

成矿系统:地球动力学的有效探针

陈衍景^{1,2} 肖文交³ 张进江²

(1.中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室,广东广州510640;

2.北京大学造山带与地壳演化开放实验室,北京100871;3.中国科学院地质与地球物理研究所,北京100029)

摘要:笔者介绍了矿床研究促进地球动力学或大地构造研究突破的实例,证明成矿系统是理想的地球动力学探针。其原因之一是成矿系统往往由多种地质作用综合作用形成,更全面地记录了地质作用的信息;原因之二是矿床的研究程度高于其他类型的地质体,能够更准确地给出地球动力学演化的信息。作为尝试,笔者初步建立了重要成矿系统与地球动力学背景之间的链接,提出了一些似可通过成矿系统研究而解决的重要科学问题。

关键词:成矿系统;地球动力学探针;构造环境;新思路

中图分类号:P618.2;P591 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)06-1059-15

1 前 言

地质学家很早就已经清楚特定的构造环境有利于某些类型矿床的形成。例如,大陆裂解地带有利于铬铁矿、铜镍硫化物矿床、钒钛磁铁矿、铂族元素矿床、与火成碳酸岩或碱性岩有关的稀土元素矿床发育,由洋壳俯冲引发的岩浆弧区有利于斑岩型铜金矿床和浅成低温热液型金、银、铜矿床发育,海底热液活动(喷流)有利于层状铜锌、铅锌矿床的形成,被动大陆边缘有利于巨量铁、锰、铝等金属矿床沉积,残留海盆地常发育巨厚蒸发岩系并蕴涵巨型钾盐等盐类矿床,等等。这种知识已很大程度地被大地构造学家、矿床学家、勘查学家熟悉地运用到成矿预测和勘查战略制订工作中。

那么,特定的矿床类型可否指示特定的大地构造环境?可否利用某种或某些类型矿床的发育来反演、重建大地构造格局和演化史呢?答案是肯定的^[1,2],但长期没有得到足够的重视。笔者通过列举一些实例,说明矿床研究可以促进大地构造研究的一些重要突破,如确定重大地质事件、重要构造边界、重要

构造单元的属性等,显示矿床是有效的地球动力学研究的探针,初步构建了不同类型成矿系统与构造环境之间的桥梁,提出了一些值得重视的科学方向。

2 实例

2.1 确定地球演化过程中的重大事件

2.1.1 印支运动

中国乃至整个欧亚大陆的各主要陆块曾被海洋分隔,至二叠纪末—晚三叠世期间,这些海洋相继消失(局部晚至早侏罗世),各主要陆块陆续拼合,这次事件被称为印支运动^[3-8]。

印支运动奠定了现今中国大陆的主体构造格局^[9],被誉为“定格运动”^[4,5],实现了中国大陆由海相向陆相演化地历史性转变,奠定了中国“陆相生油”的基础。

如此重要地质事件的发现,缘于黄汲清等^[6]对江西萍乡煤田的调查。他们在萍乡煤田的勘查和研究中,发现了侏罗系(煤系地层)与三叠系之间存在显著的不整合。随后的研究表明,该不整合广泛存在于华南等地区^[7-8]。

收稿日期:2008-12-16;改回日期:2008-12-20

基金项目:国家“973”计划项目(2006CB403500、2007CB411300)、国家自然科学基金项目(40425006、40473004、40725009)以及中国科学院“百人计划”项目资助。

作者简介:陈衍景,男,1962年生,博士,教授,研究方向为矿床地球化学和区域成矿学;E-mail:yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com。

2.1.2 中国东部燕山期构造特征:挤压向伸展转变

中国东部在燕山期爆发成矿^[9](侏罗纪和白垩纪),其原因被认为与构造转折事件有关^[10-21]。而且,确定这次“构造转折”发生在侏罗纪—白垩纪之交,地球动力学特征是“由挤压向伸展转变”^[16-21]。

按照物理化学原理,挤压向伸展转变体制的物理化学特征是减压、增温,减压—增温过程有利于物质熔融、流体产生,导致燕山期大规模岩浆活动和热液成矿作用^[16-21]。

“在侏罗纪—白垩纪之交中国东部地球动力学背景由挤压向伸展转变”的结论主要来自对金矿床研究。其重要依据之一是:中国东部发育太古宙至新生代的沉积物,但只有新生代(至早为晚白垩世)沉积物含砂金矿床,太古宙至中生代沉积物不含砂金。这一事实表明,中国东部缺乏中生代之前的岩金矿床,至少没有裸露剥蚀;同时,新生代(或早至晚白垩世)之前应有大量岩金矿床裸露剥蚀。上述结论要求中国东部必须在燕山期快速形成大量岩金矿床,这些矿床被迅速抬升至地表遭受剥蚀,方可为新生代大量砂金形成提供物源。鉴于中国东部金矿集中区很少发育侏罗纪沉积物(指示挤压隆升环境),含砂金盆地多为白垩纪断陷盆地(指示伸展背景)的继承发展,而白垩纪沉积物基本不含砂金,因此认为岩金

矿床主要形成于侏罗纪—白垩纪之交,构造背景是由挤压隆升向伸展断陷转变。

重要依据之二是:很多断裂控制的脉状金矿的赋矿断裂具有早期逆冲、晚期滑塌(如河南申家窑、瑶沟等;图1),或者早期压扭、晚期张扭(如上宫、铁炉坪、玲珑等)的特征;而且,这类脉状金矿床或多金属矿床的矿石组构指示早阶段成矿作用发生在挤压或压扭背景下,或者遭受了韧/脆性剪切变形、破碎,晚阶段矿化发生在伸展构造背景下(参见后述及图6)。

2.1.3 华北岩石圈古生代加厚与中生代减薄

地球物理探测表明,现今华北岩石圈和地壳厚度自西向东依次变薄,部分地区地壳厚度不足20 km,岩石圈厚度不足60 km^[22]。同时,苏鲁超高压榴辉岩带研究证实,至少三叠纪时华北东部曾存在加厚的岩石圈,而加厚岩石圈的减薄作用发生在三叠纪之后,即200 Ma以后的中生代。目前,华北岩石圈中生代减薄机制和过程已是国内外同行关注的热点问题之一。

地球物理探测无法给出过去岩石圈和地壳的厚度,也无法给出岩石圈加厚作用的具体时间和程度。池际尚等^[23]和郑建平^[24]基于对辽宁复县和山东蒙阴地区含金刚石金伯利岩的综合研究,确定华北岩石圈曾在古生代加厚,古生代岩石圈厚度超过120~200 km;中生代时岩石圈地幔发生置换,中生代至今(200 Ma以来)岩石圈减薄幅度达50~120 km。

关于200 Ma以来华北岩石圈东部减薄的机制、过程和方式,目前认识分歧较大,图2是其中的模式之一(详见文献[25、26])。图2将剥蚀脱顶(denudating deroofting)、拆沉去根(delaminating de-rooting)、伸展减薄(extensional thinning)等3种减薄方式融为一体,结合了壳幔相互作用、造山带P-T-t轨迹,给出了伴随岩浆活动、盆地发育和流体成矿的机制、过程和演化,较好说明了华北岩石圈东部减薄的机制和过程。该模式强调快速减薄事件发生在晚白垩世之前(即100 Ma之前),原因是在130~110 Ma形成的深度总体为5~15 km的胶东金矿省至今存在,证明110 Ma至今的总剥蚀幅度小于5~15 km,平均每年剥蚀速度小于0.05~0.15 mm(后述)。

显然,古生代加厚岩石圈的确定来自金刚石矿床研究,而中生代(主要是200~100 Ma)快速减薄的厘定得益于秦岭、胶东等地的金矿床研究^[16-18,25-26]。

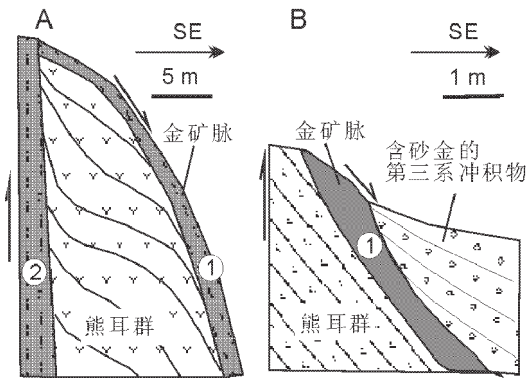


图1 瑶沟矿区伸展构造与伸展盆地^[16]

A—示意逆掩性质的1号和2号矿化断裂带叠加了伸展期的正断层作用; B—示意1号矿化带隆升剥蚀,且被古近—新近纪含金冲积物直接覆盖

Fig.1 Extensional tectonics and basin in the Yaogou gold ore-field^[16]

A—showing the Nos. 1 and 2 Au-containing reverse-fault zones overprinted by normal faulting during late extension; B—showing uplifting and erosion of No. 1 Au-bearing lode which is directly overlain by Early Tertiary placer gold-bearing alluvial sediments

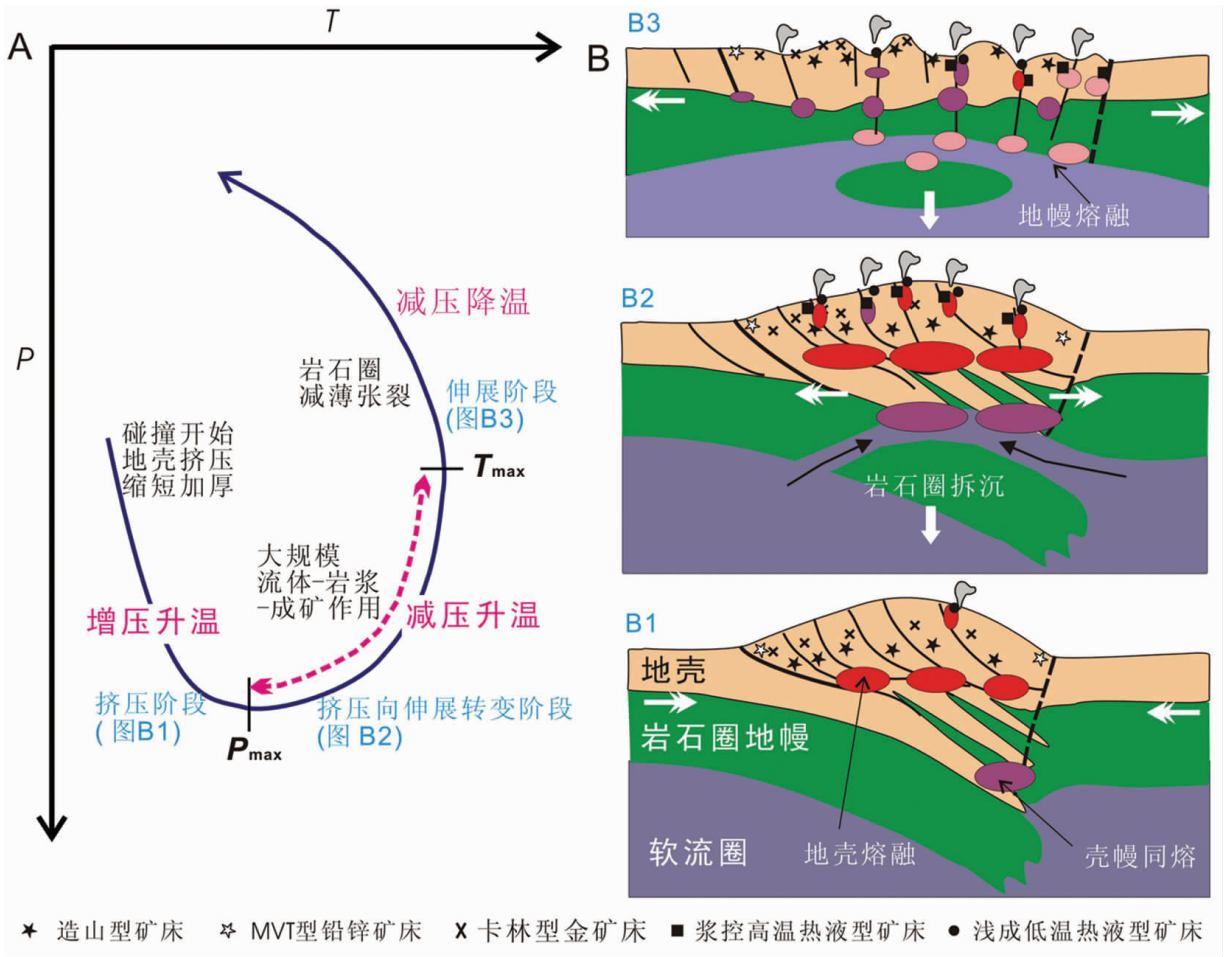


图 2 加厚岩石圈减薄及其伴随的岩浆、成矿作用 [25,26]

Fig.2 Thinning of thickened lithosphere and coeval magmatism and metallogenesis [25, 26]

2.2 厘定重要构造边界及其性质和意义

2.2.1 秦岭碰撞造山带北缘反向边界逆冲断裂(RBT)

据 Sengor^[27]总结,世界范围的碰撞造山带与其两侧大陆内部稳定区之间的界线截然清楚,总以主边界逆冲断裂(Main Boundary Thrust, MBT)和反向边界逆冲断裂(Reverse Boundary Thrust, RBT)与大陆内部稳定区相隔,呈现两侧大陆或前陆盆地俯冲到碰撞造山带之下的构造作用和地貌景观。

碰撞造山带内部的构造几何特征是发育一系列薄皮、厚皮推覆构造,它们也可被视为不同规模、不同深度层次、不同构造样式的 A 型俯冲或陆内俯冲作用的产物,缘于强烈的水平挤压作用。A 型俯冲使碰撞造山带岩石圈和地壳的加厚,而且诱发 A 型俯冲板片变质、脱水、熔融以及热液成矿作用等,进而导致造山带内部发育壳内低速高导层、造山期花岗

岩类和热液矿床^[16-18]。可见,A 型俯冲强烈与否是碰撞造山带与大陆内部稳定区的显著区别之一;厘定碰撞造山带与大陆内部稳定区的边界,可以有效部署找矿勘查工作。

在东秦岭成矿规律研究中,胡受奚等^[28]和陈衍景等^[29]首先发现华北克拉通南缘的华熊地块与其北侧的高箕地块和中条地块存在多方面差异,并由三宝断裂(三门峡—宝丰断裂)相隔;接着,陈衍景等^[30-31]论证了三宝断裂的存在及其对板缘造山作用的“隔档”和“转换”作用,使华熊地块富蕴金、银、钼、铅锌等热液矿床和显生宙花岗岩,而高箕地块基本缺乏这些内生金属矿床和晚元古以来的花岗岩类;然后,根据舞阳铁矿及其赋矿太华超群(>2.1 Ga)向北推覆到震旦系地层之上(图 3),鲁山铁山岭铁矿及其赋矿太华超群沿青枣岭断裂向北推覆逆掩在韩梁煤田的石炭

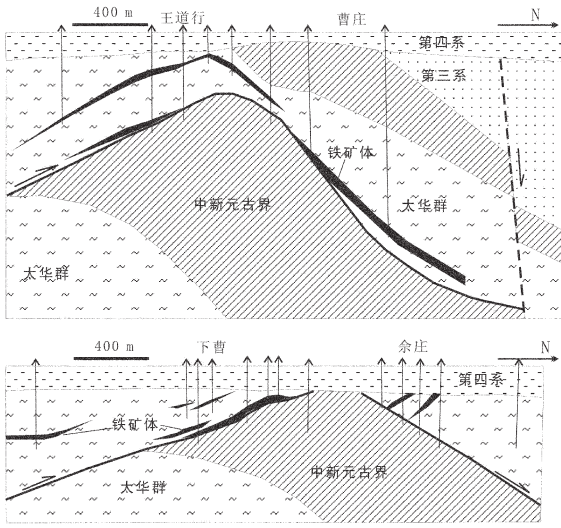


图3 舞阳铁矿区的巨型推覆构造^[16]

Fig.3 Nappe structure revealed by drills in the Wuyang iron field^[16]

系—三叠系含煤建造之上，确定三宝断裂是秦岭造山带显生宙造山作用的北边界^[16]；最后，对照 Sengor (1990)及其引文关于 MBT 和 RBT 的定义，厘定三

宝断裂是秦岭碰撞造山带的 RBT^[18]。

值得说明，上述认识来自矿床研究或者对矿床勘探资料的再认识，并与张国伟等^[32-33]、袁学诚^[34]、张本仁等^[35]、Ratschbacher 等^[36]研究结果相一致。

2.2.2 熊耳地体南缘马超营断裂带是陆内俯冲带

自河南地质三队 1978 年提交祁雨沟 2 号角砾岩筒的金矿勘探报告以来，在熊耳地体发现了金/银矿点近百处，大中型金/银矿床 10 多处^[37]。这些矿床主要为造山型和浆控高温热液型，分布在五丈山—蒿坪—金山庙花岗岩基带（合称花山花岗岩杂岩体）的南、北两侧，矿床和含矿浅成侵入体曾被解释为花山花岗岩结晶分异的产物（如：黎世美等^[38]）。然而，详细研究^[16]表明：(1) 脉状造山型矿床、花岗岩基、浆控高温热液型矿床规律性地自南向北成带分布，难以用岩浆结晶分异解释；(2) 与浆控高温热液型矿床有关的岩浆岩的酸性程度低于花山花岗岩，岩浆温度高于花山花岗岩，表明前者不可能是后者结晶分异的产物；(3) 很多脉状造山型矿床的成矿流体是变质成因热液，而非岩浆热液^[39-41]。结合对 A 型俯冲过程元素活化及成岩、成矿作用的分析，陈衍景等^[16,18,39-41]认为熊

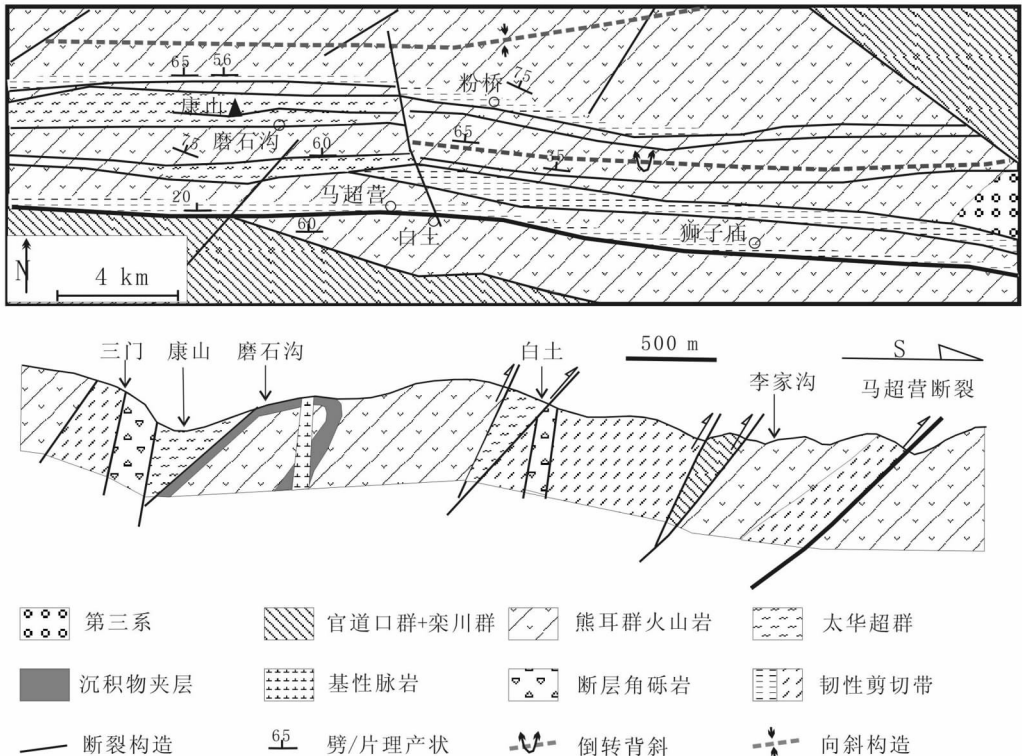


图4 马超营断裂带构造特征^[33]

Fig.4 Structural features of the Machaoying fault belt^[33]

耳地体南缘的马超营断裂带应是陆内俯冲带。随后,对马超营断裂带进行了多次野外考察,发现太华超群岩块推覆到熊耳群之上,并在断裂带内发现了含芦木类化石的沉积岩碎块(曹瑞冀教授鉴定,限于化石重

现性差,碎块来源不明,未撰文发表),证实马超营断裂确属倾向北的陆内俯冲带^[6]。

张国伟等^[23]总结指出,“马超营断裂为指向南的厚皮推覆构造带”(图 4)。

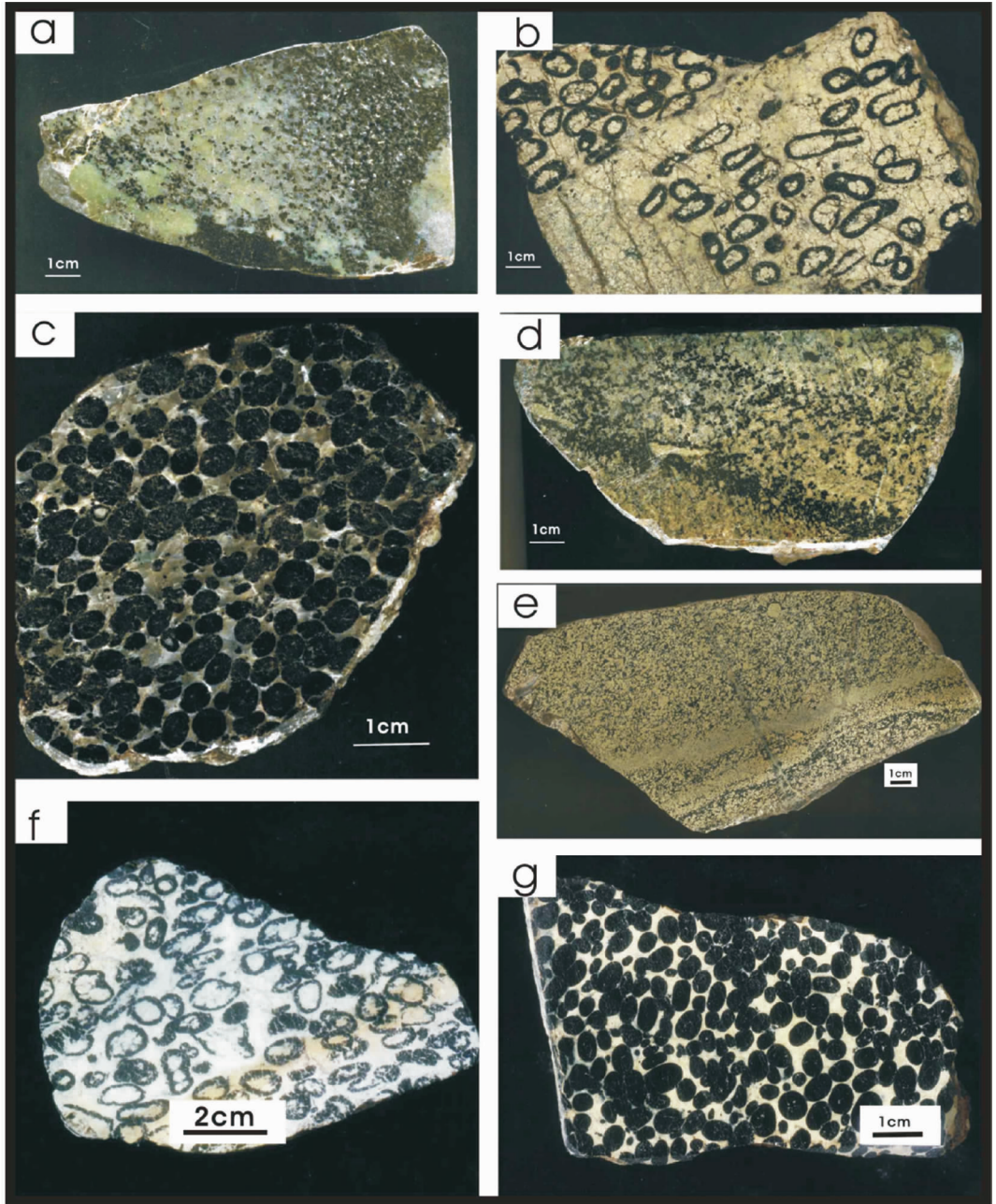


图 5 河北遵化铬铁矿矿床的矿石结构^[45]

a-浸染状结构;b-浸染状的豆壳状结构;c-豆状结构;d-条带状构造;e-浸染状的反豆状或网孔状结构;f-豆壳状结构;g-稠密浸染状的豆状铬铁矿

Fig.5 Ore fabrics of the Zhunhua chromite deposit, Hebei^[45]

a-disseminated structure;b-disseminated orbicular structure;c-pisolitic structure;d-banded structure;e-disseminated reverse pisolitic or reticulated structure;f-orbicular structure;g-dence disseminated pisolitic Chromite ore

2.3 指示地质单元的构造属性

2.3.1 华北北缘发育太古宙古洋壳

板块理论诞生以后,很多学者将其运用到大陆内部和早前寒武纪的板块构造重建,即“登陆”和“复古”。Windley and Bridgwater^[42]主张太古宙存在板块构造作用,并将太古宙构造单元划分为高级区(相当于岩浆弧)和低级区(相当于边缘海或大洋地壳)。陈衍景等^[43]支持 Windley 等人^[42]的观点,并根据中国和北半球太古宙地体变质普遍较高的特征,将早前寒武纪花岗绿岩地体划分为代表初始大洋地壳的 O 型(始洋型)和代表初始陆壳背景的 C 型(始陆型)。显然,检验上述观点或划分方案的关键依据是识别太古宙的蛇绿混杂带。

李江海等^[44-45]详细研究了遵化地区的 5 个太古宙铬铁矿矿床(点)及其含矿超基性岩体,发现这些铬铁矿均具豆荚状结构(图 5),与阿曼、塞浦路斯等典型蛇绿岩套中的铬铁矿相似;含铬铁矿超镁铁质岩块由方辉橄榄岩、纯橄岩、变质辉长岩-辉石岩、层状辉长岩和枕状熔岩等组成,向东南逆掩于迁西—迁安古陆块上。鉴于超基性岩块被 2.5 Ga 左右的花岗岩类侵入破坏,豆荚状铬铁矿 Re-Os 等时线年龄为(2547±10) Ma,因此,将遵化含铬铁矿超镁铁质岩被确定为蛇绿混杂带。随后,李江海等^[46]又在辽

宁西部的变质岩区发现了与遵化蛇绿混杂带完全对比如的豆荚状铬铁矿和超基性岩快,使华北北缘的太古宙蛇绿岩混杂带的延伸长度超过了 200 km。

2.3.2 华南大地构造属性的再认识

关于华南大地构造属性,长期存在古陆或克拉通与地槽褶皱带或造山带两种观点^[47],前者源于葛利普^[48]提出的“华夏古陆”(Cathaysian old land)的概念,后者则始于黄汲清^[7]确定华南是加里东褶皱带。

胡受奚等^[47]根据世界著名地台或古陆均不产钨矿,而华南是世界最重要的钨矿省,通过分析钨等元素成矿地球化学原理,结合介绍华南含钨花岗岩类的地球化学特点及其形成构造背景,从区域成矿规律角度论证了华南是显生宙造山带,而非早前寒武纪古陆。

2.3.3 南天山是海西印支期造山带

天山长期被作为海西造山带,造山作用发生在石炭纪和二叠纪^[7,49]。然而,最近在南天山地区发现了较多二叠纪和三叠纪的海相沉积地层和化石,与洋壳俯冲有关的二叠纪或三叠纪的弧岩浆岩或埃达克岩和高压-超高压变质岩,以及三叠纪的成矿作用,确证至少南天山属于海西印支期的造山带^[50-51]。

值得说明的是,涂光炽等^[52]早在 1986 年就指出南天山(含前苏联境内)是海西印支期的造山带,并

表 1 主要成矿系统的标志特征和发育的构造环境成矿系统类型

Table 1 Key features and tectonic setting of main metallogenic system

成矿系统类型	成矿系统发育的地质条件	构造环境
岩浆型	高温基性-超基性岩浆经历充分的结晶分异作用,或者基性-超基性岩经历强烈的热液交代蚀变	地幔柱,大陆裂谷,造山带超基性岩体或块片
伟晶岩型	产于中高级变质岩-混合岩-花岗岩地体;典型的深成矿床(>5 km),静岩压力系统的变质/岩浆成因的流体-熔体过渡相,具有高盐度、富挥发份、高温、高氧逸度特点	大陆碰撞带,大陆边缘弧根部
花岗岩有关的 热液型*	中深成矿床(>4 km),静岩压力系统的中高温、高盐度岩浆流体,可富含 CO ₂ ,可混入大气降水热液	碰撞带,陆缘弧或弧后大陆区
斑岩型,爆破 角砾岩型	地壳浅部(1~4 km);静岩压力系统的高温高盐度岩浆流体演化为静水压力系统的低盐度大气降水热液;包裹体盐度达 60%	岩浆弧、碰撞带、断裂 岩浆带
砂卡岩型	地壳中浅部(>1 km);静岩压力系统的高温高盐度岩浆流体演化为静水压力系统的低盐度大气降水热液;包裹体盐度达 60%	岩浆弧、碰撞带、断裂 岩浆带
铁氧化物型和 碳酸岩型 造山型 (变质热液型)	地壳中浅部;高温、高盐度、富 CO ₂ 的高氧化性岩浆流体,晚期有大气降水热液混入;流体为(超)静岩压力-静水压力体系 多产于变质地体;地壳中部(4~18 km),>200°C;构造超压变质流体±大气降水热液;流体富 CO ₂ (5%~30% mole),低盐度(<10%)	大陆裂谷区,地幔柱上涌区,弧后大陆伸展区 弧前增生楔,碰撞造山带 或陆内造山带
沉积岩容矿的 浅成低温热液型	地壳中浅部(<10km),<350°C;浅成流体±变质/岩浆流体;成矿流体为盐水溶液,流体贫 CO ₂ (<10% mole),低盐度(<10%,MVT 型铅锌矿盐度可>10%)	弧后盆岭省,碰撞造山带 (含前陆褶皱带)
火山岩容矿的浅 成低温热液型	地壳浅表(<2km);静水压力系统的大气降水热液±岩浆热液;成矿流体低 CO ₂ 、低盐度(<10%)	岩浆弧、碰撞带、断裂 岩浆带
VMS 型	多见于增生型造山带的海相火山岩;海底的水-岩界面,一般>100°C;主体为静水压力体系的循环海水,混有岩浆水	大洋中脊或大洋裂谷, 岩浆弧或弧后盆地
SEDEX 型	多见于碰撞型造山带的沉积岩建造;海底的水-岩界面,一般>100°C;主体为静水压力体系的循环海水,混有岩浆水或变质水	弧前盆地,大洋台地

注: * 包括与深成花岗岩有关的石英脉型、云英岩型、蚀变花岗岩型钨、锡、铍、铌钽、稀土元素等矿床,以中国南岭地区为典型代表。

经南祁连与秦岭造山带相连,构成了长达 5000 km 的第三条全球性汞锑成矿带,即秦岭—中亚西亚汞锑矿带。他们的主要依据是:造山带内大量发育汞锑矿床,汞锑矿床赋存于晚古生代—三叠纪的冒地槽相沉积物中,成矿时代主要为中生代。

总之,南天山属于海西印支造山带的认识最初来自矿床研究和总结。

3 启示和设想

3.1 成矿系统是地球动力学研究的探针

上述实例表明,一些关于大陆演化的重要成果来自矿床学家的发现,或者来自构造学家对矿床勘查与研究资料的再认识;而且,依据矿床研究而得出的重要结论或认识往往比来自其他研究的认识更早、更准确。事实启发我们:矿床是研究地球动力学的有效探针。

矿床是一种独特而复杂的地质体,往往是多种地质过程综合作用的结果,更全面或完整地记录了地球演化的过程,避开了某些简单地质体只能给出某方面信息的片面性,使基于矿床研究而得出的结论更具完整性。在各类地质体中,只有矿床是经过了大量工程勘查的地质体,其三维形态、内部结构、元素和矿物组分特征及其变化被详细而准确地解释出来。例如,河南舞阳铁矿勘探过程中,60 多个钻孔打穿了赋矿太华超群推覆体,清楚地揭示太华超群推覆到震旦纪地层之上,给出了推覆体底面的三维形态^[6]。因此,关于矿床研究的细致程度和准确程度高于其他类型的地质体,以矿床为研究对象而获得的认识更富可靠性。

中国数以万计的矿床中,蕴涵着通过巨量勘查

工作而获得的精确地质资料和宝贵的地球动力学信息,值得人们去研究、总结,用于解决地球动力学演化的问题。

3.2 成矿系统与构造环境的链接:设想

矿床是岩石圈板块运动与演化的产物,不同类型的成矿系统发育在不同的构造环境。因此,合理的成矿系统类型划分,准确建立成矿系统与构造环境之间的链接,是有效运用矿床探针研究地球动力学问题的基础之一。作为尝试,表 1 给出了主要内生成矿系统的成矿地质条件和环境。

4 地球动力学研究的新思路和新方向

基于前面的论述,下面提出一些值得重视的科学问题或疑难问题,简要介绍笔者所想到的研究思路,供同行参考。

4.1 成矿系统及其特征:造山带隆升剥蚀的约束

不同类型的成矿系统发育在地壳不同深度或造山带演化的不同阶段,造山带内成矿系统的类型、特征等可以用于约束造山带隆起—剥蚀的程度和时间。例如,浅成低温热液型矿床形成于 <2 km 的地表或近地表环境^[2],在长期隆升剥蚀的古老造山带很难保留,这类矿床的保存指示成矿后的隆升剥蚀相对较弱。同样,形成于 1~5 km 的斑岩型成矿系统的保存也指示成矿后造山带隆升的幅度不会超过 5 km。就东秦岭北坡而言,大量发育 130~145 Ma 的斑岩型、爆破角砾岩型成矿系统(如祁雨沟金矿^[17]),说明东秦岭北坡在 130 Ma 之后的隆升剥蚀幅度总体小于 5 km,即平均每年隆升 1/26 mm,暗示东秦岭造山带的快速隆升只能发育在 130 Ma 之前。

大别超高压榴辉岩形成深度被估算为 100~220

表 2 部分脉状矿床流体压力估算结果

Table 2 Estimated pressures of the ore-fluids for several lode-style deposits

矿床	早阶段		中阶段		晚阶段		文献
	压力/MPa	深度/km	压力/MPa	深度/km	压力/MPa	深度/km	
纸房钨矿 ^b	180~220	6.9~8.5	180~220	6.9~8.5			[55]
大湖金钨矿 ^a	~331	11.8	~237	8.5			[56]
玲珑金矿 ^a	123, 325	12±4	162~191	5.8~6.9	45, 187	4.5, (6.7)	[57]
三山岛金矿 ^a	≥300	≥10.7	120~200	4.3~7.1			[58]
上宫金矿 ^a	200~285	7.1~10.5	100~160	3.5~5.7			[59]
银洞沟银矿 ^a	280~320	10~11.4	250~277	8.9~9.9	90~92	9~9.2	[60]
冷水北沟铅锌银矿 ^b			70~80; 180~200	7~8; 6.9~7.7	70~80	7~8	[61]
阳山金矿 ^b	~222	~8.5	~168	~6.5			[62]

注:早、中阶段按照静岩压力计算深度,晚阶段按照静水压力计算(括号内数据按静岩应力计算),a 设矿区岩石密度为 2.8g/cm³,b 设岩石密度为 2.6g/cm³。

km, 年龄为 220~180 Ma, 现地表所见为经历了 100~220 km 折返、隆升的超高压榴辉岩地体^[53]。侵位于含超高压榴辉岩的片麻岩地体的时代为 118 Ma 的汤家坪斑岩钼矿系统^[54]至今保留, 指示 118 Ma 以后隆升剥蚀总量不足 5 km, 每年隆升幅度平均约为 1/24 mm。如此, 在 220~118 Ma 期间, 汤家坪矿区快速隆

升了 100~220 km, 平均每年隆升 1~2 mm。可见, 从汤家坪矿区反映的结果看, 大别造山带在 220~118 Ma 期间的隆升速度是 118 Ma 以后隆升速度的 24~48 倍。

以上认识与根据流体包裹体估算的中央造山带的造山型流体成矿系统的成矿压力结果基本一致,

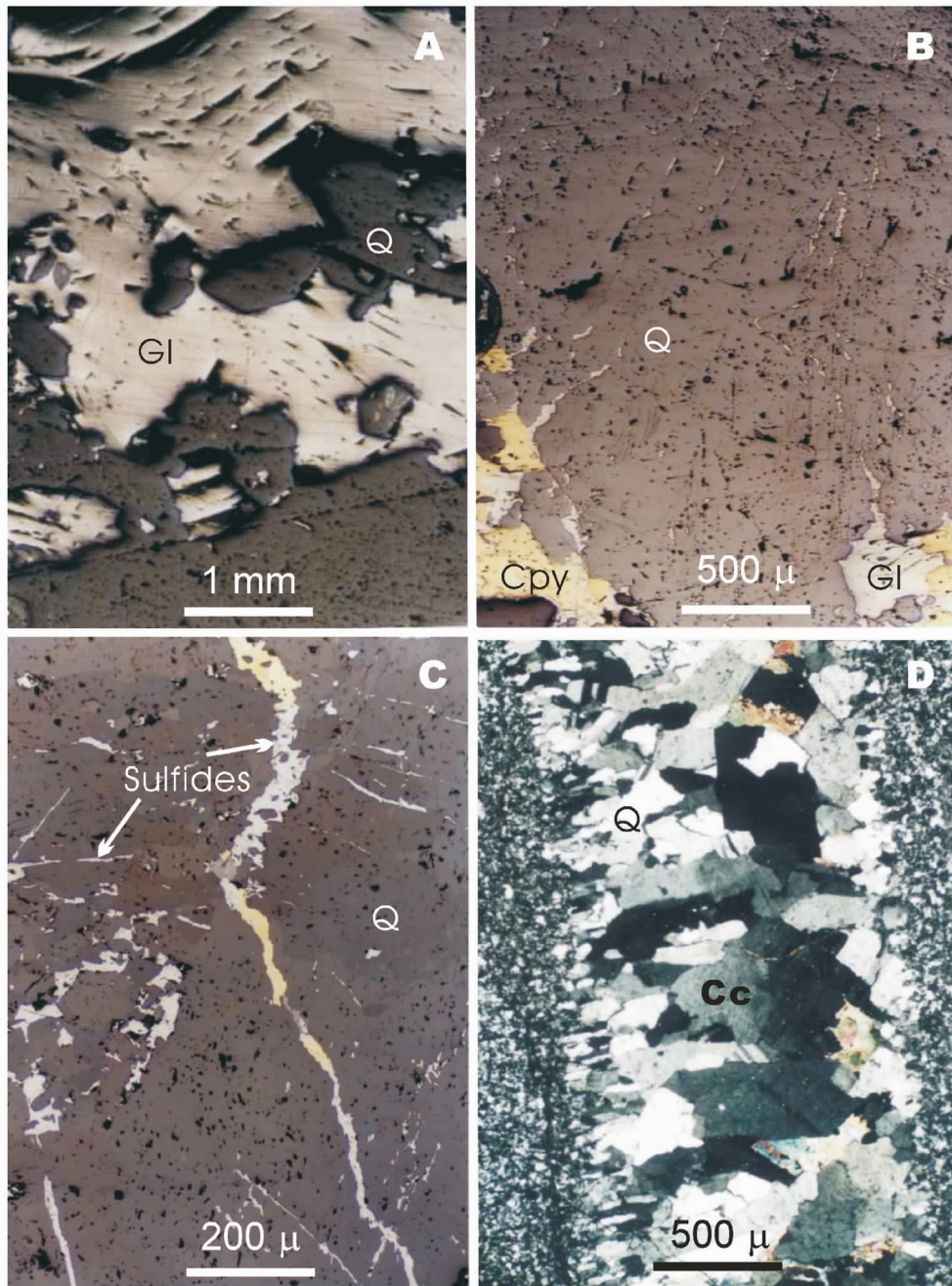


图 6 铁炉坪银矿矿石结构^[39]

Fig.6 The ore structure of the Tieluping Ag deposit^[39]

即白垩纪以来的剥蚀深度总体小于 10 km(表 2)。

4.2 造山型成矿系统:构造过程的标志

造山型矿床是构造控制的变质热液矿床^[2,63,64]。之所以称为造山型,是因为此类矿床的形成与造山作用密不可分,并分布于增生型或碰撞型造山带内或其相关构造带(如派生的陆内造山带、走滑带等)。因此,这类矿床可以作为造山作用的标志。具体说明如下:

区域变质作用是规模最大、分布最广泛的变质作用类型,是变质热液矿床(即造山型矿床)最主要的形成机制或途径。众所周知,区域变质作用都发生在造山带内,高压低温变质作用(含区域动力变质作用)发生在增生型造山带的俯冲洋壳一侧,低压高温变质(区域热流变质)作用发生在岩浆弧背景,而中压中温变质作用(区域动热变质)发生于大陆碰撞造山带地区。

几乎所有造山型矿床均可大致划分为特征相似的 3 个阶段(可以包括若干亚阶段或世代)。早阶段为遭受韧/脆性剪切而变形、破碎的石英脉或次生交代石英岩(图 6-a),指示形成于挤压或压扭构造背景下或之前,应属挤压造山环境;中阶段为细粒石英-多金属硫化物网脉充填于早阶段石英脉裂隙或角砾之间,一般见不到构造变形现象(图 6-b、c),指示形成过程或之后没有发生重要的挤压或压扭性构造变形事件,即没有强烈的挤压造山作用;晚阶段发育没有遭受变形的具梳状/晶簇构造的石英-碳酸盐细脉(图 6-d),属于典型的张性裂隙充填(Open-space filling)产物,指示网脉形成于伸展或张裂条件,且其后没有明显的构造变形事件。如此三阶段特

征已有大量报道,如胶东金矿田、秦岭等地的典型造山型成矿系统,被作为“成矿作用发生于挤压向伸展转变体制”的关键依据之一^{—[2,16,25-26,39-40,55-61]},也被解释为由挤压隆升造山转变为伸展垮塌过程(即造山晚期)的标志,并得到成矿流体物理化学条件研究结果的支持(表 2)。

表 2 显示,构造控制的造山型流体成矿系统的发育过程,实际就是造山带地壳快速隆升-剥蚀的过程!否则,无法解释同一矿床甚至同一块标本的成矿流体压力越来越低,成矿深度越来越浅。那么,如何概括或称谓“由区域挤压引起的地壳快速隆升-剥蚀过程”呢?显然,这一过程最符合人类对“造山作用”的朴实理解,似乎只有“造山作用”才能概括!

4.3 碰撞前浅成低温热液型矿床:增生型造山带的标志

浅成低温热液型矿床的形成于近地表环境(<2 km),容易遭受风化破坏,难以保存。目前发现的此类矿床基本限于新生代和中生代晚期,如黑龙江的团结沟金矿^[65],古生代及其以前的浅成低温热液矿床只在中亚造山带被发现,如西天山的阿希金矿^[66]。然而,包括西天山在内的中亚造山带被认为是强烈的造山、隆升区,多数学者甚至认为现今的天山是中新生代的第二代山脉,古生代的山脉已被风化夷平^[49]。如此以来,中亚造山带浅成低温热液型矿床的幸存就成了一个不可思议的问题^[67]。笔者认为,尽管古生代以来中亚造山带造山作用强烈、隆升幅度较大,但中亚造山带属于多块体拼合而成的增生型造山带,在增生造山、碰撞造山和陆内造山过程中,块体之间差异显著,势必有部分块体相对稳定、升降幅度小,使浅

表 3 大陆内部与活动大陆边缘浆控高温热液型成矿系统的对比

Table 3 Contrasting geology and geochemistry of intrusion-related hypothermal ore-systems

特征	岩浆弧区(大陆边缘)	大陆内部
主导性构造机制	大洋岩石圈俯冲-部分熔融	大陆地壳或岩石圈部分熔融
源区岩石学特征	海水浸泡的洋壳,缺乏碳酸盐	贫水的大陆壳,含碳酸盐
源区化学成分	富 Na,Cl,H ₂ O;贫 K,F,CO ₂	贫 Na,Cl,H ₂ O;富 K,F,CO ₂
岩浆岩特征	钙碱系列,缺乏碱性岩和碳酸岩	高钾钙碱性系列,钾玄系列,可见碱性岩、碳酸岩
稀土元素地球化学	LREE/HREE 高,负 Eu 异常弱	LREE/HREE 低,负 Eu 异常强
同位素地球化学	I _{Sr} 低,ε Nd 和 ε Hf 高,δ ¹⁸ O 低	I _{Sr} 高,ε Nd 和 ε Hf 低,δ ¹⁸ O 高
流体特征	K/Na 低, F/Cl 低, CO ₂ /H ₂ O 低	K/Na 高, F/Cl 高, CO ₂ /H ₂ O 高
围岩蚀变	富水蚀变:云母化、绿泥石化强烈	贫水蚀变:钾长石化、绿帘石化和萤石化突出
成矿元素组合	铜金为主,伴生少量 Mo, Pb, Zn	钼或铜钼为主,伴生 W, Sn, REE
流体包裹体	少见富 CO ₂ 包裹体	常见各类富 CO ₂ 包裹体
代表性矿床	安第斯新生代斑岩铜金矿带	东秦岭燕山期斑岩钼矿带

成低温热液型矿床得以保存。由此派生的结论是,古老的浅成低温热液矿床能够被保存,说明存在多块体拼贴的增生型造山作用。因此,浅成低温热液矿床是识别古老增生型造山作用的标志。事实上,秦岭、喜马拉雅、阿尔卑斯等大陆碰撞型造山带,虽然其造山时代年轻,但浅成低温热液型矿床罕见,也反证了上述结论的科学性。

既然碰撞前的浅成低温热液型矿床可以保存,那么,碰撞前的增生型造山过程中形成的斑岩型、造山型矿床的保存几率就应更高,如加拿大的 British Columbia 地区。但是,目前在中国的中亚造山带所发现的碰撞前形成的斑岩型和造山型矿床较少,这是一个值得重视的科学问题,也暗示中亚造山带碰撞前造山型和斑岩型成矿系统的找矿潜力较大。

4.4 岩浆弧与大陆内部浆控高温热液型成矿系统的差异

浆控高温热液型矿床(含斑岩型、爆破角砾岩型、IOCG 型^[68]、矽卡岩型和与侵入岩有关的脉状矿床)主要发育在岩浆弧(含陆缘弧和岛弧)或大陆内部(含碰撞造山带和断裂-岩浆带)^[2,67,69],但两类地质背景的同类型矿床之间是否存在地质地球化学特征的差异?究竟存在哪些差异?目前很少有人研究和讨论。

笔者认为,岩浆弧区与大陆内部浆控高温热液型成矿系统的主要差异在于其发育过程中是否有大洋板块参与。前者主要起源于大洋板块俯冲作用,而后者与大洋板块俯冲无关或者没有直接成因关系,因此导致两种不同构造背景的成矿系统存在一系列的差异(表 3)。反之亦然,两种不同性质的浆控高温热液成矿系统,似可作为判别成矿背景究竟是陆缘岩浆弧还是大陆内部造山带或断裂-岩浆带的标志之一。

4.5 弧后盆岭省与碰撞造山带微细粒浸染型金矿的差异

已知微细粒浸染型(卡林型和类卡林型)金矿发育在弧后盆岭省(美洲西部)和大陆碰撞造山带(陕甘川、滇黔桂和伊朗北部等特提斯构造带)两种构造背景,成矿地球动力学环境分别为挤压向伸展的转变带或转变期。据 Hofstra et al^[70],美国西部弧后盆岭省的微细粒浸染型矿床不发育富/含 CO₂ 包裹体,温度低于 300°C,深度 < 6.5 km,不与造山型金矿共存,常与浅成低温热液型甚或浆控高温热液型矿床有密切的时间、空间和成因联系,一些学者将其归属

为浅成低温热液型^[71-72],或者被解释为远源矽卡岩型^[73];相反,碰撞造山带(陕甘川和滇黔桂)的微细粒浸染型金矿床常发育富/含 CO₂ 包裹体,常见 > 300°C 的案例,压力高达 200 MPa 或更高,深度高达 7 km,常与造山型金矿共生,矿集区很少发育浅成低温热液型或浆控高温热液型矿床,部分矿床被解释为造山型或卡林型与造山型之间的过渡^[62,74-78]。

如此一来,两种差异显著的微细粒浸染型矿床似可分别作为俯冲型(或增生型)与碰撞型造山带的判别标志。

致谢: 第一作者在胡受奚教授悉心指导和关爱下,获得学士、硕士和博士学位。适逢恩师从事地质事业 60 周年暨 80 华诞之际,谨以此文表示祝贺和感激。研究工作得到涂光炽、王德滋、翟裕生、常印佛、李廷栋、张国伟、金振民等院士以及马福臣、李继亮教授的鼓励和指导,特致谢意。

参考文献 (References):

- [1] 陈衍景, 赖勇, 李文博. 矿床是大陆动力学研究的理想探针[C]//陈骏(主编). 地质与地球化学研究进展. 南京: 南京大学出版社, 2006: 279-284.
Chen Yanjing, Lai Yong, Li Wenbo. Ore deposits as the probe to continental geodynamics [C]//Chen Jun (ed.). Progresses in Geological and Geochemical Studies. Nanjing: Nanjing University Press, 2006, 279-284 (in Chinese).
- [2] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085-2108.
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵宗溥. “印支运动”五十周年回顾[J]. 地质科学, 1986, (1): 7-15.
Zhao Zongpu. Review of the 50th anniversary of the Indosinian Movement[J]. Scientia Geologica Sinica, 1986, (1): 7-15 (in Chinese with English abstract).
- [4] 朱夏, 陈焕疆, 孙肇才, 等. 中国中、新生代构造与含油气盆地[J]. 地质学报, 1983, 57(3): 235-242.
Zhu Xia, Chen Hongjiang, Sun Zhaocai, et al. The Mesozoic - Cenozoic tectonics and petroliferous basins of China [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57 (3): 235-242 (in Chinese with English abstract).
- [5] 崔盛芹, 李锦蓉. 试论中国滨太平洋带的印支运动 [J]. 地质学报, 1983, 57: 51-62.
Cui Shengqin, Li Jinrong. On the Indosinian Movement of China's Peri-Pacific tectonic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57: 51-

- 62 (in Chinese with English abstract).
- [6] 黄汲清, 徐克勤. 江西萍乡煤田之中生代造山运动 [J]. 地质学报, 1936, 16:177-194.
Huang Jiqing, Xu Keqin. Mesozoic orogenic movements in the Pinghsiang coalfield, Kiangsi [J]. Bull. Geol. Soc. China, 1936, 16: 177-194(in Chinese).
- [7] 黄汲清. 中国主要地质构造单位[J]. 中央地质调查所地质专报 A, 1945, 20:1-165.
Huang Jiqing, On Major Tectonic Forms of China [J]. Geological Memoirs Series A, 1945, 20:1-165 (in Chinese)
- [8] 黄汲清. 中国主要构造单元[M]. 北京:地质出版社, 1954.
Huang Jiqing. Major Tectonic Units of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1954.
- [9] 涂光炽, 赵振华. 燕山期成矿作用的多样性 [J]. 地质论评, 1983, 29(1):57-65.
Tu Guangzhi, Zhao Zhenhua. On the diversity of minerogenetic processes of the Yanshanian period [J]. Geological Review, 1983, 29 (1): 57-65(in Chinese).
- [10] 胡受奚, 赵懿英, 胡志宏. 中国东部中生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展[J]. 岩石学报, 1994, 10(4):370-381.
Hu Shouxi, Zhao Yiyong, Hu Zhihong. Tectono-magmatic evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin of eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1994, 10(4):370-381(in Chinese with English abstract).
- [11] 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(10):913-920.
Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, et al. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block [J]. Science in China(series D), 2003, 33:913-920(in Chinese).
- [12] 陈根文, 夏换, 陈绍清. 华北晚中生代重大构造转折的地质证据 [J]. 中国地质, 2008, 35(6):1162-1177.
Chen Genwen, Xia Huan, Chen Shaoqing. The geological evidences of Late Mesozoic Tectonic Transition in North China[J]. Geology in China, 2008, 35 (6):1162 -1177 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京:科学出版社, 1999:219.
Liu Jiaqi. Volcanos in China [M]. Beijing: Science Press, 1999:219 (in Chinese).
- [14] 王德滋, 任启江, 邱检生. 中国东部与中生代陆相火山作用及其有关金成矿的地质学和地球化学[C]// 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 等 (主编). 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京:科学出版社, 1998: 267-338.
Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng. Geology and geochemistry of gold deposits associated with Mesozoic continental volcanism in East China [C]// Hu Shouxi, Wang Henian, Wang Dezi, et al (eds.). Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China. Beijing: Science in China Press, 1998, 267-338 (in Chinese).
- [15] 王德滋, 周新民. 中国晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京:科学出版社, 2002:295.
Wang Dezi, Zhou Xinmin. Granitic Volcanos in Late Mesozoic Era of China: Causes of Intrusive Complex and Crustal Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2002:295 (in Chinese).
- [16] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京:地震出版社, 1992:234.
Chen Yanjing, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan, China [M]. Beijing: Chinese Seismological Press, 1992:234 (in Chinese).
- [17] 陈衍景. 中国绿岩带型金矿床[C]// 中国金矿研究新进展, 第一卷上篇. 北京:地震出版社, 1994:4-29.
Chen Yanjing. The gold deposits in greenstone belts, China[C]// The Current Progresses in the Study of Gold Deposits, China. Beijing: Seismological Press, 1994:4-29 (in Chinese).
- [18] 陈衍景. 碰撞造山体制的流体演化模式:理论推导和东秦岭金矿床氧同位素证据[J]. 地学前缘, 1996, 3(4):282-289.
Chen Yanjing. Fluidization model for intracontinental collision and its metallogenic significance: theoretical inference and evidences from gold deposits in eastern Qinling Mountains [J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(4):282-289 (in Chinese).
- [19] 陈衍景. 中国陆区陆陆碰撞与成矿作用的时空耦合和动力学机制[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊):407-410.
Chen Yanjing. The Spatial, temporal and mechanic linkage between continental collision and metallogenesis in mainland China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(Supp):407-410 (in Chinese).
- [20] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京:海洋出版社, 1998.
Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, Liu Shuwen. Structural Features, Genetic Mechanism and Tectonic Evolution of the Xiaoqinling Metamorphic Core Complex[M]. Beijing: Ocean Press, 1998.
- [21] Zhang J J, Zheng Y D. The multiphase extension and their ages of the Xiaoqinling metamorphic core complex [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 1999, 73:139-147.
- [22] Yuan X C. Atlas of Geophysics in China [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:215.
- [23] 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征 [M]. 北京:科学出版社, 1996:292-293.
Chi Jishang, Lu Fengxiang. Characteristics of Kimberlites and Palaeozoic Lithospheric Mantle in North China Platform [M]. Beijing: Science Press, 1996:292-293 (in Chinese).
- [24] 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999:126.
Zheng Jianping. Mantle Replacement and Lithosphere Thinning during Mesozoic-Cenozoic in East China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999:126 (in Chinese).
- [25] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, in the Jiaodong province, eastern

- China[J]. *International Geology Review*, 2005, 47:530-549.
- [26] Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Geological Survey of Western Australia; Springer, 2008:1250.
- [27] Sengor A M C. *Plate Tectonics and Orogenic Research After 25 Years*[J]. *Earth Science Reviews*, 1990, 27:1-207.
- [28] 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988:558.
Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Zeming, et al. *Geology and Metallogeny of the Collisional Belt Between North China and South China Plates*[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 558 (in Chinese).
- [29] 陈衍景, 富士谷, 胡受奚. 华北地台南缘不同类型绿岩带的主要元素特征及意义[J]. *南京大学学报(地学版)*, 1988, (1):70-83.
Chen Yanjing, Fu Shigu, Hu Shouxi. The main element character and its significance of different type greenstone belts in south margin of North-China platform[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 1988, (1):70-83(in Chinese).
- [30] 陈衍景, 胡受奚, 富士谷. 三门峡-宝丰断裂存在的证据及若干问题讨论[J]. *南京大学学报(地学版)*, 1990, (3):75-84.
Chen Yanjing, Hu Shouxi, Fu Shigu. Evidence for the existence of the Sanmenxia -Baofeng fault and discussion on some related problems[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 1990, (3):75-84 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈衍景, 富士谷, 胡受奚, 等. 华北克拉通南缘两个不同地块的对比研究[J]. *大地构造与成矿学*, 1991, 15(3):265-271.
Chen Yanjing, Fu Shigu, Hu Shouxi, et al. The inter-block differences and their metallogenic significance of the southern margin of the North China craton [J]. *Geotectonica et Metallogenica*, 1991, 15 (3):265-271 (in Chinese with English abstract).
- [32] Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(3):225-234.
- [33] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:1-855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics* [M]. Beijing: Science Press, 2001:1-855 (in Chinese).
- [34] 袁学诚. 秦岭造山带地壳构造与楔入成山[J]. *地质学报*, 1997, 71(3):227-235.
Yuan Xuecheng. The crustal structure of the Qinling orogen and wedging mountain building[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(3):227-235 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张本仁, 高山, 张宏飞, 等. 秦岭造山带地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:1-187.
Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei, et al. *Geochemistry of Qinling Orogen* [M]. Beijing: Science Press, 2002:1-187 (in Chinese).
- [36] Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology and deformation history[J]. *Tectonophysics*, 2003, 366:1-53.
- [37] 李诺, 赖勇, 鲁颖淮, 等. 河南祁雨沟金矿流体包裹体及矿床成因类型研究[J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1230-1239.
Li Nuo, Lai Yong, Lu Yinghui, et al. Study of fluid inclusions and ore genetic type of the Qiyugou gold deposit, Henan [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (6):1230-1239 (in Chinese with English abstract).
- [38] 黎世美. 河南洛宁县上宫金矿同位素地球化学特征 [J]. *豫西地质*, 1987, 1:1-29.
Li Shimei. Isotope geochemistry of the Shangong gold deposit, Luoning county, Henan Province [J]. *Geology in West Henan*, 1987, 1: 1-29 (in Chinese).
- [39] Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79:106-119.
- [40] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P, et al. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China[J]. *Resource Geology*, 2006, 56(2):99-116.
- [41] 祁进平, 张静, 唐国军. 熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成: CMF 模式的证据[J]. *岩石学报*, 2005, 21:1365-1372.
Qi Jinping, Zhang Jing, Tang Guojun. Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoic strata south of the Xiong'er Terrane: Evidences of the CMF model [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21:1365-1372 (in Chinese with English abstract).
- [42] Windley B F, Bridgwater D. The evolution of Archean low- and high-grade terrains[J]. *Special Publications of Geological Society of Australia*, 1971, 3:33-46.
- [43] Chen Y J, Hu S X, Fu S G, et al. Gold deposits in greenstone belts controlled by the structural pattern of the granite-greenstone terrain [C]//*Proceedings of International Symposium on Gold Geology and Exploration*. Publishing House of Northeast University of Technology, Shenyang, 1989:53-57 (in Chinese with English Abstract).
- [44] Li J H, Kusky T M, Huang X N. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélangé, North China Craton: a record of early oceanic mantle processes[J]. *GSA Today*, 2002, 12(7):4-11.
- [45] 李江海, 牛向龙, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据[J]. *地学前缘*, 2002, 9:235-246.
Li Jianghai, Niu Xianglong, Huang Xiongnan, et al. Podiform chromitite: key evidence of segment of paleo-oceanic lithosphere[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9:235-246(in Chinese with English abstract).
- [46] 李江海, 牛向龙, 陈征, 等. 辽西豆荚状铬铁矿的发现及其意义[J].

- 岩石学报, 2002, 18(2):187-192.
- Li Jianghai, Niu Xianglong, Chen Zheng, et al. Discovery of podiform chromitite in western Liaoning and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18 (2):187-192 (in Chinese with English abstract).
- [47] 胡受奚, 徐金芳. 区域成矿规律对华南大地构造属性的约束 [J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1045-1053.
- Hu Shouxi, Xu Jinfang. The geotectonic nature of South China: constraints from regional mineralization. *Geology in China*, 2008, 35(6):1045-1053(in Chinese with English abstract).
- [48] Grabau A W. Migration of geosynclines [M]. *The National Geological Survey of China*, 1924:208-237.
- [49] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展 [J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1):17-22.
- Chen Yanjing. Progress in the study of Central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(1):17-22. (in Chinese with English abstract).
- [50] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22:1069-1089.
- [51] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32:102-117.
- [52] 涂光炽, 丁抗. 全球性第三条汞锑矿带-秦岭-中亚细亚汞锑成矿带 [C]//*地球化学文集*. 北京: 科学出版社, 1986:8-13.
- Tu Guangzhi, Ding Kang. The Qinling-Central Asia Sb-Hg belt? the third Sb-Hg belt of global significance [C]//*Geochemical Collections*. Beijing: Science Press, 1986:8-13 (in Chinese with English abstract).
- [53] Li C, Chen Y J, He S D. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction --petrological evidences and stipulation [J]. *Chinese J Geochem*, 2001, 20:59-72.
- [54] 杨艳, 张静, 刘家军, 等. 河南汤家坪钼矿床流体成矿作用研究 [J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1240-1249.
- Yang Yan, Zhang Jing, Liu Jiajun, et al. Hydrothermal metallogeny of the Tangjiaping molybdenum deposit, Henan Province [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (6):1240-1249 (in Chinese with English abstract).
- [55] 邓小华, 李文博, 李诺, 等. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(9):2133-2148.
- Deng Xiaohua, Li Wenbo, Li Nuo, et al. Study of fluid inclusions and genesis of the Zhifang Mo deposit in Songxian county, Henan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (9):2133-2148(in Chinese with English abstract).
- [56] 倪智勇, 李诺, 管申进, 等. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(9):2058-2068.
- Ni Zhiyong, Li Nuo, Guan Shenjin, et al. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaoqinling gold field, Henan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(9):2058-2068(in Chinese with English abstract)
- [57] 张祖青, 赖勇, 陈衍景, 山东玲珑金矿流体包裹体地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9):2207-2216.
- Zhang Zuqing, Lai Yong, Chen Yanjing. Fluid Inclusion study of the Linglong gold deposit, Shandong province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (9):2207-2216 (in Chinese with English abstract).
- [58] Fan H R, Zhai, M G, Xie Y H, et al. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38:739-750.
- [59] 范宏瑞, 谢亦汉, 王英兰. 豫西上官构造蚀变岩型金矿成矿过程中的流体-岩石反应 [J]. *岩石学报*, 1998, 14:529-541.
- Fan Hongrui, Xie Yihan, Wang Yinglan. Fluid-rock interaction during mineralization of the Shanggong structure-controlled alteration-type Au deposit in western Henan Province, Central China [J]. *Acta Petrol. Sin.*, 1998, 14:529-541 (in Chinese with English abstract).
- [60] 张静, 陈衍景, 李国平, 等. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型 [J]. *矿物岩石*, 2004, 24(3):55-64.
- Zhang Jing, Chen Yanjing, Li Guoping, et al. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan Province: implication for metallogenic type [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi)*, 2004, 24(3):55-64. (in Chinese with English abstract).
- [61] 祁进平, 陈衍景, 倪培, 等. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9):2119-2130.
- Qi Jinping, Chen Yanjing, Ni Pei, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibeiou Pb-Zn-Ag deposit, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (9):2119-2130(in Chinese with English abstract).
- [62] 李晶, 陈衍景, 李强之, 等. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9):2144-2154.
- Li Jing, Chen Yanjing, Li Qiangzhi, et al. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9):2144-2154. (in Chinese with English abstract).
- [63] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 3:7-27.
- [64] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力 [J]. *中国地质*, 2006, 33:1181-1196.
- Chen Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic

- model and exploration potential [J]. *Geology in China*, 2006, 33: 1181–1196.
- [65] 孙丰月, 王力, 霍亮, 等. 黑龙江乌拉嘎大型金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究[J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1267–1273.
Sun Fengyue, Wang Li, Huo Liang, et al. Fluid inclusion study on Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province and implications for ore genesis [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (6):1267–1273 (in Chinese with English abstract).
- [66] Chen Y J, Bao J X, Zhang Z J, et al. Laumontitization as exploration indicator of epithermal gold deposits: A case study of the Axi and other epithermal systems in West Tianshan, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 22(4):289–303.
- [67] Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I, et al. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43 (supp.):1–68.
- [68] 聂凤军, 江思宏, 路彦明. 氧化铁型铜-金(IOCG)矿床的地质特征、成因机理与找矿模型[J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1074–1087.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Lu Yanming. Geological features, ore-forming processes and prospecting model of Iron Oxide-Copper-Gold deposits [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (6):1074–1087(in Chinese with English abstract).
- [69] Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31:139–169.
- [70] Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and models for Carlin type gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13:163–220.
- [71] Bagby W C, Berger B R. Geologic characteristics of sediment-hosted, disseminated precious-metal deposits in the western United States[J]. *Reviews in Economic Geology*, 1985, 2, 169–202.
- [72] Berger B R, Henley R W. Advances in the understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States[J]. *Economic Geology Monograph*, 1989, 6: 405–423.
- [73] Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits [J]. *Bulletin of Geological Survey of Canada*, 1979, 280:1–580.
- [74] Zhang F X, Chen Y J, Li C, et al. Geological and geochemical character and genesis of the Jinlongshan-Qiuling gold deposits in Qinling orogen: Metallogenic mechanism of the Qinling-pattern Carlin-type gold deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43 (Supp.):95–107.
- [75] Zhang J, Chen Y J, Zhang FX, et al. Ore fluid geochemistry of the Jinlongshan Carlin-type gold deposit ore belt in Shaanxi Province, China[J]. *Chinese J. Geochem.*, 2006, 25:23–32.
- [76] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质论评*, 2004, 50:134–152.
Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, et al. Carlin and Carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. *Geological Reviews*, 2004, 50(2): 134–152(in Chinese with English abstract).
- [77] 刘家军, 刘光智, 廖延福, 等. 甘肃寨上金矿床中白钨矿矿体的发现及其特征[J]. *中国地质*, 2008, 35(6):1113–1120.
Liu Jiajun, Liu Guangzhi, Liu Yanfu, et al. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6): 1113–1120(in Chinese with English abstract).
- [78] 马星华, 刘家军, 李立兴, 等. 甘肃寨上金矿床成矿流体性质与成矿作用探讨[J]. *岩石学报*, 2008, 24(9):2069–2078.
Ma Xinghua, Liu Jiajun, Li Lixing, et al. Nature of ore-forming fluids and mineralization of the Zhaishang gold deposit, Gansu Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(9): 2069–2078 (in Chinese with English abstract).

Ore-system as a geodynamic probe

CHEN Yan-jing^{1,2}, XIAO Wen-jiao³, ZHANG Jin-jiang²

(1. *Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*; 2. *Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China*; 3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: In this paper we introduce several breakthroughs in geodynamic or tectonic issues resulted from studies on ore-systems, and propose that ore-systems can serve as an ideal geodynamic probe. Usually formed in multiple geological processes, ore-systems record complete geological information. Compared to other kinds geologic bodies, ore-systems are more precisely studied through prospecting and/or mining. As a consequence, ore-systems can provide accurate indicators to geodynamic settings and evolution. We set up a preliminary linkage between major ore-systems and geodynamic settings; and propose several important scientific approaches for solving long-standing geodynamic controversies by the study of ore-systems.

Key words: ore-system; geodynamic probe; tectonic settings; new approaches

About the first author: Chen Yan-Jing, male, born in 1962, received Ph.D. degree in Nanjing University, and now professor in the Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences and Peking University. His research interests include metallogeny and geology; E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com