

区域矿床成矿谱系的概念、内涵及其应用*

王登红¹, 黄凡¹, 王岩¹, 徐志刚¹, 陈毓川², 董连慧³

(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 中国地质科学院, 北京 100037; 3 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要 谱系学是一种方法论, 原义是指分析关于家族世系、血统关系和重要人物事迹的方法, 它有助于辨明人物的身份、认识事物的特征和理解事物的起源及其演变过程。研究者将其应用到自然科学领域, 提出了区域矿床成矿谱系(简称“区域成矿谱系”)的概念, 揭示出一定区域内地质历史发展过程中成矿作用的演化轨迹及其时空结构。地质历史跟人类历史一样是连续演化的, 尽管有时缺失记录, 但每一个特定空间范围内, 成矿作用也是必然在发生的, 只是其成矿的效果带有极大的偶然性, 究竟形成的是什么矿种、什么类型、多大规模的矿床等, 都取决于该空间范围内不同历史时期的成矿作用及其发育程度。区域成矿谱系相当于成矿作用的“家谱”, 即以图谱的方式记录一定时空范围内的成矿作用及其演化轨迹。此概念是在区域成矿规律研究的基础上结合矿床的成矿系列理论新进展而提出来的, 不仅充实了矿床的成矿系列理论, 并且更形象地表达了矿床成矿系列的时间顺序和空间定位规律, 有助于阐述区域成矿作用与地质构造环境之间的关系及其发生、发展的过程。由区域成矿谱系进一步提出“全位成矿, 缺位找矿”的理念, 至今已经 20 年了, 其已在实践中得到了检验和发展, 并在指导找矿的过程中发挥了积极作用。

关键词 地质学; 矿床; 成矿系列; 区域成矿谱系; 演化规律

中图分类号: P618.2

文献标志码: A

Metallogenic pedigree of regional mineral deposits: Concept, connotation and application

WANG DengHong¹, HUANG Fan¹, WANG Yan¹, XU ZhiGang¹, CHEN YuChuan² and DONG LianHui³

(1 Key Laboratory of Mineralization and Resource Evaluation, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources and Development, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract

Genealogy is a kind of methodology, originally refers to the technology of recording about family lineage, blood relations and deeds of important peoples. It helps to identify the identity of people, understand the characteristics and origin of things and their evolution. By applying the genealogy to the natural science field, the concept of metallogenic pedigree of regional mineral deposits (regional metallogenic pedigree for short) has been put forward, which is used to reveal the evolution and spatial-temporal structure of mineralization in the process of geological tectonic environment evolution in a region. Geological history, like human history, is continuous, though sometimes the historical record is missing. Therefore, the mineralization is also inevitable in every specific region, but the effect of mineralization is very accidental. What kind of mineral, what type and scale of deposit

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 42172097)和中国地质调查局中国矿产地志项目(编号: DD20221695、20190379、DD20160346)联合资助

第一作者简介 王登红, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿产资源研究。Email: wangdenghong@vip.sina.com

收稿日期 2022-08-19; 改回日期 2022-09-13。秦思婷编辑。

are formed depends on the mineralization and its development degree in different historical periods within the region. The regional metallogenic pedigree is equivalent to the “genealogy” of mineralization, that is, it records the mineralization and its evolution trajectory in a certain spatial-temporal range by pattern of atlas. The regional metallogenic pedigree is put forward based on the study of regional metallogenic regularity and the new development of metallogenic series theory, not only enriches the theory of metallogenic series theory, but also better expresses the time sequence and spatial orientation regularity of metallogenic series for mineral deposits and expounds the relationship between regional mineralization and metallogenic geological environment as well as their occurrence, development and evolution process. On the basis of the regional metallogenic pedigree, the concept of “Ore-formation in all-positions and ore-prospecting in ore-vacant-positions” was further put forward, which has been tested and developed in practice for 20 years, and played an active role in guiding the process of prospecting.

Key words: geology, mineral deposits, minerogenetic series, regional metallogenic pedigree, evolution regularity

矿床的成矿系列(简称“成矿系列”)理论自1979年由以程裕淇(程裕淇等,1979)为首的科研团队提出后,历经再论(程裕淇等,1983)、三论(陈毓川等,2006a;Chen et al., 2020)、四论(陈毓川等,2015)、五论(陈毓川等,2016)、六论(王登红等,2020)、七论(陈毓川等,2020)、八论(陈毓川等,2022),分别对成矿系列的概念及其内涵、成矿系列的组成序次等进行了详细论述,成矿系列的理论体系进一步完善(陈毓川等,2007;2022),明确了岩浆、沉积、变质、表生和非岩浆、非变质流体5类成矿作用(陈毓川等,2016),进一步强调了矿床成矿系列的矿床自然分类属性(陈毓川等,2015),初步厘定了全国的矿床成矿系列,提出了“全位成矿、缺位找矿”预测思维(陈毓川等,2007;2020;王登红等,2011),创新了“五位一体”区域成矿规律图编制方法,并将其进一步升华为研究地球系统科学的四维成矿论(陈毓川等,2020)。

在成矿系列研究过程中,研究者们逐渐认识到区域上经历的各种地质构造与成矿活动及演化,能反映出地球系统的演化(陈毓川等,2022),如在桂北地区厘定的5个时段的矿床成矿系列很好地反映了区域成矿的演化轨迹(陈毓川等,1995)。因此,借鉴谱系学的内涵,逐步引入“区域矿床成矿谱系”(简称“区域成矿谱系”)概念(陈毓川等,2001),目的是以成矿系列理论为基础,研究各类区域地质构造-成矿轨迹及其演化规律,对探索地球系统演化有着重要的科学意义。因此,本文简要回顾了区域成矿谱系概念的提出、内涵及其意义,并通过研究实例进一步阐明区域成矿谱系在示踪成矿演化方面的重要性,

以期有助于深入认识和研究区域成矿规律、探讨地球系统演化过程及其成因、指导找矿勘查部署。

1 概念的提出

在商务印书馆出版的第4版《新华词典》中,“谱”字的其中一条释义为按照事物类别或系统编成的一种图案、表册或书本等,“谱系”可泛指物种发展变化的系统。一个区域内的成矿作用均决定于本区域地球层圈间的相互作用,后期的成矿作用都是在前期成矿地质环境及物质组成的基础上进行的;先后不同时期的成矿作用,在成矿背景上必然具有区域构造演化方面的继承性,并表现出成矿物质间的内在联系,存在一定程度的“亲缘”关系和演化趋势。因此,为了更好地阐述这种演化关系,陈毓川等为首的科研团队在21世纪初全国第二轮成矿系列理论研究、应用过程(1999~2013年)中借用了“谱系”的词义,提出了区域成矿谱系概念,用于指一个区域内地质构造环境演化过程中成矿作用的演化及时空结构(陈毓川等,2001;2003;2007;王登红等,2002;2005;2007)。区域成矿谱系可揭示成矿物质在区域地质构造不断演化过程中分散与集中、组合与变化、区域成矿作用的继承性或突发性等规律,是区域成矿学的重大问题,也是研究区域壳幔作用及其演化的重要内容(陈毓川等,2003)。“九五”、“十五”期间,第二轮全国成矿远景区划工作和全国成矿体系与区域成矿评价研究等工作均采用了矿床成矿系列的概念作为成矿远景分析的理论基础,对促进成矿预测工作起到了积极作用(陈毓川,

2007;王登红等,2011)。

区域成矿谱系研究也是一种方法学研究,是以区域地壳演化历史为背景,以区内众多重要矿床成矿基本事实为基础,配合成岩成矿和相关地质事件年龄精测,通过对区域内成矿作用的深入分析、广泛对比、系统总结、全面归纳,以矿床成矿系列为基本单位建立时间坐标上的成矿作用历史演化序列,揭示其空间分布规律,最终达到发展矿床地质理论和指导勘查找矿的目标。

2 内涵和表达

如上所述,区域成矿谱系是以矿床成矿系列为基本组成单元来表达成矿演化及时空结构的,一个完整的区域成矿谱系涉及的基本内容包括成矿年代学、区域成矿旋回、成矿地质环境、成矿谱系图等诸方面的内容。

2.1 以矿床成矿系列为基本单元

地球上各个区域,从形成地壳至今都先后经历了不同时期的地质构造发展历史,与各地质历史发展阶段相伴随均有程度不等、性质不同的成矿作用发生,并形成不同的矿床成矿系列(陈毓川等,2007),如华南地区经历了6个构造时段的地质构造演化,尤其是在中生代形成了6个构造-岩浆-成矿带(地质构造环境),各成矿带有其特征性的岩浆岩组合和相应的矿产组合,形成了5个矿床成矿系列(陈毓川等,2012;2014)。也就是说,矿床成矿系列是一定地质历史时期的产物,与一定的构造旋回有关,而地质构造演化具有多旋回的特点,矿床成矿系列也必然具有多旋回的特点。

区域成矿谱系主要是研究一个特定的区域内经历的全部地质历史过程中成矿作用的演化过程及成矿产物的时空分布、内在联系的规律等,并探讨构成一个区域内的各个成矿旋回和其中某个成矿旋回内形成的矿床和矿床成矿系列之间的关系。为了简要地反映成矿演化的特点,以矿床成矿系列为基本单位是可行的,也是必要的。区域成矿谱系具有不同的规模,大可至整个地球、亦可是不同级别的成矿区带,但都强调大地构造的过程与成矿历史的对应性。不同区域因各自具有不同的壳幔结构及地质构造发生、发展和演化过程,故矿床成矿系列的性质和演化历史也各具特色,以此为基础建立的区域成矿谱系也各具特色。

2.2 突出时间性

区域成矿谱系从演化的观点出发,强调时间的重要性。地质学研究大约45亿年历史中地球的发展和演化,在此期间,生命在演化、大气圈在演化、水圈也在演化,成矿作用肯定也是在演化的。研究成矿作用在地质历史中的演化不只是矿床学本身的需要,同时可提供关于地球演化的有用信息和研究这些信息的一种重要手段。区域地质历史中的成矿作用演化亦反映了地质构造环境的演化,涉及地幔、地壳、水圈、大气圈乃至生物圈环境的演化,而矿床正是在这些环境中形成的。

矿床赋存在特定的成矿地质限定的时空范围内,其地质背景有明显的时间坐标,通常用地层、岩浆岩、变质岩和矿床形成的时代和地质构造旋回确定矿床形成的区域成矿旋回;当前矿床的形成时间需应用同位素测定的年龄作为矿床形成的时代依据;矿床形成过程中蚀变作用的形成时代,与矿床形成的时代接近,亦需应用同位素测定年龄值为依据;矿床形成后的变形变质作用,改造和二次富集作用的年龄均按同位素测定的年龄值判定。上述多种年龄值中,成矿旋回、矿床形成年龄是建立区域成矿谱系的先决条件。

划分区域成矿旋回通常与构造旋回对应,在当代区域构造研究工作中,中国的构造旋回划分为十二个旋回和十三个亚旋回(任纪舜等,1999),由老到新具体的区域成矿旋回是迁西旋回、阜平旋回、五台旋回、吕梁旋回、四堡旋回、晋宁旋回、震旦旋回、加里东旋回(早、晚2个亚旋回)、华力西/海西旋回(早、中、晚3个亚旋回)、印支旋回(早、晚2个亚旋回)、燕山旋回(早、中、晚3个亚旋回)、喜马拉雅旋回(早、中、晚3个亚旋回)。根据同位素年龄测定值,矿床可以找到在成矿旋回中的相应位置。

2.3 强调区域性

区域成矿谱系具有区域性特点,一是强调不同尺度或不同地区的区域成矿谱系各不相同,但都应是该区域地球层圈相互所用的结果,只是不同尺度或不同地区的区域成矿谱系的表述方式和详略程度有所不同;二是强调同一区域在不同的地质演化阶段具有不同的构造环境或成矿地质环境特点,如鲁西地区在新太古代后期的前阶段是裂陷拉张环境,形成条带状硅铁建造型的铁矿床,后阶段则随着地槽的封闭而进入挤压环境,形成的是与变质作用有关的金矿床,即由一种成矿地质环境演变成另一种

新的成矿地质环境,标志着从一种区域成矿作用转化为新的区域成矿作用,原有的矿床成矿系列的结束和新的矿床成矿系列的形成。在特定的地质历史时间段内,若干个成矿地质环境连续转换,与成矿地质环境相对应的矿床成矿系列也出现连续地转变,这种转换反映了地质历史的演化进程。将成矿地质环境与相应的矿床成矿系列时间顺序叠置起来,就能鲜明地展现出区域成矿作用的演化序列。由此可知,成矿地质环境和与其对应形成的矿床成矿系列是区域成矿谱系的关键内容。

成矿地质环境是划分区域成矿作用类别和矿床成因类型的重要条件,也是随地质历史演化呈现的区域成矿作用的总貌,通常是按地质时代为“轴心”划分区域成矿地质环境的类别,如“中生代宁羌火山岩盆地”、台湾东部新近纪岛弧和黔川鄂下二叠世碳酸盐台地等(陈毓川等,2007)。就成矿地质环境而论,不同成矿地质环境赋存的矿床类型各异;同类矿床一般都是产出在特定而相似的成矿地质环境中。如陈毓川等(2007)论述了与海相火山喷发-沉积作用有关的Fe、Cu、Zn、Pb、Ag矿床成矿系列类型与成矿地质环境之间的关系,提出6类成矿地质环境出现不同岩类的海相火山喷发作用与铁、铜、锌、铅、银矿床之间的密切关系,阐明了成矿地质环境、海相火山喷发作用和成矿作用之间的联系性(表1)。

2.4 创新表达方式

区域成矿谱系创新表达方式,将成矿单元作为横坐标,成矿旋回的历史顺序和成矿地质环境变化

顺序作为纵坐标(分列纵坐标的两侧),中间列出与成矿旋回和成矿地质环境相对应出现的矿床成矿系列,构建成矿床成矿谱系图。这种表达形式改变了已有单纯应用成矿规律图平面表达,文字叙述的习惯方式,增添垂向地质历史的演变顺序,构造旋回的依次更迭、成矿单元的横向关联和区域成矿作用相互制约等方面的有机联系,将区域成矿规律内容以四维图谱的方式展示出来。

不同成矿区带内在不同成矿旋回或同一成矿旋回中,具有相似成矿地质构造环境的时期,可形成相似的矿床成矿系列及同一个矿床成矿系列类型。他们之间的共性多,个性不明显,则区域成矿作用的相似性较高,赋存有相似矿床的可能性大;若相反,则相似性低或不相似,他们之间的共性少,突出个性则可能属另一类区域成矿作用或可能出现新的矿床成矿系列。通过对各个区域成矿谱系的对比,可较为清晰地突出不同成矿区带(成矿地质环境),不同时间段(成矿旋回)的区域成矿作用的“共性”和“个性”,以深化对区域成矿规律认识的探索,进而对指导成矿预测有所启发。

3 应用举例

矿床成矿系列和区域矿床成矿谱系的研究,不但具有地质理论意义,而且可用于指导矿产勘查工作。

3.1 中国大陆成矿体系

陈毓川等(2006b)指出,成矿体系是各个地质历

表1 成矿地质环境、海相火山喷发作用和成矿作用关系

Table 1 The relationship between metallogenic geological environment, marine volcanic eruption and mineralization

成矿地质环境		氧化物相		硫化物相	
构造背景	喷发作用	矿种	实例	矿种	实例
洋中脊	基性-超基性岩类	Fe、Cr和PGE、Au、Ag的自然物及其金属互化物	西藏罗布莎、新疆萨尔托海、青海大德尔吉铬铁矿床	Cu、Zn、Co、(Au、Ag)	甘肃石居里、筏子坝铜锌(金银)矿床,青海德尔尼铜镍钴矿床
大洋盆地	基性火山岩类	Fe、Mn结核	太平洋盆地		
岛弧和弧后盆地	角斑岩类	Fe	海伦山铁矿(加拿大)	Pb、Zn、Ag	四川呷村、阿勒泰可可塔勒铅锌矿
	细碧岩为主	Fe、Co	海南石碌铁铜矿床	Cu、Co	别子型矿床
大陆裂谷	细碧岩	Fe、Cu	陕西铜厂铁铜矿床	Cu、Co	中条山落家河铜钴矿
陆缘裂谷	细碧岩+碎屑岩+碳酸盐	Fe、Fe+Cu	云南大红山和甘肃陈家庙铁铜矿	Cu-Fe和Pb-Zn、Ag	云南东川式铜矿和老厂式铅锌铜银矿
	双峰式火山岩	Fe、Cu	辽宁弓长岭铁矿、内蒙古谢尔塔拉铁(锌)矿	Cu-Zn和Cu-Pb-Zn	新疆阿舍勒铜镍矿床、甘肃白银厂铜铅锌矿床
活动大陆边缘	细碧角斑岩系+钠质火山岩	Fe-B、Fe	辽宁翁泉沟硼镁铁矿和阿尔泰阿巴宫铁矿	Cu-Zn和Pb-Zn	辽宁红透山铜锌矿

注:成矿地质环境是按板块成矿学理论划分的;资料引自陈毓川等,2007。

史时期所形成的矿床及其与成矿作用密切相关的地质要素所共同构成的整体,且具有明显的阶段性、多期叠加和成矿演化特征。中国大陆成矿体系可以理解为,目前在中国大陆地壳漫长的形成、发展过程中,随着壳幔相互作用、变形和地壳海陆变迁而形成的成矿作用及其产物的有机整体及其在四维时空中的分布规律(陈毓川等,2006;王登红等,2011)。

在“中国成矿体系与区域成矿评价”项目执行(1999~2004年)期间,中国首次厘定出11个地质时代的214个矿床成矿系列,434个矿床成矿亚系列,978个矿床式,初步归纳出38个矿床成矿系列组和24个矿床成矿系列类型。考虑到矿床成矿系列涵盖了成矿时代、构造环境、地质成矿作用及所形成的矿产资源4个要素,比单个的零散矿床或单一矿床类型拥有更加丰富而明确的内涵,因此,以矿床成矿系列为基本组成单位建立了中国大陆成矿体系,再以中国大陆从“陆核→古陆→古陆边缘增生(通过碰撞、对接等方式)→中国大陆基本形成→大陆形成之后的活化”这样一条主线来探索中国大陆成矿体系的形成过程(图1)。也就是说,以矿床成矿系列为基本单位来描述的中国大陆成矿体系是站在历史的高度来探讨中国大陆的演化轨迹,揭示在中国大陆形成、发展过程中成矿作用的轨迹,这也正是区域矿床成矿谱系所揭示的内涵。总之,以成矿地质环境为基础,通过时间和空间2条主线对不同地质历史时期和不同成矿区带中成矿作用的系统研究,再通过对中国矿床成矿系列的深入研究,来探讨中国大陆成矿体系形成之奥秘,揭示区域成矿规律,进而达到指导成矿预测并对全国矿产资源潜力进行评估的目的。

3.2 阿尔泰地区

根据已有的研究成果,阿尔泰地区按照地质演化与成矿特征的矿床成矿系列划分方案如表2。其中,与海西期构造-岩浆作用有关的铁、铜、镍、铅、锌、金、稀有金属矿床成矿系列又可以进一步分为5个成矿亚系列,这5个亚系列分别形成于阿尔泰海西期造山过程的不同阶段或同一阶段的不同的地质构造部位,因而相互之间具有内在的成因联系,他们共同构成了海西旋回的成矿谱系。因此,不同造山旋回及其不同阶段及不同部位造就了不同的矿床成矿系列及亚系列,反之,不同的矿床成矿系列及其亚系列同样可以指示不同的构造演化阶段与构造部位。

阿尔泰地区的区域成矿谱系,可以根据不同的

尺度来表述,如整个阿尔泰成矿省(图2)、中国阿尔泰(图3)、中国阿尔泰的海西旋回(图4),其中,海西旋回大致经历了如下阶段:

I 海西构造旋回初期,西伯利亚陆块西南缘裂解张开;

II 海西构造旋回早中期400~380 Ma拉张阶段,在裂陷带内发生海相双峰式火山活动及成矿作用,形成第1成矿亚系列——火山岩型铁矿及块状硫化物铜铅锌金银钨矿床组合,包括蒙库铁矿、阿巴宫铁矿、阿舍勒铜铅金银钨矿床、可可塔勒铅锌矿床等;

III 海西构造旋回中期370~330 Ma挤压阶段,裂陷带闭合、褶皱,在北阿尔泰地壳深处再形成深变质花岗岩穹隆体并伴有伟晶岩型稀有金属-白云母矿床——第2成矿亚系列,包括大桥-库威、虎斯特等地的伟晶岩型含稀有金属白云母矿床,其中,萨尔朔克北白云母矿床中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为369.78 Ma,并有印支期(224.09 Ma)岩浆作用影响的记录;

IV 海西构造旋回中晚期320~280 Ma拉张阶段,沿碰撞带形成深断裂,有地幔熔浆上侵,形成与基性-超基性岩有关的铜镍成矿亚系列(第3亚系列,包括喀拉通克1号、2号、3号等含矿岩体)和与偏碱性花岗岩有关的锡铜金成矿亚系列(第4亚系列,包括萨惹什克锡矿、塔斯特金矿、索尔库都克铜矿等);

V 海西构造旋回晚期300~250 Ma挤压阶段,山前断裂构造剪切带,形成与花岗岩类有关的金矿成矿亚系列(第5亚系列,包括多拉那萨依、赛都等金矿)。

阿尔泰成矿省经历了多旋回的造山过程,每个不同的旋回分别形成不同的成矿系列,这些成矿系列各不相同但又相互联系,具有成生演化的历史必然性。在一个典型的阿尔泰式的造山过程中,伴随早期裂陷拉张过程形成的是与海相火山作用有关的氧化物型铁矿床和块状硫化物型铜锌、铅锌多金属矿床;随着裂陷槽或裂谷盆地的闭合,在挤压应力作用下,伴随深变质作用和花岗岩化可以形成伟晶岩型稀有金属矿床——白云母矿床;随着山脉的隆升,一些大型构造剪切带和深达地幔的断裂带也分别在不同的部位形成,并伴随有剪切带型金矿(与花岗岩类有关)、铜镍硫化物矿床(与超基性岩类有关)、锡铜金矿床(与偏碱性岩类有关)的形成,这就构成了一个海西旋回的区域成矿谱系。

3.3 南岭地区

(1) 成矿单元划分

由于不同作者对南岭地区的界定范围不一致,

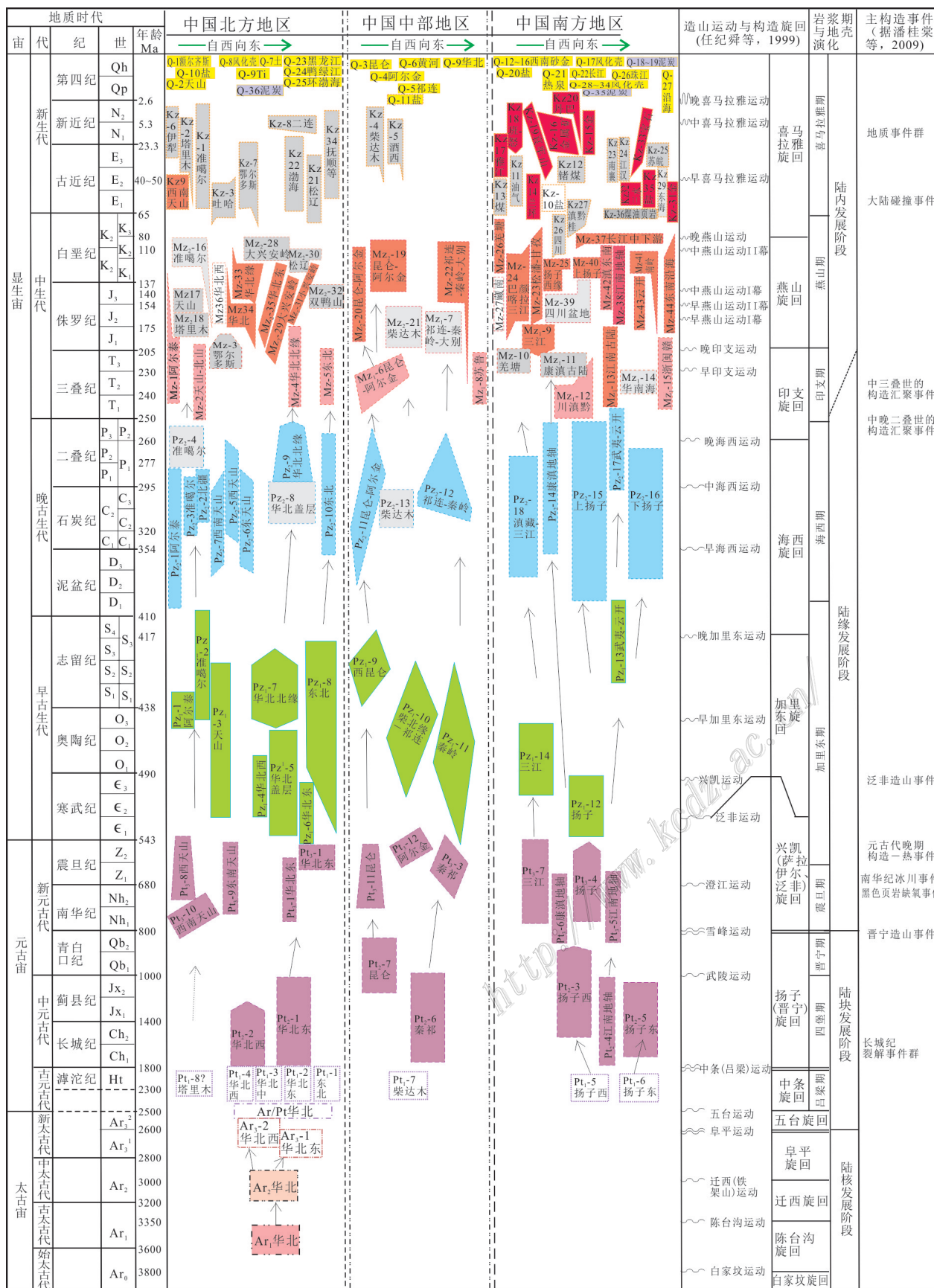


图1 由矿床成矿系列构建的区域成矿谱系以标示中国成矿体系(据陈毓川等,2007)

岩浆期与地壳演化阶段的划分根据程裕淇等,1994;矿床成矿系列或矿床成矿系列组以编号简称标示,水平方向标示着主要是沉积成因矿床成矿系列,垂直方向者为岩浆成因成矿系列

Fig.1 Regional metallogenic pedigree constructed by metallogenic series for mineral deposits is used to indicate the metallogenic system of China (after Chen et al., 2007)

The division of magmatic stage and crustal evolution stage is according to Cheng et al., 1994; the metallogenic series for mineral deposits or their groups denoted by numbered abbreviation. The horizontal direction indicates mainly sedimentary metallogenic series, and the vertical direction indicates magmatic metallogenic series

表 2 阿尔泰地区矿床成矿系列的划分

Table 2 The classification of minerogenetic series for mineral deposits in the Altay region

成矿系列组合	成矿系列	成矿亚系列	矿床式
变质作用成矿系列组合	A 前寒武纪与沉积变质作用有关的硅铁建造成矿系列		
	B 加里东期与变质-岩浆作用有关的矿床成矿系列	与加里东晚期变质花岗岩有关的稀有金属、白云母矿床成矿亚系列	那森恰式 也拉曼式
岩浆作用成矿系列组合	C 与海西期构造-岩浆作用有关的矿床成矿系列	C1-海西早期裂陷拉张过程中与火山作用有关 Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Ag 矿床成矿亚系列	蒙库式、阿舍勒式、可可塔勒式
		C2-海西期挤压造山过程中与岩浆作用有关伟晶岩型稀有金属、白云母、宝石矿床成矿亚系列	大桥-库威式、库卡拉盖式
		C3-海西中晚期造山期后准噶尔盆地北缘及阿尔泰地区与幔源偏碱性岩浆作用有关的锡、金、铜矿床成矿亚系列	萨惹什克式、塔斯特式、索尔库都克式
		C4-海西中晚期造山期后伸展阶段与幔源基性超基性岩有关 Cu-Ni-PGE 矿床成矿亚系列	喀拉通克式
		C5-海西晚期造山期后与构造-岩浆活动和韧性剪切带有关的岩金矿床成矿亚系列	多拉纳依式、赛都式、萨尔布拉克式
	D 印支期—燕山期与造山后碱长-偏碱性岩浆作用有关稀有金属、白云母、宝石、贵金属、有色金属矿床成矿系列	D1-与印支期花岗岩有关的稀有金属、白云母矿床成矿亚系列	大喀拉苏式、将军山式、小喀拉苏式
		D2-与燕山期花岗岩有关的稀有金属、白云母、宝石矿床成矿亚系列	可可托海式、阿祖拜式
		D3-与燕山期岩浆作用有关的贵金属、稀有金属矿床成矿亚系列	阿克提什坎式
沉积作用成矿系列组合	E-1 古生代能源矿产成矿系列	准噶尔盆地北缘古生代地层中的煤	扎河坝式
	E-2 中生代能源矿产成矿系列	阿尔泰山间盆地中生代沉积建造中的煤	北淮式
	E-3 新生代冲积砂矿床成矿系列	近现代河湖沉积相中的金矿床	红墩式
流体作用成矿系列组合	新生代盆地流体铀成矿系列	砂岩中受氧化还原条件制约的含铀流体形成的铀成矿系列	顶山式

注:流体作用成矿系列组合是指与变质、岩浆、沉积作用无直接联系的地下气液流体形成的这部分矿床组合;目前难以归入变质、岩浆或沉积作用成矿系列组合的一些矿床,亦暂列入流体作用成矿系列组合。

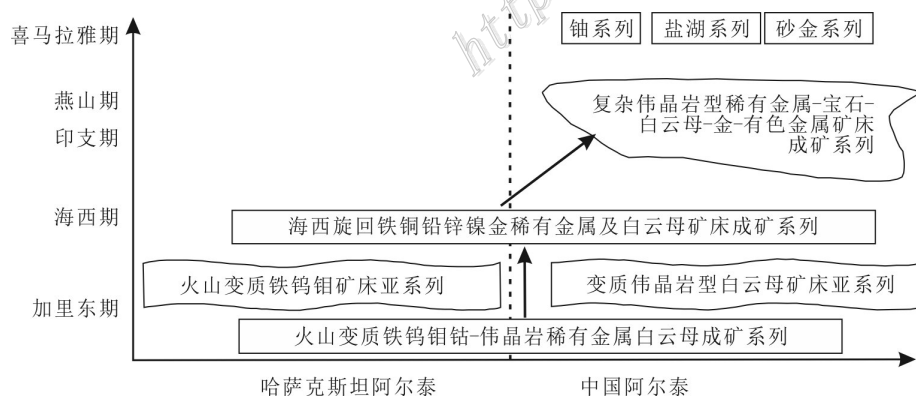


图 2 阿尔泰成矿省区域成矿谱系

Fig.2 The regional metallogenic pedigree of the Altay metallogenic province

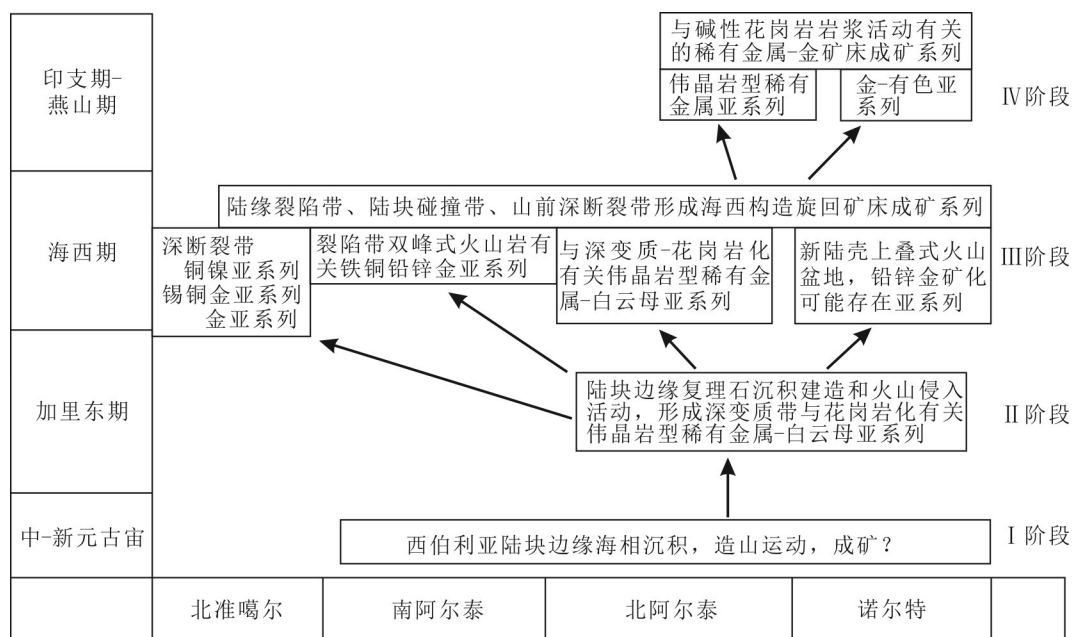


图3 中国阿尔泰成矿亚省的区域成矿谱系

Fig.3 The regional metallogenic pedigree of Altay metallogenic sub-province in China

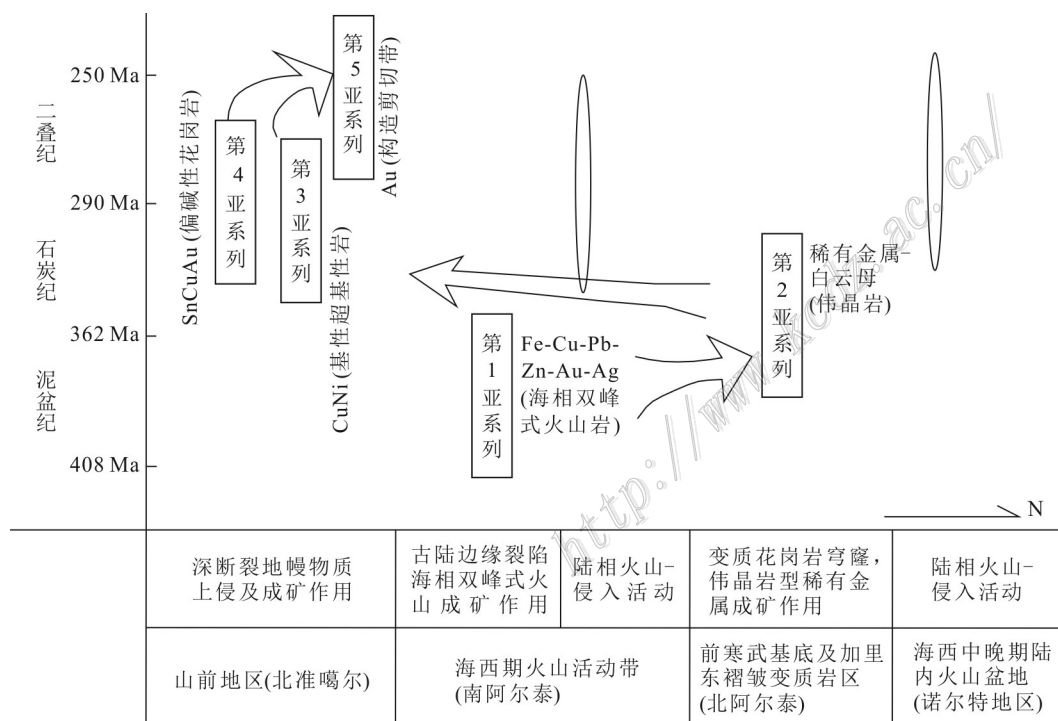


图4 中国阿尔泰海西旋回区域成矿谱系

Fig.4 The regional metallogenic pedigree showing the Hercynian cycle of mineralization in the Altay, China

导致南岭地区的矿床成矿系列划分存在一定的差异性。如王登红等(2022)在编制《中国矿产地质志·南岭卷》时,对南岭地区范围的描述采用了

《中国成矿区带划分方案》中对南岭成矿带的限定范围,与前人界定的南岭成矿区范围明显不同(陈毓川等,1989),主要为包括桂东南、湘东、粤北、

赣南的一个近似菱形的区域内(其长轴呈北东向而非东西向),再进一步根据出露地层主要是下古生界还是上古生界(反映的隆起还是坳陷构造)而分为南岭东段(Ⅲ-83-①赣南隆起,包括湘东南隆起,诸广山隆起和九连山隆起)、南岭中段(Ⅲ-83-②湘东-粤北坳陷)和南岭西段(Ⅲ-83-③桂东大瑶山隆起,含北侧海洋山次级凸起和西南延伸之西大明山隆起)3个成矿亚带(图5)。

(2) 矿床成矿系列划分

前人对南岭地区的矿床成矿系列的研究已经比较系统,如陈毓川(1983)讨论了华南和与燕山期花岗岩有关的稀土、稀有、有色金属矿床成矿系列,并相应建立了成矿模式,随后讨论了华南地区与中生代岩浆作用有关的5个矿床成矿系列,分别对应于不同的成矿构造背景(陈毓川等,1989;2012);陈毓川等(1989)进一步将南岭地区与花岗岩类有关的矿床划分为5个矿床成矿系列、6个亚系列、21个矿床式。由于《中国矿产地质志》研编时强调了“矿

种、矿产地和空间分布”全覆盖的原则,而不再只是以典型矿床为主。因此,王登红等(2022a)以《中国成矿体系与区域成矿评价》(陈毓川等,2007)中矿床成矿系列厘定方案为基础,结合大量新发表的同位素年龄数据,重新梳理并厘定了南岭成矿带的矿床成矿系列划分方案,划分为19个矿床成矿系列、30个亚系列、74个矿床式,较以往有了很大变化,如新增了华南第四纪热泉、热水、地下水及相关矿产矿床成矿系列(编号Q-40)等(图6)。

(3) 区域成矿谱系

以王登红等(2022a)新厘定的南岭成矿带矿床成矿系列为基础,建立南岭成矿带及邻区的区域成矿谱系(图6),以清晰地反映南岭地区的成矿作用、时空结构及演化规律。作为华南成矿省的一部分,南岭成矿带可能也经历了早前寒武纪克拉通(华夏古陆)形成、中-新元古代古陆裂解的地质历史发展过程,志留纪末的加里东运动发生褶皱、造山,使之与扬子陆块拼接,华南陆块固结阶段;早古

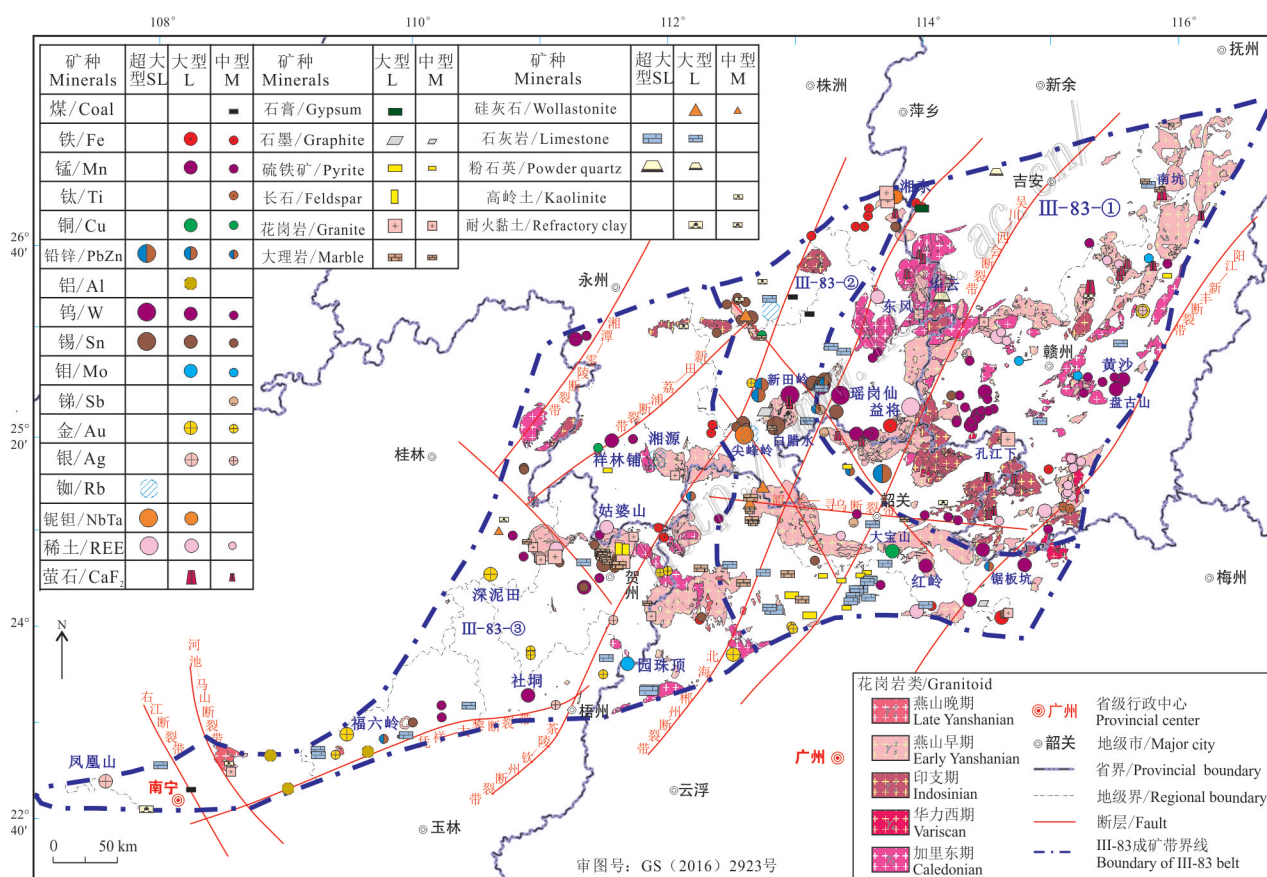


图5 南岭成矿带界定范围及大中型矿床分布简图

Fig.5 Delineation range of Nanling metallogenic belt and distribution of large and medium-sized deposits



各矿床成矿(亚)系列引用自《中国矿产地质志·南岭卷》(王登红等, 2022); 虚线框表示该系列主体不在南岭成矿带范围内; 底部的成矿单元向南、向北、向东、向西4个方向均有拓展, 并不严格局限于南岭成矿带及其邻区

Fig.6 The regional metallogenic pedigree in the Nanling metallogenic belt and its adjacent areas

Each metallogenic (sub-) series for mineral deposits are quoted from the volume of Nanling of "Annals of Geology of Mineral Resources of China" (Wang et al., 2022). The dotted box indicates that the main body of the series is not within the range of Nanling metallogenic belt. The metallogenic units at the bottom bar are not strictly confined to the Nanling metallogenic belt and its adjacent areas, but extend in four directions:

South, north, east and west

生代在这基底上沉积了以海相为主的活动型沉积, 进入华南大陆形成阶段; 印支运动后, 华南大陆构造岩浆活化, 并进入滨太平洋活动发展阶段。

南岭成矿带区域成矿作用在早古生代之前不发育, 但在扬子陆块形成了与古元古代海相火山变质作用有关的矿床成矿系列, 与新元古代火山-热水-沉积作用有关的磷、Fe、Mn矿床成矿系列组, 均波及南岭成矿带, 以铜锣塘式受变质型铁矿为代表, 但规模不大, 其初始成矿与海相火山作用有关。加里东运动导致裂谷海盆闭合造山、同时有大量花岗岩浆侵入。加里东晚期, 在武夷山隆起区及其周缘形成了与加里东运动有关的W、Sn、Nb、Ta、Cu、Au、Be、白云母矿床成矿系列(Pz₁-13)。

在整个晚古生代, 华南地区处于海陆过渡并转化的构造演化格局, 不同时段、不同构造环境中形成的沉积矿产是不同的, 分别形成不同的成矿亚系列和矿床式。南岭成矿带在晚古生代由加里东运动之后的陆相环境演化为海相环境再到印支运动之后转为陆地, 以晚石炭世海域面积最大, 形成的沉积矿产也最丰富, 构成了下扬子及华南与晚古生代沉积作用有关的Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、V、硫铁矿、重晶石、石膏、煤、黏土、碳酸盐岩矿床成矿系列(Pz₂-16), 代表性的矿床式有封开式水泥用灰岩(白沙、大冲; D₂₋₃)、英德式硫铁矿(红岩、西牛; D₂)、大坪式铁矿(D₂)、乌石山式石膏矿(C₁)、翁源式碳酸盐岩矿床(将军屯, C₂₋₃)、永来式煤矿(白沙, P₂-T₁)等。

晚三叠世一早白垩世为燕山期由伸展到强烈陆内造山时期, 表现为强烈的褶皱、断裂和大规模的钙碱性岩浆活动, 成矿物质高度活化, 导致大规模内生成矿作用的发生, 形成了南岭与燕山期中浅成花岗岩类有关的有色(稀土)、稀有、铀、贵金属、石墨、大理岩等矿床成矿系列, 主要包括南岭东亚带(湘东-赣南-粤北-闽西)与燕山期花岗岩类有关的W、REE、Nb、Ta、Mo、Bi、Sn、Ag、Au、U、萤石矿床成矿亚系列(Mz₂-41¹)和湘粤桂(南岭中亚带为主)海西期—印支期拗陷区与燕山期花岗岩类有关的W、Sn、Nb、Ta、Be、Rb、

Bi、Mo、Cu、Pb、Zn、Ag、Fe、U、萤石、硼、水晶、石墨、硫、硅灰石、红柱石、大理岩、花岗岩矿床成矿亚系列(Mz₂-41²), 表现为燕山早期成矿大爆发。

晚白垩世—第四纪(即燕山运动末至喜马拉雅运动时期), 在印度和欧亚板块作用下, 使华南大陆向东南部离散, 与造山后的松弛联合, 陆块强烈裂陷, 出现东南沿海成盆、陆缘造海的重要地质事件, 但南岭成矿带本身以陆内块断隆升为基本构造格局, 风化作用强烈, 形成南岭独具特色的风化壳离子吸附型稀土矿床及高岭土矿床等表生成因的矿床成矿系列。

3.4 昆仑-阿尔金成矿带锂等稀有金属的找矿实践

昆仑-阿尔金成矿带是中国中部秦祁昆成矿域(有的学者也称为中央造山带)西部的重要成矿单元(图7), 在空间上位于塔里木盆地与青藏高原之间, 在时间上经历了太古宙(?)经元古宙、早古生代、晚古生代、中生代到新生代的漫长演化历史, 而且, 不同的历史时段, 区域内所发生的地质事件和成矿作用显著不同, 十分复杂。但是, 该区域山高路险, 自然环境险恶, 基本属于无人区, 地质工作程度极低, 如何在这样的区域内开展找矿工作部署, 并付诸实施呢?

在早期的矿床成矿系列研究中, 根据昆仑山产稀有金属、阿尔金产白云母的简单资料, 曾经提出存在“昆仑新元古代构造旋回Cu、Pb、Zn、稀有金属、云母、水晶、宝石硫矿床成矿系列组”及“与花岗伟晶岩有关稀有金属、云母、水晶、宝石矿床成矿亚系列”, 全国统一编号为Pt₃-11³(陈毓川等, 2007), 但没有深入研究。随着四川甲基卡伟晶岩型锂矿的找矿突破, 西昆仑的大红柳滩也被高度重视并取得新突破, 并且都形成于印支旋回向燕山旋回的构造转折时期, 而阿尔金是否也存在类似的成矿事件呢? 经过2018年以来在新疆砂里沟、吐格曼、瓦石峡等地的找矿实践, 不但证实阿尔金也存在广泛发育的伟晶岩型稀有金属矿床, 而且是多旋回、多期次的, 尤其是发现吐格曼存在460 Ma、吐格曼北存在468~454 Ma的稀有金属成矿事件, 填补了秦祁昆成矿域加里东期伟晶岩型矿床成矿(亚)系列之空白, 其意义重大, 不

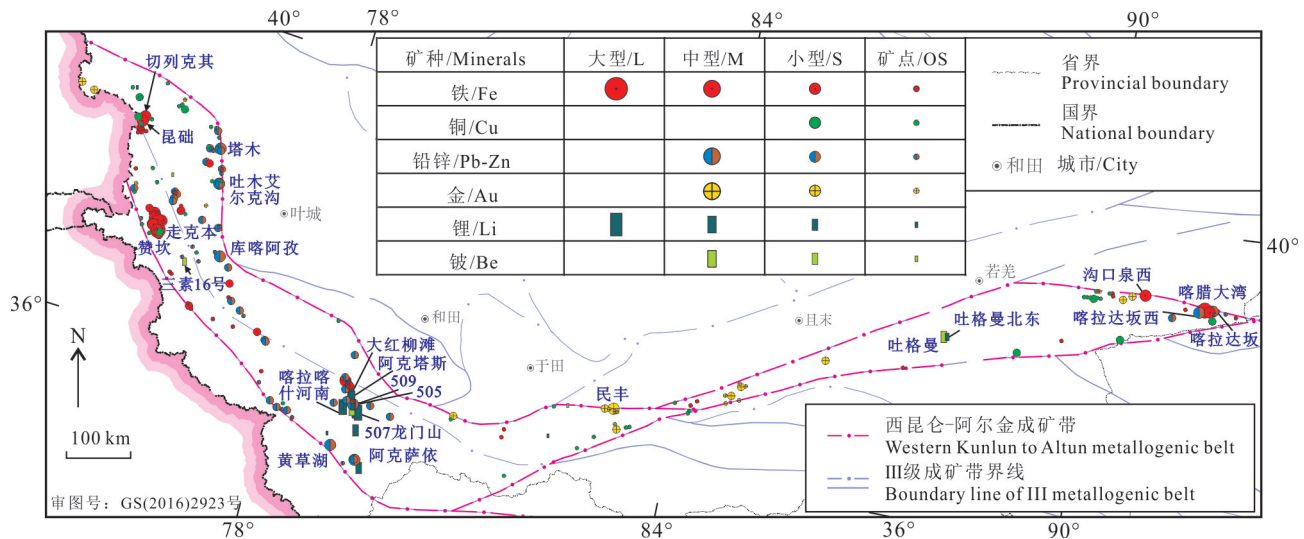


图7 西昆仑-阿尔金 Fe-Pb-Zn-Au-稀有金属成矿带主要矿产地分布图(改自王岩等, 2006)

Fig.7 Distribution map of western Kunlun to Altun Fe-Pb-Zn-Au-Rare metals metallogenic belt(modified after Wang et al., 2006)

仅仅是发现了新的矿产地,更重要的是,阿尔金成矿带的区域成矿谱系得以完善,成矿演化轨迹更加清晰,部署区域地质找矿工作的依据更加充分,带动了近年来阿尔金找矿的区域性展开与突破(王岩等, 2016;王登红等, 2022b)。

可以预测,新疆南部从西昆仑到阿尔金,从元古代到新生代,以锂为主的稀有金属成矿谱系是客观存在的,并且向西可以延伸到境外的阿富汗等地,向东延伸到青海甚至甘肃、陕西、河南等地。因此,阿尔金加里东旋回伟晶岩型稀有金属成矿(亚)系列的确认,类似于阿尔泰山成矿省中加里东旋回伟晶岩型矿床成矿(亚)系列的确认,将成矿历史追溯到更加久远,而不只是局限于燕山期、印支期和海西期,极大地拓展了找矿思路和工作部署的空间,按照“全位成矿,缺位找矿”的思路可以通过以点带面的方式来部署区调和矿调工作。

4 结 语

区域成矿谱系的概念从提出的那一天起就受到广大矿床地质学家的重视。首先起源于桂北地质区域成矿演化关系探讨,并在新疆阿尔泰山地区进行了探索研究,制作了首个矿床成矿谱系图,以后相继在各省、各成矿区带的矿床成矿系列研究中,应用区域成矿谱系的思想来阐述矿床的成矿规律。可以说,区域成矿谱系的研究创新了区域成矿规律研究的表达方式,从四维角度完整地刻画了区域成矿作用的

演化规律,从更高层次上反映成矿演化过程和多旋回成矿特点,增强了人们对成矿作用认识的能力,以启迪找矿思维,开拓找矿思路,提高找矿效果。

需要说明的是,区域成矿谱系有不同尺度的表述方式,详略程度差异甚大。但无论哪种方式,均突出了成矿单元范围内的矿床形成规律,不同地质历史时期内矿床的成矿特征、演化顺序和相互关系,并将矿床形成的时空关系用“图谱”的形式展示出来。另一方面,区域成矿谱系的研究基于矿床成矿系列研究,这比传统的单一研究矿床的时空分布规律具有更大的难度,因而不可避免地带有主观性和历史局限性,但却是在不断地逼近对于成矿作用本质的认识,对于揭示客观规律和在找矿中发挥主观能动性均有重要意义。

References

- Chen Y C. 1983. Minerogenic series of Re-Rare metal non-ferrous metal deposits related to Yanshanian granites in South China[J]. Mineral Deposits, (2): 15-24 (in Chinese).
- Chen Y C, Pei R F, Zhang H L, Lin X D, Bai G, Li C Y, Hu Y J, Liu G G and Xian B Q. 1989. The geology of nonferrous and rare metals related with the Mesozoic granitoid in the Nanling region[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-508(in Chinese).
- Chen Y C and Mao J W. 1995. Metallogenic series of ore deposits and metallogenic evolution through geological history in North Guangxi[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-433(in Chinese).
- Chen Y C, Wang D H, Wang P A and Mao J W. 2001. Progress and e-

- examples in the study of metallogenic series and metallogenic pedigree of ore deposits: concepts, advances and trends[A]. China Geological Survey. Technical papers on theory and method of mineral resources investigation and evaluation[C]. 25-33(in Chinese).
- Chen Y C, Xue C J, Wang D H, Li H Q and Lu Y F. 2003. A discussion on the regional mineralizing pedigree of the ore deposits in the northern margin of the North China landmass[J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 520-535(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Pei R F and Wang D H. 2006a. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80 (10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Wang D H, Xu Z G and Zhu M Y. 2006b. Preliminary study of Chinese mineralization system[J]. Mineral Deposits, 25(2): 155-163(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Wang D H, Zhu Y S and Xu Z G. 2007. Chinese metallogenic system and regional metallogenic evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-1005(in Chinese).
- Chen Y C and Wang D H. 2012. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 36(3): 315-321(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Wang D H, Xu Z G and Huang F. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 38(2): 219-229(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Pei R F, Wang D H and Wang P A. 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 Y C, Pei R F, Wang D H and Huang F. 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 Y C, Pei R F and Wang D H. 2020. On minerogenetic series: The third discussion[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94 (1): 1-9.
- Chen Y C, Pei R F, Wang D H and Huang F. 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 Y C, Pei R F, Wang D H and Huang F. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 123-130(in Chinese with English abstract).
- Cheng Y Q, Chen Y C and Zhao Y M. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-57 (in Chinese).
- Cheng Y Q, Chen Y C, Zhao Y M and Song T R. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 5(6): 1-64+134-135(in Chinese).
- Cheng Y Q. 1994. Outline on Regional Geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-517(in Chinese).
- Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, Den J F, Feng Y M, Zhang K X, Zhang Z Y, Wang F G, Xing G F, Hao G J and Feng Y F. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- Ren J S, Wang Z X, Chen B W, Jiang C F, Niu B J, Li J Y, Xie G L, He Z J and Liu Z G. 1999. The tectonics of china from a global view—A guide to the tectonics map of China and adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House. 1-50(in Chinese).
- Wang D H, Chen Y C and Xu Z G. 2002. Minerogenetic series and regularity of mineralization in the Altay metallogenic province, China[M]. Beijing: Atomic Press. 1-493(in Chinese).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G. 2005. Preliminary study on Cretaceous mineralization systems in China: Implications for future prospecting[J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 231-239(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen S P, Wang H, Meng G X, Chen Z H, Wang C H and Li C J. 2007. Mineralization pedigree and prospecting for iron deposits in eastern Tianshan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 31(2): 186-192(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, Chen Z H, Shen B F, Tang Z L and Pei R F. 2011. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 385-395(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, Huang F, Wang Y and Pei R F. 2020. Minerogenetic series group: Discussion on minerogenetic series (VI)[J]. Acta Geologica Sinica, 94(01): 18-35(in Chinese with English abstract).
- Wang D H and Wang Y. 2022a. The volume of Nanling of “Annals of Geology of Mineral Resources of China”[M]. Beijing: Geological Publishing House. in press(in Chinese).
- Wang D H, Dai H Z, Liu S B, Li J K, Wang C H, Lou D B, Yang Y Q and Li P. 2022b. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): DOI: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 20222811(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Xing S W and Xiao K Y. 2016. Metallogenic features and resource potential of the West Kunlun to Altun Fe-Pb-Zn-Au-rare metals metallogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 90(7): 1353-1363(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈毓川. 1983. 华南与燕山期花岗岩有关的稀土、稀有、有色金属矿床成矿系列[J]. 矿床地质, (2): 15-24.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 林新多, 白鸽, 李崇佑, 胡永嘉, 刘娟群, 洗柏琪. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 1-508.

- 陈毓川, 毛景文. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 桂林: 广西科学技术出版社. 1-433.
- 陈毓川, 王登红, 王平安, 毛景文. 2001. 矿床成矿系列及成矿谱系研究的进展及范例——概念、进展与趋势[A]. 中国地质调查局主编, 矿产资源调查评价理论与方法技术论文集[C]. 25-33.
- 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 李华芹, 路远发. 2003. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨[J]. 高校地质学报, 9(4): 520-535.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006a. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 10: 1501-1508.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 朱明玉. 2006b. 对中国成矿体系的初步探讨[J]. 矿床地质, 25(2): 155-163.
- 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 徐志刚. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社. 1-1005.
- 陈毓川, 王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题[J]. 大地构造与成矿学, 36(3): 315-321.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 219-229.
- 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, 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.
- 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.
- 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, (2): 1-64+134-135.
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社. 1-517.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦铁, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社. 1-50.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社. 1-493.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2005. 中国白垩纪大陆成矿体系的初步研究及找矿前景浅析[J]. 地学前缘, 12(2): 231-239.
- 王登红, 陈世平, 王虹, 孟贵祥, 陈郑辉, 王成辉, 李纯杰. 2007. 成矿谱系研究及对东天山铁找矿问题的探讨[J]. 大地构造与成矿学, 31(2): 186-192.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 陈郑辉, 沈保丰, 汤中立, 裴荣富. 2011. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[J]. 地球学报, 32(4): 385-395.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 黄凡, 王岩, 裴荣富. 2020. 矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 94(1): 18-35.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022b. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. 地质力学学报, 28(5). DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222811.
- 王登红, 王岩等. 2022a. 中国矿产地质志·南岭卷[M]. 北京: 地质出版社. 待印刷.
- 王岩, 邢树文, 肖克炎. 2016. 西昆仑-阿尔金 Fe-Pb-Zn-Au-稀有金属成矿带成矿特征及资源潜力[J]. 地质学报, 90(7): 1353-1363.