矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题

王登红[1)]，陈毓川[2)]，徐志刚[1)]，黄凡[1)]，王岩[1)]，裴荣富[1)]

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

内容提要：矿床的成矿系列(简称成矿系列)是矿床学领域的一个理论性概念，由五级序次组成。矿床成矿系列组属第一序次，是指在一定的地质历史时期、在一定的地壳运动过程中形成的一组相互关联的矿床成矿系列。理想情况下，一个完整的矿床成矿系列组(G)，可包括与岩浆作用有关的(I)、与沉积作用有关的(S)、与变质作用有关的(M)、与区域性构造事件-流体作用有关的(F)及与表生作用有关的(H)5类矿床成矿系列。从地球构造演化角度来看，矿床成矿系列组的形成与大陆成矿体系形成的阶段性与旋回性存在内在成因联系，是地壳构造演化的不同阶段的客观记录和必然产物，可与地壳尺度构造运动相对应。深入研究矿床成矿系列组，对于探索地球演化规律，深化理解不同尺度、不同时期成矿构造环境及其成矿过程，揭示地壳运动的基本规律具有重要意义。同时，应用成矿系列组内矿床成矿系列“全位成矿、缺位找矿”的理念和“成矿序列”(有序性)的原则，不仅可以解释矿产资源分布的不均衡性，还可以有效指导区域成矿预测。因涉及面广，矿床成矿系列组的研究尚属起步阶段，有待于进一步深化研究。

关键词：矿床成矿系列组；大地构造演化；成矿作用；成矿预测；成矿体系

自从1979年程裕淇等发表《初论矿床的成矿系列问题》(Cheng Yuqi et al.，1979)以来已经40周年，这40年正好与改革开放的40年基本同步合拍，也是中国矿床地质学界深化成矿理论研究指导找矿实践取得丰硕成果的40年，有关矿床成矿系列的论文、专著、报告也不下千篇(部)(如 Cheng Yuqi et al.，1979，1983；Chen Yuchuan，1983，1994，1997；Chen Yuchuan et al.，1985，1989，1998，2006a，2006b，2007，2015a，2015b，2016；Chen Ping et al.，1996；Han Zhenxin et al.，1996，2004；Liu Dequan et al.，1996；Pei Rongfu et al.，1998，2008；Luo Mingjiu et al.，2000；Wang Denghong et al.，2002，2005；Feng Xueshi et al.，2004；Tang Zhongli et al.，2002；Li Junquan et al.，2005；Shen Baofeng et al.，2006，2020)。但是，地球上为什么会发生成矿作用？所形成的矿产资源为什么会出现有规律的组合关系？21世纪的能源资源问题如何解决？这样的基础性、根本性、前瞻性问题，依旧需要我们不断探索。本文仅就成矿系列理论体系中矿床成矿系列组的相关问题加以探讨。

1 “矿床成矿系列组”概念的提出

矿床成矿系列组指的是：在一定的地质历史时期、在一定的地壳运动过程中形成的一组相互关联的矿床成矿系列。地质历史时期一般指一个独立的构造旋回(相当于威尔逊旋回)，而地壳尺度的构造运动一般指包含有造山运动、造陆运动或造洋运动含义的大地构造，而且有一个比较明确的演化过程。

1.1 概念及其由来和命名

由不同地质时代、不同地区但相似地质环境中相似地质成矿作用形成的一组矿床成矿系列可以归属于同一个“矿床成矿系列类型”。那么，形成于“一定的构造单元”、“一定的构造运动阶段”，由不同的成矿作用形成的一组矿床成矿系列，该如何称呼呢？

注：本文为中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号 JYYWF20183701、JYYWF20183704)、中国地质调查局中国矿产地质志项目(编号 DD20160346、DD20190379)和国家自然科学基金项目(编号 41402069)联合资助成果。
收稿日期：2019-10-16；改回日期：2019-11-14；网络发表日期：2019-11-26；责任编辑：周健。
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。通讯作者：黄凡，男，1983年生。副研究员，硕士生导师，主要从事区域成矿规律与成矿预测研究。Email：hfhymn@163.com。

引用本文：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. 地质学报，94(1)：18～35，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020103.
Wang Denghong，Chen Yuchuan，Xu Zhigang，Huang Fan，Wang Yan，Pei Rongfu. 2020. Minerogenetic series group：discussion on minerogenetic series (Ⅵ). Acta Geologica Sinica，94(1)：18～35.

在 1999～2004 年承担“中国成矿体系与区域成矿评价”项目时,笔者引入了“矿床成矿系列组”的概念来加以概括,即地质成矿作用不同,但在同一构造旋回及该旋回所形成的构造单元内的矿床成矿系列可以整合为一个具有一定内在联系的“组”,称为“矿床成矿系列组”(Minerogenetic Series Group),可简称为“成矿系列组”,包括由不同地质作用形成的、但形成于同一个地质历史时期的同一构造旋回中的、按照一定时空规律有序组合的矿床成矿系列(Chen Yuchuan et al., 2006a, 2006b, 2007)。

由此可以明确:① 矿床成矿系列组是一组“矿床成矿系列”,并非单个系列;② 这一组系列是同一构造运动旋回中形成的(这明显不同于“矿床成矿系列类型”,其中的系列可形成于不同的地质历史时期),而构造是地壳尺度的大地构造,不是小尺度的矿田构造;③ 在不同的构造演化阶段形成的矿床成矿系列虽然是不同性质的,分别与不同的地质成矿作用有关,但不是随机的,也不是可逆的,是具有“时间进化”概念的,因而可以反过来根据矿床成矿系列组的特点来“反演”地壳演化的历史过程。

以一个完整的威尔逊旋回为例。威尔逊旋回是指大陆岩石圈在水平方向上的彼此分离与拼合运动的一次全过程,即大陆岩石圈由崩裂开始、以裂谷为生长中心的雏形洋区渐次形成洋中脊、扩散出现洋盆进而发展为大洋盆,而后大洋岩石圈向两侧的大陆岩石圈下俯冲(即俯冲作用)、消亡,洋壳进入地幔而重熔,洋盆缩小;或发生大陆渐次接近、碰撞,出现造山带,遂拼合成陆的过程。J. T. 威尔逊将大洋盆地的演化归纳为 6 个发展阶段:胚胎期(如东非裂谷)、幼年期(如红海、亚丁湾)、成年期(如大西洋)、衰退期(如太平洋)、终了期(如地中海)和遗迹(如印度河地缝合线)。实际上,这 6 个阶段在哪个大洋也无法同时观察到,大西洋是否会发展到太平洋的地步、太平洋是否会萎缩为地中海,也难以预料。且不论板块构造是否放之四海而皆准,也不论这 6 个时期是否会完整,运用历史发展的观点来研究地质作用与矿床成矿系列之间的关系是非常有意义的,因为这 6 个不同阶段发生的地质-成矿作用是不同的,所形成的矿床成矿系列也是不同的,但历史是不可逆转的,对应的矿床成矿系列也是有时空条件约束的,不是偶然的、随机的。显然,一个完整的威尔逊旋回包括了陆地上的岩浆作用,也包括海相的岩浆作用;包括了海相的沉积作用,也包括了陆相的沉积作用;包括了终了期的变质作用,也包括了遗迹期构造应力驱动下的区域性、方向性流体作用,共同构成一个成矿系列组,即一个完整的“组(G)”=沉积系列(S)+岩浆系列(I)+变质系列(M)+流体系列(F)+表生系列(H)。

1.2　研究进展

自提出“矿床成矿系列组”的概念以来,在全国范围内至少已经识别出 38 个成矿系列组(表 1)。其中,新生代 2 个,中生代燕山旋回 5 个,印支旋回 3 个,晚古生代 8 个,早古生代 5 个,新元古代 6 个,中元古代 4 个,古元古代 1,太古宙 4 个(Chen Yuchuan et al., 2007)。对这些具体的“成矿系列组”的研究还不够深入,因为涉及面太广,包括大地构造、地史学及深部地球物理等诸多领域的深层次问题,不只是矿床地质本身所能解决的。此外,对于矿床成矿系列组的认识也经历过并且经历着发展的过程,有些认识在不断深化,比如,在《中国新生代成矿作用》(Wang Denghong et al., 2005)中,厘定出了“中国西北方新生代荒漠盐湖成矿系列组”、“西南部风化壳稀有、稀散元素、镍、金、铂族元素、钛铁矿、砂锡成矿系列组”和“西南三江与陆内造山过程-岩浆作用有关的成矿系列组”。这三个“成矿系列组”,后经研究认为定为“系列”更合适,其中所包含的“系列”也相应降格为“亚系列”,因为有的只涉及地壳表层,有的是更高层次成矿体系的一个组成部分。当时只考虑到相似的成矿构造环境,而未考虑到成矿构造环境是演化的,并且是在大地构造旋回的总格局之下的具体体现。也正因为如此,在《三论矿床的成矿系列》(Chen Yuchuan et al., 2006a, 2006b)、《四论矿床的成矿系列》(Chen Yuchuan et al., 2015a)和《五论矿床的成矿系列》(Chen Yuchuan et al., 2016)三篇文章中,已经明确把“矿床成矿系列组”列为成矿系列序次的第一层次,且位居前列。也正是因为矿床成矿系列组可与地壳尺度构造运动旋回相对应,深入研究矿床成矿系列组,对于揭示地壳运动的规律意义重大。这也是今后努力的方向。

2　“矿床成矿系列组”的典型实例

2.1　华北地台(陆块)北缘

华北地台北缘是我国矿产资源非常丰富的成矿带之一,也是中国北方一个独特的构造单元,其构造演化的历史与成矿作用的演化历史存在对应关系,尤其是古生代与中生代构造体制的变化在矿床成矿系列组方面也是不同的。古生代,由于南北两个陆块之间存在海相沉积,因而形成有海相沉积作用成

表 1 中国大陆的矿床成矿系列组(据 Chen Yuchuan et al., 2007,简化)

Table 1 Minerogenetic series group in mainland China (modified from Chen Yuchuan et al., 2007)

编号	矿床成矿系列组的名称
Ar/Pt	华北地台及其周边地区与太古宙末期—元古宙初期(2500Ma 前后)挤压(造山,五台运动)环境强烈变质作用(混合岩化)有关的 Fe、Au、石墨等矿床成矿系列(组)
Ar_3-2	华北地台中西部(鲁西、五台、色尔滕山、中条地区花岗-绿岩带中)与新太古代后期(2.7～2.5 Ga)构造旋回有关 Fe、Cu、Au、非金属矿床成矿系列(组)
Ar_3-1	华北地台中东部(辽吉、冀东、鲁西花岗-绿岩带中)与新太古代前期(2.8～2.7 Ga) 构造旋回有关的 Fe、Cu、Zn、Au 多金属矿床成矿系列(组)
Ar_2	华北地台中太古代(3.2～2.8Ga)陆核发育阶段形成的 Fe、石墨、Au 矿床成矿系列(组)
Pt_3-12	阿尔金晚元古代与岩浆作用有关的 Fe、Au、Cr、石棉矿床成矿系列(组)
Pt_3-11SIM	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
Pt_3-9SI	东南天山新元古代构造旋回矿床成矿系列组
Pt_3-8SI	西天山新元古代构造旋回矿床成矿系列组
Pt_3-4SIF	扬子地台及周边地区新元古代与火山-热水-沉积作用有关的磷、Fe、Mn 矿床成矿系列组
Pt_3-3SIM	祁连—秦岭与新元古代构造旋回有关的 Fe、Mn、Ag (Co、Zn) V、Mo、Cu、Ni、石墨、红柱石、蓝晶石、矽线石、菱镁矿、铬铁矿、橄榄岩、蓝石棉矿床成矿系列组
Pt_{2-3}-6SI	秦祁与中、新元古代构造旋回有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Ni、V、Ti 矿床成矿系列组
Pt_{2-3}-5SM	扬子地台东南部与中、新元古代火山-沉积变质改造作用有关 Cu、Au、矿床成矿系列组
Pt_2-2SI	华北地台西部与中元古代裂陷拉张环境火山-沉积变质改造作用有关 Fe、Cu、Pb、Zn、REE、稀有、Au、硫铁矿矿床成矿系列组
Pt_2-1SI	华北地台中、东部与中元古代构造旋回岩浆-沉积作用有关的 Fe、Ti、V、Mn、Pb、Zn、硫铁矿矿床成矿系列组
Pt_1-4SM	华北地台西部(山西裂谷?)与古元古代构造旋回有关的 Cu、Co、Au、非金属矿床成矿系列组
Pz_1-3SI	天山—北山与加里东旋回岩浆、沉积作用有关的磷、V、U、Cu、Mn、重晶石、硫铁矿、Au、Mo、Pb、Zn、Fe、萤石、稀有、W、Sn 矿床成矿系列组
Pz_1-7SI	华北地台北缘与加里东旋回岩浆、沉积、变质作用有关的 Fe、Cr、Cu、Pb、Zn、Au、硫铁矿、碳酸盐岩、板岩矿床成矿系列组
Pz_1-3SI	天山—北山与加里东旋回岩浆、沉积作用有关的磷、V、U、Cu、Mn、重晶石、硫铁矿、Au、Mo、Pb、Zn、Fe、萤石、稀有、W、Sn 矿床成矿系列组
Pz_1-7SI	华北地台北缘与加里东旋回岩浆、沉积、变质作用有关的 Fe、Cr、Cu、Pb、Zn、Au、硫铁矿、碳酸盐岩、板岩矿床成矿系列组
Pz_1-8SI	兴安岭—张广才岭—太平岭与加里东旋回岩浆、沉积作用有关 Fe、多金属、水晶、碳酸盐岩矿床成矿系列组
Pz_1-10SIF	柴北缘—祁连与加里东旋回岩浆、沉积、变质作用有关 Cr、Fe、Cu、Ni、Pb、Zn、W(Mo)、Au、REE 矿床成矿系列组
Pz_1-11SI	秦岭与加里东旋回岩浆、沉积作用有关的磷、Mn、Ni、Mo、V、U、Cu、Zn、Ba、稀有金属、白云母矿床成矿系列组
Pz_2-5SI	西天山与海西旋回构造-岩浆作用有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Mo、W、Sn、Au、Ag、Ni、Co、V、Ti、蛇纹石、滑石矿床成矿系列组
Pz_2-6SIM	东天山与海西旋回构造-岩浆作用有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Mo、W、Sn、Au、Ag、Ni、Co、V、Ti、蛇纹石、滑石矿床成矿系列组
Pz_2-7SI	西南天山与晚古生代构造-岩浆旋回有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Ag、Mn、W、Sn、稀有金属、钒钛磁铁矿、金刚石、宝石、石膏、铝土矿成矿系列组
Pz_2-9SI	华北地台北缘与海西旋回构造-岩浆作用有关的 Au、Cu、Fe、Cr、Ni、V、Ti、PGE、P、萤石、膨润土矿床成矿系列组
Pz_2-10SI	兴安岭—张广才岭—太平岭与海西旋回岩浆-沉积作用有关的 Cu、Cr、Fe、Ti、Mo、Au、Ag、Be、水晶、石墨、碳酸盐岩、陶粒页岩、煤矿床成矿系列组
Pz_2-11SIF	昆仑—阿尔金与晚古生代构造-岩浆-沉积作用有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Co、Ni、V、Ti、S、石棉、石膏、玉石矿床成矿系列组
Pz_2-12IF	祁连—秦岭与海西期构造-岩浆-沉积作用有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Ag、W、Be、Nb、REE、U、P、萤石矿床成矿系列组
Pz_2-18SI	滇藏(三江)地区与海相火山岩有关的 Fe、Cu、Co、S 等矿床成矿系列组
Mz_1-6SI	昆仑—阿尔金与印支旋回构造-岩浆-沉积作用有关的 Au、Fe、Cu、REE、石膏矿床成矿系列组
Mz_1-9SI	三江地区与印支(—燕山)期火山-沉积-岩浆侵入作用有关的 Cu、Fe、Pb、Zn、Ag、Au、石膏矿床成矿系列组
Mz_1-12SIF	川滇黔与印支旋回热水-沉积作用有关的 Pb、Zn、Mn、Sr、石膏、盐、杂卤石、煤矿床成矿系列组
Mz_2-19SI	昆仑—阿尔金燕山旋回与沉积-岩浆作用有关的稀有、Fe、Cu、Au、煤、石膏矿床成矿系列组
Mz-22IF	秦岭—大别与燕山期构造、岩浆、沉积作用有关的 Au、Hg、As、Sb、Ag、Pb、Zn 矿床成矿系列组
Mz-24SI	巴颜喀拉(—三江中上游)与中生代沉积-岩浆-构造作用有关的 Cu、Sn、Ag、石膏、油页岩矿床成矿系列组
Mz_2-35	华北地台东部与燕山期壳幔源基性—中酸性—碱性浅成超浅成侵入岩有关的 Au、Fe、Cu、Mo、Pb、Zn 矿床成矿系列组
Mz_2-36	华北地台西部与燕山期壳幔源基性—中酸性—碱性浅层超浅层侵入岩有关的 Au、Fe、Cu、Mo、Pb、Zn 矿床成矿系列组
Mz_2-37SIF	长江中下游与燕山期壳幔源侵入-喷出岩有关的 Fe、Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 多金属矿床成矿系列组

矿系列(Pz_2-9S);中生代,华北已经发展为大陆,主要是陆内构造演化,缺乏区域性海相矿产,因而其印支旋回的成矿系列组中就不发育海相沉积矿床成矿系列。此外,印支旋回的构造格局延续到燕山旋回,因而中生代两个构造旋回的成矿系列可归属于同一个"组"。

从古生代的南北向挤压构造环境到中生代的陆内但受到太平洋板块斜向远程影响的构造环境,华北地台北缘的内生成矿作用均非常显著,但两个大地构造旋回所形成的与岩浆作用有关矿床成矿系列

的特点也在发生变化。印支旋回是一个关键时期,其成矿系列组的组成不同于加里东旋回和海西旋回,中生代沉积作用形成的矿床成矿系列则明显"欠发育"。

虽然对于早古生代的华北地台北缘,还不能像中生代那样可以给出较为详细的成矿作用发生与发展的框架,因为华北地台北缘在加里东旋回处于什么样的构造环境、具有什么样的演化历史,目前还缺乏翔实的研究。但从矿床成矿系列的角度,至少可以识别出两个矿床成矿系列,即与岩浆作用有关的Fe、Cu、Pb、Zn、Cr、硫铁矿矿床成矿系列(包括小绥河的铬铁矿、放牛沟的铅锌硫铁矿)和与海相沉积作用有关的石灰岩矿床成矿系列,在后期的造山运动中也通过变质作用形成了一些板岩矿床。

到了晚古生代海西期,华北地台北缘的矿床成矿系列组与加里东期相似,但格架更为清晰,也由沉积成因成矿系列、岩浆成因成矿系列和变质成因成矿系列三部分有机组成,但以岩浆成因成矿系列最为发育。其中,岩浆成因矿床成矿系列由海相火山岩、基性超基性岩和中酸性侵入岩三部分构成,对应于三个矿床成矿亚系列,分别包括红太平式的多金属块状硫化物矿床、红旗岭式的铜镍硫化物矿床、索伦山式的铬铁矿、铁马土沟式的钒钛磁铁矿、红石砬式的铂族元素矿床、宫胡洞式的铜金矿、白乃庙式的金矿,等等。而且,与中酸性岩浆作用有关的成矿作用可延续到中生代,如东坪金矿和白乃庙金矿,但以铬铁矿为主的成矿作用未见延续到中生代。因此,总体上,早古生代的华北地台北缘以拉张为主,海相正常沉积矿床最为发育;到了晚古生代,这种拉张格局仍然延续,并且有更多的幔源岩浆侵入和喷发,形成了多种类型的与基性超基性岩有关的矿床;到了海西后期,随着造山运动的进行,壳源岩浆活动越来越强烈,并一直延续到中生代。

到了印支期,华北地台北缘发生了与分布范围很广的与中酸性岩浆侵入-喷发活动有关的成矿作用,形成了一个以 Au、Ag、Pb、Zn、Mo、磷矿床为主的矿床成矿系列(Mz-4),其中的具体矿床在时间和空间上的分布也是有规律的,不是随意的。比如,与中酸性火山-侵入岩有关的 Au、Ag、Pb、Zn 矿床主要出现在内蒙古、河北和辽宁三省区的交界地域,成矿时代相对较晚(撒岱门沟钼矿 201.6～215.6Ma,柴火栏子金矿 206.4Ma,金厂峪金矿有 221～186Ma 的记录,牛心山银矿 234～180Ma,Wang Denghong et al., 2014);与幔源碱性超基性岩有关的磷、铁矿床主要集中在冀北(矾山磷矿和姚家庄磷矿形成于 227～206Ma,Wang Denghong et al., 2014);与碱性花岗岩有关的金矿则主要分布在乌拉山—大青山一带,形成更早,如乌拉山金矿的同位素年龄为 247.7～203Ma(Wang Denghong et al., 2014)。这样,华北地台北缘在这一时期的成矿作用具有从早到晚,自西向东逐渐推进的发展趋势(具有剪刀式闭合特点,Xu Zhigang, 2004),岩浆作用从侵入开始向喷发的方向发展,成岩成矿物质来源也从幔源→壳源为主发生变化,成矿元素组合也由简单到复杂,并出现较低成矿温度的矿床式,如牛心山的银矿。

可见,仅就华北地台北缘而言,随着地质时代的变迁,矿床成矿系列的组合也在发生变化,早期以沉积、岩浆和变质三个系列共同发育且沉积矿床成矿系列最发育为特色,到后期是岩浆成因成矿系列"一枝独秀"。这样的变化规律反映的是大陆成矿体系形成的基本过程,显然与大洋成矿体系形成过程中矿床成矿系列的变化是不同的(即沉积成因成矿系列最为重要)。总之,中国地壳的演化经历的是多旋回构造,但每个构造旋回不是简单的重复。相应地,每个构造旋回中的矿床成矿系列组也不是简单地重复再现,而是在发展中有变化。

2.2　辽吉裂谷带

对于前寒武纪的矿床成矿系列,采用矿床成矿系列组的概念有其独到之处。如辽吉裂谷带、华北地台西部、华北地台中东部、秦岭—祁连等地均存在由岩浆成因、沉积成因和变质-流体成因矿床成矿系列有序组合的矿床成矿系列组,代表了一个构造旋回的产物。辽吉裂谷带是个"古老"的概念,也被认为是中国最古老的裂谷带之一,而近年来随着同位素年代学新资料的积累,有人提出了该裂谷带不存在的看法。Shen Baofeng et al. (2018) 认为,辽吉地区的古元古代变质岩系连同朝鲜东北部的古元古代摩天岭系一起组成一条位于太古宙龙岗地块和狼林地块之间的古元古代活动带。那么,无论是什么样的构造背景,辽吉成矿带是客观存在的,而对该成矿带中成矿系列组的研究,有没有可能反过来为解决其构造背景问题提供依据呢?

首先,"辽吉裂谷带"比较特殊,研究得比较详细,其阶段性比较清楚,演化顺序是可以区分开的,与成矿的阶段性对应得也比较好,即裂谷演化与成矿演化在历史上是对应的。

(1)早期形成有与基性超基性岩有关的铜镍硫

化物矿床成矿亚系列(如赤柏松,相当于 B.И. 斯米尔诺夫所描述的地槽旋回第一组矿床),基性超基性岩的侵入可能是裂谷开始拉张的标志,而基性超基性岩出现在裂谷演化的早期而不是晚期,意味着裂谷的拉张是由于地幔强烈作用的结果(即主动拉张型裂谷,有可能是地幔柱导致的)而不是地壳拉张导致幔源物质上侵(即被动拉张型裂谷,pull-apart)。

(2)随着裂谷作用的进一步发展,地壳减薄,活化剥蚀物质向盆地中堆积,同时由于花岗岩的风化剥蚀提供了 U 等成矿物质来源,从而在裂谷边部的陆缘碎屑岩建造中形成了以铀矿化为特色的第二个矿床成矿亚系列(如连山关铀矿,赋存在辽河群浪子山组中,铀矿化按成因可划分为沉积变质型、中高温碱交代型和中低温热液充填型,U-Pb 成矿年龄分别为 2114Ma、1891Ma 和 1829Ma)。

(3)接下来是地壳的进一步拉张、减薄以至于出现双峰式海相火山岩建造,从而进入真正的裂谷阶段,期间形成的与海相火山作用有关的矿床除了铁、铜等许多裂谷环境中常见的块状硫化物矿床之外,还形成了大量的硼、铁矿(如翁泉沟式、后仙峪式、高台沟式)。此类矿床赋存在辽河群的里尔峪组之中,比浪子山组高一个层位。

(4)随着裂谷的扩张,进入到碳酸盐岩沉积阶段,也即远离大陆或深水环境,此时可能形成有块状硫化物型铅锌矿床,即青城子式的 SEDEX 型矿床,赋存在里尔峪组之上的高家峪组中,同位素年龄为 1844Ma(Chen Yuchuan et al., 2006a,2006b)。

(5)辽吉裂谷开始进入新的阶段,即洋壳范围缩小,地槽褶皱并伴随有变质作用,除了使早期矿床变质、变形之外,辽河群大石桥组的富镁碳酸盐岩也发生变质,形成一个由菱镁矿、滑石、水镁石、岫玉等富镁矿物组成的成矿亚系列,包括辽宁的大石桥和山东的李博士夼等。

(6)与辽河群大石桥组时代大致相当,但空间位置更靠北的老岭群主要分布在吉林境内,同样有一套富镁的沉积岩,但主要是富镁富碳的黏土岩,形成的是一个 Fe、Cu、Co 矿床成矿亚系列(如大栗子、大横路、松树岗)。

(7)随着辽吉裂谷的逐渐封闭,最后形成了一个以 Au、Ag 为主的成矿亚系列,主要赋存在辽河群大石桥组和盖县组中,但成矿时代可能晚于成岩时代。

其次,不同类型的矿床成矿系列对应于不同的大地构造环境。在洋陆转化的过程中,随着大地构造环境的变化,地质作用在发生着有规律的变化,成矿作用也相应变化,进而形成不同的矿床成矿系列,组成一个完整的"矿床成矿系列组"。反之,如果其他构造单元出现类似的"矿床成矿系列组",则意味着经历过类似的地壳演化过程。但是,世界上一模一样的构造单元是不存在的,一模一样的成矿系列组也是不存在的。比如,如果以硅质岩代表大洋深海环境,以富硼镁的蒸发岩代表浅海环境,其他地质事件不变,则成矿系列中的成矿作用及所形成的矿产资源会有所区别,具体可表现为硅质岩和硼质岩的区别,但代表的构造演化却是"陆→洋→陆"与"陆→海→陆"的重大区别。此外,古陆结合带往往也是新大陆内部的一个活动带(如华南的钦杭带,西南的攀西裂谷带在晋宁期曾经是一个拼合带),完全有可能成为下一个构造旋回重新拉张的薄弱带,因而,即便是辽吉裂谷两侧基底建造的性质完全不同、同位素年龄对不起来,也难以否认裂谷的存在。关键问题是,裂谷是什么时代的裂谷?延续多长时间?这是需要深入研究的。从"辽吉裂谷"古元古代矿床成矿系列组的内部结构看,既有岩浆作用形成的内生矿床,也有沉积作用形成的沉积矿床,更有变质作用形成的变质矿床,甚至完全可能发育大量的流体成因热液矿床(裂谷沉积岩中丰富的"水"完成可能在沉积期后到造山运动期间乃至于更晚的构造旋回中,转化为成矿流体)。因此,辽吉裂谷式的"成矿系列组"由沉积(S)、岩浆(I)、M(变质)及流体(F)四类成矿系列组成,可以较完整地代表威尔逊旋回的演化历史,或者更准确地说,可以代表地槽背景下的成矿演化历史。

类似的情况在太古宙也是可能出现的。目前识别出新太古代时期的华北地台,在其东部和西部分别形成了两个类似的矿床成矿系列组,二者虽然时间不一致,但可以对比,演化轨迹也相似,因而也可以互为找矿标志。其中,华北地台中东部新太古代的 Fe、Cu、Au 矿床成矿系列组分布在辽吉、冀东、鲁西一带,与新太古代前期(2.8~2.7Ga)花岗-绿岩带的形成有关,具体包括红透山式的块状硫化物铜锌矿床、弓长岭式的铁矿、司家营式的铁矿,分别赋存在鞍山岩群和滦河岩群中。华北地台中西部的 Fe、Cu、Au 矿床成矿系列组则主要分布在鲁西、五台、中天山、色尔滕山等地,与新太古代后期(2.7~2.5Ga)花岗-绿岩带的形成有关,包括五台地区五台群中的山羊坪式铁矿、鲁西泰山岩群中的苍峄式和韩旺式铁矿、内蒙古色尔滕山群中的三合明式铁

矿、中条山涑水杂岩中的铜矿等,另外还出现了与基性超基性岩有关的桃科式 Cu-Ni 矿床、桐峪式 Cr-Ti-P 矿床等。宏观上看,新太古代的铁矿在辽宁、河北、山东和山西均出现,红透山式的铜矿在辽宁有成型矿床,在山西的涑水杂岩中也已经发现,那么,山东是否有铜锌矿床,山西和辽宁是否有铜镍矿床以及后期与阜平运动有关的金矿是否普遍出现,就值得考虑了。

总之,根据相似构造旋回出现相似的矿床成矿系列组的规律,有助于为地质找矿提供新的依据。

2.3　秦祁昆成矿域

秦祁昆成矿域与古亚洲成矿域、特提斯成矿域、环太平洋成矿域等相比,有共性也有个性。首先应该指出,不同时代的成矿域具有不同的地质内涵。比如说,中生代的太平洋成矿域与新生代的太平洋成矿域不是一回事,古生代的古亚洲成矿域与元古宙的古亚洲成矿域也不是一回事。因此,秦祁昆成矿域也具有明显的随时代变化的特点,而且常常表现为与其两侧的成矿域具有不同程度的亲和性。如,古生代时期,秦祁昆成矿域介于塔里木-中朝地台与扬子地台之间,中生代以来则还受到了特提斯-喜马拉雅成矿域的显著影响。因此,要严格地区分出秦祁昆成矿域与塔里木-中朝地台、扬子地台及特提斯-喜马拉雅成矿域的地理界线和构造界线是困难的。此处认为,秦祁昆成矿域介于相邻地台之间地槽、及从不同地质历史时期的相邻地台中分离或活化出来、经过长期的演化又组合到一起的构造-成矿域,其范围可以与构造域不一致。这样一个地域,显然还没有发展到稳定地台的阶段,其长期活动性和特殊的构造环境有利于成矿作用的长期发生与发展,当然也可能产生破坏作用。因此,保存条件对于找矿是至关重要的,但对能否成矿或者说对于成矿系列组的完整性却并非关键。

秦祁昆成矿域的特殊性具体可表现为:① 两侧的地台区(如塔里木-中朝地台和扬子地台)可以长期提供丰富的成矿物质来源,因而沉积成因矿床成矿系列比较多,矿产资源丰富;② 由于长期以来一直处于活动状态,多次的"开合"运动,导致地壳始终未能完成固结,深部来源的岩浆活动易于达到地表,因而与岩浆作用(包括侵入的和喷发的)有关的矿床成矿系列相当发育;③ 由于经历了多个旋回的造山运动,卷入造山带的沉积岩地层中的流体和成矿物质易于活化,形成了许多与地质流体有关的矿床成矿系列(包括许多以往认为成因不明的铅锌、金、锑矿床成矿系列);④ 多次的造山运动及造山运动期间强大的构造应力作用,促使了变质成因矿床成矿系列的形成,而且所涉及到的同时被变质的不只是沉积岩,还有岩浆岩以及更古老的变质岩,如由矽线石、蓝晶石和红柱石及石榴石、石墨、蓝石棉、金红石等复杂矿种组成的矿床成矿系列(包括杨乃沟式的红柱石矿床、隐山式的蓝晶石矿床、崔庄式的矽线石矿床、小岔沟式的石墨矿床等等),目前还只在秦祁昆成矿域出现;⑤ 秦祁昆成矿域在目前的地理位置上属于中国的"中央造山带",地质工作程度相对于南北两侧要低,因而仍然是今后地质找矿的重点地区。从找矿和成矿两个角度,揭示秦祁昆成矿域的形成过程无疑具有重要意义。比如,秦祁昆成矿域中的锑矿(图 1),主要形成于燕山期,但矿脉可以切割不同时代的地层,这在新疆最大的锑矿——硝尔库勒矿区即可见到,二叠系和三叠系中均含锑。但这种现象在整个成矿域也可以看到,如,东部陕西境内的高岭沟-蔡凹锑矿赋存在前寒武纪变质岩中,中部甘肃的尹家坪等锑矿赋存在石炭系浅变质岩中,中南部的拉尔玛锑多金属矿床则赋存在寒武系中,而西部青海石藏寺、东大滩锑金矿赋存于三叠系碎屑岩中。可见,在中生代锑矿成矿的过程中,卷入到造山带的地层是多种多样的,赋存在不同时代地层中的锑矿并非属于不同的矿床成矿系列,当以岩浆作用为主时属于岩浆成因矿床成矿系列,当以流体作用为主时属于流体成因矿床成矿系列,但岩浆成因(M)和流体成因(F)的系列是否存在内在成因联系难以查明时,将这两个系列归属于同一个成矿系列组,则不但顺理成章,而且可以规避一些争论,便于更有效地指导地质找矿。也就是说,既然在陕西的前寒武系变质岩中可以找到燕山期的锑矿,那么,在西部青海、新疆等地,除了在中生代建造层中找矿之外,也要注意到深部的古生代建造层甚至更古老的前寒武纪基底地层中去找锑矿。

秦祁昆成矿域在太古宙时期是否已经有了雏形?尚待研究。但赋存于登封群(2570～2501Ma)中的许昌式铁矿以及太华群中的铁山式铁矿,与华北地台中的铁矿(如色尔滕山群中的三合明式铁矿,滦县岩群中的司家营式铁矿、山草峪组中的苍峄式铁矿和雁翎关组的韩旺式铁矿)具有可比性,而类似的矿床在扬子地台罕见(扬子地台当时尚未发育到华北地台的程度)。因而,许昌式铁矿所在位置属于华北地台。向南到大别山区,新太古代的大别杂岩或五河岩群一般认为属于华北地层单元(Zhou

Yunsheng et al., 2002)。因此,五河岩群具有强磁性,是否有铁矿尚待研究,但在后期卷入到秦祁昆成矿域中的由五河岩群所代表的基底,有可能属于华北地台的一部分。也就是说,秦祁昆成矿域在太古宙可能是华北地台的一部分,或者说是在从华北地台开裂出来的小陆块基础上发展起来的。那么,在秦祁昆成矿域与华北地台之间应该有元古宙尤其是早—中元古宙的大陆边缘裂谷带以及相应的矿床成矿系列。这恰恰可以得到华北的中条裂谷带铜多金属矿床以及西北的金川铜镍硫化物矿床所在的矿床成矿系列组的佐证,也可以从大地构造研究成果中找到依据(Sun Dazhong, 1991; Sun Jiyuan et al., 1995; Tang Zhongli et al., 2002)。

实际上,到了元古宙,尤其是中—新元古代,秦祁昆成矿域的构造活动非常强烈,沉积记录、岩浆活动和变质作用都很强烈。如,秦岭—祁连一带中、新元古代构造旋回的 Fe、Cu、Pb、Zn、Ni、V、Ti 矿床成矿系列组(Pt_{2-3}-6SI)包括有煎茶岭式与基性超基性岩有关的 Cu-Ni 硫化物矿床,赋存在碧口群中的阳坝和筏子坝式的块状硫化物铜矿和铁矿床,赋存在朱龙关群中的镜铁山式铁-重晶石矿床,以及赋存在汝阳群云梦山组海相碎屑岩中的岱崮寨式铁矿等等,总体上以海相-火山沉积成矿作用为主。同一时间段,西昆仑也形成了赋存在布伦阔勒群海相碎屑岩中的布伦口式铁、铜、锌矿床以及赋存在塔昔达坂群中的塔木其式块状硫化物铜锌矿床。这表明,秦祁昆成矿域在中元古代和新元古代的前期处于海相环境,但考虑未见到与蛇绿岩套有关的矿床、而陆缘碎屑岩和陆缘拉张环境下的双峰式火山岩非常发育,推测当时可能是狭长的海槽,秦岭和祁连海槽可能相通,而西昆仑是否与秦岭—祁连相通则不得而知。到了新元古代,这一狭长的海槽卷入造山运动,形成了“祁连—秦岭与新元古代构造旋回有关的 Fe、Mn、Ag、Co、Zn、V、Mo、Cu、Ni、磷、重晶石、石墨、红柱石、矽线石、蓝晶石、石墨、菱镁矿等复杂矿种组成的多个矿床成矿系列构成的“矿床成矿系列组”(Pt_3-3SIM),包括沉积成因、岩浆成因和变质成因三个矿床成矿系列,每个系列又由多个亚系列组成。类似的矿床成矿系列组也出现在昆仑(Pt_3-11SIM)和阿尔金地区(Pt_3-12),如昆仑地区与火山沉积作用有关的卡拉玛铜矿、与基性超基性岩有关的柯岗布拉克石棉矿床、与花岗伟晶岩有关的叶城三素云母矿床和阿克陶巴尔达仑水晶矿床、与变质作用有关的皮山布琼铁矿及和田梅爷山石墨矿床。阿尔金地区与海相火山-沉积作用有关的有英格布拉克的铁矿、若羌大通沟的铜银矿,与基性超基性岩有关的有安南坝式石棉矿床等。因此,昆仑、阿尔金、祁连、秦岭地区在新元古代期间的成矿作用具有明显的可比性,所经历的构造变动也相似,可能意味着新元古代之后秦祁昆成矿域基本成型。

但是,新元古代的秦祁昆成矿域很快又受到了早古生代加里东期构造旋回的改造和叠加,在西昆仑形成了与海相火山-沉积作用有关的铁、铜矿床成矿系列(包括黑黑孜站干、契列克其的铁矿);在柴北缘—祁连形成了由 Cr、Fe、Cu、Ni、Pb、Zn、W、Mo、Au、REE 等多个矿种的矿床组成一个“矿床成矿系列组”(Pz_1-10SIF),包括沉积、岩浆、变质-构造流体三个成矿系列,分别包括白银厂式的铜矿、锡铁山式的铅锌矿、元石山和古浪峡式的铜镍矿、大道尔吉的铬铁矿、塔尔沟式的钨矿、寒山式和滩间山式的金矿;在秦岭形成了由磷、Mn、Ni、Mo、V、U、Cu、Zn、Ba、稀有金属和白云母矿床组成的一个“矿床成矿系列组”(Pz_1-11SI),也包括沉积、岩浆和变质成因三个矿床成矿系列(只是变质成因的伟晶岩与岩浆成因系列可以合在一起),其中与海相火山-沉积作用有关的块状硫化物矿床依然发育(如刘山岩式的铜锌矿),但与黑色岩系有关的 P、Mn、V、Mo、Ba 等组合的矿床更加突出。因此,加里东期间,秦祁昆成矿域各地的成矿作用发育程度不同,成矿特点各有千秋,但也多经历了从拉张到闭合、造山这样一个构造旋回。

进入晚古生代,类似的矿床成矿系列组再次出现。如,在昆仑—阿尔金一带形成了由 Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Co、Ni、V、Ti、硫、石膏、玉石等矿床构成的矿床成矿系列组(Pz_2-11SIF),包括岩浆成因、沉积成因和构造-流体成因三个系列。但是,这三个矿床成矿系列在时间上的配置关系发生了变化,即不再是先沉积、后岩浆、再变质,而是先岩浆后沉积,如新疆洛甫阿其克的石膏矿床出现在二叠纪,而早期泥盆纪碳酸盐岩地层中的铅锌矿(如塔木铅锌矿)有可能形成于海西晚期,德尔尼、驼路沟等地的形成于拉张环境的矿床也都形成于海西晚期。在祁连—秦岭一带也形成了一个类似的矿床成矿系列组(Pz_2-12IF),包括洛大式的硫铁矿、大西沟式的重晶石-菱铁矿、厂坝式的铅锌矿、塔尔河式的钨矿,并出现了幔源碱性岩浆成因的庙垭式 Nb-REE 矿床。可见,晚古生代的秦祁昆成矿域,可能经历了从造山带向盆地演化的发展阶段,但各地发育程度不同,构造环

境差别很大。也就是说,早古生代加里东运动之后,秦祁昆成矿域的海西期造山运动具有非均衡发展的特点,有的地方是由海洋变陆地,有的地方则是由造山带向盆地和海洋方向发展。幔源岩浆作用均在晚期出现,如秦岭庙垭的岩浆碳酸岩、阿尔金若羌的碱性辉长岩(伴随有钒钛磁铁矿)。

进入中生代,印支旋回的秦祁昆成矿域进一步发育,但沉积作用形成的矿床成矿系列明显减少,与其逐渐结束海相演化的历史密切相关,但陆相盆地(残余的或构造作用新生的)沉积矿床、流体成因的金矿床和变质成因矿床在不同地段不同程度地发育,代表了秦祁昆成矿域在不同部位处于不同的构造环境:西部可能是洋陆板块碰撞体制、中部是强烈的两大大陆板块之间相互挤压与剪切、东部则是超高压变质带的形成,分别对应于"昆仑—阿尔金 Au、Fe、Cu、REE、石膏矿床成矿系列组"(Mz_1-6SI,包括沉积和岩浆两个系列)、"祁连—秦岭—桐柏—大别与山间盆地有关的煤、黏土矿床成矿系列"和"苏鲁变质成因金红石、水晶、云母矿床成矿系列"。这一时期的秦祁昆成矿域,在空间上可能处于一种立体的"V"形状态,即水平方向上,西开东合;垂直方向上,西减薄东增厚。而三叠纪后期强大的印支运动,不但使甘孜—理塘一带的沉积地体大规模地"挤入"秦岭造山带,而且干扰了造山带的深部构造,导致了下地壳物质的重熔,并扰动了地幔,为燕山期再次进入新的成矿高峰期奠定了基础。因此,印支运动不但破坏了古生代以来秦祁昆成矿域向地台方向发展的趋势,而且为燕山期成矿作用的再度爆发创造了构造条件。

燕山期的秦祁昆成矿域,在西部还处于残余海环境,因而在昆仑、阿尔金、柴达木盆地等地形成了与沉积-蒸发作用有关的矿床成矿系列,如昆仑地区的布雅式煤矿、阿尔金的中南山式石膏矿、祁连—柴北缘的大通式煤矿等,但中部秦岭一带则主要形成了与岩浆作用和构造-流体作用有关的 Au、Hg、Sb、Ag、Pb、Zn 矿床成矿系列组(Mz-22IF),并且在不同的地域有不同的特色,如西秦岭和南秦岭主要形成了赋存在碳酸盐岩和碎屑岩中的 Au、Sb、Hg、U 等矿床,大多数情况下岩浆作用不明显(可能与大量的特提斯洋中沉积岩的覆盖有关),华北地台和扬子地台之间的小秦岭、北秦岭、桐柏—大别地区则明显地以下地壳的活化和大量的岩浆活动为特色,除了金矿外,还有大量的钼矿(南泥湖、栾川、黄龙埔、雷门沟等)、铁矿(如八宝山)、铁铜矿(如银家沟)、铜钼矿(如秋树湾),成矿温度明显较高,但也有萤石(尖山式)和银铅矿(如固始沟)等较低温的矿床形成。秦岭—大别一带的燕山期矿床成矿系列(组)与华北地台另一侧即华北地台北缘东侧的燕山期矿床成矿系列(组)很相似,而且均有自西向东发展的趋势(秦岭的金矿也是西部早东部新,如李坝金矿形成于 210～171.6Ma,八卦庙 232.58～131.9Ma,金堆城 139.1Ma,祁雨沟 125～115Ma,老湾金矿 91.5Ma,Wang Denghong et al.,2014)。这样的一种变化趋势,在秦祁昆成矿域可以看成是印支运动自西向东推进的结果,在华北地台北缘则也许是其远程响应,也许另有成因。

3　"矿床成矿系列组"的成因机制

鉴于矿床成矿系列组是大地构造运动的区域性、历史性产物,对于矿床成矿系列组的正确识别和准确厘定与大地构造演化历史的研究密切相关。只有对大地构造背景进行比较深入的研究,才能正确地识别出在什么样的环境下形成了什么样的矿床成矿系列及亚系列;反过来,对于矿床成矿系列组中各个矿床成矿系列、成矿亚系列及矿床式的深入研究,有助于揭示成矿区(带)的地质背景和构造演化历史。

3.1　矿床成矿系列组是地壳运动的客观记录

矿床的成矿系列是指在一定的时间、一定的空间、由一定的成矿作用形成的一组具有成因联系的矿床的自然组合(Cheng Yuqi et al.,1979; Chen Yuchuan et al.,1998,2006a,2006b),一旦将"一定"明确为"确定",即在特定的时间段、特定的地质构造环境、由特定的成矿作用形成的特定的矿床组合自然体,即可厘定出每一个具体的矿床成矿系列。矿床成矿系列组则是在一定的时间、一定的空间由地壳运动中各种成矿作用形成的具有成因联系的一组成矿系列;当地质历史时期、地质环境空间单元确定,即在特定地质历史时期由特定的地壳运动所形成的一组相互关联的矿床成矿系列,即可厘定出具体的矿床的成矿系列组。对于成矿系列组来说,一定的时间可以理解为一个"构造运动旋回",如加里东旋回、海西(华力西)旋回、印支旋回、燕山旋回和喜马拉雅旋回;一定的空间可以理解为一个成矿省,可以对应于一个造山带或大型盆地;而成矿作用包括岩浆成矿作用、沉积成矿作用、变质成矿作用、流体成矿作用及表生成矿作用,但成矿作用是否发育齐全以及所形成矿产资源的种类及矿床类型是否齐

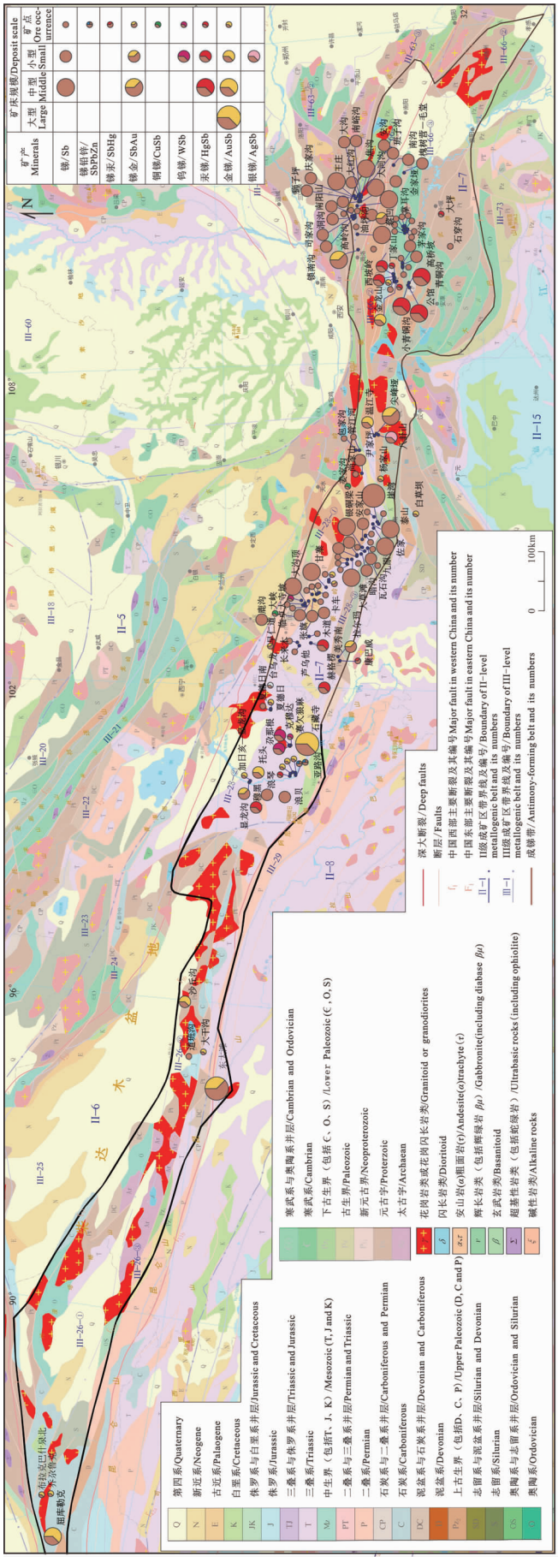


图1 秦祁昆成矿域中锑矿分布简图

Fig.1 Distribution map of antimony deposits in Qinling, Qilian and Kunlun metallogenic domain

全则取决于地球演化历史时期的内在特点及构造背景及构造运动的本质属性。如，阿尔泰成矿省在海西旋回中由岩浆作用、沉积作用、变质作用和流体作用分别形成、但具有内在成因联系的各个成矿系列，共同构成一个矿床成矿系列组；而阿尔泰成矿省在印支旋回中由岩浆作用、沉积作用、变质作用和流体作用分别形成的矿床成矿系列，则构成另外一个矿床成矿系列组；依此类推。但是，在海西旋回，阿尔泰成矿省经历了比较完整的威尔逊旋回，形成的矿床成矿系列组由多种成因类型的系列构成，而印支旋回和燕山旋回只经历了陆内构造运动，并没有演化出洋壳的历史，甚至连“海”还都没有，只有一些山间小盆地，因此，沉积作用形成的矿床成矿系列就不发育，但陆内壳源岩浆尤其陆内岩浆-热-流体作用还是发育的，并且两个旋回实际上具有连续性。这样，阿尔泰的印支旋回与燕山旋回实际上可以作为一个旋回来看待，并且明显不同于海西旋回。可见，①即便是同一个空间，不同的地质历史时期，由于地质作用和成矿作用的独特性，所形成的矿床成矿系列组是不完全一样的。反之，根据不同地史时期成矿系列组的不同特点，有助于深入了解不同时期地壳的性质与演化过程。当然，“将今论古”这一地质学基本原理，在运用时也必须注意其“条件性”，因为地球是演化的，是有生命周期的，是动态的，不能简单地把现今（第四纪）的构造格局与成矿特点简单地复制到几亿甚至几十亿年前；②矿床成矿系列组也是客观存在的，不是人为想象的、主观的，但人类认识自然的过程是艰辛的，因此，人们厘定出来的“矿床成矿系列组”都是主观认识客观事物的阶段性成果，不可避免地带有时代的局限性和方法上的片面性；③矿床成矿系列组的厘定，尽管带有局限性甚至片面性，但主观能动性的发挥，有助于准确把握客观规律。

3.2 矿床成矿系列组是地壳运动的必然产物

地壳运动的结果不但形成了各种各样的岩石以及岩石与岩石之间的相互关系

表 2　威尔逊旋回不同阶段地质特征与成矿系列组的对应关系(据马宗晋等,2003)

Table 2　Correspondent relationship between geological characteristics and minerogenetic series in different stages of Wilson cycle (after Ma Zongjin et al., 2003)

阶段	实例	主导作用	特征形态	岩浆作用	沉积作用	变质作用	流体作用	成矿作用	成矿系列组
胚胎期	东非裂谷	抬升并扩张	裂谷	拉斑玄武岩溢流,碱性玄武岩中心	少量沉积作用	可忽略	来自地球内部甚至幔源的热流体作用于陆壳	稀土等,可能出现内生油气	I+S+F
幼年期	红海,亚丁湾	扩张	陆间海	拉斑玄武岩溢流,碱性玄武岩中心	陆架与海盆沉积,可能有蒸发岩	可忽略	深部热流作用于洋壳	海底热液喷流沉积成矿	S+I+F
成年期	大西洋	扩张	有活动中脊的洋盆	拉斑玄武岩溢流,碱性玄武岩中心,但活动集中于大洋中心	有丰富的陆架沉积	少量		洋中脊蛇绿岩型铬矿?	S+I+F+M
衰退期	太平洋	收缩	有俯冲边缘的洋盆	安山岩质火成岩、花岗闪长岩、片麻岩、深成岩	大量源于岛弧沉积物	局部广泛	沉积岩中的封存水可以在俯冲过程中脱离,萃取地层中的成矿物质而成为成矿流体	大洋碳酸盐岩,Mn、Co;俯冲造山带斑岩型矿床,弧后别子型Cu-Co矿	S+I+M+F
终结期	地中海	收缩并抬升	残留海盆	边缘的火成岩及花岗闪长岩	大量源于岛弧沉积物,但可能有蒸发岩	局部广泛	残余盆地成为热卤水,构造挤压出含矿流体	盆地卤水蒸发成矿	S+I+F+M
遗痕期	雅鲁藏布江缝合带	收缩并抬升	年轻山系	少量	红层	广泛	强烈挤压作用下,含矿流体进一步聚集到构造合适部位,尤其是降温加压部位卸载成矿	变质成矿	M+F+S+I

注:S、I、M、F 分别表示沉积、岩浆、变质和流体成因矿床成矿系列。

(相对于构造),同样也形成了各种各样的矿床以及矿床与矿床之间的相关关系(相对于成矿系列)。因此,运动是原因,矿产是结果,矿床成矿系列组也是其结果。遗憾的是,岩石与岩石之间的关系,已经研究得比较深入而成熟,如,同一块岩石发生弯曲就是褶皱,发生错开就是断层……但是,矿床与矿床之间的关系还远没有达到那样的程度。这是因为,一方面,矿石也是一种岩石,具有自然属性;另一方面,矿石又具有经济属性,其边界条件是随着社会经济技术条件的变化而变化的,这就具有不确定性。但是,更大难题是,矿床成矿系列组究竟是地壳运动独立的产物呢,还是不同地质作用的衍生产物?以金属矿床为例,金属元素的聚集是岩浆作用形成岩浆岩的附属产物呢,还是独立于岩浆作用的"成矿作用"的必然产物?再比如,风化壳矿床(不论是风化壳中的离子吸附型矿床还是红土型金矿抑或风化壳型的锰矿),实际上是随着岩石的破坏而成矿的,并不是沉积成岩作用的产物,一旦固结成岩,反而不能成其为具有开采价值的"矿"了;即便是沉积过程,成岩和成矿也有可能是"敌对"的,因为一个自然地质体中,只有有用物质(矿物质)占的比例越大,其经济价值才大,才可能成为"矿石"而不是普通"岩石"。推而广之,这种"反常"的逻辑关系,不但需要在研究单个矿床时注意,也需要在研究矿床式、矿床成矿系列乃至于成矿系列组时注意。当然,目前的工作还只能在"成岩成矿一致性"方面不断积累,只有认识到一定的"深刻"程度,才可能摆脱"矿石"对"岩石"的依赖性,才能从成矿作用的角度反过来认识成岩过程,认识区域地质过程,认识地球的演化过程。

比如,四川盆地与三叠系海相碳酸盐岩、海陆交互相碎屑岩有关的沉积矿床成矿系列自下而上从嘉陵江组(T_1^2)、雷口坡组(T_2^1)到须家河组(T_3^{2-3}),依此由一系列矿床组成,其中赋存在嘉陵江组中的石膏矿床称为农乐式石膏矿床、天青石矿床可称为重庆式锶矿,赋存在嘉陵江组和雷口坡组中的杂卤石矿床称为渠县式,赋存在雷口坡组中的石膏矿床称为大为式、石盐类矿床称为威西式,赋存在须家河组中的煤矿称为永荣式。这样一组矿床的有序出现,不是偶然的,是四川盆地演化过程的具体体现,不同的矿床式分别赋存在特定的地层层位(上下次序不是随机的),形成于不同的成矿时代,因此比一般的矿床工业类型或成因类型具有更加明确的时空概念和演化意义。显然,对于认识四川盆地这样一个局限范围内盐类矿床的形成历史并不困难,但要进一步认识金属矿产(如锶、锂……)的成矿历史则要困难得多,但二者均是成盆作用的产物,对于认识

四川盆地的“地壳演化”历史和成因机制具有同等重要的意义。

遗憾的是,对大多数的矿床,究竟是在地壳演化的什么阶段、在什么机制下形成的,尚不能清楚地给出明确的答案。即便是对蛇绿岩型的铬铁矿,以往都作为是洋中脊的产物,作为识别威尔逊旋回的一个重要标志,但其实也存在不同的看法,如西藏的罗布莎铬铁矿,究竟是洋中脊的残余(被残留在缝合带)还是直接从地幔上升到构造薄弱带(构造侵位)?对于板块构造理论中如此经典的一个案例都产生了动摇,那么,对于其他典型矿床示范大地构造背景的研究,自然也会遇到难题。而矿床成矿系列组,不再将单个矿床作为识别构造背景的依据,而是一个组,一组具有内在成因联系的矿床更具有“判断力”。例如,东天山在古生代形成了泥盆—石炭纪的石墨、红柱石变质矿床成矿系列,中石炭世残余海盆中形成的石膏、菱铁矿沉积矿床成矿系列;海西中晚期形成的岩浆成矿作用金属矿床成矿系列。这些矿床成矿系列属于同一个“系列组”,但并不对应于一个完整的威尔逊旋回,而是既有对加里东构造旋回的继承,又有对印支旋回的奠基。这三个系列单独来看,似乎并不内在联系,实际上都是在本地区海西构造旋回演化的不同阶段、不同的次级构造单元中形成的,受同一构造旋回不同地质作用的控制。这一矿床成矿系列组具有海西时期的东天山特色,与众不同,也体现了东天山在海西时期的地壳运动的特殊性。

顺便指出,中生代以来,中国大陆地壳的格局基本形成,无论是印支旋回、燕山旋回还是喜马拉雅旋回都不再具有完整的威尔逊旋回演化历史。其中,西南部地区的印支运动尤为特殊。如,松潘-甘孜成矿省属于典型的印支旋回造山带,从沉积作用到岩浆作用再到变质作用以及流体作用都是存在的,而燕山旋回则更像是印支旋回的延续,类似于华北陆块北缘的中生代构造演化历史。以稀有金属成矿为例,从四川的甲基卡向西到四川与青海交界处的石渠再到西昆仑的大红柳滩,含锂辉石的伟晶岩及其相关的花岗质侵入岩几乎是同时形成的(210~190Ma,集中于 2 亿年前后),属于典型的印支晚期—燕山早期成矿。但是,也不能忽视,松潘东侧的可尔因、丹巴以及九龙等伟晶岩型矿床富集区,也存在燕山期的岩浆活动以及成矿作用,按照成矿系列的概念,应该单独建立一个成矿系列;但从区域构造演化和区域成矿演化的角度看,燕山期的伟晶岩型稀有金属矿床和印支晚期—燕山早期的稀有金属矿床,并没有本质上的区别,期间也没有影响全局的“区域性大地构造事件”,继承与延续的特点更加显著。因此,也不妨把燕山期的伟晶岩型稀有金属矿床成矿系列与早期的同类矿床成矿系列共同组成一个“系列组”,以便于完整地反演新生代青藏高原大规模隆升之前的中生代构造演化历史。

实际上,印支运动在中国西南地区典型发育,波及范围广,对应的矿床成矿系列组也发育得比较完整,但对于中国其他地方也不是没有反应,而是“全国性”,只是方式不同,成矿系列也不同。其中,华北、华南、西北地区,表现出古构造的再活化以及印支期点状、线状的岩浆岩与矿床分布特点,既不同于加里东期、海西期也不同于燕山期,具有“激活”古构造并为燕山旋回大规模岩浆活动“铺垫”的意义。如,西北地区阿尔泰成矿省出现了印支期的伟晶岩型稀有金属矿床,而东南地区武夷山也出现印支期的伟晶岩型稀有金属矿床,在秦祁昆成矿域同样存在印支期的伟晶岩型稀有金属矿床,只是其成矿作用的规模、强度、广度均不如青藏高原北缘到东缘、漫长数千千米的松潘-甘孜伟晶岩型稀有金属成矿带,该地区是印支运动的最强烈的场所。

3.3 矿床成矿系列组是地壳运动的特殊代表

地壳运动的结果不只是留下了不同类型的岩石,也留下了岩石之间的错综复杂的关系,推而广之就是“构造”,包括不同类型沉积岩之间的堆叠关系,岩浆岩与沉积岩之间的侵入关系,沉积岩向变质岩的转化关系,等等。矿床也是如此,矿床成矿系列组更是如此。比如,与印支期金伯利岩有关的金刚石矿床成矿系列,意味着印支期的某个地壳部位发生了深达地幔的岩浆侵入活动,“地壳破了一个口子”;如果同一时期的金刚石成矿系列跨越了两个大地构造单位,如华北和华南,则意味着至少有两个金刚石成矿系列,可以构成一个成矿系列组,意味着“地壳不只是破了一个口子,而是破了一个带”。如果说,同一部位还存在加里东旋回的金刚石矿床成矿系列组,则意味着该构造单元不只是在印支期破了长口子,而且不只是破了一次。这样的构造环境以及对应的矿床成矿系列组已然出现在太平洋成矿域的西带,郯庐断裂带及其金刚石矿床可能是其产物,但不局限于此,是否向南延伸到华南,向北东延伸到俄罗斯的远东,还有待于研究,但无疑具有启发性。

4 研究“矿床成矿系列组”的意义

一旦可以从理论上认定,矿床成矿系列组属于地

壳构造演化的自然而且必然的产物,不是随机产物,那么,研究矿床成矿系列组不但具有成矿学方面的理论意义,具有指导找矿勘查实践的现实意义,同样具有深远的基础地质意义,可以为揭示地壳运动的基本规律提供独特的依据,弥补岩石学等方面之不足。

4.1　有助于探索地球演化的规律

地球演化是螺旋式前进的、不可逆的,不同地质时期、不同构造部位的具体运动及其产物是不同的,在成矿方面留下的纪录——包括矿床成矿系列组也是不同的。因此,不同构造单元、不同历史阶段形成的矿床成矿系列组之间既有共性也有个性,但都体现了地壳运动尺度的客观记录,因而与"地层"、"岩石建造"等一样可作为示踪地球演化的依据。目前厘定的一些矿床成矿系列组,以前寒武纪和古生代者比较多。这主要是由于前寒武纪和古生代的地质历史时期比较长,在每个"代"或"纪"的时间尺度上,某个地域的构造环境本身变化比较大,而且受到了中生代和新生代以来构造运动的多次改造,其成矿时期的构造环境和构造性质往往难以识别,但其构造演化的旋回性比较清楚(Chen Yuchuan et al.,2012,2014)。因此,提出"矿床成矿系列组"的概念对于研究一个成矿省区域、一个地质构造旋回的成矿演化历史及其成矿构造环境的变迁具有现实意义。

4.2　有助于深化对成矿构造环境的认识

由于中国大陆的形成经历了多次地壳尺度的构造运动,地壳块体的聚合与离散是常见现象,因此不同块体之间往往是成矿作用易于发生的部位,在不同尺度上强调各时期成矿环境跨越已有的构造单元就显得尤其重要。比如:① 在矿区、矿田或构造层尺度上。如广东的长坑金矿和富湾银矿实际上定位于中新生代三水盆地与盆地边部古陆区的过渡带,盆地中也可能找到更多金属矿床;② 在成矿带尺度或地壳尺度上。如西南三江地区新生代与构造-岩浆作用有关的 Au、Cu、Pb、Zn 矿床成矿系列出现在扬子地台西缘与松潘-甘孜褶皱带过渡部位,相应的岩浆作用不但出现壳源重熔的 S 型花岗岩(如折多山岩体),而且出现幔源的基性超基性岩脉和基性岩、碳酸岩(如牦牛坪),与这个矿床成矿系列形成相对应的地质作用已经超出了地壳范围而涉及到地幔(牦牛坪这样的稀土矿床一般出现在裂谷带而不是造山带,如东非裂谷带);③ 在成矿域、成矿省尺度上。如晚古生代与地幔柱事件有关的矿床成矿系列组,实际上包括地表的沉积矿床成矿系列、地壳中的热流体矿床成矿系列和地壳深部及地幔中形成的矿床成矿系列,不但跨越了陆与海的界线(峨眉山玄武岩分布区东部主要是陆相喷发,与此同时,西部则是海相喷发),而且超越了地壳与地幔的界线,甚至可能通过影响水圈、生物圈、大气圈而跨越更大的时空范围。因此,在不同尺度上注意"成矿环境不等于构造单元"具有积极的现实意义,为我们开拓思路(如到盆地中去寻找金属矿床、到造山带去寻找非造山型矿床、到板块过渡带或超壳断裂分布带去寻找幔源矿床)提供了新的依据。

4.3　有助于总结复杂的成矿规律

对于研究得比较清楚的某个地壳单元而言,在不同的阶段其构造属性是变化的,相应的成矿作用也是明显有别的。这在 В И·斯米尔诺夫等人的著作中已经有了详细的描述。如,对于地槽而言,早期阶段,在拉张环境中形成与细碧角斑岩有关的块状硫化物矿床和铁、锰矿床,在深断裂主要形成与基性超基性岩有关的岩浆型铬、钛、磁铁矿和铂族元素矿床,与斜长花岗岩-正长岩有关的有矽卡岩型铜铁矿床;到了地槽演化的中期阶段,随着花岗岩类的侵入形成有伟晶岩型、矽卡岩型和热液型有色、稀有金属矿床和金矿床;到了地槽演化的晚期,随着一系列小岩体的侵入往往伴随有有色、稀有金属、贵金属和放射性金属矿床的形成。因此,在地槽演化的不同阶段,地质作用不同,成矿作用也不同,但其先后关系往往是有序的,是地槽演化的阶段性所决定的。这种成矿作用在时间、空间和成因上的有序组合即是成矿规律的一部分。从矿床成矿系列的角度,不同阶段和不同地域中与不同的地质作用有关的矿床成矿系列也不是随意出现的,而是有规律的。这种在地壳演化的一定历史构造旋回时期、在一定的构造环境中所形成的一组有序组合的矿床成矿系列,即是矿床成矿系列组。

比如,阿尔泰与天山,其古生代的矿床成矿系列组可以对比(表 3)。阿尔泰成矿省在海西期经历了从西伯利亚大陆西南缘拉张到后期褶皱造山的过程,在拉张阶段形成了与海相火山-沉积作用有关的 Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Ag 矿床成矿亚系列,在后期的造山过程中分别形成了与中酸性侵入岩有关的 Cu、Au 成矿亚系列、与伟晶岩有关的稀有金属、宝石、白云母矿床成矿亚系列、与构造-岩浆-流体作用有关的 Au 矿床成矿亚系列,并且复合了一个与基性超基性岩有关的 Cu-Ni 硫化物矿床成矿亚系列。海西期的这一矿床成矿系列与中生代与岩浆作用有关的稀有金属、宝石、Au、W 矿床成矿系列可以组成

一个跨古生代和中生代的矿床成矿系列组,代表了阿尔泰造山带从古生代到中生代演化历史的必然产物。类似的矿床成矿系列组也出现在东天山地区,除了海西期的矿床外,中生代与花岗岩类有关的稀有金属、有色金属矿床也同样出现,并且同样复合了一个与幔源基性超基性岩有关的Cu-Ni硫化物矿床成矿亚系列。因此,根据阿尔泰造山带在中生代形成了大量稀有金属、有色金属矿床的事实,我们认为东天山地区也可能存在中生代的成矿作用,包括伟晶岩型的稀有金属矿床。通过近年来的研究,也的确证实东天山的白山钼矿形成于中生代(辉钼矿Re-Os等时线年龄为229Ma),相邻地区北山的辉铜山-花牛山铜矿形成于194~192Ma,金窝子金矿形成于230~228Ma,南金山金矿形成于250~232.7Ma(Wang Denghong et al., 2014)。阿尔泰的稀有金属成矿作用一直可以延续到燕山期(如可可托海三号脉),而东天山的镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床形成于印支期(243Ma,Wang Denghong et al., 2014),近年来在镜儿泉的东部也发现了"红岭"等伟晶岩型的锂辉石矿床。

表3 阿尔泰成矿省、天山成矿省与昆仑-阿尔金成矿省在古生代和中生代成矿作用的对比

Table 3 Paleozoic and Mesozoic mineralization of Altai metallogenic province, Tianshan metallogenic province and Kunlun-Altun metallogenic province

时代	海西中晚期	海西期	海西早中期	海西晚期	海西中晚期	印支—燕山期
矿床类型	与基性超基性岩有关矿床	与火山作用有关铁矿床	与海相火山作用有关块状硫化物矿床	与大型剪切带或构造走滑及相关岩浆-热液作用有关金矿	斑岩-矽卡岩型	与变质-岩浆作用有关伟晶岩型稀有金属-白云母-宝石矿床
阿尔泰	喀拉通克	蒙库、阿巴宫、乔夏哈拉	阿舍勒、可可塔勒	多拉那萨依、赛都、萨尔布拉克	希勒克特喀拉苏、索尔库都克	可可托海、库鲁木图、大喀拉苏、小喀拉苏、阿祖拜
天山	黄山、黄山东、土墩、箐布拉克	式可布台、磁海、雅满苏、尾亚	小热泉子、达坂城	康古尔塔格、石英滩、西凤山、望峰、阿希、玉西	土屋、延东	白山
昆仑-阿尔金	阿帕、英格里克、茫崖、安南坝、阿尔马斯、塔什赛因、密尔岱山	驼路沟、德尔尼式、赛什塘	卡兰古、塔木、若羌红柳沟	库地、大同	大红柳滩、白干湖、火烧云	

注:为便于讨论,此表仅涉及古生代和中生代。

4.4 有助于抓住关键、指导找矿

提出"矿床成矿系列组"的概念,对于研究地壳运动的基本规律具有重要的示踪意义,对于成矿预测同样具有重要的指导意义。鉴于一个演化完整的构造旋回应该伴随有配置相对完整的一组矿床成矿系列,从较理想的角度说,一个"矿床成矿系列组",可包括与岩浆作用有关的(I)、与沉积作用有关的(S)、与变质作用有关的(M)、与区域性构造事件-流体作用有关的(F)及与表生作用有关的(H)5类矿床成矿系列,每类矿床成矿系列又可包括不同的矿床成矿亚系列。如果构造运动以拉张为开始到造山运动结束为一个旋回,则理想化的组合序列表现为:早期出现海相火山作用有关的块状硫化物矿床成矿(亚)系列→中期正常沉积的海相非金属(有时伴随有金属)矿床成矿(亚)系列→后期岩浆侵入作用有关的矿床成矿(亚)系列→晚期变质和构造-流体成因矿床成矿(亚)系列,分别对应于拉张(裂谷化)→洋盆或海盆→挤压碰撞或造山运动几个不同的地球动力学环境,而这样的矿床成矿系列的先后排列是有序的,不是随意的,是由地壳运动的一般规律所决定的。因此,同一个"矿床成矿系列组"中不同矿床成矿系列的形成先后是有序的,即可称为"成矿序列"。如果矿床成矿系列的排列顺序不完全或出现相反的情况,则表明构造演化的顺序是相反的,或缺少某个演化阶段,即非标准"旋回"。对于标准的或演化比较完善的旋回,即使目前已知矿床很少,也不可轻易放弃对可能存在的矿床及矿床成矿(亚)系列的预测。如中国西南部的特提斯成矿域在印支旋回经历了从大陆边缘拉张到洋盆再到封闭造山以及造山后的陆内演化过程,因此,虽然目前已知的与拉张阶段双峰式海相火山岩有关的块状硫化物矿床还比较少,尤其是铜矿床比较少,但成矿的可能性是不能排除的。比如四川西部盐源一带的青天堡组、得荣一带的党恩组(厚度965~1687m。厚度据《中国地层典·三叠系》(《中国地层典》编委会,2000)。下同)、巴塘一带的列衣组(厚度1919m)、白玉一带的根隆组(厚度985m)、雅江一带的瓦多组(厚度>2000m),青海玛多的洪水川群(厚度1218~1971m)、玉树的巴塘群(厚度数千米)、西藏东部江达的普水桥组(厚度600m)、洞卡组(厚度2600m)、

察雅的竹卡组(厚度 2000～3000m),云南中甸的尼汝组(厚度 1919m)、维西的攀天阁组(海相细碧角斑岩的厚度 1270m)和崔依比组(9 个喷发旋回,厚度 5697m),等等,都具有赋存块状硫化物矿床的可能性。目前已知的呷村超大型银铅锌矿床赋存于上三叠统勉戈组(或称图姆沟组)中,但可以预测,三江地区与三叠纪海相火山作用有关的块状硫化物矿床绝不止呷村一处。

5　问题讨论

5.1　成矿系列组与成矿构造环境

对于矿床成矿系列组的研究还只是开头,许多问题尚待深入探讨。由于研究程度的不同,目前对于构造旋回的延续时间和涉及范围都没有固定的界线,对于太古宙和元古宙时期的构造旋回更是"伸缩性"很大。因此,通过对于矿床成矿系列在一定时空范围内配置关系的研究,反过来有助于研究当时的构造性质和演化历史。

矿床成矿系列组的形成与大陆成矿体系形成的阶段性与旋回性是存在内在成因联系的,这为从地壳演化的历史来考察矿床成矿系列时空分布的规律性提供了新的切入点,即将一组具有时空及成因联系的矿床成矿系列作为一个整体来"标定"地壳的演化过程,而不是根据一个一个的单个矿床,尽管单个矿床也是一定的大地构造环境下的产物;也不是根据某一矿床类型来示踪大地构造环境,如斑岩型铜矿代表了板块俯冲构造体制下的产物,而块状硫化物矿床代表的是裂谷拉张环境;也不是根据某一具体的矿床成矿系列来示踪大地构造演化的轨迹,因为单个的矿床成矿系列尽管也是特定的成矿作用的产物,但往往只是地球演化某一时间节点、某一特定构造环境下的特定产物,往往"就事论事"而未更多考虑"前因后果"。也就是说,应用"矿床成矿系列组"的概念来研究成矿规律,不但要搞清楚该"成矿系列组"由哪一系列"成矿系列"来构成(而不是哪些具体的矿产地),而且要搞清楚不同的矿床成矿系列之间的内在成因联系,更要搞清楚这些不同的矿床成矿系列(而不是单个的矿产地)所对应的大地构造环境,这样才能借以揭示大地构造演化的历史。可见,其研究的层次、深度和尺度都要比通过典型矿床的成矿构造背景研究要复杂得多,要求也更高。典型矿床是基础,但不能局限于典型矿床;只有从典型矿床这一特殊性中找到一般性,才能指导找矿突破,因为新发现的矿产地、期望被找到的矿产地,可能完全不同于已知的典型矿床。也就是说,矿床成矿系列组的研究,不能"只见树木,不见森林",也不能"只见森林,不见树木"。是特殊性与一般性的紧密结合,也是必然性与偶然性的紧密结合,更是现实性与预见性的"纠结"。

5.2　成矿系列组形成演化的不均衡性与相对完整性

需要指出的是,囿于观察时间尺度的局限性,人类还只能从大陆上去寻找大洋演化的痕迹。也正因为如此,1974 年杜威(J. F. Dewey)和伯克(K. Burke)把大洋从张开到闭合的整个过程命名为威尔逊旋回,但其实这种大洋开闭的过程在大洋中难以观察到,却有可能保留在大陆岩石圈上。与之对应,大陆由形成到消亡的过程可能只有到大洋中去寻找了(Ren Jishun et al., 2015)。那么,不妨把大陆从闭合到张开的过程称为"反(逆)威尔逊旋回"。大洋由开到合,大陆由合到开。这不仅仅是"开合构造学说"的事情,而是地壳运动的基本特点,只是"开"与"合"的方式、时间、地方、原因、延续时间尺度、波及空间广度、涉及地壳深度等等具体问题要具体分析,而不是一个模式包打天下的。比如,威尔逊旋回在不同的地质历史时期可能是不完整的,在同一地质历史时期的不同空间部位也可能是很不均衡的,甚而至于,威尔逊旋回本身也只能解释地壳运动的局部(局地、局时、局维)现象,因此,矿床成矿系列组中的矿床成矿系列也完全有可能发育不完整。如,红海正在发生海底热卤水成矿(外生成矿作用),而红海裂谷带波及到大陆上,则对应于陆地上的与新生代碱性岩-碳酸岩有关的稀土等内生成矿作用,二者可以同时,也可以区分为不同的成矿期。威尔逊旋回把红海与东非裂谷作为两个"时期"对待,但实际上东非裂谷带的陆相火山喷发直到近代也是在进行的,二者几乎同时,无非一个是陆相一个是海相而已。1983～1987 年间,坦桑尼亚 Oldoinyo Lengai 是唯一一座喷发碳酸岩的活火山,富含稀土,与我国白云鄂博形成于中元古代古裂谷带中的稀土矿床,在本质上具有可比性。假如红海裂谷因为某种原因,不再扩张,由海洋再变为陆地,无论发生的是板块碰撞,还是"即便是不碰撞也可以通过陆地物质的填充而导致红海消失",其"威尔逊旋回"就不完整,对应的矿床成矿系列也可能只有 2 个——陆地上的岩浆作用矿床成矿系列和海洋中的沉积作用矿床成矿系列。这样,一个不完整的威尔逊旋回对应的就不是理想的矿床成矿系列组。

5.3 成矿系列组的厘定

矿床成矿系列组的厘定,理论上不是以矿产地个数的多少来作为依据的,而是基于一定时空尺度的地壳演化过程中成矿作用发生与否。因此,从全位成矿的角度,每个矿床成矿系列组都应该包括 5 大类地质作用对应的成矿作用(岩浆成矿作用、沉积成矿作用、变质成矿作用、流体成矿作用及表生成矿作用),但正因为地壳发展演化的不均衡性,这 5 大类成矿作用也不是"平均分配"的,以至于矿产资源在全球的分布很不均衡。

5.4 成矿系列组的研究方法

采取什么样的方法来研究矿床成矿系列组也是个关键问题。根据地质历史的演化特点和研究程度,目前可以采取两种不同的方法来研究矿床成矿系列组,即"先时间后空间"和"先空间后时间"。具体地说,对于前寒武纪的矿床成矿系列组,在一个比较宽泛的地域内详细研究地质和成矿作用的历史,通过地质和成矿历史来重新塑造构造框架;对于中新生代的矿床成矿系列组,在一个比较确定的时间域内,通过深入地研究不同地域的矿床成矿系列,来揭示同时发生在不同地域的成矿作用及所形成的矿床成矿系列之间的相互关系,进而揭示不同地域之间在构造运动和地球动力学方面的内在联系;对于古生代的矿床成矿系列组,根据具体情况具体分析,当空间位置比较明确,可通过成矿时代的研究来揭示构造演化和矿床成矿系列组的内部结构;当成矿时代比较清晰,则通过对不同地域或同一地域不同的矿床成矿系列及亚系列之间相互关系的研究,来揭示构造演化。

6 结论

矿床的成矿系列,既是矿床的自然分类,也是区域成矿规律研究的一个重要内容。成矿系列理论,通过短短 40 年的研究与实践,已经被证明具有重大的理论和应用价值。矿床成矿系列组作为成矿系列理论的组成部分,是在研究过程中不断总结出来的,虽然还有许多问题有待于进一步探索,但作为沟通区域成矿作用与大地构造演化的桥梁和纽带,不但完善了成矿系列的理论框架,而且为"以矿论构"——通过成矿系列揭示大地构造演化提供了新的切入点,也进一步夯实了区域成矿预测的理论基础。

本文进一步明确了矿床成矿系列组的概念,是指在一定的地质历史时期(构造旋回)、在一定的地壳运动过程中形成的一组相互关联的矿床成矿系列。一个理想的完整的矿床成矿系列组(G)包括与岩浆作用有关的(I)、与沉积作用有关的(S)、与变质作用有关的(M)、与区域性构造事件-流体作用有关的(F)及与表生作用有关的(H)5 类矿床成矿系列,但因为地球演化不同阶段、不同地域的构造运动特点不同,不同类型的成矿作用发育程度以及先后次序也不同,如洋壳转换为陆壳或者由陆壳转化为洋壳或者其他,这就导致了矿床成矿系列组合方式的不同,也就是说,矿床成矿系列组是地壳构造演化不同阶段的客观记录和必然产物,体现的是特定构造旋回内地壳构造演化的特点和成矿过程的历史,因而具有对大地构造背景的指示意义,同时也对成矿预测尤其是战略性预测具有重要的指导意义。

研究矿床成矿系列组的目的之一,就是要通过建立构造演化与成矿作用之间的内在联系,既要预测同一构造单元内可能存在的矿床的成矿系列(而不只是单个矿产地),还要通过相似成矿省的构造对比,借鉴其他成矿省的成矿系列组的研究成果,预测尚未被发现的矿床成矿系列。比如,新疆的"三山夹两盆",在塔里木盆区中预测准噶尔盆地区出现的矿床成矿系列(包括亚系列、矿床式、具体矿床),在昆仑-阿尔金成矿省和天山成矿省预测阿尔泰成矿省出现的矿床成矿系列。目前在昆仑-阿尔金成矿省已经取得了大红柳滩等成矿时代与阿尔泰成矿省一样属于中生代的伟晶岩型稀有金属矿床,当与阿尔泰南缘喀拉通克、东天山黄山等类似的铜镍硫化物矿床,在昆仑—阿尔金尚未取得突破,值得关注。当然,矿床成矿系列组的研究因为涉及面广泛,尚属于起步阶段,不妨针对不同地质历史时期、不同构造-成矿单元,采取"先时间后空间"和"先空间后时间"的研究方法,加强成矿理论的创新,并及时开展成矿预测。大胆预测,小心求证,不断推进矿床成矿系列组的研究。

致谢:矿床的成矿系列理论的深入研究和完善是建立在前人工作和成果的基础上的,经过四十年发展和应用实践,证明了该理论具有强大的生命力,不仅对指导区域成矿预测、找矿勘查具有重要意义,还促进了成矿理论创新,丰富发展了地球系统科学理论,这应是集体的荣誉。对前人的辛勤付出和取得的成果以及审稿专家提出的建设性修改建议,在此一并致谢。

References

Chen Ping, Chen Junming. 1996. Minerogenetic series and model of

major metallogenetic belts in ShanxiProvince. Taiyuan: Science and Technology Press of Shanxi, 1～259 (in Chinese).

Chen Yuchuan. 1994. Metallogenic series of ore deposits. Earth Sciences Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 3～4: 90～94 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan. 1997. Present situation and trend of research on metallogenic series of ore deposits. Geology and Exploration. 33(1):21～25 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan. 1983. Minerogenic series of Ree-Rare metal nonferrous metal deposits related to Yanshanian granites in South China. Mineral Deposits, (2): 15～24 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Huang Minzhi, Xu Jue, et al. 1985. Geological features and metallogenetic series of the Dachang cassiterite-sulfide polymetallic belt. Acta Geologica Sinica. 59 (3): 228～240 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, Lin Xinduo, Bai Ge, Li Congyou. 1989. The geology of nonferrous and rare metals related with the Mesozoic granitoid in the Nanling region. Beijing: Geological Publishing House, 1～508 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Song Tianrui, Qiu Xiaoping. 1998. Preliminary discussion on metallogenic series of ore deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1 ～ 104 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Wang Denghong. 2006a. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion. Acta Geologica Sinica, 80 (10): 1501 ～ 1508 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Zhu Mingyu. 2006b. Preliminary study of Chinese mineralization system. Mineral Deposits, 25(02): 155～163 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Zhu Yusheng, Xu Zhigang, Ren Jishun, Zhai Yusheng, Chang Yingfo, Tang Zhongli, Pei Rongfu, Teng Jiwen, Deng Jinfu, Hu Yunzhong, Ren Tianxiang, Shen Baofeng, Wang Shicheng, Xiao Keyan, Peng Runmin, Qian Zhuangzhi, Mei Yanxiong, Du Jianguo, Shi Junfa, Zhang Xiaohua, Zhu Mingyu, Xu Jue, Xue Chunji. 2007. Chinese mineralization system and assessment of regional mineralization (upper and lower volumes). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Chen Yuchuan, Wang Denghong. 2012. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China. Geotectonica et Metallogenia, 36(03):315～321 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China. Geotectonica et Metallogenia, 38(02): 219～229 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Wang Denghong, Wang Ping'an. 2015a. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits (IV). Mineral Deposits, 34(06): 1092～1106 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Sheng Jifu, Zhu Mingyu, Xu Jue, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Chen Zhenghui, Wang Chenghui, Huang Fan, Ying Lijuan, Zhang Changqing, Wang Yonglei, Li Houmin, Gao Lan, Fu Xujie, Zhang Daquan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Liu Dequan, Wu Guang, Tang Juxing, Feng Chengyou, Sha Deming, Liu Caize, Geng Quanru, Li Junjian, Zhao Zheng, Wang Liqiang, Zheng Wenbao, Liu Xinxing, Liu Xifang. 2015b. Important mineral and and regional metallogenic regularity in China. Beijing: Geological Publishing House, 1～179 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Wang Denghong, Huang Fan. 2016. Minerogenetic series for mineral deposits: discussion on minerogenetic series (V). Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 519～527 (in Chinese with English abstract).

Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32～57 (in Chinese).

Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming, Song Tianrui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 5(6): 1～64 (in Chinese).

Feng Xueshi. Wang Shangyan. 2004. Minerogenetic series of regional resources in Guizhou. Beijing: Geological Publishing House, 1～91 (in Chinese).

Han Zhenxin, Hao Zhengping, Hou Min. 1996. Minerogenetic sense of major metallogenetic belts in Helongjiang Province. Ha'erbin: Ha'erbin Engineering University Press (in Chinese).

Han Zhenxin, Xu Yanqiang, Zhen Qingdao. 2004. Minerogenetic serÎes of important metal and non～metal mineral resources in Heilongjiang. Ha'erbin: People Press of Heilong, 1～241 (in Chinese).

Li Junquan, Tan Qiuming, Li Jiangzhou. 2005. Minerogenetic series of Hubei. Wuhan: Science and Techology Press of Hubei, 1～270 (in Chinese).

Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 1996. Minerogenetic series of Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Luo Mingjiu, Li Shimei, Lu Xinxiang, Zheng Deqiong, Su Zhenbang. 2000. Mineralization and minerogenetic series of major mineral resources in Henan province. Bejjing: Geological Publishing House, 1～355 (in Chinese).

Pei Rongfu, Lu Fengxiang. 1998. Minerogenetic series and prospecting of ore deposits in the north margin and lurther area of the Huabei massif. Beijing: Geological Publishing House, 1～237 (in Chinese).

Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Mao Jingwen, et al. 2008. Mesozoic mineralization in China. Bejjing: Geological Publishing House, 1～339 (in Chinese).

Ren Jishun, Xu Qinqin, Zhao Lei, Zhu Junbin. 2015. Looking for submerged landmasses. Geological Review, 61(5): 969～989 (in Chinese with English abstract).

Shen Baofeng. 2020. Annals of Geology of Mineral Resources of China, Precambrian metallogenic system in China. Beijing: Geological Publishing House, unprinted (in Chinese).

Sun Dazhong, Li Huimin, Lin Yuanxian, Zhou Huifang, Zhao Fengqing, Tang Min. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. Acta Geologica Sinica, 65(3): 216～231 (in Chinese with English abstract).

Sun Jiyuan, Ji Shukai, Zhen Yunqing. 1995. Copper deposits in the Zhongtiao rift. Beijing: Geological Publishing House, 1～147 (in Chinese).

Tang Zhongli, Bai Yunlai, Xu Zhanghua. 2002. Metallogenic systems and metallotectonic dynamics in the southwest margin (the Longshoushan mountains and the Qilianshan mountains) of north China paleocontinent. Beijing: Geological Publishing House, 1～393 (in Chinese).

Wang Denghong. 1995. On the metallogenic mechanism and model of the Ashele volcanogenic massive sulfide copper deposit, Xinjiang. A Dissertation submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Doctoral Degree (in Chinese with English abstract). 1～134.

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, et al. 2002. Minerogenetic series and regularity of mineralization in the Altay metallogenetic province, China. Beijing: Atomic Press, 1～493 (in Chinese)

Wang Denghong, Li Huaqin, Qu Wenjun, He Hanhan, Qin Yan, Liu Xinxing, Huang Fan, Wang Chenghui, Li Chao, Chen Zhenghui, Li Jiankang, Zhang Changqing, Wang Yonglei, Mei Yuping, Ying Lijuan, Li Lixing, Zhao Zhi, Zhao Zheng, Fu Yong, Sun Tao, Hou Kejun. 2014. The rock-and ore-forming chronology genealogy in China. Beijing: Geological Publishing

House, 1～438 (in Chinese).
Xu Zhigang. 2004. On opening-closing patterns. Geological Bulletin of China, 23(3): 238 ～ 245 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈平, 陈俊明. 1996. 山西主要成矿区带成矿系列及成矿模式. 太原: 山西科学技术出版社, 1～259.
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. 矿床地质, 02:15～24.
陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列. 地学前缘, 1(3～4): 90～94.
陈毓川. 1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势. 地质与勘探, 33(1): 21～25.
陈毓川, 黄民智, 徐珏, 等. 1985. 大厂锡石—硫化物多金属矿带地质特征及成矿系列. 地质学报, (3): 228～240.
陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等. 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. 北京: 地质出版社: 1～508.
陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 邱小平. 1998. 中国矿床成矿系列初论. 北京: 地质出版社, 1～104
陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006a. 三论矿床的成矿系列问题. 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. 矿床地质, 02: 155～163.
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. 中国成矿体系与区域成矿评价. 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. 大地构造与成矿学, 36(03): 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. 大地构造与成矿学, 02: 219～229.
陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015a. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题. 矿床地质, 06: 1092～1106.
陈毓川, 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 应立娟, 张长青, 王永磊, 李厚民, 高兰, 傅旭杰, 张大权, 孙涛, 付勇, 李建康, 刘德权, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 沙德铭, 刘才泽, 耿全如, 李俊建, 赵正, 王立强, 郑文宝, 刘新星, 李立兴, 刘喜方. 2015b. 中国重要矿产和区域成矿规律. 北京: 地质出版社, 1～179.
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. 地球学报, 37(5): 519～527.
程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1979. 初论矿床的成矿系列问题. 中国地质科学院院报, 1(1): 32～57.
程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题. 中国地质科学院院报, 5(6): 1～64.
冯学仕, 王尚彦, 等. 2004. 贵州省区域矿床成矿系列与成矿规律. 北京: 地质出版社, 1～91.
韩振新, 郝正平, 侯敏, 等. 1996. 黑龙江主要成矿带矿床成矿系列. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社.
韩振新, 徐衍强, 郑庆道, 等. 2004. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及其演化. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1～241.
李均权, 翠秋明, 李江洲, 等. 2005. 湖北省矿床成矿系列. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1～270.
刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1996. 中国新疆矿床成矿系列. 北京: 地质出版社.
罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥, 郑德琼, 苏振邦. 2000. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列. 北京:地质出版社, 1～355
裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 等. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查. 北京: 地质出版社, 1～237.
裴荣富, 梅燕雄, 毛景文等编著. 2008. 中国中生代成矿作用. 北京: 地质出版社, 1～339.
任纪舜, 徐芹芹, 赵磊, 朱俊宾. 2015. 寻找消失的大陆. 地质论评, 61(5): 969～989.
沈保丰, 主编. 2020. 中国矿产地质志·中国前寒武纪成矿体系. 北京: 地质出版社, 待印刷.
孙大中, 李惠民, 林源贤, 周慧芳, 赵凤清, 唐敏. 1991. 中条山前寒武纪年代学\年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. 地质学报, 65(3): 216～231.
孙继源, 冀树楷, 真允庆. 1995. 中条裂谷铜矿床. 北京: 地质出版社, 1～147.
汤中立, 白云来, 徐章华. 2002. 华北古陆西南缘(龙首山—祁连山)成矿系统及成矿构造动力学. 北京: 地质出版社. 1～393.
王登红. 1995. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿床成矿机制与成矿模式. 中国地质科学院博士学位毕业论文, 1～134.
王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究. 北京: 原子能出版社, 1～493
王登红, 李华芹, 屈文俊, 何晗晗, 秦燕, 刘新星, 黄凡, 王成辉, 李超, 陈郑辉, 李建康, 张长青, 王永磊, 梅玉萍, 应立娟, 李立兴,赵芝, 赵正, 付勇, 孙涛, 侯可军. 2014. 全国成岩成矿年代学谱系. 北京: 地质出版社, 1～438.
徐志刚. 2004. 初论开合构造方式. 地质通报, 23(3): 238～245.

Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series (Ⅵ)

WANG Denghong[1)], CHEN Yuchuan[2)], XU Zhigang[1)], HUANG Fan*[1)], WANG Yan[1)], PEI Rongfu[1)]

1) *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing*, 100037;

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037

* *Corresponding author: hfhymn@163.com*

Abstract

Minerogenetic series of mineral deposits(minerogenetic series for short) is a theoretical concept in the field of mineral deposits, which can be divided into five orders by ore-forming sequence. As the first order, minerogenetic series group is a set of interrelated minerogenetic series for mineral deposits which developed in a certain period of geological history and in a certain crustal movement process. A complete minerogenetic series group (G) ideally contains 5 types of minerogenetic series for mineral deposits of relating to igneous magmatism (I), sedimentation (S), metamorphism (M), regional tectonic event-fluid action (F) and hypergenesis (H). From the perspective of tectonic evolution, the formation of minerogenetic series group is internally related to the stage and cycle of continental mineralization system, which is the objective record and inevitable product of different stages of crustal tectonic evolution and can correspond to crustal scale tectonic movement. In-depth study of minerogenetic series group is of great significance to explore the evolution regularity of the earth, deepen understanding of metallogenic tectonic environment and metallogenic process at different scales and periods, and reveal the basic law of crustal movement. At the same time, the application of the concept of "mineralization in all-position, exploration to any location" and the principle of "metallogenic sequence" (order) can not only explain the uneven distribution of mineral resources, but also guide the regional metallogenic prediction effectively. The study of minerogenetic series group is still in the initial stage and needs to be further studied because it involves extensive subject knowledge.

Key words: minerogenetic series group; tectonic evolution; mineralization; metallogenic prediction; mineralization system