

区域成矿与壳幔作用初探

丁玉进¹, 何胜飞², 李社宏³, 刘战庆⁴

(1. 青海省地质调查院, 西宁 810012; 2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 4. 长安大学, 西安 710054)

摘要:区域成矿研究从简单到复杂, 从地表到地壳深部, 现在已经向众多学科, 纵深领域渗透。壳幔作用是现代地球动力学研究的一个关注点。本文对壳幔动力作用与区域成矿关系进行探讨, 分别讨论了俯冲、底侵、拆沉和地幔柱对区域成矿作用的影响和作用。初步建立了深部动力作用与区域成矿之间的关系, 为研究区域成矿的深部机理和规律提供依据。

关键词:区域成矿; 壳幔作用; 俯冲; 底侵; 拆沉; 地幔柱

中图分类号: P618.201

文献标识码: A

绝大多数矿床成矿机理的研究都与其成矿环境和动力作用过程紧密相连。寻找一种矿产资源一般从分析区域成矿背景开始, 研究成矿规律, 归纳控矿因素, 确定找矿对象的标志特征等。其中成矿规律多是矿床内部动力作用的综合体现。即使地壳浅层部位表生(外生)矿床也往往与内外成矿流体关系密切, 其中内部流体可能来自地球不同深度; 内生矿床则多与深部岩浆相关, 尤其是与壳幔作用相关的岩浆。这种内部的动力作用通过构造运动为人们所识别, 在外部表现为地形、岩体和岩石组合等变化, 内部有各种元素的不均匀分布等特征。这些动力作用在地表表现为挤压、拉张和走滑, 在深部主要表现为地壳与地幔物质的相互作用, 岩浆与围岩的作用等。深部的动力作用使不同元素有不同的富集和贫化趋势, 在动力作用过程中成矿元素运移富集, 受构造和成矿控制最终形成各种异常, 赋存于地壳的不同位置, 从而形成有区域特征分布的成矿带。

1 区域成矿研究现状

收稿日期: 2008-06-06

作者简介: 丁玉进, 男, (1973—), 湖南常德人, 工程师, 从事地质矿产勘查工作。

1905 年法国人 de Launay 提出 metanogeny 概念, 主要指矿床的成因, 侧重阐述成矿与区域岩石和构造的关系。后来, 他指出“每个成矿省都有一定的区域矿床类型, 受地质构造的控制, 在一定程度上可以根据构造来预测矿床”。从此关于区域成矿的思想在全世界开始发展。初期的研究以满足矿山开发与地质勘查为需要, 多以阐明矿床基本特征为主。上世纪中期随着科学技术的进步和地质事业的发展, 开始对物质来源和成矿机理进行研究。70 年代以后, 板块构造理论的兴起, 区域成矿研究则有了较大的发展, 主要表现在区域构造、板块构造、花岗岩与成矿、岩浆演化与成矿、区域地球物理与成矿等方面^[1-3]。90 年代以来人们开始重视动力学作用在成矿中的地位。这主要表现在①伸展环境下的大陆裂谷成矿作用; ②挤压环境下的造山带成矿作用; ③大陆内部巨型线性构造和断裂构造常伴有壳幔混合型岩浆及 Cu, Au 成矿。新世纪以来随着对壳 - 幔动力作用的研究, 人们开始注重深部动力作用对区域成矿的影响^[2,4-5]。

区域成矿学是研究区域成矿背景、控矿因素、成矿过程和矿床基本地质特征等为内容, 以阐明矿床时空分布规律为目的的综合性学科。它是成矿预测和矿产资源评价的地质理论基础, 也是地球系

统科学的重要组成部分。具体地说就是以成矿构造-地球化学背景、成矿系统和成矿演化为主线,以矿质分馏-浓集、临界转换成矿、多因耦合成矿等为理论基础,研究区域成矿的时空结构及演化,阐明矿床的形成与分布规律。研究内容主要有成矿背景、成矿演化和区域成矿系统三大方面^[3,5]。

关于中国的区域成矿背景研究资料很丰富^[6-8]。郭文魁从区域成矿的角度建立了古亚洲成矿域、滨太平洋成矿域和特提斯-喜马拉雅成矿域作为我国区域成矿地质背景^[9];按照成矿区域位置、构造背景,地质控制因素将我国划分为滇系西太平洋成矿域、古亚洲成矿域、秦祁昆成矿域和特提斯-喜马拉雅成矿域4个一级成矿带、18个二级成矿带和77个三级成矿带^[10-11]。从地理位置出发,按我国矿床成矿机理可分为天山-兴蒙成矿域、塔里木-华北成矿域、秦-祁-昆成矿域、扬子成矿域、华南成矿域、喜马拉雅-三江成矿域等6个一级成矿域^[11]。总的来说,成矿背景横向是大地构造格架的划分,纵向是构造演化史的建架。

现阶段对区域成矿研究有几个新的方向值得关注:壳幔成矿,核心内容是大陆壳幔多圈层相互作用与成矿关系,而壳幔成矿学研究的主要支撑技术是“岩石探针”分析^[12]。大陆汇聚过程的成矿作用,俯冲前期的MVT型矿床,俯冲过程中与岩浆和成矿热液有关的矿床如斑岩型矿床,碰撞后伸展体制有关的矿床如阿尔泰A型花岗岩矿床^[3,13],与之相应的有边缘成矿理论,其实质是成矿赋存于地质体的转折端^[14]。此外还有板内与地幔柱有关的PGE矿床等,强调对新型矿种的发现和对比矿床学的研究^[15-16]等。总之,区域成矿学已经向宽领域、深层次发展了。

2 壳幔作用特点

地壳与地幔的作用近年来一直是众多学者关注的焦点之一。因为一方面地壳和地幔作用是很多地质表层现象(包括矿床)的内因外现;另一方面又是连接地壳和地幔内部物质交换和交流的主要机制,是地球动力内部作用的体现。壳幔作用的方式主要有俯冲、底侵、拆沉、地幔柱和火山作用等。

俯冲是板块理论的重要组成部分,整个俯冲过程像是一个工厂,产物是岛弧岩浆和新生陆壳。在俯冲过程中,常见有两种壳幔作用方式,其一是俯冲板片脱水,交代上覆地幔楔熔融形成各种岛弧岩浆岩,富大离子亲石微量元素K, Rb, Sr, U, Th和REE等,亏损HFSE, Nb, Ta, P等元素为特征。另一类为俯冲板片直接熔融形成埃达克岩、高镁安山岩和富铌玄武岩系列。埃达克岩高Sr低Y,相对富集Eu, HREE含量低, B/Be比值低等特征。高镁安山岩高镁(MgO 3.5~7.0%), Th, LREE; Yb含量稳定, HREE分异明显, (Nb/Th)和(Nb/La)值低等特点。富铌玄武岩低LREE/HFSE, Nb含量高(7~16 μg/g), 具有较高的P₂O₅和TiO₂, Zr, Sc, V, Nb/Th值等特点^[17-19]。

自从Fyfe首次提出“underplating”(basalt melt beneath granitic crust)概念后,其含义就有不断变化和发展^[20]。现在一般认为底侵有两种,一种是自在地幔熔融产生的基性岩浆(玄武质熔体)侵入或添加到下地壳底部的过程和作用。还有一种是下地壳岩石部分熔融形成的岩浆向中上地壳侵位的过程和作用。底侵可以使下地壳分异成为下部的富橄榄石+辉石的堆积岩及上部的辉长岩及斜长岩。岩浆底侵有两个明显的作用效果,一个是使地壳加厚,另一个是带入大量热能和部分地幔物质进入地壳或引起下地壳部分熔融。底侵形成的花岗岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和εNd值带有地壳和地幔混合特征^[21]。

由于重力的不稳定性导致岩石圈地幔或下地壳物质沉入到下伏软流圈地幔中的过程为拆沉。包括大陆下地壳拆沉和大洋下地壳的拆沉。下地壳加厚达到榴辉岩相,大规模岩浆活动使其密度进一步增加直至超过下伏地幔,且下伏地幔已经被软化为软流圈地幔,这时,下地壳即可发生拆沉进入地幔。地壳拆沉的结果是使下地壳减薄、大量热的地幔物质进入地壳形成中酸性岩浆。最近有人提出由于拆沉作用会形成新生的岩石圈地幔结构,这种岩石圈地幔,一旦在构造条件下活化,可喷出玄武岩浆,这种玄武质岩浆具有显著的地壳特征。拆沉的岩石具有Eu/Eu*和Sr/Nd降低, Cr/Nd, Ni/Nd, Co/Nd, V/Nd, Ti/Nd等过渡金属元素的比值比大陆地壳降低的趋势^[22-23]。

地幔柱是继板块学说之后影响最广泛的大地构造理论,一般是指起源于核幔边界的热物质以柱状形式上升到地壳甚至喷发出地表的过程。Vincent^[24]将地幔柱总结为三类,起源于核幔边界(2900 Km)、起源于上下地幔间(670 Km)和起源于下地壳。地幔柱带有更深的地幔物质和更强大的热源,与岩石圈物质发生交换熔融,甚至可能形成酸性的岩石系列,如 A 型花岗岩等。它们在地表表现形式为热点、火山岛链、大火山岩省溢流玄武岩(FB)、苦橄岩、大型变质核杂岩、绿岩带、科马提岩等。其地球化学特征与 MORB 和 OIB 基本相同,不相容元素富集, LREE 与大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, U)正异常,高场强元素(Nb, Ta, Ti)负异常和高³He/⁴He 值等等。判别图解中地幔柱玄武岩常用范围是 Nb/Zr 比值 > 0.15, Th/Nb 比值 < 0.11^[25-27]。

3 区域成矿与壳幔作用

通常分析矿床成因时,会分析成矿的构造背景和动力学机制。矿床是区域成矿作用外因表现,动力学机制可能是区域成矿内在根本原因。实际上矿床系统的类型和分布也可以直接反映动力学背景^[28]。地球内部的俯冲、底侵、拆沉和地幔柱等壳幔作用与区域成矿必然有不同程度的因果关系。这几种作用方式并不是单独作用的,往往是复合作用或叠加作用,这样区域成矿类型在地表表现就变的更加复杂和无序起来。

3.1 俯冲与区域成矿

俯冲与成矿的关系倍受人们注目,通常认为斑岩型铜、钼、金与俯冲的关系最为密切。这主要因为俯冲把富含金属元素的洋壳物质和部分沉积物带入下部,与地幔物质作用时又能汲取到地幔中的成矿元素和热量,这样便构成了成矿金属的物质来源和能量来源。另一方面,俯冲板片的脱水,可以萃取金属元素,并成为成矿流体的一部分。这些成为成矿有利的重要条件。同时,俯冲带来的高氧逸度、高含水量和壳幔作用引起的高挥发份对成矿都起到重要的控制作用。这样在岛弧地区形成以斑岩型和矽卡岩型为主的矿床,在弧后地区形成基性

成分较高的矿床如铜镍硫化物型矿床、SEDEX 等矿床。在俯冲前期岩浆演化不够成熟,萃取的金属元素少,常以高温热液型矿床和 MVT 型矿床为主,富集 Mo, Sn, W 等的矿床,比正常斑岩铜矿床多分布在更靠大洋的一方。到后期,尤其到碰撞后拉伸环境时,俯冲地壳物质与地幔物质交换能量充分,成矿元素富集程度提高后形成含矿熔体,含矿熔体上升侵位后容易形成各种类型的矿床^[28-30]。在纵向上,下部形成与深成岩有关的交代型如金、铜、铁等矿床;浅部形成与浅成岩有关的矿床如斑岩型矿床;喷出地表的形成硫化物矿床^[13]。

矿床与俯冲作用的关系多种多样。如从我国东北漠河到俄罗斯内贝加尔的金、铜、铀和钼矿与中生代俯冲有关,并受深大断裂控制^[31]。东天山和阿尔泰成矿带多在早古生代,由板块俯冲形成斑岩型矿床,如希勒克特哈腊苏铜矿、土屋、延东等矿床。由后退式俯冲作用形成明显的矿代,如东天山铜矿、铜铁矿、菱铁矿^[32]。矿床的产出背景也多种多样,如可可塔勒铜锌矿、阿舍勒铅锌矿等矿床其构造背景为岛弧弧后盆地。阿尔泰南缘泥盆系成矿带成矿物质来源以幔源为主,但从南到北参与成矿的陆壳物质越来越多^[33]。俯冲碰撞作用可以形成区域上不同的类型的矿床,碰撞后岩浆内垫,引起地幔物质上涌,形成铜镍硫化物矿床和夕卡岩铜、钼、银矿床^[34],如环太平洋大型斑岩铜、钼、银矿床。同时有些矿床与俯冲中特定的地形有关:如智利北部 Rosario 铜、钼-金矿床,阿根廷西北 Alumbra 铜、金矿床,智利中部大型斑岩铜、钼矿床,印度尼西亚巴布亚的铜、金矿床,澳大利亚 Tasman 的金矿等^[35],其金矿床的形成与洋岛和陆弧下洋脊、海山链和洋底高原的俯冲密切相关。

俯冲板片熔融形成的埃达克质岩浆与斑岩性矿床的关系在国内外都有很多研究。总结其成矿过程可以为:①洋板片俯冲并发生部分熔融形成埃达克质熔体;②熔体与地幔楔橄榄岩及幔源熔体相互作用萃取金属使熔体富集成矿元素;③熔体向上侵位成岩(多经历一次、二次沸腾)使成矿运移富集,后期构造运动及热液成矿作用使成矿元素活化迁移并最终富集成矿。

俯冲埃达克岩成矿实例很多,我国三大成矿域

均有出露,特提斯成矿域的玉龙矿床,环太平洋的德兴矿床,古亚洲洋的土屋-延东、包谷图等斑岩型铜金矿床,中央造山带甘肃的黑石山金矿^[36]。

很多学者都强调中国古陆边缘矿床集中^[2,4]。中国的主要板块有华北板块、扬子板块、华南板块和塔里木板块等。这些板块的交界处正好是中央造山成矿带、南岭成矿带、古亚洲成矿带和特提斯成矿带。这些大陆边缘汇聚时,俯冲必然起到重要作用,壳-幔物质交流,地幔可能提供热和部分成矿物质,从而形成铜、金、钨等矿床在我国各成矿域都有较好出现。

3.2 底侵与区域成矿

由于岩石圈伸展导致玄武质岩浆的底侵作用。幔源岩浆上升至下地壳底部,发生同化混染、结晶分异等作用,形成部分堆晶岩。底侵岩浆带来的大量热量,促使下地壳的基底岩石及早先形成的堆晶岩发生麻粒岩相变质,形成基性麻粒岩。底侵岩浆在固结过程中, CO_2 首先达到过饱和,释放出大量 CO_2 ,形成 CO_2 流,并带出岩浆中的大量水,形成 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 水汽或流体。富 CO_2 流体的存在加速了岩石或岩浆中硫化物的分解,其中金属元素析出,并加入到流体中,形成富含 CO_2 含矿流体。在底侵作用后期,随着岩浆的不断冷却,岩浆中的 CO_2 含量逐步减少,引起岩浆中水的含量不断增加,从而形成富水岩浆和富水流体。该富水岩浆在岩石圈伸展进一步加强或其它构造因素诱发下,快速上升,侵入到中上地壳部位,形成基性岩墙群或侵入体,并将深部早先形成的基性麻粒岩作为包体带至地壳浅部。由于岩浆是富水的,导致岩石含有大量含水矿物角闪石和云母。底侵作用引起地壳抬升,地壳伸展形成可渗透带,伴随底侵作用造成的高地温梯度,有利于热液对流体系的形成及相关成矿作用发生^[37]。

与底侵作用有关的矿床很多,矿床的形成与底侵作用也是多方面的。如 Andean 成矿带中锡与铁镁质岩浆底侵提供热源,加厚的地壳和先前俯冲物提供了金属元素,最终形成富锡过铝质岩浆上升侵位成矿^[22]。中国东南部的 W, Sn 等矿床与俯冲期间,地幔楔熔融,玄武质岩浆底侵提供热量,引起中下地壳熔融产生的长英质岩浆关系密切^[38]。鄂东

南地区 Cu - Au - Mo - W 矿床、铁铜钨矿集区由于加厚的地壳快速垮塌,玄武质岩浆底侵熔融地壳,沿构造面上侵后形成的^[39-40]。豫西南钨,钨,铅锌银等矿床与中国东部构造体制大转换晚期的岩石圈伸展,幔源岩浆在壳幔边界附近发生底侵作用,诱发碰撞加厚的下地壳部分熔融形成含矿的花岗质岩浆相关^[41]。安徽沙溪铜金矿床中金属元素来自富集地幔,在底侵过程中形成埃达克岩浆上升成矿的^[42]。胶东金矿床中成矿流体由岩浆底侵提供^[43]。

幔源岩浆的底侵不但导致地壳的部分熔融或壳幔物质同熔,形成区域岩浆-热流体成矿系统,而且幔源岩浆富含挥发分(如 CO_2 等)和成矿元素(如 Cu, Fe, Zn 等)与地壳物质混熔后,使成矿元素进入成矿系统,固结成岩时形成一个富矿储库,当下次底侵时,再次诱发^[21]。当底侵的幔源岩浆上侵后,受到地壳物质的混染,其所含的成矿元素将直接进入区域岩浆-热流体成矿系统。玄武质岩浆底侵发生部分熔融使大范围内硫化物不稳定发生分解,将金属矿物释放到流体中从而有利于成矿^[44]。

底侵作用与成矿关系国内研究还比较薄弱,华北地壳减薄(底侵和拆沉的双重作用)形成明显的金铜矿带。华东南也有部分矿带被认识,现在在中央造山带中西部与底侵有关的矿床研究较少,但是底侵岩体发现不少。这需要对矿床动力学背景进行研究和探讨。另一方面底侵与拆沉往往是相联系的,当岩浆底侵进入下地壳熔融固结后,地壳加厚,此过程中成矿元素就会进行一次筛选。下地壳增厚引起拆沉,拆沉进入地幔熔融。与此同时,地幔物质又会上涌底侵熔融下地壳,带出地幔成矿元素和有利成矿因素(温度,挥发份等)再次浓缩富集。如此循环,可以形成具有大规模成矿的条件,当岩浆上侵时,通过不同的地质条件形成整体成带,局部分散的不同矿种或多金属矿床。

3.3 拆沉与区域成矿

拆沉榴辉岩沉入地幔后将有可能发生2种岩浆熔融形式:

(1)地幔软流圈物质上涌并加热下地壳(底侵作用),促使玄武质下地壳发生部分熔融,如果下地

壳富含成矿元素,那么将形成含矿岩浆或在上升过程中淋滤围岩中的成矿元素形成中酸性岩石为主的赋矿岩体,常带有堆积岩包体;如西藏驱龙^[45]。

(2)拆离下沉的榴辉岩相下地壳物质在热的地幔物质作用下发生熔融,将导致熔体与地幔橄榄岩发生交代混染,使得熔体具有高 Cr, Ni, Mg, 低 Si 的特征。同时地幔中的成矿元素和拆沉板片中的成矿元素混合,在岩浆演化中富集最终成矿。

与拆沉作用有关的矿床国内有很多。如宁芜地区矿集区与岩石圈大规模拆沉作用和郯庐断裂带发生强烈左行走滑有关,其中矽卡岩型 - 斑岩型铜、钼、金成矿亚系列形成于应力转换期,可能与俯冲岩浆底侵有关,后期拆沉熔融,幔源岩浆大规模强烈上涌,形成矽卡岩铁矿成矿亚系列^[46]。小秦岭 - 熊耳山地区金、钼等多金属成矿带研究发现,印支期岩石圈发生拆沉作用引起古老地幔柱重新活动,地幔物质不断上涌,含矿地幔流体向浅部运移穿过岩石圈,在地壳浅部成矿形成了小秦岭多金属矿床^[47]。熊耳山 Au - Ag - Pb - Mo 矿集区发现在主拆沉地段矿床薄但是品位高,这说明矿床后期的成矿位置与深大断裂等构造特征有关^[48]。招掖金矿带中,构造背景受岩石圈地幔缩短加厚 - 拆沉 - 地幔隆起 - 地壳拆沉滑脱控制,金矿流体在地幔底侵下地壳部分熔融,形成初始含矿流体,然后地幔物质和下地壳部分熔融物质在侵入过程中与围岩发生交代最终形成含矿流体^[49]。

拆沉洋壳、下地壳熔融形成的高氧逸度熔体不断加入到地幔中,导致地幔氧逸度增高,地幔中金属硫化物被氧化,地幔中亲硫元素以硫酸盐的形式进入熔体中。在高温、高压条件下熔融形成的强烈亏损 HREE 的中酸性熔体,熔体快速上升对 Au, Cu 等成矿物质上升到地壳浅处成矿是非常有利^[50]。故而富含 Au, Cu 等成矿物质的熔体在快速的上升到地壳浅处时由于温压条件变化很容易形成铜金等矿床。此外,在拆沉下地壳熔融的同时,下地壳上部地幔橄榄岩在熔体、流体的作用下,也可能发生熔融形成富含 Au, Cu 等成矿物质的玄武质岩浆。当中酸性岩浆与地幔橄榄岩发生反应有利于成矿,这与地幔物质的上涌关系密切^[51],如华北板块的拆沉引起华北内部有大量的相关矿床产生^[52]。

3.4 地幔柱与区域成矿

地幔热柱的活动,为成矿提供足够多的热量,能够形成量多且速度快的成矿流体体系;同时富含大量成矿物质的幔源气体、流体和熔浆物质以地幔柱形式大规模上涌,一方面使得大规模成矿流体的含矿元素浓度增高,另一方面使得大规模成矿流体富含幔源气体(CO₂, H₂S),成为形成矿床必不可少的矿化剂,这样成矿流体不断萃取出更多的成矿物质,等到在合适的构造条件下,成矿流体的物理化学条件发生改变,成矿元素卸载成矿。由于地幔柱作用,超大陆裂解有关板内矿床有:发育在克拉通边缘或内部裂谷环境有层状侵入的 PGE,碱性岩柱管道内的金刚石,与 A 型花岗岩有关的铁、铜、金等矿床。这些矿床常伴随 Cu - Ni 矿床产出^[28]。这类矿床常有高镁含量,铁钛含量高等特点。

王登红^[53-55]指出与地幔柱热点有关的矿床类型有锡矿、热液铜矿、层状铜矿和裂谷型铅锌(铜)矿。除此之外可能还有其它类型,比如白云鄂博的巨型稀土矿床、奥林匹克坝的巨型铜稀土 - 铀矿等。一些钨矿、稀有元素矿床和金矿,表面上与玄武岩没有直接联系,但成因上和时空分布上可能与热点有关。现代海底火山喷气矿床有些也可能跟热点有关,如东非裂谷、加拉帕戈斯、塔希提的海底热泉成矿,陆地上的如黄石公园、冰岛的地热资源等。

峨眉地幔柱是我国现阶段地幔柱研究最深入的地区。其中 Ni - Cu - (PGE)硫化物矿床是地幔柱活动早期阶段的产物,分布于内带的低钛区;而 V - Ti 磁铁矿床的形成则晚于岩浆硫化物矿床,分布于外带的高钛区^[56-57]。同时地幔柱影响到黔西南水银洞金矿地区,地幔柱喷发的玄武质岩浆为金矿提供了金属来源^[58],地幔柱热液蚀变引起形成自然铜,同时也为川 - 滇 - 黔铅锌多金属成矿提供了成矿流体^[59]。地幔柱带来的深源流体也可以多级演化,与地壳流体混合形成各种矿床如冀北金矿床^[60]。陕西略阳煎茶岭硫化镍矿床其成岩物质来源于比较亏损的上地幔,与地壳的硫明显混染,反映与地幔柱岩浆有关^[61]。小秦岭多金属成矿带在地幔柱慢枝构造的内侧主要为 Au(Cu, Mo)成矿区,远离为 Au, Pb, Zn 成矿区^[47]。华南地区地幔

柱则与铀矿有关,不但提供了热源,而且提供了成矿物质和成矿部分成矿流体^[62]。湘南地区大型超大型金属矿床多是由受地幔柱影响的热岩浆迁移过程中岩浆中的成矿元素和围岩中的成矿元素活化转移共同作用的结果^[63],如湘中铋矿在地幔柱热驱动下,历经长期壳幔循环,形成高浓度古水热液成矿流体,此成矿流体为铋矿的矿源^[64]。

我国可能与地幔柱-热点作用有关的成矿区(带)主要有:

(1)华南以南岭为主的中、新生代成矿带。钨、锡、钼、铋多金属矿,东部钨矿可能是地幔柱头部加地热地壳使之重熔的结果,西部的锡矿则是地壳重熔与地幔物质(如富锡的地幔流体)共同作用的产物。

(2)峨眉山火成岩省,铜、金、铅、锌、铋、汞和稀有-稀土等矿床(点)。

(3)白云鄂博成矿区花岗岩,富含Nb和Fe,究其原因,白云鄂博的地幔柱可能起源较浅,规模较小。

(4)阿尔泰造山带,主要与A型花岗岩有关。

地幔柱总结起来有三点有利于成矿,其一是提供了成矿的元素(从地幔带人);其二是提供了成矿的热源(地幔柱温度高);其三在地壳和地表引发的构造事件有利于成矿流体运移和聚集,如地幔柱喷发的岩浆快速冷凝,形成岩石可能为成矿源,同时这类岩石孔隙大,利于成矿流体通过。在地理分布上,地幔柱不仅在中心可以形成Fe-Ti-V-(PGE)等亲地幔元素的岩浆-热液矿床,还可以引起了强烈的壳幔相互作用,造成大区域尺度的异常高热场,对地壳成矿流体的形成、循环、演化起了重要的促进作用,从而在地幔柱周边形成Au,Ag,Pb,Zn,Hg,Te,Sb等矿床^[65-66]。

4 结论

综上所述,地球内部的俯冲、底侵、拆沉和地幔柱等壳-幔作用与区域成矿有必然的联系。在各种壳幔作用下,岩浆大规模上涌,下地壳部分熔融,形成初始含矿流体,然后地幔物质和下地壳部分熔融物质在侵入过程中与围岩发生交代最终形成含矿流体,并在有利成矿部位富集成矿。在这一过程

中,受构造和环境控制,各成矿元素运移、富集,最终形成各种矿床(异常),赋存于地壳的不同位置,从而形成具有区域特征分布的成矿带。

本文在纂写过程得到了青海地质调查院、天津地质矿产研究所、中科院广州地化所和长安大学的技术人员、专家和学者的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 翟裕生,邓军,彭润民. 中国区域成矿若干问题探讨[J]. 矿床地质,1999,18(4):323—332.
- [2] 翟裕生. 中国区域成矿特征探讨[J]. 地质与勘探,2002,38(5):1—4.
- [3] 翟裕生. 中国区域成矿特征及若干值得重视的成矿环境[J]. 中国地质,2003,30(4):337—342.
- [4] 吴良士,裴荣富. 中国东部区域成矿研究述评[J]. 矿床地质,1990,9(1):91—94.
- [5] 翟裕生,彭润民,邓军,等. 区域成矿学与找矿新思路[J]. 现代地质,2001,15(2):151—156.
- [6] 韦永福,孙培基. 中国金矿区域成矿地质背景[J]. 黄金地质,1995,1(3):1—7.
- [7] 尹冰川. 区域成矿规律研究现状及发展趋势[J]. 世界地质,1995,14(1):56—60.
- [8] Khin Zaw, Stephen G. Peters et al. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China [J]. Ore Geology Reviews, 2006, 1—15.
- [9] 中国地质科学院地质研究所编制;郭文魁主编. 1:4000000 万中国内生金属成矿图. 1987, P618. 201/G1.
- [10] 朱裕生,梅燕雄. 成矿模式研究的几个问题[J]. 地球学报,1995,2:182—189.
- [11] 朱裕生,王全明,张晓华,等. 中国成矿区带划分及有关问题[J]. 地质与勘探,1999,35(4):1—4.
- [12] 杜杨松. 1999. 壳幔成矿学初探[J]. 矿床地质,18(4):341—346.
- [13] 王方国,康静. 大陆边缘地质及贵金属矿展布规律[J]. 贵金属地质动态,1990,1:8—14.
- [14] 孙启桢. 边缘成矿概论[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [15] 涂光炽,李朝阳. 浅谈比较矿床学[J]. 地球化学,2006,35(1):1—5.
- [16] 赵一鸣,李大新,陈文明,等. 内蒙古羊蹄子山沉积变质型钛矿床——一个新的钛矿床类型的发现[J]. 矿床地质,2006,25(4):113—122.
- [17] 赵振华,王强,熊小林. 2001. 俯冲带复杂的壳幔相互作用

- 用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 277—284.
- [18] Manning C E. The chemistry of subduction - zone fluids [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223: 1—16.
- [19] 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 等. 俯冲、碰撞、深断裂和埃达克岩与斑岩铜矿[J]. *地质与勘探*, 2006, 42(1): 1—6.
- [20] Fyfe W S, et al. Ancient metamorphic - migmatite belts of the Brazilian African coasts [J]. *Nature*, 1973, 224: 501.
- [21] 杜杨松, 刘金辉, 秦新龙, 等. 岩浆底侵作用研究进展[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(3): 237—242.
- [22] Michele Lustrino. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism [J]. *Earth - Science Reviews*, 2005, 72: 21—38.
- [23] 刘新秒. 介绍一个产生玄武岩的模型[J]. *地质调查与研究*, 2006, 29(2): 150—154.
- [24] Vincent Courtillot, Anne Davaille, Jean Besse, Joann Stock. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205: 295—308.
- [25] Lianxing Wen. A compositional anomaly at the Earth's core - mantle boundary as an anchor to the relatively slowly moving surface hotspots and as source to the DUPAL anomaly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246: 138—148.
- [26] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应[J]. *地质学前沿*, 2002, 9(4): 341—353.
- [27] 孙书勤, 张成江, 黄润秋. 板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 593—598.
- [28] David I, Groves, Bierlein, Frank P. Geodynamic settings of mineral deposit systems [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 19—30.
- [29] Joseph. B, Whalen, McNicoll, Vicki J, Galley, Alan G. J, Frederick Longstaffe. Tectonic and metallogenic importance of an Archean composite high - and low - Al tonalite suite, Western Superior Province, Canada [J]. *Precambrian Research*, 2004, 132: 275—301.
- [30] 侯增谦, 陈文, 卢记仁. 四川峨嵋大火成岩省 259 Ma 大陆溢流玄武岩喷发事件: 来自激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1130.
- [31] 武广, 孙丰月, 朱群等. 上黑龙江盆地金矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿床地质*, 2006, 25(3): 215—230.
- [32] 方维萱, 黄转盈, 唐红峰, 等. 东天山库姆塔格—沙泉子晚石炭世火山—沉积岩相学地质地球化学特征与构造环境[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 529—544.
- [33] 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰山缘泥盆纪多金属成矿带 Sr - Nd - Pb 同位素地球化学与构造背景探讨[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 145—152.
- [34] 韩春明, 肖文交, 崔彬, 等. 新疆北部晚古生代铜矿床主要类型和地质特征[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 74—89.
- [35] 王承书译. 2006. 世界大型斑岩矿床[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(3): 109—112.
- [36] 付善明, 周永章, 郭原生等. 2005. 甘肃黑石山埃达克岩金矿床成矿模式初析[J]. *矿床地质*, 24(6): 669—675.
- [37] 余宏全, 王义文, 李庆环, 等. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿基性麻粒岩包体特征及其成矿动力学意义[J]. 2006, *地质学报*, 80(6): 863—875.
- [38] X. M. Zhou, W. X. Li. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China; implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3 - 4): 269—287.
- [39] 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲等. 鄂东南地区 Cu、Au、Mo、(W) 矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿 Re、Os 同位素年龄[J]. *矿床地质*, 2006, 25(1): 43—52.
- [40] 赵新福, 李建威, 马昌前. 鄂东南铁铜矿集区铜山口铜(钼)矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及对区域成矿作用的指示[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 849—862.
- [41] 叶会寿, 毛景文, 李永峰等. 豫西南泥湖矿田钨钼及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 165—174.
- [42] 王强, 赵振华, 熊小林等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长岩的证据[J]. *地球化学*, 2006, 30(4): 353—362.
- [43] 邢树文, 孙景贵, 李东旭等. 胶东晚中生代金矿成矿的硫同位素组成及热动力源[J]. *吉林大学学报*, 2003, 33(2): 141—146.
- [44] 王奖臻, 李朝阳, 胡瑞忠. 斑岩铜矿研究的若干进展[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 514—519.
- [45] 高顺宝, 郑有业. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床成矿作用的地球化学控制[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(2): 41—46.
- [46] 余金杰, 毛景文. 宁芜斑岩铁矿钠长石 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 定年及意义[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(10): 1059—1063.
- [47] 卢欣祥, 尉向东, 于在平等. 小秦岭—熊耳山金成矿作

- 用与区域构造的耦合[J]. 黄金地质, 2004, 10(1): 1—5.
- [48] 郭保健, 李永峰, 王志光等. 熊耳山 Au - Ag - Pb - Mo 矿集区成矿模式与找矿方向[J]. 地质与勘探, 2005, 41(5): 43—47.
- [49] 刘晓煌, 王金荣, 孙兴丽等. 招掖金矿区带花岗岩与金成矿作用研究[J]. 有色金属, 2006, 58(4): 15—20.
- [50] 王强, 许继峰, 赵振华. 强烈亏损重稀土元素中酸性侵入岩(或埃达克质岩)与成矿——以中国东部、青藏高原、新疆北部为例[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 561—572.
- [51] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 351—360.
- [52] Lin Wei, Wang Qingchen. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China block: a crustal response to subcontinental mantle removal? [J]. Bulletin de la Soci, 2006, 177: 287—297.
- [53] 王登红. 地幔柱与热点的成矿作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 393—400.
- [54] 王登红. 地幔柱的识别及其在大规模成矿研究中应注意的问题[J]. 地球学报, 1999(增刊): 426—432.
- [55] 王登红, 李建康, 刘峰等. 地幔柱研究中几个问题的探讨及其对于找矿的意义[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 489—494.
- [56] 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠等. 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系[J]. 矿物岩石, 25(4): 35—44.
- [57] 陶琰, 罗泰义, 黄智龙等. 云南金宝山岩体岩浆起源的微量元素模式分析[J]. 矿物学报, 2005, 25(4): 341—346.
- [58] 聂爱国, 张竹如. 黔西南水银洞金矿床成矿地质条件研究[J]. 2006, 黄金, 27(6): 5—9.
- [59] 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏等. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 42—54.
- [60] 王宝德, 牛树银, 孙爱群等. 冀北地区金矿床 He、Ar、Pb 同位素组成及其成矿物质来源[J]. 地球化学, 2003, 32(2): 181—187.
- [61] 王瑞廷, 毛景文, 任小华, 等. 煎茶岭硫化镍矿床成岩成矿作用同位素地球化学证据[J]. 地球学报, 2006, 26(6): 513—513.
- [62] 李子颖, 李秀珍, 森锦. 试论华南中生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向[J]. 铀矿地质, 1999, 15(1): 9—18.
- [63] 刘钟伟. 热点岩浆活动与湘南地区大型超大型金属矿床的形成[J]. 湖南地质, 1998, 17(1): 7—13.
- [64] 黎盛斯. 湘中铀矿深源流体的地幔柱成矿演化[J]. 湖南地质, 1996, 15(3): 137—142.
- [65] 张成江, 刘家铎, 刘显凡等. 峨眉火成岩省成矿效应初探[J]. 矿物岩石, 2004, 24(1): 5—9.
- [66] 朱炳泉, 常向阳, 胡耀国, 等. 地球化学急变带与地幔柱资源系统[J]. 岩石矿物地球化学通报, 2003, 22(4): 287—300.

Preliminary Study on Relationship between Regional Metallogenic and Crust - Mantle interaction

DING Yu - jin¹, HE Sheng - fei², LI She - hong³, LIU Zhan - qing⁴

(1. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China, 2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resource, Tianjin 300170, China, 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou, 510640, Guangdong, China, 4. College of Earth Science and Resource, Chang'an University, Xian 710054, Shanxi, China)

Abstract: The studies on regional metallogenic have advanced from simple to complex, from the surface to the deep crust, have been to vast field for metallogenic is a hot action of a modern geodynamics studies. In this paper, through discussing the relations of Crust - Mantle interaction and regional mineralization, analyzed and discussed the influences and effects about regional metallogenic and various Crust - Mantle interaction, such as dive, underpating, delamination and mantle plumes. We preliminarily established a relationship between the depth dynamic actions and the regional mineralization. It provides evidences for the deep mechanism and rule of regional metallogenic studies.

Key words: Regional metallogenic; Crust - Mantle interaction; Dive Underpating; Delamination; Mantle plume