据,成矿区带的级别越低,地质找矿的目标区(找矿靶区)越小,找矿效益越好,四十余年中始终是科学找矿探索和获得地质找矿连续突破的支撑点。

(6)“图”是展示多源地质资料和数据实物,说明科学找矿内容的表达方式,指导矿产勘查,记载科学找矿成果的可视化方法。编制不同尺度的成矿规律图和相关的系列图件(矿产地质图、超大型大型矿产分布图、矿产勘查部署建议图、找矿靶区优选图、区域成矿谱系图)是科学找矿实施过程中需要完成的、实物工作量巨大的基本任务,当前仍然在大数据平台上,应用MAPGIS系统完成,在《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实施过程中建议研制智能化编图软件系统,提高编图效益。

(7)“就矿找矿”和“理论找矿”是我国两套成熟的科学找矿中实用的矿产预测理论,但在地质找矿向陆、海并举,富、大(含超大型)、深矿产资源综合利用全方位发展的找矿事实面前,立体找矿(三维预测、智能化找矿、立体勘探)是《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》实现找矿新突破的有效途径,应继续进行探索研究。

(8)超大型、大型矿床的勘查是科学找矿四十余年探索的重要内容,当前实施《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》仍然是关键内容,在矿产勘查实施过程中,找准发现超大型、大型矿床找矿的切入点是摆在科学找矿和矿产勘查决策者面前的首要任务。

7.2 讨论

(1)矿产三维立体成矿规律的探讨

矿床成矿作用的四维空间特征一般用三维立体图显示。但是“X”、“Y”轴在地表可实地观察和测量,有详细描述;“Z”轴方向仅以点观察为主。两者的资料(或数据)水平极不相称(朱裕生等,2002)。由此可知,“Z”轴是推断的,有多解性,带来了深部成矿规律认识的不确定性,导致深部矿产的预测空间和勘查靶区圈定的风险增加,必然会降低勘查效益。这项科学难题今后必须攻克。

(2)科学找矿有效机制的不确定性

科学找矿有效机制涉及矿产勘查部署方案(含矿床勘探)、技术管理体制、政府的矿业政策、地勘费的来源等内容,它们都具不确定性。一般来说,

建立的有效机制只适用于某一时段的矿产勘查阶段。随时间的迁移和情况的改变,不断调整矿产勘查的有效机制是必要的。

(3)矿产预测中,本文已经涉及成矿信息的提取、浓缩、综合、转化、优选(矿产预测区优选原则是最小面积、最大含矿率)、排除无效信息等内容,跨入了“信息论”的范畴,未来的矿产勘查工作中如何与“信息论”结合,拓展应用领域是值得研究的课题。

致谢: 本文编写过程中,得到中国地质科学院陈毓川院士、矿产资源研究所王登红和肖克炎研究员三位专家的指教和帮助,依托两位专家审阅意见提高了本文的质量,论文是集体智慧的结晶,笔者予以归纳总结,在此一并致谢!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20221696, DD20221695, DD20190379 and DD20160346).

参考文献:

- P·鲁蒂埃. 1990. 全球成矿规律研究(未来到何处去找金属)[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2016. 矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 37(5): 519-527.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2020. 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, 39(5): 745-753.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 96(1): 123-130.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题[J]. 矿床地质, 34(6): 1092-1106.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 80(10): 1501-1508.
- 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 徐志刚, 任纪舜, 翟裕生, 常印佛, 汤中立, 裴荣富, 滕吉文, 邓晋福, 胡云中, 任天祥, 沈保丰, 王世称, 肖克炎, 彭润民, 钱壮志, 梅燕雄, 杜建国, 施俊法, 张晓华, 朱明玉, 徐珏, 薛春纪. 2007. 中国成矿体系和区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 朱裕生. 1993. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川. 1999a. 矿床成矿系列与成矿预测[C]//陈毓川. 当代矿产资源勘查评价理论与方法. 北京: 地震出版社: 19-25.
- 陈毓川. 1999b. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川. 2011. 实现找矿突破的探索[J]. 矿床地质, 30(5): 767-772.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, (6): 1-64.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J].

- 中国地质科学院院报, 1(1): 32-58.
- 何贤杰, 盛昌明, 孟祥舟. 2013. 新形势下矿产区划工作新机制研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 米·依·伊齐克松. 1985. 太平洋区成矿分带[M]. 北京: 地质出版社.
- 浦志伟, 朱裕生. 1993. 矿产预测中成矿信息的提取和强化[J]. 地质论评, 39(6): 508-514.
- 宋叔和. 1989. 中国矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述[J]. 地质学报, 88(12): 2176-2191.
- 王嘉玮, 朱裕生. 2019. 界面成矿探讨[J]. 中国地质, 46(1): 77-86.
- 韦昌山, 叶天竺, 陈美英, 周尚国, 方维萱, 李文良, 姚超美, 郎涛. 2020. 中国主要矿山资源潜力调查评估案例[M]. 北京: 地质出版社.
- 温家宝. 1985. 开展新一轮固体矿产普查工作[J]. 中国地质, 26(10): 1-5.
- 翁文灏. 1920. 中国矿产区域论: 地质调查所地质汇报[J]. (2): 9-24.
- 武广, 朱裕生. 2016. 成矿单元内涵及级别划分的探讨[J]. 地质论评, 62(S1): 233-234.
- 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 刘冬林. 2000. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京: 地质出版社.
- 谢家荣. 1936. 中国之矿产时代及矿产区域[J]. 地质论评, 1(3): 363-380, 389.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社: 1-138.
- 中国地质地质科学院成矿远景区划室. 1991. 成矿预测论文集[M]. 北京: 地质出版社.
- 中国地质调查局. 2010. 国土资源大调查矿产资源调查评价成果集成[Z]. 北京: 中国地质调查局.
- 中国地质调查局. 2016. 中国地质调查百年史纲[M]. 北京: 地质出版社.
- 朱裕生, 丁建华, 马玉波. 2016. 矿床成矿系列与成矿区带融合关系的探讨[J]. 地质论评, 62(B11): 85-86.
- 朱裕生, 李纯杰, 王全明, 梅燕雄. 1997. 成矿地质背景分析[M]. 北京: 地质出版: 1-143.
- 朱裕生, 王全明, 张晓华, 方一平, 肖克炎. 1999. 中国成矿区(带)划分及有关问题[J]. 地质与勘探, (4): 1-4.
- 朱裕生, 肖克炎, 马玉波, 丁建华. 2013. 中国成矿区带划分的历史与现状[J]. 地质学刊, 37(3): 349-357.
- 朱裕生, 肖克炎, 梅燕雄, 宋国瑶, 李纯杰, 阎升好, 刘亚玲, 陈郑辉, 王美玉. 2007. 中国主要成矿区(带)成矿地质特征及矿床成矿谱系[M]. 北京: 地质出版社: 1-458.
- 朱裕生, 肖克炎, 宋国瑶, 梅友松. 2000. 强化成矿规律研究, 提高“调查评价”效益[J]. 中国地质, (6): 38-41.
- 朱裕生, 徐珏, 王全明, 肖克炎, 高永峰, 庄道择, 冯京, 方一平, 陈郑辉, 宋国耀, 高兰. 2002. 阿舍勒铜锌矿床及三维定位预测[M]. 北京: 地质出版社.
- 朱裕生. 1984. 矿产资源评价方法学导论[M]. 北京: 地质出版社.
- 朱裕生. 1993. 论矿床成矿模式[J]. 地质论评, 39(3): 216-222.
- 朱裕生. 2006. 矿产预测理论——区域成矿学向矿产勘查延伸的理论体系[J]. 地质学报, 80(10): 1518-1527.

References:

- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2016. Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series(V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 519-527(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2020. Four-dimensional metallogeny in earth system and study trends of mineral deposits: A discussion on minerogenetic series (VII) [J]. Mineral Deposits, 39(5): 745-753(in Chinese with English abstract)
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 123-130.
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, WANG Ping-an. 2015. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits(IV)[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1092-1106(in Chinese with English abstract)
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong. 2006. On minerogenetic(metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, XU Zhi-gang, REN Ji-shun, ZHAI Yu-sheng, CHANG Yin-fo, TANG Zhong-li, PEI Rong-fu, TENG Ji-wen, DENG Jin-fu, HU Yun-zhong, REN Tian-xiang, SHEN Bao-feng, WANG Shi-cheng, XIAO Ke-yan, PENG Run-min, QIAN Zhuang-zhi, MEI Yan-xiong, DU Jian-guo, SHI Jun-fa, ZHANG Xiao-hua, ZHU Ming-yu, XU Jue, XUE Chun-ji. 2007. Metallogenic system and regional metallogenetic evaluation in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-1005(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, ZHU Yu-sheng. 1993. Mineral deposit models of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1999a. Metallogenic series and mineral prediction[C]//CHEN Yu-chuan. Modern theories and methods of exploration and evaluation of mineral resources. Beijing: Seismological Press: 19-25(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1999b. Prospect evaluation of mineral resources in major metallogenetic belt in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 2011. A tentative discussion on the breakthrough of ore prospecting in China[J]. Mineral Deposits, 30(5): 767-772(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, (6): 1-64(in Chinese with English ab-

- stract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-58(in Chinese with English abstract).
- CHINA GEOLOGICAL SURVEY. 2010. Integration of mineral resources survey and evaluation results (in Chinese).
- CHINA GEOLOGICAL SURVEY. 2016. Centennial history of Geological Survey of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HE Xian-jie, SHENG Chang-ming, MENG Xiang-zhou. 2013. Study on the new mechanism of mineral regionalization under the new situation[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Metallogenic Prospect Division, Chinese Academy of Geology and Geological Sciences, 1991. Proceedings on Metallogenic Prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- PU Zhi-wei, ZHU Yu-sheng. 1993. The abstraction and enhancement of metalization information in prognosis of mineral resources[J]. Geological Review, 39(6): 508-514.
- ROUTHIER P. 1990. Research on global metallogenic regularity (Where to Find Metals in the Future)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-67(in Chinese).
- SONG Shu-he. 1989. Mineral deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, HUANG Fan, WANG Yan, PEI Rong-fu. 2020. Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series (VI)[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1): 18-35.
- WANG Deng-hong, XU Zhi-gang, SHEN Ji-fu, ZHU Ming-yu, XU Jue, YUAN Zhong-xin, BAI Ge, QU Wen-jun, LI Hua-qin, CHEN Zheng-hui, WANG Cheng-hui, HUANG Fan, ZHANG Chang-qing, WANG Yong-lei, YING Li-juan, LI Hou-min, GAO Lan, SUN Tao, FU Yong, LI Jian-kang, WU Guang, TANG Ju-xing, FENG Cheng-you, ZHAO Zheng, ZHANG Da-quan. 2014. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: A review[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2176-2191.
- WANG Jia-wei, ZHU Yu-sheng. 2019. A discussion on marginal metallogenesis[J]. Geology in China, 46(1): 77-86(in Chinese).
- WEI Chang-shan, YE Tian-zhu, CHEN Mei-ying, ZHOU Shang-guo, FANG Wei-xuan, LI Wen-liang, YAO Chao-mei, LANG Tao. 2020. Case study of resource potential evaluation of major mine resources in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WEN Jia-bao. 1985. Launch a new round of solid mineral survey[J]. Geology in China, 26(10): 1-5(in Chinese).
- WU Guang, ZHU Yu-sheng. 2016. Discussion on connotation and classification of metallogenic units[J]. Geological Review, 62(S1): 233-234(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, ZHANG Xiao-hua, WANG Si-long, LIU Dong-lin. 2000. GIS evaluation system of mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- XIE Jia-rong. 1936. Metallogenic age and districts of China[J]. Geological Review, 1(3): 363-380(in Chinese).
- XIE Jia-rong. 1963. Types of deposits and metallogenic mechanism[M]. Science Press. Beijing.
- XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LI Hou-min. 2008. The scheme of the classification of the minerogenetic units in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHU Yu-sehng, XU Jue, WANG Quan-ming, XIAO Ke-yan, GAO Yong-feng, ZHUANG Dao-ze, FENG Jing, FANG Yi-ping, CHEN Zheng-hui, SONG Guo-yao, GAO Lan. 2002. Ashele massive Cu-Zn sulfide deposit and three-dimensional localization prognosis[M]. Geology Press, Beijing. 1-252.
- ZHU Yu-sheng, DING Jian-hua, MA Yu-bo. 2016. Discussion on fusion relations between metallogenic series and metallogenic belt[J]. Geological Review, 62(S1): 85-86. (in Chinese)
- ZHU Yu-sheng, LI Chun-jie, WANG Quan-ming, MEI Yan-xiong. 1997. Analysis of metallogenic geological background[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHU Yu-sheng, WANG Quan-ming, ZHANG Xiao-hua, FANG Yi-ping, XIAO Ke-yan. 1999. Some problems on division of metallogenic belts in China[J]. Geology and Exploration, (4): 1-4(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yu-sheng, XIAO Ke-yan, MA Yu-bo, DING Jian-hua. 2013. Review and status of mineralization belt study in China[J]. Journal of Geology, 37(3): 349-357(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yu-sheng, XIAO Ke-yan, MEI Yan-xiong, SONG Guo-yao, LI Chun-jie, YAN Sheng-hao, LIU Ya-ling, CHEN Zheng-hui, WANG Mei-yu. 2007. Geological feature and metallogenic pedigree of ore deposits in the major metallogenic regions (belts) in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-458(in Chinese).
- ZHU Yu-sheng, XIAO Ke-yan, SONG Guo-yao, MEI You-song. 2000. Strengthen the study of metallogenic regularity and improve the efficiency of "investigation and evaluation" [J]. Geology in China, (6): 38-41(in Chinese).
- ZHU Yu-sheng. 1984. Introduction to mineral resources evaluation Methodology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHU Yu-sheng. 1993. On mineral deposit modeling[J]. Geological Review, 39(3): 216-222(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yu-sheng. 2006. Basic theory of mineral resources assessment-Theory system between regional metallogeny to mineral Exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1518-1527(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yu-sheng. 2016. Mineral resources assessment: A new combination model of scientific research with mineral exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 90(9): 2454-2463(in Chinese with English abstract).
- ИЦИНСОН М И. 1985. Metallogenic zonation in Pacific region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).