

# 特大型矿床与异常成矿作用

裴荣富, 梅燕雄, 李进文

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘 要:**特大型矿床具有成矿偏在性并受控于异常成矿构造聚敛场。它们是常规成矿作用(过程)中发生“引潮共振”而爆发的异常成矿作用的产物,具有与中小型及大型矿床显著不同的成矿机制。异常成矿作用的发生与一定地质历史时期出现的全球性重大异常地质事件有关,如太古宙氧大气变态(过氧事件)、元古宙还原大气变态(缺氧事件)和显生宙构造圈热侵蚀(大规模构造岩浆事件),其结果导致在短时限内发生成矿物质的超巨量工业堆积。研究和探索异常成矿作用的“基因”是当代成矿学研究的一项重大前沿性课题。

**关键词:**特大型矿床;成矿偏在性;异常成矿构造聚敛场;异常成矿作用

**中图分类号:**P611 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2004)02-0323-09

## 0 引言

特大型矿床是指那些具有特别大的矿产储量和特殊成矿特征的矿床,其经济价值及战略意义巨大。据粗略统计,特大型矿床仅占矿床总数的 5%~10%,但可以提供全球矿产资源量的 50%~75%,对一个国家乃至全球经济和社会的可持续发展具有举足轻重的作用<sup>[1~11]</sup>。自 1987 年国际地球物理与大地测量联合会(IUGG)提出将“超大型矿床的全球背景”列为 20 世纪 90 年代固体地球科学 12 个重要前沿课题以来,对特大型矿床的研究与勘查已引起全球性的关注。澳大利亚、美国、加拿大、俄罗斯等矿业大国相继组织开展了对特大型矿床的不同层次的研究和勘查工作。在国际地质对比计划中设立了 ICGP-354“岩石圈超巨量金属堆积”(Economic super-accumulation of metals in lithosphere)项目(1995—1999),现又继续申请将该项目延续为 ICGP-504“地球深部构造与地动力作用和岩石圈金属富集”(Deep structure of earth and concentration of metals in litho-

sphere—A geodynamic approach)项目(2004—2009);在 2000 年第 31 届国际地质大会期间,世界地质图类委员会(CGMW)批准设立了“1 2 500 万世界大型超大型矿床成矿图——全球成矿研究”(World metallogenic map of large and super-large deposits and global metallogeny)项目(2001—2005);即将于 2004 年在意大利召开的第 32 届国际地质大会亦专门设立了“大型超大型矿床成矿”讨论会。在国内也相继开展了“中国特大型矿床形成地质背景和预测研究”、“与寻找超大型矿床有关的基础研究”、“找寻难识别隐伏的大矿、富矿的新战略方法新技术基础研究”等重大项目的研究和探索,对中国及全球若干超大和特大型矿床进行了典型解剖,取得了一些重要的新认识和新进展。

成矿作用是指导致岩石圈成矿物质富集而形成具有经济意义和工业利用价值的矿床的一种特殊的地质作用,包括成矿物质的来源和供应、成矿流体的运输、成矿物质的富集和储存等主要地质作用过程<sup>[12]</sup>,即成矿过程三部曲——源、运、储。特大型矿床则是常规成矿作用(过程)中发生“引潮共振”而爆发的异常成矿作用的产物,它们具有成矿偏在性,即对成矿元素(矿种)、成矿类型、成矿时代、成矿背景等均具有十分明显的选择性,并受控于异常成矿构造聚敛场。

成矿学概念自法国学者 L. de Launay 于 1913 年提出以来,经过近百年的发展,已赢得作为矿床学分

收稿日期:2004-01-07;修订日期:2004-01-14

基金项目:世界地质图类委员会“世界大型超大型矿床成矿图——全球成矿研究”项目;中国地质调查局地质调查项目“中国成矿体系与区域成矿评价”

作者简介:裴荣富(1924—),男,研究员,中国工程院院士,长期从事成矿研究工作。E-mail:peirf@sohu.com

学科的学科地位<sup>[13,14]</sup>。成矿学研究最初主要是通过大量描述性资料及成矿信息的综合分析来划分矿床类型、圈定成矿区(带)并论述成矿规律,20世纪70年代以来,通过矿(岩)石测试、同位素测年与地球化学示踪、成岩成矿模拟等多学科技术方法的广泛应用,使人们在获取更多成矿信息的基础上得以更深刻地研究和解决矿床的成因问题。当代成矿学正在大力开展以地球各圈层相互作用过程为基础的成矿动力学研究,将静态成矿学发展成为动态成矿学,甚至把全球成矿与宇宙演化相联系,为探讨和发现矿床成因的原因(基因)而努力。异常成矿作用的发生与全球性重大异常地质事件有关,如太古宙氧大气变态(过氧事件)、元古宙还原大气变态(缺氧事件)和显生宙构造圈热侵蚀(大规模构造岩浆事件),其结果导致在短时限内发生成矿物质的超巨量工业堆积。研究异常成矿作用的“基因”,探索异常成矿发生的原因,从而为当代成矿学的提出新的研究方向。

## 1 特大型矿床的成矿偏在性

特大型矿床偏爱产在某一特定地质背景(环境)和它们现存的构造位置上,它们对成矿元素(矿种)、成矿类型、成矿时代、成矿背景等均具有十分明显的选择性,我们称之为成矿偏在性(metallogenetic preferentiality)<sup>[7,10]</sup>。

不同成矿元素(矿种)形成特大型矿床的数量及能力是各不相同的。据 P. Laznicka 统计,全球 260 个特大型矿床按不同矿种所形成的矿床数量排序为铜、金、铁、银、铬、钼、铅、锌、锑、汞、砷、锰、钨、镍、铌、铍、锆、稀土、钒、硒、钴、铀、锂、铯、钽、铌等,排序靠前的金属较易形成特大型矿床,而排序靠后的金属则较难出现巨量堆积<sup>[10]</sup>。对我国 198 个特大型矿床的统计表明<sup>[11]</sup>,48 种主要矿产按所形成的特大型矿床数量排序为:煤 石膏 铁 硫铁矿 钛 磷、芒硝 金、高岭土 石盐、滑石 锌、钨、钼、汞、菱镁矿、耐火粘土、石墨、云母 铝、锡、钽、稀土、硼、蛭石 铜、银、萤石、自然硫、重晶石、金刚石 铅、镍、锑、铋、铍、铊、钾盐、明矾石、膨润土、石油,而锰、铬、矾、天然碱、石棉、天然气等 6 种矿产在国内尚未发现特大型矿床。

特大型矿床对矿床类型也具有十分明显的选择性。例如,全球已知铜矿类型近 20 种,但在 21 个储

量大于 1 000 万 t 的铜矿床中,斑岩型 12 个(占 57%)、砂页岩型 6 个(占 29%)、铜镍硫化物型 2 个(占 9%)、黄铁矿型 1 个(占 5%);又如,我国铁矿类型众多,主要有变质型、岩浆型、火山岩型、夕卡岩型、沉积型、风化壳型及热液脉型,目前只有前 3 种能形成特大型矿床,其中又以变质型铁矿最为重要。

特大型矿床通常依矿种和类型的不同而不均衡地偏爱产在特定的地质历史时期和特定的地质构造位置。从时间域来看,全球特大型条带状铁建造矿床主要形成于新太古代—古元古代、特大型喷流沉积型(SEDEX)铅锌矿床主要形成于中元古代—古生代、特大型斑岩型铜钼矿床主要形成于中—新生代。根据在一个成矿年代省(区)内特大型矿床的储量规模与成矿年代跨度( $T_s$ )的比值可以建立一个成矿省(区)特大型矿床成矿年代评价指数( $api$ ),应用特大型矿床储量相对丰度(RAOR)及其成矿时限(FTI)的相关关系可以评价成矿区带成矿远景及特大型矿床的成矿强度。在空间上,特大型矿床主要偏爱产于大陆边缘增生带或板块汇聚带、陆内克拉通或陆缘裂谷系、陆内构造岩浆带、前寒武纪花岗岩—绿岩带及大型韧性剪切带等成矿堆积环境中。

特大型矿床的成矿偏在性是客观存在的,是特大型矿床成矿规律的宏观体现。什么原因造成特大型矿床成矿偏在呢?知其然,还须知其所以然,才能达到深化认识和指导特大型矿床找寻的目的。

## 2 异常成矿构造聚敛(场)

异常成矿构造聚敛场(exceptional metallotect convergence)是异常成矿作用于特定空间及时间产生的有利成矿组合的物质实体,是地质的、地球物理的、地球化学的多种有利控矿因素的异常汇聚,是最有利于促使成矿物质超巨量堆积的场地准备(ground preparation)。异常成矿构造聚敛场不是一个简单的空间场所或地域概念,而是表现在一定成矿地质构造背景上发生的包括物源在内的成矿环境的突变,特别是促使成矿载体的流体流(fluid flow)在开放体系的非平衡态物化条件下骤然变为相对平衡态并释放出大量能量,产生有利成矿构造动力,促使成矿物质发生超巨量堆积。

根据对中国及世界特大型矿床成矿特征的对比和分析,我们将异常成矿构造聚敛场归纳为 4 个主要类型<sup>[10,15,16]</sup>:(1)太古宙—古元古代同剪切形变

异常成矿构造聚敛场:所谓同剪切形变是指成矿与剪切形变在空间上和时间上是同步发生的,具直接和连续的控矿作用。矿体多与剪切线理整合产出,即使富大矿体切穿剪切线理呈脉状产出时,实际上也应是同剪切驱动促使成矿物质在韧-脆性至脆性剪切过程中堆积形成的。只有同生长的剪切形变构造聚敛方能控制特大型矿床。例如,特大型硅铁建造 Homestake 型金矿床就是典型的同剪切形变控矿,其他如穆龙套细碎屑岩型金矿和夹皮沟绿岩型金矿也属于同剪切形变控矿。成矿作用与剪切构造有时不能构成同剪切形变异常成矿构造聚敛场,但它可作为后剪切构造-岩浆活化成矿作用的“成矿基预”,即成矿前的场地和基础准备,这也是我国花岗岩-绿岩带受后剪切构造-岩浆活化形成大型金矿床的特殊成矿机制,如胶东金矿可称之为广义花岗岩-绿岩带型金矿。(2)元古宙-古生代“三同一体”异常成矿构造聚敛场:所谓“三同一体”是指同成矿断裂、同成矿不协调褶皱、同成矿角砾岩带3种控矿因素在时间上和空间上的最佳耦合。实际上,“三同一体”的最佳耦合是很少见的,较常见的是“二同”或“一同”,能否形成异常成矿构造聚敛场还取决于能否与其他控矿因素耦合,特别是充分的物源补给、显生宙构造岩浆作用的叠加改造等。“三同一体”异常成矿构造聚敛场对沉积岩容矿的特大型层控和层状矿床的形成最为重要。关于这类矿床的成因尚有不同看法,但一般共识是其成矿多位于浊积沉积岩系的、具有补偿沉积作用的盆地中,即该盆地不断沉降并能不断接受巨厚的含矿堆积,而且补给喷流的通道即是同成矿生长的断裂;如果在被补给的成矿物质发生工业堆积的同时,围岩产生不协调褶皱,则成矿空间的容积将成倍增大。例如,澳大利亚布罗肯希尔(Broken Hill)铅锌铜矿床就是同成矿不协调褶皱使成矿物质不断补给而形成的特大型矿床,我国的东升庙特大型铅锌硫矿床明显地受控于同成矿断裂和同成矿不协调褶皱。湖南锡矿山特大型锡矿床则是典型的“三同一体”控矿,大规模角砾岩化,尤其是同成矿的层状角砾岩带的发育是一个巨大的岩石扩容过程,它们与同成矿断裂和不协调褶皱相配合,为锡矿的超巨量堆积提供了非常好的空间条件。(3)中新世“行、列、汇”异常成矿构造聚敛场:“行、列、汇”构造样式是对地球表壳十分发育的棋盘格子构造的新发展,它是一种有利的成矿“温床”。当然,并不是所有的“行、列、汇”构造都能控矿,只有具备下

列4个方面的条件时才能形成异常成矿构造聚敛场:其一是两组构造的交叉;其二是在构造交叉处(即“汇”)发生多种有利控矿因素的汇聚;其三,与岩浆作用耦合并发生共岩浆补余分异效应<sup>[17]</sup>,含矿流体流受裂隙水偏流理论支配形成涡流;其四,与深部构造作用(过程)耦合。前中生代近东西向构造带与中-新生代北东-北北东向或近南北构造带叠加形成的“行、列、汇”构造式样在我国东部广泛发育,当其与中生代深部壳-幔不调谐运动形成的构造-岩浆作用等成矿因素耦合时,就为特大型矿床的形成创造了极为有利的条件。(4)新生代多阶湖汇流异常成矿构造聚敛场:我国西部的青藏高原盐湖区是多阶湖汇流异常成矿构造聚敛场发生的主要地质环境。大面积分布的泛河湖区经区域构造变动后形成不同高差的阶梯状多阶湖盆,可达8个阶梯以上,高差可达180 m。初始泛河湖中的成矿物质随流体介质向最低阶湖盆汇流,从而导致巨量成矿物质的大规模堆积,形成特大型矿床。西藏扎布耶特大型盐湖矿床是其典型代表<sup>[15]</sup>。

### 3 异常成矿作用与重大地质事件

特大型矿床的矿产储量或资源量往往特别巨大,在与一组中小型及大型矿床的线性趋势分析中也不具备统计的统一性。例如,如果将超大型矿床定义为大型矿床储量下限的5倍以上,根据我国矿床规模划分的储量参考标准<sup>[18]</sup>,铁矿储量超过5亿t即可称为超大型铁矿床,但国外这类矿床的储量一般可达到200~300亿t,俄罗斯的库尔斯克铁矿床的储量达到千亿t,是大型铁矿储量下限的几百倍;又如,超大型铜矿储量下限为50万t,但南美安第斯铜矿带的斑岩铜矿储量可达5000~8000万t,亦超过大型铜矿储量下限的100倍。如此巨大的成矿物质堆积显然不是与同类型中小型及大型矿床类似的正常成矿现象。

根据对世界主要矿床储量的线性趋势分析,73个金矿(图1)和95个铜矿(图2)分别在1300t和2300万t处出现特大型与大型-中小型矿床的储量分界,特大型金矿床和铜矿床具有与大型以下矿床显著不同的非线性拟合特征。据此,可以认为,特大型矿床的形成不属于正常成矿堆积的范畴,而是特殊地质事件促使异常成矿作用导致成矿物质巨量堆积的结果。



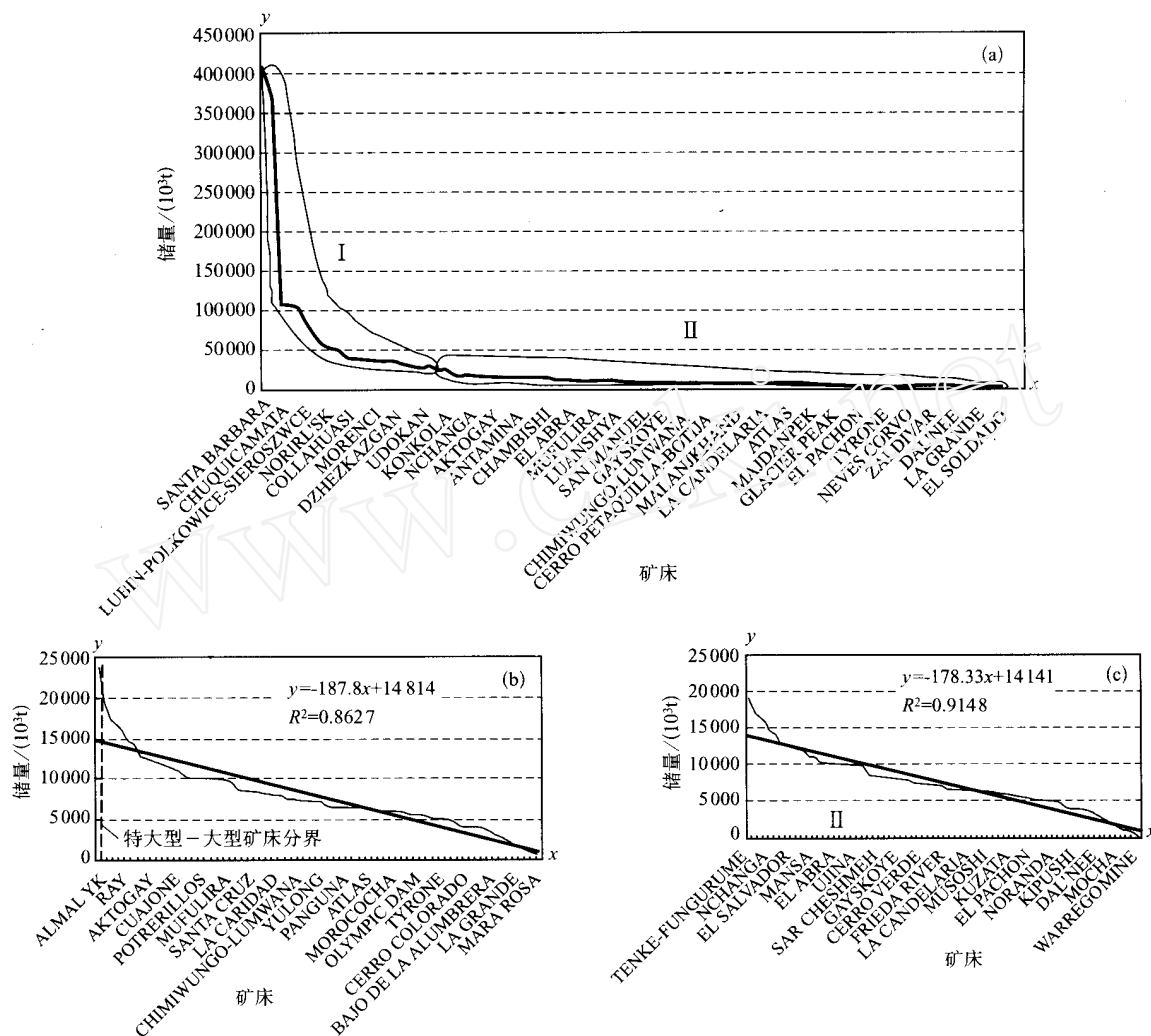


图2 世界大型—特大型铜床储量边界线性趋势分析图

Fig. 2 Linear trend analysis of reserves boundary of the large and exceptional large copper ore deposits of the world  
图注同图1

地质热事件(图3)。

隐生宙出现的“氧大气变态”(oxyatmversion)和“还原大气变态”(redoxyatmversion)等全球性重大事件是促成异常成矿作用并形成太古宙—古元古代特大型BIF型铁矿床及绿岩型金矿床和中元古—古生代特大型喷流沉积的SEDEX铅锌矿床的重要原因。这一时期在全球范围发生的古陆聚散、陨石撞击等事件激发强烈的地幔排气作用及地球圈层大规模的物质交换,引发水圈和大气圈的“氧大气变态”(过氧事件)和“还原大气变态”(缺氧事件)循环发展。这些事件的全球变态促成常规成矿作用的“引潮共振”而导致异常成矿作用的发生,并在相对短的时限内发生急剧的巨量成矿物质堆积。研究表明,新太古代至中元古代在华北地台北缘乃至全球范围发生了一系列异常成矿作用,如新太古代(2

800~2500 Ma, Ar<sub>3</sub>)绿岩带金矿、新太古代晚期至古元古代BIF型铁矿(2700~2000 Ma, Ar<sub>3</sub>—Pt<sub>1</sub>)、古元古代蒸发盐类硼镁铁矿和菱镁矿(2000~1800 Ma)、中元古代早期宣龙式铁矿(1800~1600 Ma, Pt<sub>1</sub>)、中元古代晚期沉积岩容矿喷流沉积硫化物矿床(SEDEX, 1600~1500 Ma, Pt<sub>2</sub>)等,形成了5个阶段不同矿种类型的成矿高峰(裴荣富等, 1999, 2001)。由绿岩型金矿床的硫化物相、BIF型铁矿床的FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相、蒸发岩型硼镁矿床的Mg<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>11</sub>+MgCO<sub>3</sub>相、沉积型铁矿床的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(+FeCO<sub>3</sub>)相直到SEDEX型铅锌矿床的硫化物相,氧逸度呈现低—高—低的低氧—过氧—缺氧的异常变化,并伴随着—

KARKHAM R., ROSEBOE S. Atmospheric evolution and ore deposits formation. Abstracts of 29th IGC, 1992. 1.

系列异常成矿作用的爆发。过氧达到高峰的标志为中元古代早期宣龙式铁矿的豆状、鲕状  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  沉积;  $\text{FeCO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  矿层沉积界面是高氧逸度向低氧逸度的转折点,是缺氧事件的开始。最有意义的是缺氧成矿事件骤然发生在“过氧事件”高峰之后的中元古代末,一直延续到古生代,并形成大量的 SEDEX 铅锌铜硫化物矿床,世界级的特大型矿床多数都集中在这个时期。

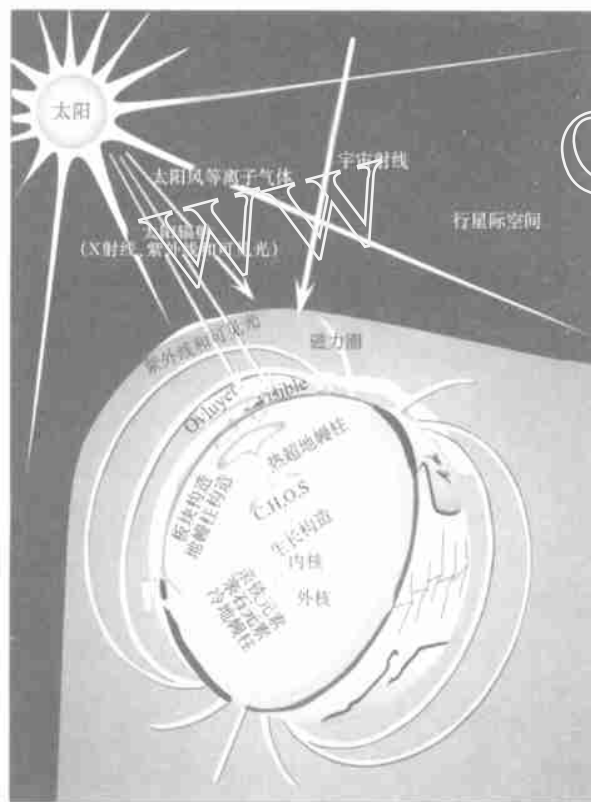


图3 地球层圈互动的宇宙链示意图

Fig. 3 Sketch map of the cosmic chain for the interaction of geosphere

显生宙发生了与隐生宙显著不同的地质环境大变革,地球层圈不协调运动导致的构造圈热侵蚀(tectonosphere thermal erosion)引发大规模构造岩浆事件是显生宙(特别是中新生代)异常成矿作用的主因。构造圈位于岩石圈和软流圈之间的软流圈一侧,绝大部分是由强亏损的方辉橄榄岩组成的活动体,是岩石圈板片插入软流圈形成的幔壳混同部位<sup>[22]</sup>,也称“根入地幔”(mantle rooted)<sup>[27]</sup>构造。澳大利亚以 Macquarie 大学为主组织国际有关单位开展“大陆地球化学演化与成矿”研究,提出了构造圈热侵蚀和岩石圈能否永存以及幔壳将发生混同大变革等新概念,为深化研究大陆构造-岩浆作用与陆

内爆发异常成矿作用奠定了理论基础。邓晋福等<sup>[23~25]</sup>认为中国东部在中生代(燕山期)发生了岩石圈-软流圈系统(LAS)大灾变事件,并识别出被扰动的LAS的两种类型,即在挤压造山环境下的岩石圈巨大减薄与巨大增厚作用。大量的新生、热地幔物质和活化的热幔流加热并注入冷的岩石圈及地壳是中生代(燕山期)爆发异常成矿作用的基本原因与深部构造(作用)过程。华仁民等<sup>[26]</sup>认为,中国东部中生代成矿大爆发是在特定地质背景下发生岩石圈大减薄和构造格局大转折、从而导致大规模壳幔相互作用和构造圈热侵蚀事件的产物。然而,深部构造(作用)过程仅是成矿“引擎”(engine),表壳控矿构造才是成矿“温床”(hot bed),深部作用激发表壳构造的耦合成矿是显生宙(特别是中新生代)爆发异常成矿作用的关键<sup>[28]</sup>。

#### 4 异常成矿作用的基因问题

基因是自然界一切事件发生的原质。成矿基因不完全等同于矿床成因,它是促发和导致成矿物质发生工业堆积的内在原因,而异常成矿作用的基因则是正常成矿基因发生变异的结果,类似于人体正常细胞发生癌变的原因<sup>[20]</sup>。

关于异常成矿作用,目前多从下列几个方面进行了大量研究:(1)极充沛的和超巨量的成矿物质供给;(2)多种有利控矿因素非常罕见的耦合;(3)重大成矿事件的年代学鉴证与演化等等。但是,这些研究还不足以判断异常成矿发生的时间和地区。

异常成矿作用的基因是预测和发现特大型矿床的关键科学问题,也是一个非常复杂的但有可能取得重大原创性成果的成矿学问题。由于异常成矿作用是在地质历史时期出现的,比现代气象学发现“厄尔尼诺”和“拉尼娜”现象造成异常天气的基因要困难得多。然而,根据作者的初步认识,全球大气变态可能是促成太古宙-元古宙“多同一体”异常成矿作用的基因,构造圈热侵蚀可能是显生宙构造岩浆异常成矿作用的基因。成矿构造聚敛场则是形成特大型矿床的客观实际,也是受成矿基因作用发生“引潮共振”的必然结果<sup>[27,28]</sup>。

O'REILLY S. Y. Director's Preface and Introducing GEMOC. *Annual Report of ARC National Key Centre for the Geochemical Evolution and Metallogeny of Continents*, 1997, 1-2.

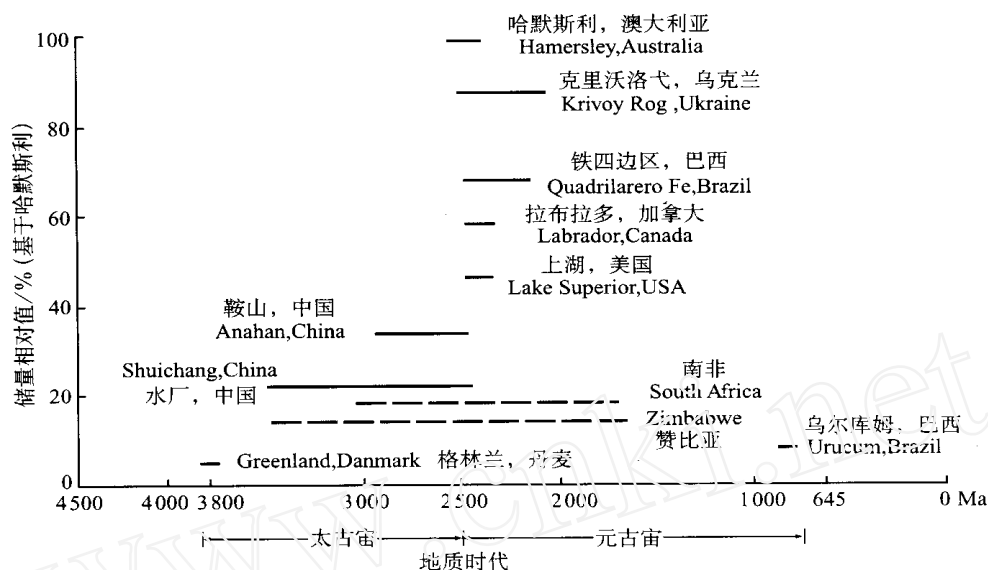


图4 全球主要BIF型铁矿的RAOR-FTI关系图

Fig. 4 Relative abundance and metallogenic timing intervals of the global main banded iron formations

作者认为,应用矿集区及矿汇中矿床相对储量丰度与其成矿时限是探求在什么时限内可能发生异常成矿作用基因的新方法,即首先根据大量矿床(点)综合赋值的方法圈定矿集区及矿汇,然后根据矿集区及矿汇中矿床储量(资源量)相对丰度(Relative Abundance of Ore Reserve, RAOR)及其与成矿时限(Forming Time Interval, FTI)的相关关系,从相对短的时限内发生超巨量金属堆积中探讨异常成矿作用的强度与基因。

从全球11个BIF型铁矿的RAOR-FTI关系可以看出(图4),澳大利亚哈默斯利克铁矿床储量为36500万t, RAOR为100%, FTI为2600~2450 Ma;俄罗斯克里沃洛格铁矿床储量为29000万t, RAOR为79%, FTI为2550~2200 Ma;巴西铁四边区铁矿床储量为22000万t, RAOR为60%, FTI为2500~2200 Ma;加拿大拉布拉多铁矿床储量为20600万t, RAOR为56%, FTI为2500~2350 Ma;美国上湖铁矿床储量为16200万t, RAOR为44%, FTI为2500~2450 Ma。上述5个BIF型铁矿床的RAOR均大于44%以上,而FTI仅为50~350 Ma。然而,与之形成鲜明对比的是,南非、赞比亚铁矿床的RAOR分别为17%和18%,而FTI长达1850 Ma。显然,前5个铁矿床是在短时限内可能发生氧大气变态促发异常成矿作用而造成铁质超巨量堆积的结果。

南美安第斯斑岩铜矿带在南北向深大断裂带及复合的控矿断裂系统控制了科亚瓦西、楚基卡马塔、拉埃斯康迪和埃尔特尼恩特4个矿汇区(图5),每

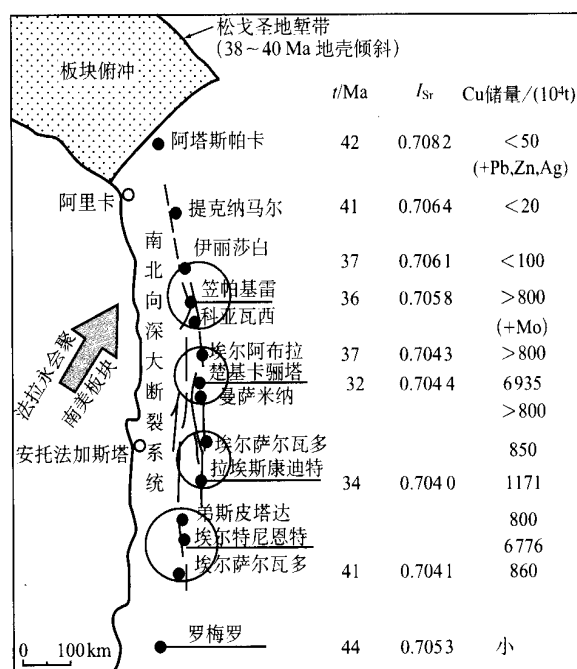


图5 南美安第斯斑岩铜矿带各矿汇区的成矿时限和铜矿储量

Fig. 5 Metallogenic timing and copper reserves in the ore clusters of the porphyry copper ore belt from the Andes of South America

个矿汇区内矿床成矿时限大多为1~5 Ma,而铜矿储量可大到800~7000万t。无疑,它们更是在短时限发生异常事件而促发超巨量堆积的。

应当指出,经过近百年的探索和研究,人们对矿床的成矿地质特征、成矿控制因素、时空分布规律以及成矿作用过程与机制等,都进行了广泛的探讨和深入的探究,取得了大量的理论性认识,促进了成矿

学的空前发展。但是,成矿学已有的科学成果主要是研究和解决(或基本解决)“矿床及矿带是怎样形成的”问题,而对“矿床及矿带为什么形成”的问题则迄今尚未有系统的认识,甚至尚未引起足够的重视。因此,开展成矿基因研究、特别是异常成矿(作用)基因研究,探索正常成矿基因发生变异的条件和原因,不仅对成矿学理论的创新和发展具有重大科学意义,而且对特大型矿床的勘查评价和新世纪矿业经济的可持续发展具有很大的实际意义<sup>[20]</sup>。

## References[参考文献]:

- [1] LAZNICKA P. Giant ore deposits, a quantitative approach[J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 1983, 2:41-63.
- [2] LAZNICKA P. Derivation of giant ore deposits[A]. *Abstracts of 28th IGC*[C]. 1989, 2:268-269.
- [3] TU G C. On prospecting and theoretical research of superlarge mineral deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1989 (3):163-168(in Chinese). [涂光炽. 关于超大型矿床的寻找和理论研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989 (3): 163-168.]
- [4] TU G C. Recent progresses on the studies and searches for superlarge mineral deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3-4): 45-53 (in Chinese). [涂光炽. 超大型矿床的探寻和研究的若干进展[J]. 地学前缘, 1994, 1(3-4): 45-53.]
- [5] TU G C, ZHAI Y S, LIU Y M, et al. *Superlarge Mineral Deposits of China* ( ) [M]. Beijing: Geol Pub House, 2000(in Chinese). [涂光炽, 翟裕生, 刘义茂, 等. 中国超大型矿床(I) [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [6] PEI R F, WU L S. Some problems concerning fundamental researches on the prospecting for supergiant ore deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 1990, 9(3): 287-289(in Chinese). [裴荣富, 吴良士. 我国开展寻找超大型矿床的若干基础研究问题的讨论[J]. 矿床地质, 1990, 9(3): 287-289.]
- [7] PEI R F, WU L S. On the evolution of metallogenetic province and metallogeny[J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3-4): 95-99(in Chinese). [裴荣富, 吴良士. 金属成矿省演化与特大型矿床[J]. 地学前缘, 1994, 13(2): 155.]
- [8] PEI R F. On the geological evolution of metallogenetic province and supergiant deposits[J]. *Mineral Deposits*, 1997, 16(2): 169-170 (in Chinese). [裴荣富. 特大型矿床成矿偏在性研究的新进展[J]. 矿床地质, 1997, 16(2): 169-170.]
- [9] PEI R F, LV F X, FAN J Z, et al. *Metallogenetic Series and Exploration of the Metal Deposits in North Margin of the North China Massif and Its North Side*[M]. Beijing: Geol Pub House, 1998 (in Chinese). [裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 等. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京: 地质出版社, 1998.]
- [10] PEI R F, WU L S, XIONG Q Y, et al. *Metallogenic Preferentiality and Exceptional Metallotect Convergence of Giant Ore Deposits in China*[M]. Beijing: Geol Pub House, 1998(in Chinese). [裴荣富, 吴良士, 熊群尧, 等. 中国特大型矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛场[M]. 北京: 地质出版社, 1998.]
- [11] MEI Y X, ZHU Y S, YE J H. Statistical characteristics of super-large ore deposits in China[J]. *Acta Geoscientia*, 1997, 18(4): 358-366(in Chinese). [梅燕雄, 朱裕生, 叶锦华. 中国超大型矿床的若干统计特征[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 358-366.]
- [12] ZHAI Y S, DENG J, LI X B. *Regional Metallogeny*[M]. Beijing: Geol Pub House, 1999 (in Chinese). [翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.]
- [13] LAZNICKA P. Metallogeny: Past, present, future[J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3): 9-20. [LAZNICKA P. 成矿学的过去、现在和未来[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 9-20.]
- [14] PEI R F, XIONG Q Y. New advances in the Metallogeny and Geochronology[J]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits*, 1997(1): 30-37 (in Chinese). [裴荣富, 熊群尧. 成矿学和成矿年代学研究的新进展[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1997(1): 30-37.]
- [15] PEI R F, XIONG Q Y. Metallogenic preferentiality and metallotect convergence of unique ore deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(1): 37-46(in Chinese). [裴荣富, 熊群尧. 中国特大型矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛(场) [J]. 矿床地质, 1999, 18(1): 37-46.]
- [16] PEI R F, YE J H, MEI Y X, et al. Discussion of some issues of exceptional large ore deposits[J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(7): 9-15, 21 (in Chinese). [裴荣富, 叶锦华, 梅燕雄, 等. 特大型矿床研究若干问题探讨[J]. 中国地质, 2001, 28(7): 9-15, 21.]
- [17] PEI R F. Co-magmatic complementary differentiation and metallogeny [J]. *Mineral Deposits*, 1995, 14(4): 376-379(in Chinese). [裴荣富. 共(源)岩浆补余分异作用与成矿[J]. 矿床地质, 1995, 14(4): 376-379.]
- [18] Office of the National Committee of Mineral Resources. *Handbook for Industrial Index for Minerals* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987(in Chinese). [全国矿产储量委员会办公室. 工业矿产手册[M]. 北京: 地质出版社, 1987.]
- [19] LI Y J, CHEN Y C. New knowledge about El Nino cause of formation [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 1998, 20(3): 109-204(in Chinese). [李扬鉴, 陈延成. 关于厄尔尼诺成因新认识[J]. 化工矿产地质, 1998, 20(3): 109-204.]
- [20] PEI R F, MEI Y X. Study on anomalous ore-forming process[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(Suppl): 48-51 (in Chinese). [裴荣富, 梅燕雄. 论异常成矿作用[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 48-51.]
- [21] ADAMS J B, MANN M E, AMMANN C M. Proxy evidence an El Nino-like response to volcanic forcing [J]. *Nature*, 2003, 426: 274-278.
- [22] JORDAN T. Lithospheric slab penetration into the lower mantle beneath the sea of Okhotsk[J]. *J Geophys*, 1977, 43: 473-496.
- [23] DENG J F, ZHAO H L. The thermal structure of the upper mantle in Eastern China—Inferred from the petrological model[J]. *Acta Geor*



- logica Sinica*, 1990, 64(4): 344-349 (in Chinese). [邓晋福, 赵海玲. 中国东部上地幔热结构——由岩石学模型推导[J]. 地质学报, 1990, 64(4): 344-349.]
- [24] DENG J F, ZHAO H L, MO X X, et al. *Continental Roots-Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics* [M]. Beijing: Geol Pub House, 1996 (in Chinese). [邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996.]
- [25] DENG J F, MO X X, ZHAO H L, et al. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China [J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(4): 309-315 (in Chinese). [邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-315.]
- [26] HUA R M, MAO J W. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China [J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(4): 300-308 (in Chinese). [华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 300-308.]
- [27] KUTINA J, PEI R F, HEYL A V. The role of deep lithospheric structure in the genesis and distribution of giant and supergiant concentrations of metals in the crust [J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 2003, 8(1-4): 9-49.
- [28] PEI R F, PENG C, XIONG Q Y, et al. Deep tectonic processes and super accumulation of metals related to granitoids in the Nanling metallogenic province, China [J]. *Acta Geological Sinica*, 1999, 73(2): 181-192.

## EXCEPTIONAL LARGE ORE DEPOSITS AND ANOMALOUS ORE-FORMING PROCESS

PEI Rong-fu, MEI Yan-xiong, LI Jin-wen

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Exceptional large ore deposits are defined as those with both very big ore reserves and special ore-forming characteristics, and were formed under an explosive anomaly of mineralization in the normal state of ore-forming process. They have special selectivity toward special ore-forming commodities, deposit types, ore-forming ages and geological setting, which may be called metallogenic preferentiality. Exceptional metallogenic convergence is the optimum ore-controlling site for exceptional large ore deposits. Regarding the genesis of anomalous ore-forming process, we hereby propose that they were created by global geological events in certain eons and eras in geological history, such as oxyatmversion (excess oxygen atmospheric event) in the Archean, redoxatmversion (lack oxygen atmospheric event) in the Proterozoic-Paleozoic, and tectonosphere thermal erosion (great amount of tectonic magmatic event) in the Mesozoic-Cenozoic. It is a key problem for metallogeny to study and discover the gene of anomalous ore-forming process.

**Key words:** exceptional large ore deposits; metallogenic preferentiality; exceptional metallogenic convergence; anomalous ore-forming process; metallogeny; metallogenic gene