

# 地球深部物质和能量交换的动力过程 与矿产资源的形成

滕吉文

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101; 吉林大学,吉林 长春 130026)

**摘 要** 地球深部物质与能量的交换和深层动力过程这一科学问题的提出,乃是近年来地球科学发展与逐步向量化“进军”的必然,它是探索一系列地学前沿课题的基础。地球表面所见到的一系列地球物理场异常、地质构造格局、地球化学组分变异,无一不受到地球内部物质与能量的交换和深层动力过程的制约。如地球圈层的形成与演化、大陆伸展与裂谷、资源与能源等,均为深部物质运移和物理学、化学效应及地质构造耦合的产物。本文讨论了金属矿产资源与地壳、地幔结构及深部物质运移的动力学响应。通过几个典型矿床和其形成要素分析了成矿作用的深层动力过程。文中主要讨论了五个方面的问题:

第一,金属矿产资源成矿和分布与地壳、地幔结构及深部物质运移和成矿带。

第二,金的形成与深层过程。

第三,金属矿床的形成、演化和分布与深部物质及能量的交换。

第四,地幔热柱与成矿作用。

第五,地球内部深层动力过程与流体运移和必须深化研究的几个问题。

**关键词** 地球内部物质与能量的交换;成矿作用的深层动力过程;地壳与地幔结构;地幔热柱与成矿;圈层耦合

**中图分类号** P542+.5; P541; P31 **文献标识码** A **文章编号** 1001-1552(2003)01-0003-19

地球表面所见到的一系列地球物理场异常、地质构造格局、地球化学组分变异,无一不受到地球内部物质与能量的交换、圈层耦合和深层动力过程的制约。基于“耦合”(Coupling)系指不同物质和构造体系之间各种介质和结构的相互作用(物理的、化学的和构造的),进而呈现出存在成因内在联系的物理、化学机理及其结构变异的新现象。为此,在深化对地球本体的认识中,在为资源、能源、灾害和环境变迁以及全球变化的研究与探索中,必须深化对耦合响应与深层动力过程的认识。应当确切地说,在地球科学领域里不同学科的人们对耦合、深层过程和地球动力学的确切内涵,不论在对定义的理解上,还是在

认识的深度、广度与应用上均还存在着一定差距,对其研究和探索的深度与本质在总体上尚知之甚少。为此,本文提出深部物质与能量交换和矿产资源形成这一科学问题,乃是21世纪上、中叶地球科学领域中成矿理论与动力成矿模型建立必须研究的主题,且为其前沿与难题之一。

## 1 问题的提出与思考

### 1.1 问题的提出

地球内部呈圈层展布,主要可分为:沉积岩层,结晶基底,上地壳、中地壳、下地壳,壳幔边界(Moho界面或界带),地幔盖层,软流层,410 km、670 km间

收稿日期:2002-09-28;改回日期:2002-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40074020)和中国科学院知识创新项目(KZCX2-109)。

作者简介:滕吉文(1934-),男,中国科学院院士,研究员,本刊编委,地球物理学家。

断面,核-幔边界与D"层、外核和内核。它们的物质属性和构造格局不论在纵向与横向都是不均匀的、非线性的和各向异性的。由于深部物质与能量在不停地运移和交换,各圈层之间存在着极其复杂的耦合与深层过程和力系作用,如沉积岩层起伏与结晶基底的继承性,地壳中不仅存在低速层(在个别地区有两个低速层,如青藏高原),而且还存在高速梯度夹层(如西北和华北地区);地幔盖层起伏的区域性变异(如喜马拉雅地带);地幔低速层的埋藏深度和厚薄亦均随地而异;410 km、670 km 间断面的普通存在,核-幔边界层(D")的热动力学效应,岩浆的形成与运移,地磁场的西向漂移,地幔热柱的形成与热物质上涌,板块的俯冲与消减,地幔对流的形态与检验;地球内部的物质属性以及其对地表构造和对地球化学元素分布的影响……等等。这便表明,地表所见到的一切地球科学现象,规模如此之大,作用时间如此之长,不可能只依据地表作用去推断,而必须受到地球内部物质运移与其物理-化学作用响应和与力源作用的控制(滕吉文,1996)。为此,要解决成因与力源的问题,要探索资源形成的深部介质和构造环境问题,则必须研究和探索地球内部物质与能量的交换和圈层耦合及深层动力过程。

### 1.2 思考

地球内部介质结构、构造是研究深层过程与地球动力学的主要领域。地球内部即是资源与能源形成、演化与分布的场所,是地震和火山等灾害的策源地,而且又与地表、海洋、日地空间以及全球变化的相互作用关切。地表所见大型构造的格局,不论是造山带与盆地、大陆伸展与裂谷、克拉通的构造活动均与地球深部密切相关。换言之,浅部构造形态乃是深部物质运动的一种响应。壳、幔、核的介质结构与物理、化学属性及其差异定会反映出耦合响应和深部动力作用过程的不同,以及深浅构造不协调的表征,同时必受到边界条件的制约。然而当今在资源形成与分布领域里未知的或尚不十分清晰的要素,如:介质结构、物理与化学要素、地质构造的表征,特别是它们之间的耦合效应和运动学与动力学过程等课题尚很多,确仍然是摆在地球科学家们面前的一大难题,而且它们是不均匀的、非线性和各向异性的复杂体系。

### 1.3 在地球深部结构与深层过程研究中必须深化认识的科学问题

要推进和解决成矿的深部要素和物质运移的深层动力过程这一带有本质性的科学问题,则必须重

视:

(1) 高分辨率的地震三维速度结构和层析图像,以刻划出地球深部地壳与上地幔的精细结构,特别是大型和超大型矿床以及大规模矿集区的特异结构背景和深大断裂体系的分布与延深。同时辅以物理-数学模拟,以取得深部圈层和耦合的定量深层过程。

(2) 提出多要素控制的和逼近于实际的复杂边界条件约束下的正反演理论、方法和高精度的观测系统,以获取大量的、精确的深部信息,给出大型、超大型矿床和矿集区的深部介质和构造环境。

(3) 地球物理场包括热物理场与岩石学、火山喷发、深源捕虏体,深钻井和超深钻井所获定量资料相结合,并通过  $P-T-t$  轨迹、痕量元素与同位素化学(邓晋福等,1998)对深部物质与过程的示踪及高温高压实验以形成岩石学、地球化学和地球物理学的纽带,并进行相平衡、相转变和介质物理与力学的属性研究。

(4) 深部介质、结构与圈层耦合和深层动力过程导致的深部物质组成和性质的转化,化学上的不平衡与物理上的不稳定性乃是深浅物质与能量交换和物质运动的必然。为此,地壳低速层、壳-幔边界、地幔低速层 410 km、670 km 间断面、核幔边界(特别是D"层)和它们的起伏变化、深度分布、物理属性、地球化学场特征与变异及其动力学响应乃是有着特殊意义的。

(5) 地球内部结构、构造,地球物理边界场效应,岩石学和深部流变学特征的综合研究是深化认识地球本体,圈层耦合和深层动力过程的关键所在。在这样的基点上不但要建立地球圈层与边界场响应的动力学模型,而且要建立大型构造体系、大型和超大型矿床及矿集区(带)形成与演化的深层动力过程模型。

## 2 金属矿产资源成矿、分布与地壳、上地幔结构及深部物质运移和成矿带

21 世纪的地球科学在成矿过程和成矿理论研究中不再是(或不再全是)描述、假设与推断的定性科学,而是在对地球运动学与动力学、耦合响应与深层过程正确理解下(即物理与化学响应),且必须是在具有充分而可靠信息的前提下,提出量化的科

学结论,并以三维或四维图像来表征。这是因为一切地表所见的地球物理异常、地球化学现象和岩石学特征,一切资源、能源和环境及其形成和演化的源区与作用力系均为地球内部物质运移的产物。

为此,对于金属矿产的形成与分布的研究,必须考虑地壳和上地幔的介质与构造的综合作用,特别是大型、超大型矿床和重要矿集区的形成则均为壳、幔物质与能量强烈交换和金属元素聚集的结果。通过我国大陆及邻近海域地壳与上地幔的研究显示,壳源、幔源、壳幔源金属矿产元素的分布与岩石圈和软流层的分布,及其不均匀性和各向异性密切相关,特别是内生多金属成矿带和“幔根”与地幔低速层关系密切(彭聪等,2000)。在岩石圈减薄区,幔源成因的含矿元素通过区域深、大断裂上涌,并通过物理-化学作用与地壳上部物质交替和围岩变质。这表明深部结构与深层动力过程制约着内生多金属矿床的分布、含矿物质的聚集、形成和结构,例如深部韧性剪切带便与多金属矿床密切相关。

我国大陆内部的南北构造带,东部郯庐(郯城—庐江)大断裂及其南延北伸地域,祁连—秦岭—大别构造带,天山—阴山—燕山构造带,三江构造带,藏南拆离带这六条大型构造界带,不仅是深、大断裂的分布带,而且是陆内的块体界带。这里不仅分布有大量的金属与非金属矿床,而且是地震的活动边界。例如南北构造带(川、滇及藏东南地域)为Fe、Cu、Sn、Ni、稀有和贵金属的成矿带,而且在这些地域对铂族元素的勘查与勘探必须继续给予足够的重视。祁连—秦岭—大别造山带系Fe、Ni、Co、Au、Ag的成矿带。天山—阴山—燕山造山带系等亦均为金属、贵金属和稀有金属的成矿带。在这些成矿带地域存在着一系列大型和超大型矿床及矿集区(徐光炽等,2000)。应当清晰地看到,在这些地带的地幔低速层对其成矿作用起着重要作用,而且与壳、幔源成矿物质的运移密切相关。

显然,深部裂谷构造、大型韧性剪切断裂带、变质核杂岩及剥离断层等大型构造的活动与作用是与各种类型大型、超大型矿床和矿集区的形成有着密切的关系(瞿裕生等,1997)。这表明,沿系列规模大、延伸深的深大断裂(穿壳断裂或抵上地幔软流层顶部的断裂系统)体系之所以存在一系列的金属矿产的分布或富集,主要由于这里是深部热物质运移和上涌的通道,是深部物质与能量强烈交换的场所。下面将通过一系列成矿实例来讨论矿产资源的形成和聚集与圈层耦合和深层动力过程的必然关系。

### 3 金矿的形成与深层过程

#### 3.1 金(Au)起源于地核

基于金的非专属性、金属特性和新的金原子结构模型,推断金应起源于地核(徐光炽等,1991)。金是以紫色气体状混合于铁镍之间,在地核的收缩与膨胀过程中,金蒸气进入到地幔的软流层,其上升通道为核幔之间由于核收缩或膨胀在局部或暂时形成的大分子间隙。气态金元素在抵达地幔软流层后,由于介质物理和化学属性的变异形成液态和气液混合相金,并与软流层中的甲烷类物质( $\text{CH}_4$ )一起,随岩浆浆体一起流动。这种气液混合相的金,在遇到断裂和岩浆上涌时,占混合相2/3以上的气态金将进到由于地热事件而发生塑变软化的围岩中去,1/3左右的气-液混合态金与岩浆一起进行分异。在分异过程中液态金在地表浅水作用下,可直接变成固态金;在地表咸水(海水)、硫化物和二氧化碳等作用下,呈络合物仍然进行搬运,待再遇到淡水或细菌(生物)等因素作用时,变为固态金。

这是因为,金元素可通过共价单键生成 $\text{Au}_2$ 气态分子,存在于气相之中,几个纳米( $1\text{ nm} = 10^9\text{ \AA}$ )大小的金沸点可低至约 $1\ 000^\circ\text{C}$ (姜泽春等,1996),通常在地下 $100\text{ km}$ 深处,温度达 $1\ 300^\circ\text{C}$ , $300\text{ km}$ 深处为 $2\ 000^\circ\text{C}$ , $2\ 900\text{ km}$ 深处(核幔边界,D"层附近)可达 $2\ 700^\circ\text{C}$ ,故纳米金在地幔内可以气化。小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的超微粒金可成为气溶胶金(气体中的超微粒固体)被气体带走。在向上运移过程中,地幔流体便成为含金的幔源成矿热流体。当进入到岩石圈后则可沿断裂继续运移,并进入地壳浅层后圈闭成矿。

为此,金的形成过程是以气态→气→气液混合态→液态→固液混合态→固态;从地核→D"层→下地幔→上地幔→壳、幔边界→结晶地壳→沉积岩层→地表的演化过程。不论金矿的物质来源,导矿通道还是富集空间均表明在金矿成矿过程中,介质属性和构造条件是主要的(如断裂、构造交汇、围岩地球物理与地球化学属性),而岩金和伴生金都源于地球深部,并受到深浅物质与能量交换和物理与化学过程的相互作用所制约。据估算,在地球大约 $60\text{ Ma}$ 的演化过程中,大约99%的金都集中在铁镍地核核内(中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所,1987)。

#### 3.2 老王寨超大型金矿床的形成与壳、幔结构

老王寨超大型金矿床位于云南省镇沅县,为扬子陆块与印支陆块衔接的部位,且为金沙江—哀牢



山、红河、元谋—绿汁江和九甲—墨江四条深断裂的交会部位,产于哀牢山构造变质岩浆杂岩中(这里即为推覆构造带,又为韧性剪切带),金储量约 100 t,平均品位 4~14 g/t,该金矿的源岩为蛇绿岩及蛇绿混杂岩和中新生代的幔源岩浆岩。这些岩体中的金含量均较高,如玄武岩中平均为  $41 \times 10^{-9}$ ,石英斑岩中为  $32 \times 10^{-9}$ ,煌斑岩中为  $227 \times 10^{-9}$ 。老王寨金矿区内外有着大量的煌斑岩(同位素年龄为 95.3~70 Ma 和 45~30 Ma 两个时段),富碱斑岩类(石英斑岩,花岗斑岩,花岗闪长斑岩,同位素年龄为 40~60 Ma),碱性玄武岩及超基性岩,它们均源于地幔,属幔源部分熔融产物。它们在形成时间上与金矿化一致,在空间上与金伴生,并且它的本体也广泛产生金矿化。例如该矿床内的云煌岩 90% 以上受到不同程度的热液蚀变或矿化,约有 20% 成为金矿(化)体。由于地幔中热物质上涌形成的低速体中富含金元素,故当它进入地幔时便可直接沿断裂侵入到地壳浅部或沉积岩层中(图 1)。由于地壳低速层上下介质的韧性剪切活动强烈,并与来自地幔流体携带的矿化剂和热量发生强烈的物质与能量的交换,故促使矿源岩中的金大量活化析出,形成壳源成矿热流体,并在进一步富集过程中沿矿构造(九甲—墨江断裂)进入浅层圈闭构造成矿(赵永贵等,1992;边千韬等,2000)。

老王寨金矿床地带不仅矿源物质来自地幔,而且与地壳和地幔结构密切相关,如该矿床下面低速透镜体较厚,且上凸,中、下地壳内的高速体乃是地

幔物质上涌后的冷却体,为金的矿源岩之一,该矿床辖区在地面的垂直投影位于渡口—楚雄幔隆与兰坪—景东幔隆的交会部位(图 2)。位于金沙江—哀牢山断裂以北澜沧江—孟连这一幅度达 15~20 km 的软流层隆起区和扬子陆块西南角东侧个旧亚低速柱的西缘。

另外,印度板块与欧亚板块的碰撞汇聚地带的玉龙斑岩铜矿,冈底斯斑岩铜矿和云南金顶等大型和超大型铅锌矿也均表征着其在成因与矿源上与壳、幔物质运移和特异结构间的内在联系。

## 4 金属矿床的形成、演化和分布与深部物质、能量的交换

### 4.1 Cu, Pb, Zn, Au 等金属矿床形成与深部流体物质的运移

因为伸展作用导致地壳减薄和上地幔顶部上隆形成变质核杂岩区的高热流环境,促使下地壳岩石的混合岩化和重熔,且使以壳源为主体的中酸性岩浆活动在变质核杂岩的中心部位发育,故为成矿元素的运移提供了热能。基于下部地壳深处以韧性变形为主,形成网络状韧性剪切带,使基底岩系或侵入其中的基性岩糜棱岩化,并提供一部分变质热液。它与岩浆来源的热流,共同形成还原环境下的热液循环系统。这些热液必然要淬取围岩中的成矿元素组分,并形成含矿热液。上部高角度正断层系和脆性破裂系为地下水的深循环提供了通道,异常的地热梯度为流体循环提供热能(翟裕生等,2001)。在热流体

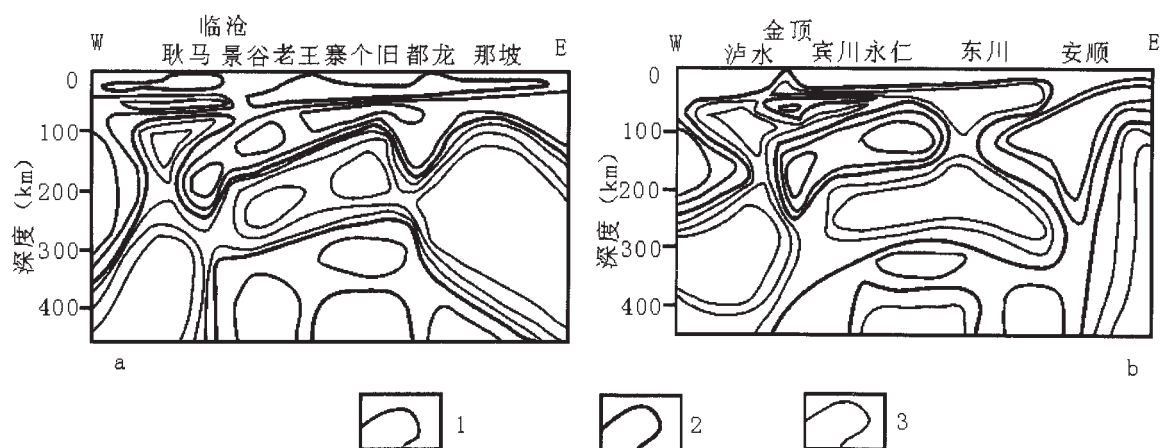


图 1 通过老王寨金矿区 (a) 和金顶金矿区 (b) 及其相邻地域的地震层析速度结构概略剖面图  
(据赵永贵等,1992)

1 - 高速异常 2 - 零异常 3 - 低速异常, 等值线间距为 3%

Fig. 1 Seismic tomographic velocity structural sketch profiles crossing Laowangzhai (a) and Jinding (b) gold ore areas and adjacent regions

循环与剥离断裂的耦合下形成十分有利的氧化—还原带,且构成了矿物质聚集的有利地段。

#### 4.2 甘肃省西成铅锌矿带的地壳与上地幔深部构造环境

西成铅锌矿带规模很大,它包括 4 个主要成矿区和两个特大型铅锌矿床(厂坝—李家沟和毕家山),这一层控矿床亦属热液型,其成矿作用的热能与金属成矿元素均源于深部。由深部结构和构造可见(彭聪等,2000;董奇珍,1988;张文斌等,1993)西成铅锌矿处于:

(1)岩石圈地幔减薄和软流层上隆上方,在深部力系作用下,Moho 界面上隆,下地壳介质亦同步上隆,故使上地幔减薄(图 3)。

(2)天水—成县之间地壳结构的特异变化表明,这里存在着一条直下切入地幔的深断裂带,这一深断裂带构成了该铅、锌矿床深部热物质上涌的通道。

(3)深部含矿热液以此断裂为通道上涌,侵入下地壳,使其增厚、熔融,花岗岩浆上升侵入上地壳,并局部出露地表,在物质与能量交换过的物理—化学作用过程中为成矿作用提供热能和矿源。

(4)在矿集区上地幔高导层埋深仅 50~55 km,充分表明了深部热物质的向上运移及其导致的壳、幔构造格局。

#### 4.3 湖南省郴州市柿竹园超大型钨多金属矿床成矿的深层过程

该矿床产于多组陡倾断裂交叉与表层褶皱滑动平面的复杂挤压剪切破裂带,基本上是由三期岩浆—热液运移和叠加而形成的一个复合矿体。在区域构造和应力作用下,中生代以来壳、幔介质在水平振荡和水平剪切作用下,不仅导致活化,且形成了多期岩浆活动与成矿作用(刘义茂等,2000)。由图 4 可见,柿竹园矿床经历了深部物质运移的成矿动力环境,在水平振荡和剪切力系作用下,在深部断裂区,存在着富 Si、碱的岩浆岩及钨、锡、钼、铋成矿带,在两侧则为基性岩及铁、铜、金成矿带。

#### 4.4 超大型斑岩铜矿形成的深部条件

##### 4.4.1 全球超大型斑岩铜矿的分

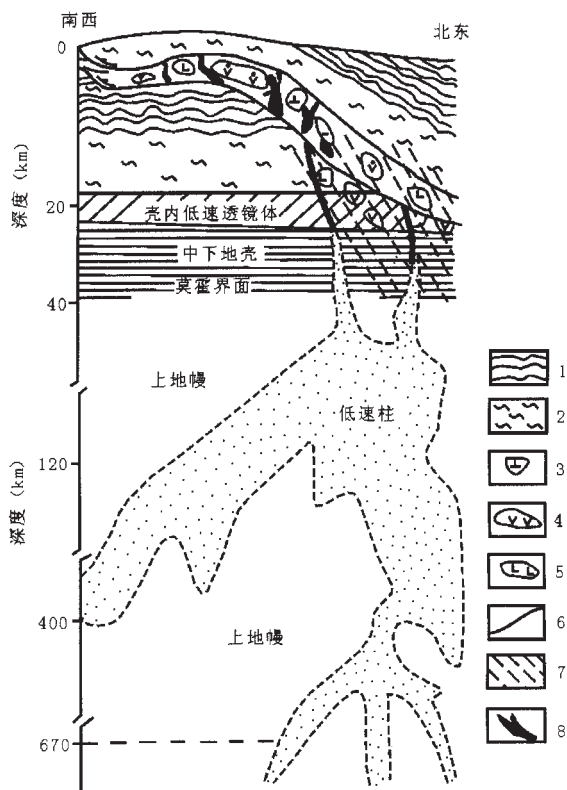


图 2 老王寨超大型金矿床的形成与壳、幔结构关系示意图

(据边千韬等,2000)

1 - 显生宙盖层; 2 - 前寒武纪结晶基底; 3 - 煌斑岩和富碱斑岩; 4 - 超镁铁质岩; 5 - 磁铁质岩; 6 - 主逆冲断裂及深断裂; 7 - 韧性剪切带; 8 - 金矿体

Fig. 2 Sketch map showing relationship between formation of superlarge Laowangzhai gold deposit and structure of crust and mantle

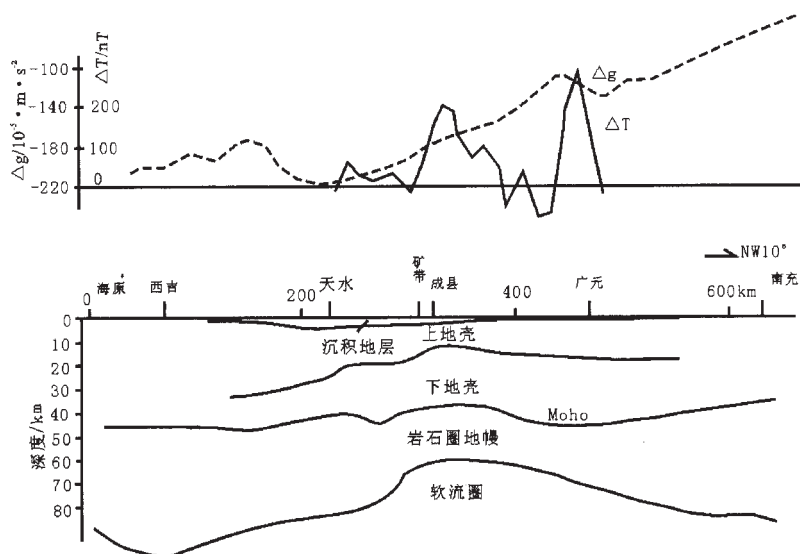


图 3 甘肃省西成铅锌矿带与深部地壳、上地幔结构背景

(据董奇珍,1988;彭聪等,2000)

Fig. 3 Xicheng Pb-Zn deposits in Gansu Province and deep background for structure of crust and upper mantle

## 布和幔源物质响应

全世界 34 个 300 万 t 级以上的超大型斑岩铜矿床, 26 个集中在太平洋东海岸中生代, 特别是第三纪构造-岩浆带; 2 个分布在太平洋西海岸中生代构造-岩浆带; 3 个分布于特提斯新生代构造-岩浆带; 2 个分布在中亚-蒙古晚古生代构造-岩浆带; 只有 1 个分布在印度克拉通前寒武纪构造-岩浆带。这些构造-岩浆带均处于不同时期的大陆板块边缘。

在这一系列斑岩铜矿床地带, 确为地球深部壳、幔物质与能量强烈交换的场所。通过对秘鲁、乌奴吐山超大型斑岩铜矿的分析 (芮宗瑶, 2000) 可以得到佐证。

智利-秘鲁超大型斑岩铜矿带产于壳幔物质最强烈的交换部位, 如在纳兹卡大洋岩石圈俯冲带的上盘分布有众多的超大型斑岩铜矿床。大洋岩石圈在深部热液作用下, 其部分熔融深度不仅达到岩石圈下部, 甚至达到软流圈上部。这样, 大洋沉积物中大量的水和金属组分便可以带到很深的部位 (最深达 250 km)。大约在 70 km 深处, 伴随着安山质岩浆和钾玄质岩浆上升, 在宽达 200~500 km 地带, 普遍有热流体强烈活动, 并引起广泛的蚀变和矿化。以黑云母和钾长石为标志的钾硅酸盐交代岩、电气石化岩、绢英岩和青磐岩等成为识别斑岩铜矿产出的重要标志。

## 乌奴格吐山斑岩铜矿床位

于得尔布干深断裂的西侧。该深断裂带在区域上分割了额尔古纳复背斜与海拉尔-根河复向斜, 构成隆拗交接的势态, 而在隆起一侧的横张断裂系统控制了矿田和矿床的定位。受燕山期板块作用的推移, 海拉尔-根河复向斜下插到额尔古纳复背斜之下,

引起幔根的部分熔融, 产生深源花岗质岩浆上侵, 并形成了斑岩铜矿床。

## 4.4.2 大型和超大型斑岩铜矿形成的过程

在许多超大型斑岩铜矿床形成过程中, 都可以见到两个阶段的壳幔物质强烈交换。第一阶段主要

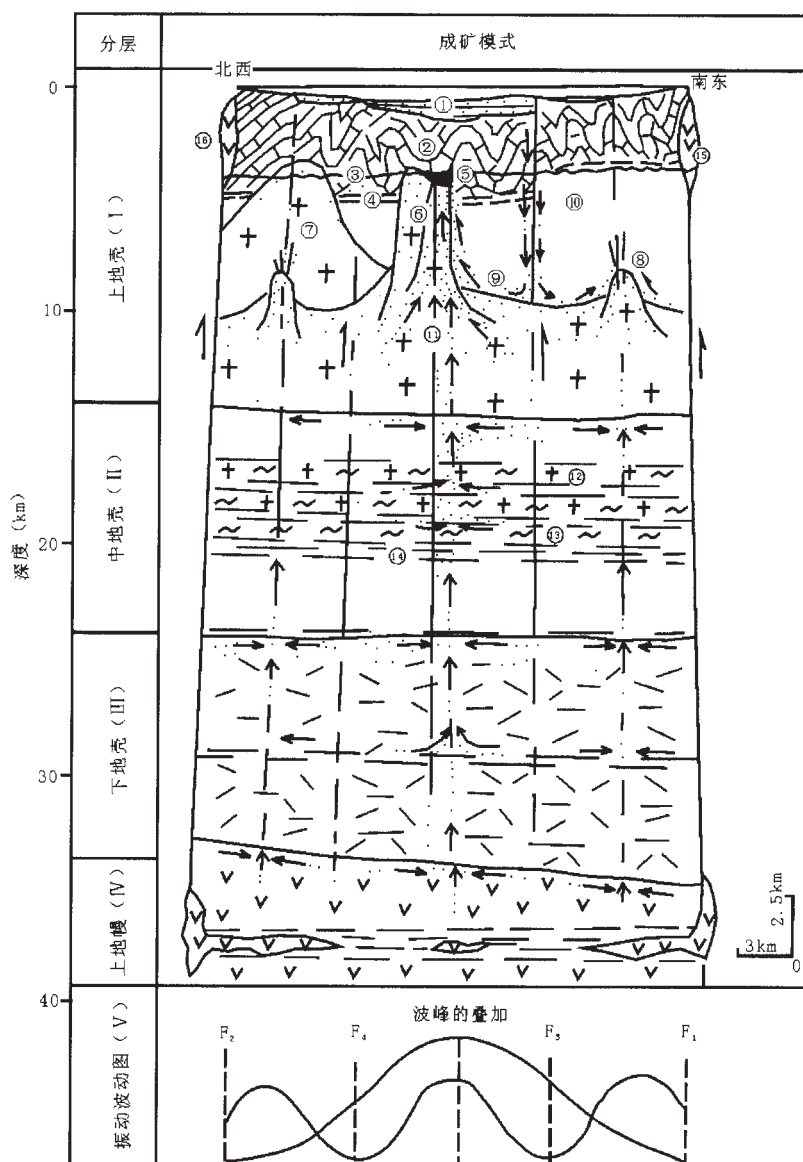


图 4 柿竹园矿床多层次振荡剪切对流成矿模式图

(据刘义茂等, 2000)

① - 侏罗纪断陷海-湖盆; ② - 泥盆系碳酸盐组成的复向斜; ③ - 现代侵蚀面; ④ - 盖层与基底之不整合面-剪切面; ⑤ - 柿竹园超大型钨多金属矿床; ⑥ - 千里山燕山早期花岗岩; ⑦ - 王仙岭印支期花岗岩; ⑧ - 预测隐伏的兰家燕山早期花岗岩及脉钨矿床; ⑨ - 对流系统; ⑩ - 志留纪-震旦纪地层; ⑪ - 活化的流体、低熔组分、成矿物质及运移方向; ⑫ - 混合花岗岩; ⑬ - 混合岩; ⑭ - 剪切及振荡剪切面; ⑮ - 长城岭玄武岩; ⑯ - 杉山岭辉石正长岩

Fig. 4 Metallogenic model for multiple oscillation and shear convection of the Shizhuyuan ore deposit



发生于板块聚敛或幔根消减之前,即形成富铜玄武岩—安山岩建造。第二阶段则主要发生于板块聚敛或消减期间,形成含矿斑岩建造。这里举两个例子来讨论这种过程:

第一,多宝山斑岩铜矿,中奥陶统多宝山安山岩组表征着第一阶段壳幔物质交换,其平均含Cu为 $130 \times 10^{-6}$ ;海西期(290~240 Ma)与成矿有关的花岗闪长岩和花岗闪长斑岩表征第二阶段壳幔物质的交换,其平均含Cu量分别为 $50 \times 10^{-6}$ 和 $80 \times 10^{-6}$ 。它们的初始 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值都为0.704,其岩浆源区都投影在玄武岩区。

第二,德兴斑岩铜矿,中元古界双桥山群英安质火山岩和火山凝灰岩表征着第一阶段壳幔物质交换,其平均含Cu量为 $76 \times 10^{-6} \sim 203 \times 10^{-6}$ ;燕山期成矿花岗闪长斑岩代表第二阶段壳幔物质交换,其平均含Cu量为 $94 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ ,铜厂花岗闪长斑岩的初始 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值为0.703,投影于玄武岩源区。

#### 4.4.3 大型和超大型斑岩铜矿在我国的远景区

目前来看,我国西北、华北和东北广大地域发现了众多的斑岩型铜矿床,其中有的属大型,有的则近于超大型斑岩铜矿床(芮宗瑶,2000)。它们形成于不同时期,并可分为古老克拉通斑岩铜矿(如超大型铜矿峪斑岩铜矿);活动大陆边缘斑岩铜矿(如阿尔泰山缘斑岩成矿带、博罗科努—觉罗塔格斑岩铜矿、北山斑岩铜矿、白乃庙斑岩铜矿和多宝山超大型斑岩铜矿等);活化斑岩铜矿(如超大型大兴安岭西侧活化带斑岩铜矿,大兴安岭东侧活化带斑岩铜矿和燕辽活化带斑岩铜矿)等。然而对于斑岩铜矿来说,应当清晰的认识到,斑岩铜矿的源岩或源区在岛弧地区和在大陆地区完全不同,其成矿系统的延续时间长达10~70 Ma以上,而且通过表生氧化富集作用过程才使得铜的品位大为增加。

我国学者在大陆地区已进行了一系列有成效的研究(芮宗瑶等,1984;杜琦,1980;马鸿文,1990),通过对地幔根和部分熔融玄武岩产生的深源花岗岩浆分析,取得多宝山和德兴含矿斑岩的初始Sr值为0.703~0.704,故证明其源岩或源区为玄武岩。玉龙斑岩铜矿的初始Sr值为0.7066~0.7077,故表明其源岩为富金云母上地幔+下地壳镁铁质岩+上地壳麻粒岩。这种斑岩类型的铜矿除在我国大兴安岭东西两侧外,还在三江地带、怀玉山—武夷山地区、青藏高原南部拆离带、雅鲁藏布江碰撞会聚带南、北两侧和东天山各地均有着一定前景。

## 5 地幔热柱与成矿作用

地幔热柱表征着地球内部深处热源物质的垂向运移,而板块构造则是基于水平运动,且具旋回性(威尔逊旋回)。由于地幔热柱源于地球内部,通过实验模拟可以求得其基本形态(Campbell *et al.*, 1989)。当它从深部上涌时,便可以携带着大量的热液和成矿元素,并在运移进程中与围岩发生蚀变和物质与能量的交换。在物理—化学作用的整体过程中,在适当的活化剂与活化环境下,矿物逐步聚集,并形成热液型矿床。

当今关于地幔热柱的来源问题主要有两种认识,即一为来自2900 km深的核幔边界,另一为670 km的地幔间断面。目前来看二者可能均存在,并可分为一级地幔热柱(来自核—幔边界D"层),二级地幔热柱(来自670 km间断面)以及三级地幔热柱(或称热点),后者是由于一、二级地幔热柱上升抵达岩石圈介质后(即100 km深度附近),基于岩石圈结构、构造和介质与断裂分布而分叉后形成的小柱体。这些小柱体与含矿物质的聚集和地表火山活动有着密切关系。近年来对地幔热柱与成矿作用的研究取得一定的进展,如在卡林型金矿集区,与基性超基性岩有关的Cu—Ni—PGE硫化物矿床、条带状铁建造(王登红,1998,2001;牛树银等,2001,2002;邓晋福等,1992;刘方杰等,2000;Isley *et al.*, 1999)。我国亦在着手进行这一方面的探索。然而,当今首要的是确定在我国地幔热柱和热点的存在、分布与属性,这对成矿远景的区划有着极为重要的意义。

### 5.1 世界上与热点和地幔热柱相关的金属矿床资源

#### 5.1.1 与热点和地幔热柱成因相关铜矿床的含铜量特征

由于地幔热柱的时空演化和其对成矿过程的控制作用,故必影响到不同阶段的成矿效应,因为在它的各个演化阶段,与其相关的成矿作用各异。与地幔热柱相关的矿床类型很多,主要有:碱性岩型锡矿、热液型铜矿、层状铜矿和裂谷型铅锌矿,可能还有其他类型,如白云鄂博的巨型稀土—铌铁矿床、奥林匹克坝的巨型铜—稀土—铀矿床等。

铜矿、特别是热液铜矿的成因与热点密切相关。依据众多铜矿床形成与构造—岩浆活动进行综合分析表明(王登红,1998),与这些铜矿有关的玄武

表 1 与热点有关玄武岩中的铜含量(转引自王登红, 1998)

Table 1 Cu contents in basalts related to hotspots

热点玄武岩产地	Cu 含量( $10^{-6}$ )	资料来源
夏威夷基拉韦厄(Kilauea)	207	Prinz, 1967
中南澳大利亚 ~ 800Ma	45 ~ 343(平均 191)	Zhao J X 等, 1994
格陵兰卡普斯托切(Kap Stosch)	197	Noe Nygaard 等, 1974
费罗群岛(Faeroes)	> 200	Bollingberg 等, 1975
哥伦比亚河 Picture 谷	160	McDougall, 1976
哥伦比亚河 Grande Ronde 和 Imnaha 谷	57	McDougall, 1976
塔斯马尼亚粗玄武岩床(Tasmania)	160	McDougall 等, 1963
密执安洲基韦诺(Keweenaw)	126	Cornwall 等, 1957
加拿大西北地区科帕曼河(Coppermine)	126	Baragar, 1969

岩具有较高的本底含铜量(表 1)。而且, 夏威夷玄武岩等洋岛玄武岩的铜含量明显高于大陆溢流玄武岩(如苏必利尔湖区)。因此可以推论, 大陆溢流玄武岩中的铜已部分被淋滤出来而形成铜矿(如苏必利尔湖区的怀特潘层状铜矿、上密执安铜矿等)。洋岛玄武岩中的铜未能淋滤出来成矿的原因, 可能主要是由于洋岛玄武岩在形成定位之后, 很快离开地幔柱的本体, 即脱离了地幔热柱的热影响。大陆溢流玄武岩则作为地幔热柱的主要产物, 仍然受到地幔热柱后续热事件的作用, 故有助于维持热流体的循环。

### 5.1.2 与地幔热柱相关的大型和超大型铜矿成矿的深层过程与矿化类型

地幔热柱自核幔热动力边界上升到地表附近, 最终以大规模岩浆作用的形式喷发或侵位, 这是一个非常复杂的过程, 即可分为初始阶段, 上升阶段, 壳、幔相互作用阶段和喷发消退阶段(王登红, 2001)。

由于地幔热柱来自地球深部, 当它的头部顶冠和其所携带的物质穿过地幔、地壳, 进入沉积岩层时, 它的巨大能量可以首先导致地壳物质的重熔, 生成一套 S 型花岗岩。这一过程主要表现为壳、幔之间物质与能量的交换, 而与热点有关的玄武岩中, 铜的含量是各类火成岩中最高的, 如夏威夷基拉韦厄玄武岩中铜的平均含量为  $207 \times 10^{-6}$ , 格陵兰卡普斯托切玄武岩中含铜达  $197 \times 10^{-6}$ 。世界上很多大型和超大型铜矿均产出在与热点有关的裂谷环境中, 如西德晚古生代的曼斯苏尔德铜矿, 北美晚元古代的白松(White pine), 海湖(Sea lake), 博克屯(Bocktown), 威特维黎(Witvlei)等著名铜矿。

地幔热柱和热点环境中的矿化类型主要包括: 碱性岩型锡矿、热液铜矿、层状铜矿、裂谷型铝(铜)矿、铀矿、金刚石及非金属矿床(Sawkins, 1976)。

## 5.2 我国大型和超大型金属矿床成矿与地幔热柱

在大型和超大型金属矿产的成矿过程中, 地幔热柱的作用是十分重要的, 而在识别和分析中地球物理深部结构与地球物理场, 地球化学与 Zr/Nb,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  以及 Ti/V 的比值(王登红, 1999)和地质构造特征的综合对比与分析占有重要地位。

### 5.2.1 地幔热柱与金成矿

胶东特大型金矿矿集区。该矿集区长期以来存在玄武岩活动, 而金是源于地幔热柱, 即来自于地幔热柱头部顶冠(王登红等, 1999)。这是由于金矿集区除分布有大量的煌斑岩、辉长岩等地幔岩外, 矿床中也含有幔源物质, 而胜利油田天然气中氦同位素的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值在 29 个样品测定中, 其平均值为  $1.58 \times 10^{-6}$ , 故表明相当一部分氦为来自地幔(徐永昌等, 1994)。另外, 在幔隆和幔凹的转换地带与位场的梯度变异地带不仅往往分布着大型构造带, 而且也是该地带金矿床的矿集区(山东招金集团公司, 2002)(图 5)。金及金矿床中的 Pt, Cr, Ni 等幔源物质是同时来自燕山期的地幔热柱所携物质。由于胶东地区大量金矿的产出, 而规模大的金矿却又均出现在靠近渤海一侧, 如三山岛、玲珑、焦家等地, 故为地幔热柱所控制。依据该区地壳与地幔特异结构和地球物理场特征, 并通过综合研究发现, 渤海地区是一个具有特异深层过程的、潜在的地幔热柱区(滕吉文等, 1997)。

这便表明: 地幔热柱的上升不仅促使金矿矿化呈区域性富集, 而且会引起燕山早期老地层重熔而花岗岩化。在燕山晚期地幔热柱继续上升, 该区地壳进一步减薄(渤海地区地壳厚度为 28 km, 而在上地幔 120 km 处尚存在低速体), 火山盆地的形成和地幔热柱火山岩的直接喷发, 到喜山期, 地幔热柱中心可能移到渤海的渤中坳陷, 故导致渤海打开, 并在渤海周边地域呈现大面积火山岩喷发。然而, 渤海及其相邻地域不仅有多类型金属矿产的分布, 而且这里是一个有着重要潜在远景的石油油田区。

滇黔桂卡林型金矿矿集区。这里不仅 Moho 界



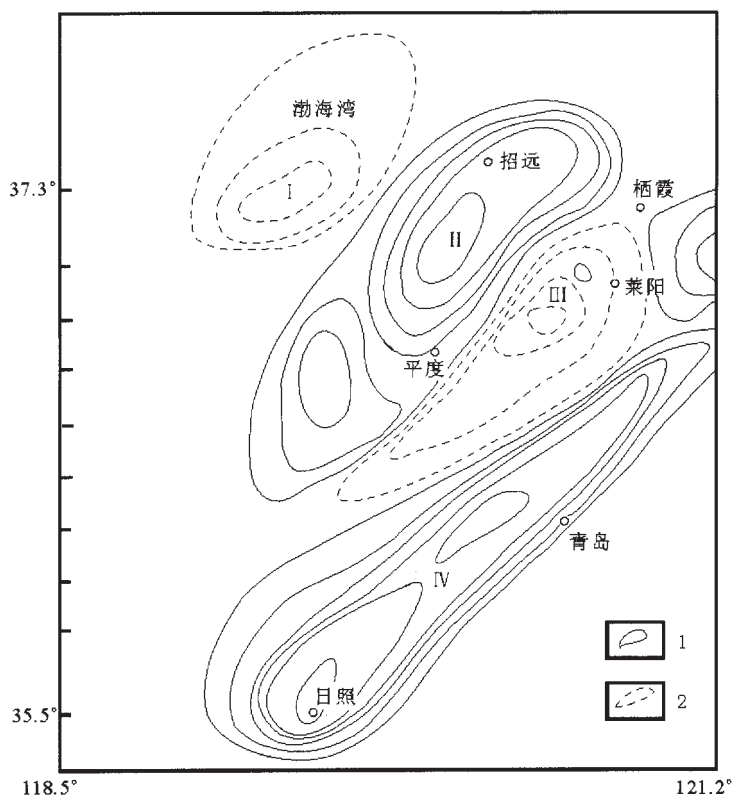


图 5 胶东地区 Moho 界面深度分布图

(依重力资料反演, 据山东招金集团公司, 2002)

1 - 莫霍面凹陷区; 2 - 莫霍面隆起区; I - 渤海湾莫霍面隆起; II - 胶西北莫霍面凹陷; III - 莱阳莫霍面隆起; IV - 胶南莫霍面凹陷

Fig. 5 Depth distribution map of Moho in east of Shandong area  
(Inversion by gravity data)

面上隆, 而且呈现出等轴状环形航磁异常、重力异常、环形构造和穹隆构造等 (王砚耕, 1994; 李朝阳等, 2000)。在扬子陆块的西南缘、西北缘分布有一系列 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Sn 多金属和铌大型、超大型矿床 (王登红等, 2002) (图 6)。广西金牙金矿床, 黄铁矿和毒砂表面存在含铂金矿、汞金矿和铂金矿的显微金粒的发现 (王奎仁等, 1994) 表明, 铂的来源是与该区隐伏的基性或超基性岩体有关, 即来自于地幔。滇黔桂地带的微细浸染型金矿和峨眉山玄武岩关切, 玄武岩本身含 Au 丰度高, 如大厂层 (赋矿层) 在不同岩层中含 Cu 可达  $44.71 \times 10^{-9}$ ,  $54.33 \times 10^{-9}$ ,  $58.24 \times 10^{-9}$ 。峨眉山地幔热柱的部分岩浆有可能滞留在滇黔桂地壳之下, 并通过后期岩浆底侵作用而制约金矿的矿集区。

### 5.2.2 秦岭地幔热柱与成矿

秦岭造山带是一个多金属矿产资源聚集的地带, 如 Au、Ag、Cu、Zn、Pb、Mo、Ba、Co、Cr、Ni、V、Be、Th、Sc、Zr、Ga 等, 而且是世界上最重要的钼矿成矿

带。这里的钼矿属矽卡岩和斑岩型, 其中三个超大型矿床 (南泥湖—三道庄、上房和金堆城) 的储量占东秦岭成矿带钼 (钨) 储量的 75%, 为世界上十个超大型钼矿床之一。根据秦岭不同时代玄武岩地幔源区类型的地球化学分析, 不仅揭示了北秦岭和南秦岭地带的地幔热柱源岩浆的时代, 而且认为这里存在地幔热柱。同位素和微量元素组成对比表明, 松树沟蛇绿岩的 E-MORB 属地幔热柱源岩浆产物, 并肯定 E-MORB 与 OIB 同为来源于地幔热柱源区 (刘方杰等, 2000; 张本仁, 2001)。同时北秦岭产于裂谷环境的古元古代秦岭群变拉斑玄武岩, 产于大陆裂谷向初始洋盆发展过程中的中元古代晚期宽坪群变拉斑玄武岩, 北秦岭弧后盆地的二郎坪群玄武岩均为来自地幔热柱源区, 并辅以亏损地幔。南秦岭和扬子北缘元古宙碧口群、铁船山组、耀岭河群和白勉峡组玄武岩浆源区均属于地幔热柱类型。这里地幔热柱的活动具有北早南晚和活动中心随时间延续的规律。

通过以上对地幔热柱与金属矿成矿作用的讨论可见, 地幔热柱的形成、演化、空间结构和深层过程是在极为复杂的物质与能量交换进程中产生的, 它与深部热液作用和上涌及在溢出过程中与围岩产生物理

- 化学反应, 并在热异场背景的影响下, 金属矿物不断富集成矿, 且逐步形成大型和超大型矿床。因此, 不论是在中国的北方, 还是南方, 在寻找大型、超大型矿床和矿集区时, 对地幔热柱作用的研究具有十分重要的意义。

另外, 新疆北部 Cu-Ni-(PGE) 硫化物矿床的形成, 很可能是由于海西期地幔热柱活动 (王登红等, 2000), 而地幔柱尾部的基性和超基性岩浆得以沿深大断裂上侵, 进而促进系列铜、镍硫化物矿床的形成 (图 7)。

总之, 应当注意到, 在地球圈层结构形成的同时, 由于地球内部与外部的温度差、压力差、粘滞度差等 (牛树银等, 2001), 会导致地球内部发生以地幔热柱多极化分裂为主要形式的垂向物质运移, 沟通深部热物质上涌的通道, 并使聚集在地核与核幔边界处的气态金属元素成为地幔热柱的热物质流, 并向岩石圈运移, 进而以气-液态或固-液态向沉积岩层中运移。因而在有利的介质与构造部位, 如扩容

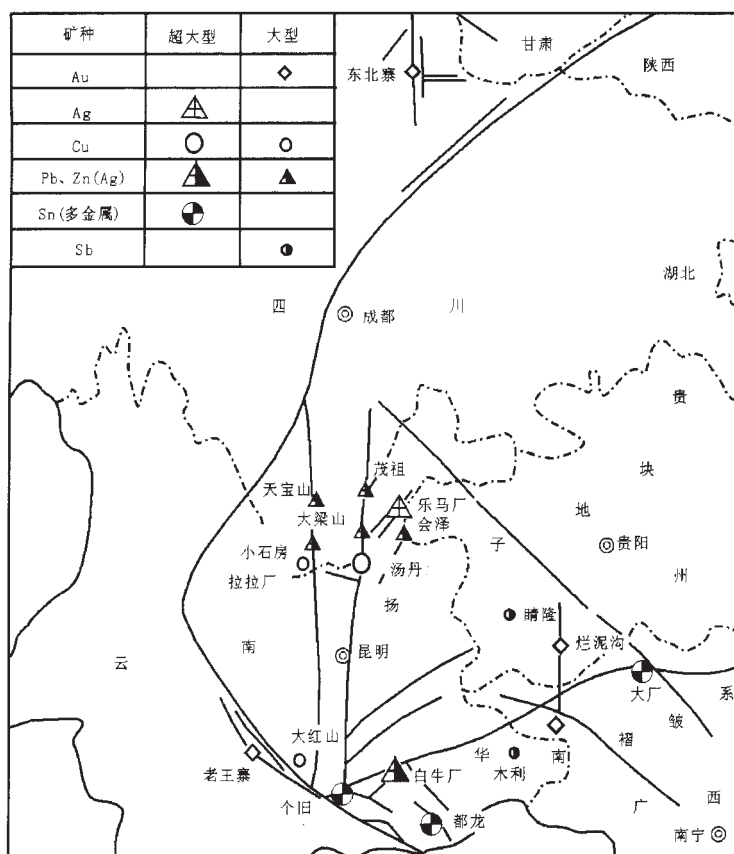


图 6 扬子地块西南、西北缘某些大型、超大型矿床分布图  
(据李朝阳等 2000)

Fig. 6 Distribution map of large and superlarge ore deposits in southwestern and northwestern margins of Yangtze continental block

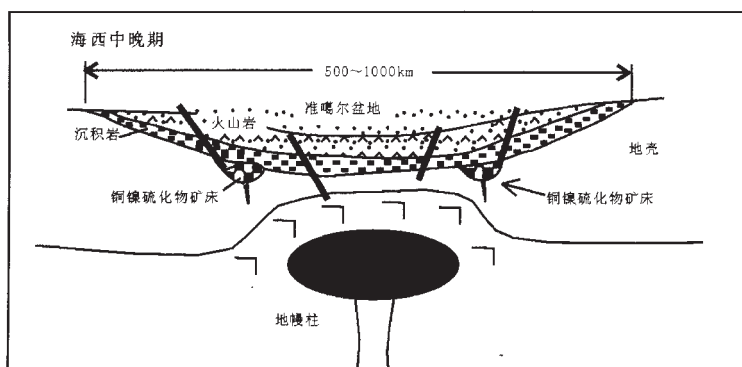


图 7 新疆北部铜镍硫化物矿床成矿系列的成因模式  
(据王登红等 2000)

Fig. 7 Genetic model for the metallogenic series of copper-nickel deposits in northern Xinjiang

带中促使聚集成矿,并形成金、银、铜、铅、锌等多种元素的重要矿床。

## 6 中国东部和西南地区深部壳、幔物质运移与多金属矿床的成矿效应

### 6.1 中国东部中生代多金属矿床的成矿效应

中国东部经历了漫长而又复杂的构造运动和地质演化,这里的矿产资源十分丰富,特别是 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 和 W、Sb、Sn、Li、Ag、Nb、Pt 等稀有金属矿产,而它们主要产生于燕山期(即  $180 \times 10^6 \sim 80 \times 10^6$  a 这一亿年左右时间内),即这是一个大规模的成矿期。据全国金矿床统计,666 个矿床中有 518 个是中生代形成的,占矿床数的 78%,占金矿总储量的 75%,且基本上产出中国东部。华南和扬子陆块周边的大量重要银矿床亦均形成于燕山晚期(王静纯,1998)。长江中下游和赣东北等地的斑岩型、矽卡岩型和次火山热液型铜矿床在我国铜矿资源中至少要占一半左右,而它们却大多为燕山期成矿作用的产物。举世瞩目的华南钨锡矿床,更是燕山期成矿作用的结果。为什么这么多矿产资源在地球形成 46 亿年以来,全集中在这一亿年里呢!这就必须追逆到我国东部在地史期间地球深部物质与能量的交换和其深层过程。应当清晰地认识到,这一时期是中国东部大规模岩石圈减薄和构造体系的重大转折时期,在它们的共同作用下,不仅使之成为大规模成矿的时期,并造成了深部物质和能量向浅部传输,而且为大规模的成矿作用提供了必需的热量、流体、挥发组分和成矿元素(华仁民等,1999)。这表明,壳、幔相互作用和深部及浅部物质与能量的交换是多金属矿床成矿的重要“源泉”。当然这一大规模的成矿作用和过程都是不均匀的。

### 6.2 西南三江地区新生代成矿区的形成与深层过程

我国西南三江地区是我国新生代以来最为重要的成矿区。这里存在着一系列大型、超大型矿床和颇

具特色的矿集区(王登红等,2002),如玉龙(以铜多金属为主)、金顶(以铅锌为主)、牦牛坪(以稀土为主)、哀牢山(以金为主)等等(图8)。这一系列矿集区的成矿物质均来源于地幔深处,在热液中携带着大量的成矿物质,岩浆和流体则为通过深部热物质上涌,并逐步聚集形成矿床。

近来,在滇黔边境地带(以鲁甸为重点,沿鲁甸、中水—迤车、威宁乌蒙山一线)发现了一个颇具远景的新类型铜矿床,现命名为沿河铜矿(科学时报,2002年7月19日)。该铜矿厚度达20~90 m,为自然铜—气化铜层控型铜矿床。它不仅规模大,而且品位高(0.5%~20%),赋矿单个向斜面积达30 km<sup>2</sup>。这种类型的大规模自然铜成矿,在世界上只有一例,即美国的密歇根基韦诺大型自然铜矿,我国这一发现乃是第二例(涂光炽,2002年7月19日)。这一矿床恰处于地球化学急变带—地球化学省边界处(朱炳泉,2001),由当地农民交认的一块含沥青的自然铜矿石为导向,圈定了鲁甸古火山口向斜构造环境中二层角砾凝灰岩夹一层气孔状熔岩及宣威组地层中自然铜—氧化铜层控铜矿床,显然这是一个热液型铜矿床,是深部物质上涌,蚀变与聚集成矿的产物。

### 6.3 中国东部陆缘郯庐断裂的成矿效应与深部壳、幔物质的交换

郯庐断裂带规模大,深度也大,是一个多期构造活动叠加的伸抵上地幔的巨型断裂带(可称为深大断裂带),在它的形成与演化过程中伴随着众多不同类型的金属矿床形成。该断裂带在性质上自新生代以来经历了张列、压扭和扭张变化,相应的岩浆活动由超基性、基性—酸性到碱性的演化过程。在这种构造和岩浆活动驱使下,形成了一系列相应的矿床:金刚石、Cr、Ni、Cu、Fe等岩浆岩矿床→Cu、Mo、W、Sn、Pb、Zn、Hg、Sb、Ag等热液矿床与石油和烃类气藏→Cu、Ag、石油、烃类气、非烃类气及宝石矿床等(郝英等,2002;郭文魁等,1982)。在郯庐断裂东、西两侧及其北伸与南延地带,地壳与上地幔的结构和地球物理场效应是不均匀的和各向异性的,故在不同地段、不同时期和不同类型的矿产形成过程中,

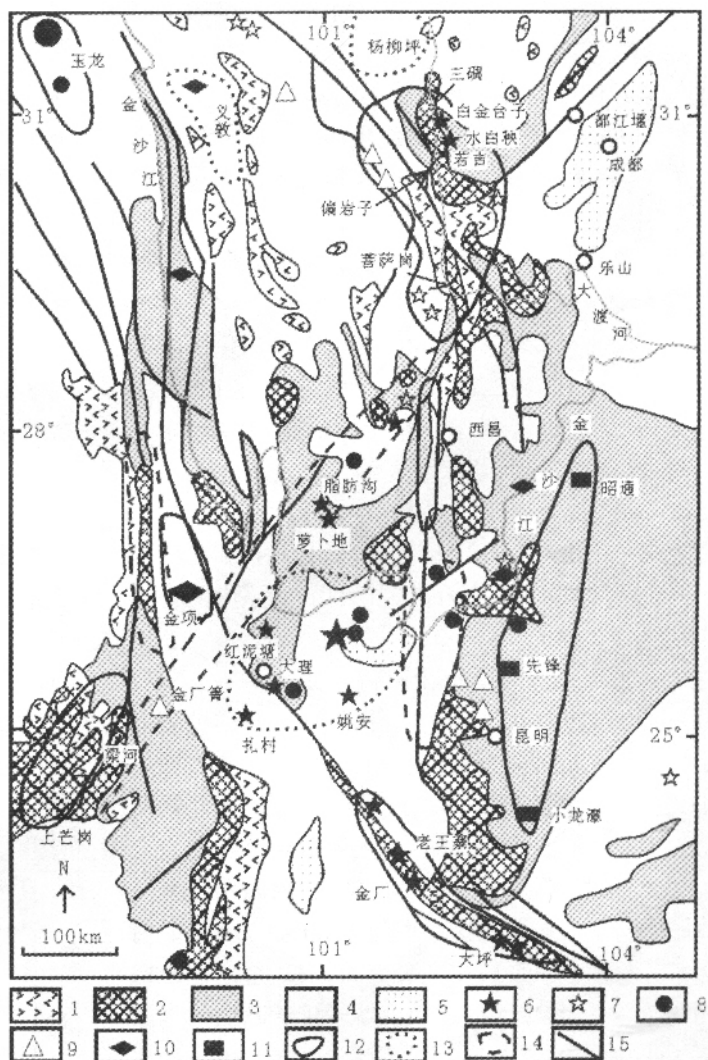


图8 三江地区新生代矿集区分布概图  
(据王登红等,2002)

1—花岗岩岩;2—前寒武纪变质岩;3—古生界;4—中生界;5—新生界;6—时代明确的金矿;7—未测年的金矿;8—铜矿;9—砂金矿;10—铅锌矿;11—煤矿;12—成熟的矿集区;13—近期可扩大规模的矿集区;14—潜在的矿集区;15—主要断裂

Fig. 8 Distribution map of major Cenozoic ore concentration areas in Sanjiang region

壳、幔物质与能量交换的程度是各异的。正是由于这种强烈的壳、幔物质和能量的交换,故导致深部物质沿一系列断裂通道上涌,以使流体通过地幔和地壳介质,并在与围岩进行物理—化学作用后,促使矿物与元素聚集,从而形成大规模热液矿床的矿集区。但该大断裂带两侧的成矿作用具有明显的阶段性、不对称性、交叉性和差异性。这是由于郯庐断裂带在穿越各个不同属性陆块和东西向造山带过程中共同作用所致。虽然壳、幔物质运移与作用的程度差异必会影响着不同部位、时期和成矿的类型,但深部物质与



能量的强烈交换及其物理-化学作用过程则系大规模热液型矿床和矿集区形成的必要与充分条件。

#### 6.4 裂谷区的幔源型岩浆侵入与矿化

大陆伸展与裂谷作用和地幔热柱之间有着极为密切的内在缘由,现以我国攀西裂谷为例来讨论其成矿作用(滕吉文,1994;曾忻耕,1985)。

##### 6.4.1 攀西裂谷构造带是一个多金属矿产聚集带

以幔源或壳幔混合源物质成矿的矿石建造是十分复杂的,且为多元素组构的矿床。在该矿化区内有 Fe、Ti、Cr、Ni、Co、Pt、Cu、Mo、Nb、Ta、Zr、U、Th、REE、硫化物等,这里存在着分异良好的超基性岩体 Cu、Ni、Pt 成矿系列,层状侵入体的 (Cr、Pt)、Cu、Ni、Fe、(Ti、V)P 成矿系列,玄武岩中的 Fe、Cu 矿床,碱性岩脉中的 Nb、Ta、Zr 成矿系列,稀有元素和稀有-稀土-放射性成矿系列及高钾(火山)岩系中的铅矿等。

##### 6.4.2 区域地壳与上地幔结构特征

该区成矿作用主要发生在镁铁质或超镁铁质岩中,岩体受南北向深断裂体系的控制。这一断裂系切穿沉积岩层、结晶基底、壳幔边界,并深达上地幔及软流层中。由于断裂多次活动,故导致岩浆脉动侵入与叠加,当必控制成岩与成矿的格局。攀西构造带壳-幔边界上隆,地幔低速层埋深为 80~90 km,即明显抬升,而且有一系列深断裂交叉分布。这是这一构造带中的岩石圈减薄区,又恰处于扬子陆块向青藏高原巨厚地壳的过渡地带(滕吉文,1994)。该区上地壳在华坪-攀枝花地带为高速区,并近地表。地壳低速层厚度很大,可达 20 km 左右,速度为 5.6~6.0 km/s,而上地幔顶部介质的速度为 7.6~7.7 km/s,即属于异常的上地幔顶部(Teng Jiwen, 1989;熊绍柏等,1986;尹周勋等,1987;滕吉文,1988)。

攀西裂谷带内部  $Q$  值低于东、西两侧(姚虹,1988),西部中甸、宁蒗、永胜、华坪等地  $Q$  值为 368~435;东部巧家、昭通、东川等地  $Q$  值为 480~616;中部冕宁、木里、西昌、普格、盐边、米易、攀枝花等地的  $Q$  值为 251~230(图 9)。在该裂谷带东、西两侧存在着不同的速度结构,且各向异性。裂谷区地热活动强烈,大地热流值在轴部最高,且岩石圈底部地幔流向上发散(Tan Tjongkie, 1987)。在这一被动活化的古裂谷带,存在着异常的壳、幔结构,多期次的构造和岩浆活动,强烈的物质与能量的交换。这种深部结构和深层过程为该贵重金属、稀有金属和多金属矿产的成矿准备了必要而又充分的深部条件。然而通过对该区布格重力场、剩余布格重力场、均衡

重力场和密度分布、航磁场、Moho 界面分布及峨眉山溢出的玄武岩分布分析和研究发现,它们的异常响应与耦合似乎表明,在西昌-元谋和会东-华平所围地域是否存在一个地幔热柱(或热点)呢?这对深化研究攀西裂谷区的构造演化、金属与非金属矿产的富集和远景将有着十分重要的意义。

##### 6.4.3 攀西裂谷带的深部物质运移和金属矿产富集

由于裂谷区的引张动力学环境,为幔源岩浆提供了入侵通道和储容空间,同时在围压不高或半开放环境下,有利于岩浆的分异与演化。从基性幔源岩浆的相容元素成矿到晚期的不相容元素富集(图 10),同时掺杂有壳源成矿物质。在矿物组合上体现了封闭环境下的硫化矿物组合,而在开放性环境中大量的金属氧化物堆积,并由于岩浆侵位引起壳幔混染,使去气、液作用增强,伴随岩浆分异的继续进行而活性组分愈加复杂化,成矿作用由早期分凝、重力结晶分异的典型正岩岩浆矿床特点,到晚期逐步显示岩浆气液成矿迹象,故构成了裂谷作用的成矿制约。裂谷地带不仅有利于矿化与富集,而且对矿床有着改造作用(滕吉文,1994)。因此,裂谷区是一个

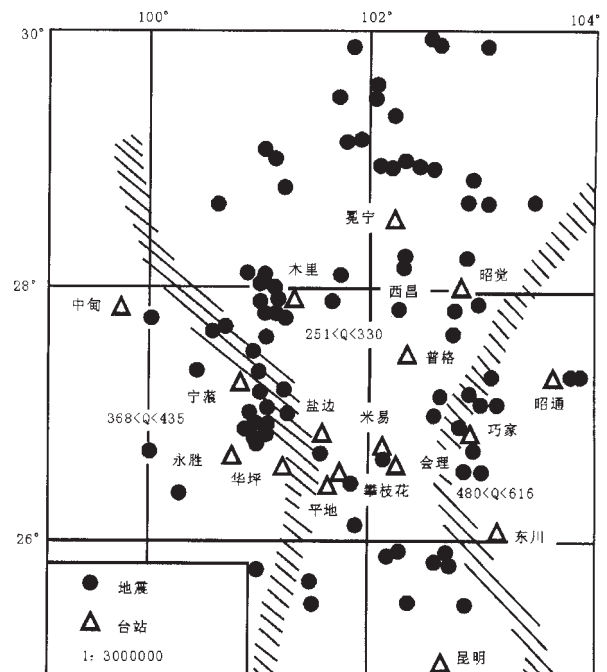


图 9 攀西裂谷带及其相邻地区的  $Q$  值分布特征  
(据姚虹,1988)

(注:阴影区表示该区  $Q$  值分布的差异带)

Fig. 9 Distribution of  $Q$ -value of Panzhihua-Xichang region and adjacent areas

(shadow attenuation; differential boundary of  $Q$ -value)

多种类的金属矿化区,且矿化集中于裂谷带的轴部(图11)。

## 7 地球内部深层动力过程与流体运移和深化研究的几个问题

地幔流体对于成矿作用是十分重要的,本文仅举了几种矿床类型的例子,如大型、超大型矿床和矿集区,而对众多的金属与非金属矿产,它们的形成与演化模式和深部环境及深层过程的关系均会存在一定的异同,但在本质上是一致的,即均受控于深部物质与能量的交换和动力响应。特别是超大型矿床和内生多金属矿床的形成乃是在壳、幔介质与结构及其演化过程中,深部热物质的运移和金属矿物元素聚集的结果,即与“幔根”作用关切。

通过以上的讨论,使我们清晰地认识到,虽然大型、超大型矿床和大规模多金属矿产矿集区的成矿过程十分复杂,却均经历了地球深部物质与能量交换的物理-化学过程,并且不同作者均一致认为深部物质运移对成矿的重要性,并给出了示意图或概念性的模式。这些研究无疑对创立新的成矿理论和寻找与预测成矿远景区有着极为重要的意义!然而,必须指出,对一系列大型、超大型矿床和矿集区通过深部精细结构和深层动力过程的研究和进行剖析,详细刻划出成矿的物理-化学过程和物质运移与不同成矿阶段的结构、物质聚集和构造格局,即深化研究已提上日程。

当然,这并不是说所有的金和金属矿床的形成就一定遵循某一种模式,而仅想说明它们均是深层动力过程的产物。因为要给出定量的结论仅依以上的讨论还是远远不够的,故必须深化研究其深层动力过程与介质和能量之间的耦合效应。为此,以下问题的探讨便十分重要:

(1) 矿产资源在形成、演化、分布和聚集过程中具有哪些必要的和充分的物质和能量相互作用的边界条件。

(2) 不同矿床、矿脉或矿带特别是大型、超大型矿床和矿集区地域,其深、浅展布的构造空间格架,

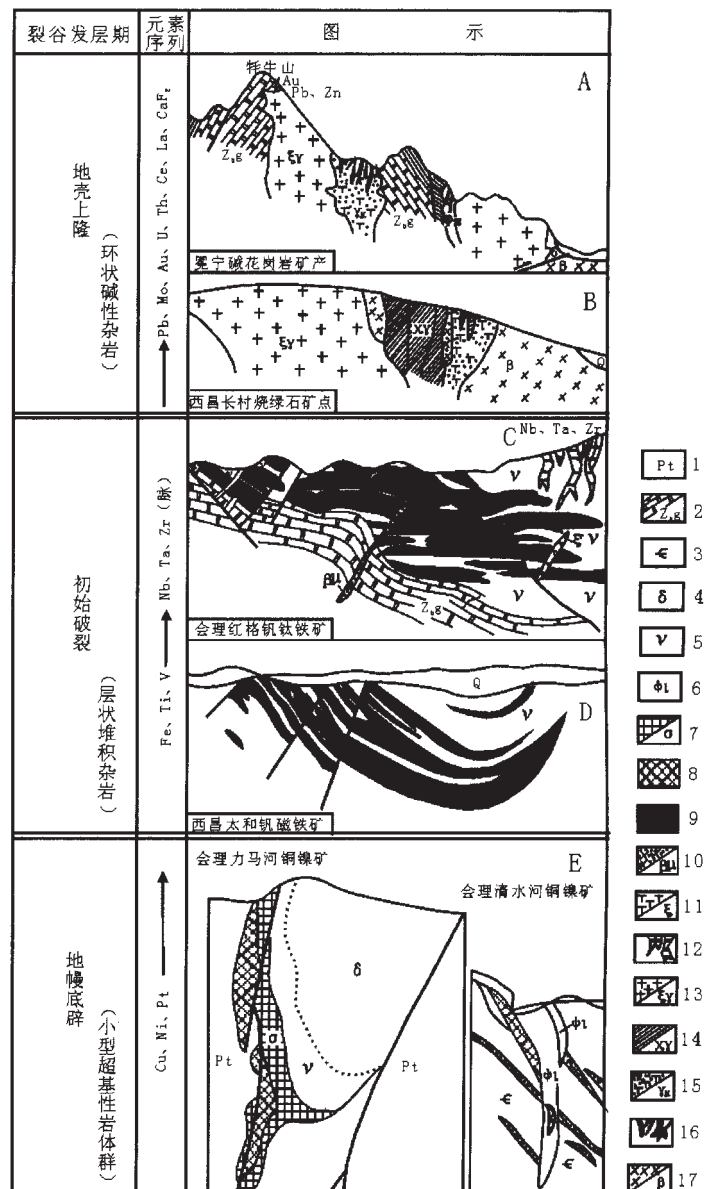


图10 幔源型岩浆侵入形态及矿产演化系列图

(据曾忻耕,1985)

1-元古界(凤山营组);2-震旦系(观音崖组);3-寒武系(页岩);4-闪长岩;5-辉长岩;6-辉石岩;7-橄辉岩(浸染状铜镍矿体);8-铜镍矿体;9-钒钛磁铁矿矿体;10-辉绿岩脉;11-正长岩脉;12-正长岩型Nb、Ta、Zr矿化脉;13-钾长花岗岩;14-矿化碱性花岗岩;15-矿化钾长花岗岩;16-稀有稀土及Pb、Zn、Au的矿化细脉;17-玄武岩

Fig. 10 Cartoon showing intrusive pattern of mantle-derived magma and evolution of mineral resources

特异的构造变异,岩石地球化学组构,热动力要素和地球物理场响应。

(3) 板块俯冲、消减或地幔热柱、地幔对流和流体作用以及热物质上涌通道的组构与成矿和成岩及其深层过程。

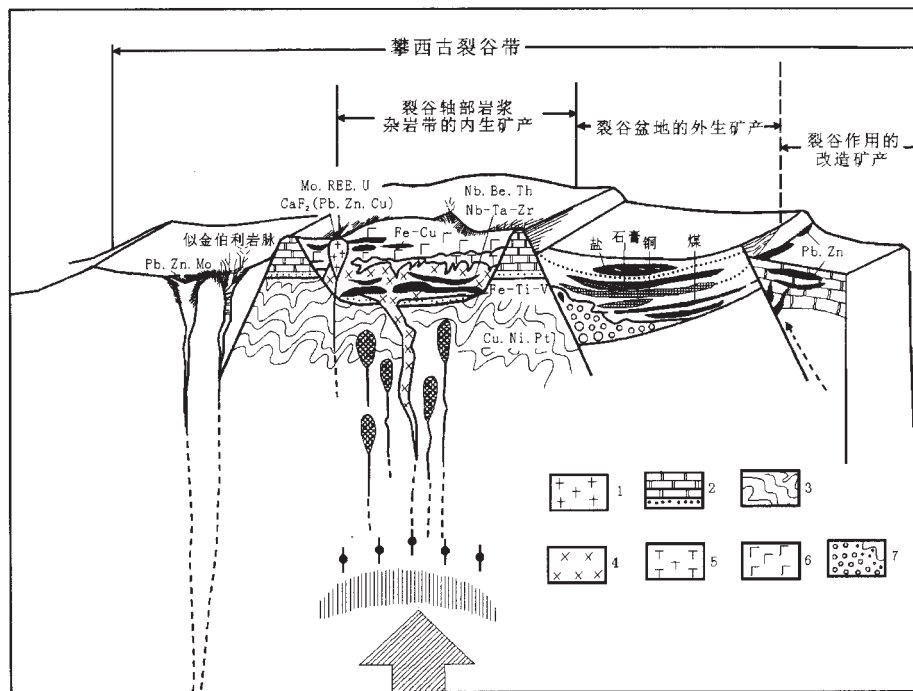


图 11 攀西裂谷深部热物质运移与成矿模式图 (据曾忻耕, 1985)

1 - A 型花岗岩 2 - 震旦系 (盖层) 3 - 结晶基底 4 - 基性岩体 5 - 正长岩体 6 - 峨眉玄武岩 7 - 砂砾岩

Fig. 11 Mineralization model for endogenous and exogenous deposits in Panxi Rift

(4) 基于深部物质与能量的交换及其深层动力过程的成矿模型的建立。

(5) 陆 - 陆碰撞与汇聚地域的动力成矿理论。

## 8 结 语

在以前地球科学界论及金属与非金属矿床的成矿问题时,往往很自然的认为这是地表找矿与勘探,然而当今要深化成矿理论与找大矿、大矿集区和深部找矿时则告诫人们,成矿的深层过程与矿源的研究是十分重要的。这就必须涉及地球物理对深部的研究与探索。

应当说对于成矿问题,地球物理学家们一直涉足较少,而多侧重于利用地球物理手段去找寻有用矿床的深部位置和圈定其范围。然而当今必须清晰的认识到一个矿床的形成是经历了漫长岁月的,而且是一个极为复杂的物理 - 化学过程。在科学与技术、经济与社会突飞猛进的今天,对矿产资源的需求日益增强,故要找到大型、超大型或矿集区的矿产资源,则必须深化研究其成矿的机理和矿源物质的形成与聚集,并将成矿作用作为地壳演化的组成部分来探讨 (陈毓川等, 1998; 李献华等, 2002; 薛春纪等,

2002; 尹汉辉等, 1990; 聂风军等, 2001)。

地球物理探测是查明地下深部结构、介质属性和深层过程的重要途径,特别是沉积岩层、结晶基底、壳幔边界、上下地幔层和地幔低速层,乃至核幔边界 (D'' 层) 在整个深部物质运移与能量交换过程中所起的控制作用。近来在长江中下游铜陵矿集区进行了地震反射探测,发现在铜陵矿区与其 NE 和 WS 两侧截然不同 (吕庆田等, 2002)。在铜陵地域 Moho 界面整体上隆,在上地壳呈现出一系列复杂的弧形反射,这是由于褶皱、冲断和侵入作用造成了强烈的

的挤压变形。上地壳下面为反射透明区,表明这里存在巨型岩基,上、下地壳之间 (5S, TWT) 倾向相反的反层就标志着上下地壳之间的拆离。这一拆离面为岩浆侵入和聚集提供了空间,故使在矿集区下面形成了巨型岩基。扬子克拉通下面 Moho 界面反射清晰,成层性好,而铜陵隆起下面几乎未见 Moho 界面,表明这里恰为深部热液物质上涌的通道。在这一剖面地区,全长仅 600 km,而地壳结构却发生了这样强烈的变异,充分表明深部物质与能量运移的复杂性及其物理 - 化学过程。为此,要从古大陆成矿作用地球动力学出发,分析、研究地球各圈层金属元素的起源和空间分布特点,探讨地球深部不同圈层在不同演化阶段物质与能量的交换,构造 - 岩浆活动与金属矿床成矿的耦合机理。因为所有的金属矿产资源的形成均是地球形成与演化过程不可分割的组成部分。在地球演化的早期,由于空间引力收缩和热力膨胀力系的共同作用,促使放射性、卤族、稀有、稀土元素及碱金属由深部向浅部运移,而贵金属、有色金属、铁族、铂钨族等密度较大的元素则有逐渐向地核聚集的趋势,以至于铁、镍、金等元素主要向地核聚集。然而,在地球不断的演化进程中,却形成了不同的圈层;地壳、壳 - 幔边界、上地幔、下地幔、核 - 幔



边界和地核。由于地球内部各圈层之间在进行着相互作用,再加上地球内外物理(包括温度、压力、粘滞性等)和化学(元素组分)上的差异,故深部物质在不断地分异和调整。深部物质产生以地幔热柱多级演化(图 12)为主要形式的径向运动和以地幔对流形式呈现的水平运动,二者错综耦合,并构成了地球内部物质运移的力源。在深部物质与能量的不断交换过程中,形成了物质迁移与上涌的通道。这时聚集在地核和核幔边界处的气态、气液态重元素则可以以物质流的形态发生运动,上涌进入地幔和地壳,并向沉积岩层或地表运移,在适宜的环境下聚集成矿。

基于这样的前提,在成矿的深层过程研究中,特别是大型和超大型矿床以及矿集区的研究中,强化地球深部探测与地球物理边界场响应和成矿物质运移与聚集的物理-化学过程的研究是建立新的成矿理论,提出新的成矿动力模型和成矿预测的重要方向,是深化认识地球本体与矿产资源内在联系,并为建立矿产资源,特别是紧缺矿产和稀有矿产的战略后备基地和提出创新成矿理论的必须。

#### 参考文献:

- 边千韬. 2000. 地球壳、幔结构构造与超大型矿床形成关系初议(以云南地区为例). 见: 涂光炽等著, 中国超大型矿床. 北京: 科学出版社, 549-569.
- 陈毓川, 王登红, 林文蔚. 1998. 中国岩金矿床系列. 矿床地质, 17(增刊): 87-92.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲等. 1998. 壳-幔物质与深层过程. 地学前缘, 5(3): 67-75.
- 邓晋福, 赵海玲, 关宗黎等. 1992. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动. 现代地质, 6(3): 267-274.
- 董奇珍. 1988. 甘川陕宁青部份地区的地壳结构. 西北地震学报, 10(1): 66-73.
- 杜琦. 1980. 多宝山斑岩铜矿床蚀变与矿化特征. 地质学报, 54(4): 390-323.
- 郭文魁, 刘兰笙, 俞志杰. 1982. 中国东部成矿域和成矿期及其区域地质背景. 矿床地质, 1(2): 1-11.
- 赫英, 张战军, 毛景文, 张荣华. 2002. 初论郯庐断裂的成藏成

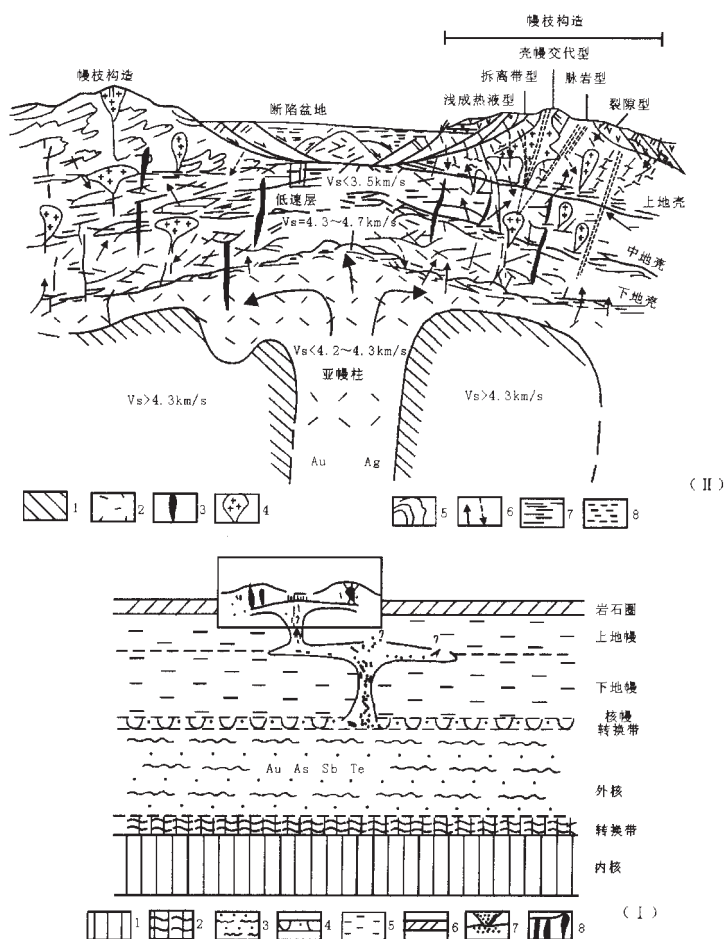


图 12 地幔热柱多级演化及其成矿模式图(据牛树银等, 2001、2002)

I - 地幔热柱成矿模式图: 1 - 地球内核; 2 - 内外核转换带; 3 - 外核; 4 - 核幔转换带; 5 - 地幔; 6 - 岩石圈; 7 - 地幔热柱亚热柱; 8 - 幔枝构造。II - 地幔亚热柱 - 幔枝成矿模式: 1 - 岩石圈硬幔块; 2 - 地幔亚热柱; 3 - 基性岩脉; 4 - 花岗岩侵入体; 5 - 变质褶皱岩系; 6 - 深部含矿还原系统流体, 浅部氧化系统大气降水; 7 - 低速高导层; 8 - 韧性剪切带

Fig. 12 Multigrade evolution and metallogenic model for mantle plume

矿效应. 大地构造与成矿学, 26(1): 10-15.

华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18(4): 300-307.

姜泽春, 章振根. 1996. 金的气相迁移探索. 地质地球化学, (2): 23-26.

科学时报. 2002年7月19日第一版. 用创新理论指导科学实践, 我国发现新类型铜矿.

李朝阳, 谭运金, 刘玉平等. 2000. 扬子地块西南、西北缘金、铅、锌、锡远景区. 见: 涂光炽等著, 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 372-396.

李献华, 周汉文, 韦刚健等. 2002. 滇西新生代超钾煌斑岩的元素和 Sr、Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约. 地球化学, 31(1): 26-34.

刘方杰, 方维萱, 郭健. 2000. 地幔柱/热点成矿作用与秦岭

- 造山带金属成矿. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 431 - 432.
- 刘义茂, 王昌烈, 胥友志, 卢焕章. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床的成因特征、成矿作用与成矿模式. 见: 涂光炽等著, 中国超大型矿床. 北京: 科学出版社, 27 - 49.
- 吕庆田, 侯增谦, 赵金花等. 2002. 地震反射剖面揭示铜陵矿集区复杂地壳结构形变. 中国科学(待发表).
- 马鸿文. 1990. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 聂凤军, 江思宏. 2001. 地球演化过程中金属矿产的形成. 中国地质, 28(4): 24 - 31.
- 牛树银, 侯增谦, 孙爱群. 2001. 核幔成矿物质(流体)的重力迁移——地幔热柱多极演化成矿作用. 地学前缘, 8(3): 95 - 101.
- 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 王宝德, 许传诗, 谢汝斌, 扬志宏, 毕伏科. 2002. 幔枝构造理论与找矿实践. 北京: 地震出版社.
- 牛树银, 孙爱群, 邵振国, 王宝德, 赵明合, 王立峰, 蒋威, 许传诗. 2001. 地幔热柱多极演化及其成矿作用. 北京: 地震出版社.
- 彭聪, 高锐. 2000. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构的横向变化研究. 北京: 地震出版社.
- 芮宗瑶. 2000. 西北、华北、东北斑岩铜矿床研究. 见: 涂光炽等著, 中国超大型矿床. 北京: 科学出版社, 397 - 426.
- 芮宗瑶, 黄琮珂, 齐国明等. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社.
- 山东招金集团公司. 2002. 招远金矿集中区地质与找矿. 北京: 地震出版社, 1 - 44.
- 滕吉文. 1988. 川滇地区地壳—上地幔结构, 地球物理场特征与攀西构造带的基本性质. 见: 张元湘, 袁学诚主编, 中国攀西裂谷文集(3). 北京: 地质出版社, 249 - 274.
- 滕吉文. 1994. 康滇构造带岩石圈物理学动力学. 北京: 科学出版社.
- 滕吉文. 1996. 世纪之交的地质盛会. 科学, 48(6): 18 - 20.
- 滕吉文, 张中杰, 张秉铭等. 1997. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的特异构造背景. 地球物理学报, 40(6): 468 - 480.
- 涂光炽等. 2000. 中国超大型矿床. 北京: 科学出版社.
- 涂光炽, 霍明远等. 1991. 金的经济地质学. 北京: 科学出版社.
- 王登红. 1998. 地幔热柱及成矿作用. 北京: 地震出版社.
- 王登红. 1999. 地幔柱的识别及其在大规模成矿研究中应注意的问题. 地球学报, 20(增刊): 426 - 431.
- 王登红. 2001. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨. 地学前缘, 8(3): 67 - 72.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 林文蔚. 2000. 新疆北部 Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床系列探讨. 矿床地质, 19(2): 147 - 155.
- 王登红, 林文蔚, 杨建民, 阎升好. 1999. 试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义. 地球学报, 20(2): 157 - 162.
- 王登红, 杨建民, 阎升好等. 2002. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景. 地球学报, 23(2): 135 - 140.
- 王静纯. 1998. 我国银矿区域成矿特点. 矿床地质, 17(增刊): 29 - 32.
- 王奎仁, 周有勤, 孙立广, 任炽刚. 1994. 中国几个典型卡林型金矿床金的赋存状态研究. 合肥: 中国科技大学出版社.
- 王砚耕. 1994. 黔西南构造与卡林型金矿. 北京: 地质出版社.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋等. 1986. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 29(3): 233 - 244.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民等. 2002. 滇西北兰坪铅锌银铜矿及含烃富 CO<sub>2</sub> 成矿流体及其地质意义. 地质学报, 76(2): 244 - 253.
- 徐永昌, 沈平, 陶明信, 孙明良. 1994. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布. 科学通报, 39(16): 1505 - 1508.
- 姚虹. 1988. 利用地震体波计算攀西构造带的  $Q$  值及其分布特征. 见: 张元湘, 袁学诚主编, 中国攀西裂谷文集(3). 北京: 地质出版社, 195 - 198.
- 尹汉辉, 范蔚茗, 林舸. 云南兰坪—思茅地洼盆地演化的深部因素及幔—壳复合成矿作用. 大地构造与成矿学, 14(2): 113 - 124.
- 尹周勋, 滕吉文, 熊绍柏. 1987. 渡口及其邻近地区地壳浅层结构研究. 地球物理学报, 30(1): 22 - 30.
- 曾忻耕. 1985. 攀西裂谷构造与成矿作用. 见: 张元湘, 袁学诚主编, 中国攀西裂谷文集(1). 北京: 地质出版社, 307 - 324.
- 翟裕生等. 1997. 大型构造与超大型矿床. 北京: 地质出版社.
- 翟裕生, 邓军, 丁式江, 彭润民, 王建平. 2001. 关于成矿参数临界转换的探讨. 矿床地质, 20(4): 301 - 305.
- 张本仁. 2001. 秦岭地幔柱源岩浆活动及动力学意义. 地学前缘, 8(3): 57 - 66.
- 张文斌, 祝治平, 张建狮. 1993. 渭河断陷地壳—上地幔速度结构研究. 见: 中国地球物理学会年刊. 北京: 地震出版社, 92.
- 赵永贵, 钟大贵, 刘建华等. 1992. 地震层析地质解释原理及其在滇西深部构造研究中的应用. 地质科学, (2): 105 - 113.
- 中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所主编. 1987. 国外主要有色金属矿产. 北京: 冶金工业出版社.
- 朱炳泉. 2001. 地球化学省与地球化学急变带. 北京: 科学出版社.

## References :

- Bian Qiantao. 2000. The preliminary discussion for the formation of superlarge ore deposits and structure of Earth's crust and upper mantle (for example, Yunnan area). In:

- Tu Guangzhi, *et al.*, eds. Superlarge ore deposits in China. Beijing: Science Press, 549–569 (in Chinese).
- Campbell I H, *et al.* 1989. Melting in an Archean mantle plume: head it's basalts, tails it's komatites. *Nature*, 339: 697–699.
- Chen Yuchuan, Wang Denghong and Lin Wenwei. 1987. Primary gold deposits series in China. *Mineral Deposits*, 17 (supplement): 87–92 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Zhao Guochun, Yu Xuezheng and Cao Yongqing. 1998. Crust-mantle materials and deep processes. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 67–75 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Guan Zongxu, Lai Shaocong, Luo Zhaohua and Mo Xuanxue. 1992. A mantle plume beneath the north part of China continent and lithosphere motion. *Geoscience*, 6(3): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Dong Qizhen. 1988. The crustal structure on a part of areas of Gansu, Sichuan, Shaanxi, Ningxia and Qinghai Provinces. *Northwestern Seismological Journal*, 10(1): 66–74 (in Chinese with English abstract).
- Du Qi. 1980. The alteration and mineralization features of the Duobaoshan porphyry copper deposit. *Acta Geologica Sinica*, 54(4): 310–323 (in Chinese with English abstract).
- Guo Wenkui, Liu Lansheng and Yu Zhijie. 1982. Metallogenic domain and period and its regional background for east part of China. *Mineral Deposits*, 1(2): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- He Ying, Zhang Zhanjun, Mao Jingwen and Zhang Ronghua. 2002. Effect of the Tan-Lu fault on the formation of mineral deposits and oil-gas fields. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(1): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin and Mao Jingwen. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in eastern China. *Mineral Deposits*, 18(4): 300–307 (in Chinese with English abstract).
- Isley A E and Abbott D H. 1999. Plume related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation. *J Geophys Res*, 104(B7): 15461–15477.
- Jiang Zechun and Zhang Zhenggen. 1996. Discussion on the migration of gaseous gold. *Geology-Geochemistry*, (2): 23–26 (in Chinese).
- Li Chaoyang, Tan Yunjin, Liu Yuping, *et al.* 2000. The perspective area of gold, lead, zinc and tin in southwest and northwest of Yangtze block. In: Tu Guangzhi *et al.*, eds. Superlarge ore deposits in China. Beijing: Science Press, 372–396 (in Chinese).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Wei Gangjian, Liu Ying, Chang Sunlin, Lo Chinghua and LEE Chifu. 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: Constraints on the composition of subcontinental lithospheric mantle. *Geochimica*, 31(1): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fangjie, Fang Weixuan and Guo Jian. 2000. Mantle plume/hotspot-related metallogeny: A case study on polymetallic mineralization in the Qinling Orogen. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 431–432 (in Chinese).
- Liu Yimao, Wang Changlie, Xu Youzhi and Lu Huanzhang. 2000. Genetic features of Shizhuyuan superlarge tungsten ore deposits. In: Tu Guangzhi *et al.*, eds. Superlarge ore deposits in China. Beijing: Science Press, 27–49 (in Chinese).
- Lu Q T, Hou Z Q, Zhao J H, Shi D N, Wu X Z, Chang Y F and Dei R F. 2002. Deep seismic profiling reveals complex crustal structure of Tongling ore district. *Science in China* (in press).
- Ma Hongwen. 1990. Granitoid of Yulong porphyry copper belt and metallogeny in Tibet. Wuhan: Press of China University of Geosciences (in Chinese).
- Nie Fengjun and Jiang Sihong. 2001. The forming of metallic deposits in the evolution of the Earth. *Geology in China*, 28(4): 24–31 (in Chinese).
- Niu Shuyin, Hou Zengqian and Sun Aiqun. 2001. The anti-gravity migration of metallogenic fluid from the core and mantle. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 95–101 (in Chinese with English abstract).
- Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, Wang Baode, Xu Chuanshi, Xie Rubin, Yang Zhihong and Bi Fuke. 2002. Mantle branch structure theory and prospecting practice. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Shao Zhenguo, Wang Baode, Zhao Minghe, Wang Lifeng, Jiang Wei and Xu Chuanshi. 2001. The multistage evolution of mantle plume and its mineralization. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Peng Cong and Gao Rui. 2000. The study for transverse variation of lithosphere and asthenosphere in continent and neighboring oceanic areas of China. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Rui Zongyao. 2000. The study of porphyry copper ore deposits of Northwest China, North China and Northeast China. In: Tu Guangzhi *et al.*, eds. Super-large Ore Deposits in China. Beijing: Science Press, 397–426 (in Chinese).
- Rui Zongyao, Huang Zhongke, Qi Guoming, *et al.* 1984. Porphyry copper (molybdenum) ore deposits. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Sawkins F J. 1976. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments. *J Geol*, 84: 653–671.



- Tan Tjongkie. 1987. Geodynamics and tectonic evolution of the Panxi Rift. *Tectonophysics*, 133(3,4): 287 – 304.
- Teng Jiwen. 1988. The structure of crust and upper mantle and characteristics of geophysical field of Kang-Dian region and some basic features of Panxi tectonic zone. In: Zhang Yunxiang, Yuan Xuecheng, eds. Contribution to Panzhihua-Xichang Rift in China. Beijing: Geological Publishing House, 249 – 274 (in Chinese).
- Teng Jiwen. 1989. Geophysical criteria for “resuscitating” of the Panxi ancient rift tectonic zone. *Science in China* (Series B), 32(1): 117 – 128.
- Teng Jiwen. 1994. Lithospheric physics and dynamics in structure belt of Xikang-Yunnan. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Teng Jiwen. 1996. International geological congress during transition from 20th century to 21st century. *Science*, 48(6): 18 – 20 (in Chinese).
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Zhang Bingming, Yang Dinghui, Wan Zhichao and Zhang Hui. 1997. Geophysical fields and background of exceptional structure for deep latent mantle plume in Bohai Sea. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 40(6): 468 – 480 (in Chinese with English abstract).
- Tu Guangzhi, et al. 2000. Superlarge ore deposits in China. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Tu Guangzhi, Huo Mingyuan et al. 1991. Economic geology of gold. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Denghong. 1998. Mantle Plume and mineralization. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 1999. Identification of mantle plume and key problems for studying large-scale metallogeny. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (Supplement): 426 – 431 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2001. Basic concept, classification, evolution of mantle plume and large scale mineralization—probe into southwestern China. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 67 – 72 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang and Lin Wenwei. 2000. Cu-Ni-(PGE) sulfide metallogenic series in north Xinjiang. *Mineral Deposits*, 19(2): 147 – 155 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Lin Wenwei, Yang Jianming and Yan Shenghao. 1999. Controlling effects of the mantle plume on the Jiaodong and Dian-Qian-Gui-concentration areas. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 157 – 162 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Yang Jianming, Yan Shenghao, Xu Jue, Chen Yuchuan, Xue Chunji, Lao Yaonan and Yan Hanlong. 2002. Cenozoic ore concentration area in the Sanjiang region, SW China, tectonic setting and exploration. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2), 135 – 140 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingchun. 1998. The metallogenic features of silver ore area in China. *Mineral Deposits*, 17(Supplement): 29 – 32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kuiren, Zhou Youqin, Sun Liguang and Ren Chigang. 1994. Gold-hosted condition study of a few carlin-type gold deposits in China. Hefei: China University of Science and Technology (in Chinese).
- Wang Yangen. 1994. Carlin-type gold deposits and tectonics in southwest Guizhou. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xiong Shaobai, Teng Jiwen, Yin Zhouxun, Lai Minghui and Huang Yiping. 1986. Explosion seismological study of the structure of the crust and upper mantle at southern part of the Panxi tectonic belt. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 29(3): 233 – 244 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianming, Wang Denghong and Xu Jue. 2002. The CO<sub>2</sub>-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluids and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu orefield, northwestern Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 244 – 253 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yongchang, Shen Ping, Tao Mingxin and Sun Mingliang. 1994. The distribution of Helium isotope in natural gas of oil-gas-bearing basins of China. *Chinese Science Bulletin*, 39(16): 1505 – 1508 (in Chinese with English abstract).
- Yao Hong. 1988. Q-value calculated by seismic body wave and its distribution in Panxi tectonic zone. In: Zhang Yunxiang, Yuan Xuecheng, eds. Contribution to Panzhihua-Xichang Rift in China. Beijing: Geological Publishing House, 195 – 198 (in Chinese).
- Yin Hanhui, Fan Weiming, Lin Ge. 1990. Deep processes and mantle-crust compound mineralization in the evolution of the Lanping-Simaio Mesozoic-Cenozoic diwa basin in western Yunnan, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(2): 113 – 124 (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhouxun, Teng Jiwen and Xiong Shaobai. 1987. A study of fine structure in the upper crust of Dukou and its adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 30(1): 22 – 30 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Xingen. 1985. Panxi Rift and its relationship to mineralization. In: Zhang Yunxiang, Yuan Xuecheng, eds. Contribution to Panzhihua-Yichang Rift in China. Beijing: Geological Publishing House, 307 – 324 (in Chinese).
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Ding Shijiang, Peng Renmin and Wang Jianping. 2001. Discussion on critical transition of ore-forming parameters(factors). *Mineral Deposits*, 20(4): 301 – 306.

- Zhai Yusheng, Zhang Hu, Song Honglin, Deng Jun and Cheng Xiaojia. 1997. Macroscopic structures and superlarge ore deposits. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Benren. 2001. Magmatic activities from plume-source in the Qinling orogenic belt and its dynamic significance. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenbin, Zhu Zhiping and Zhang Jianshi. 1993. Studies of velocity structure of crust and upper mantle in Weihe depression. In: Annual of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Seismological Press, 92 (in Chinese).
- Zhao Yonggui, Zhong Dalai, Liu Jianhua, *et al.* 1992. Principles of geological interpretation for seismic tomography and its application to studying of west Yunnan's deep structure. *Scientia Geologica Sinica*, 2: 105–113.
- Zhaoyuan Gold Mining Group Co. 2002. Geology and prospective in gold deposits clustering region of Zhaoyuan, Shandong Province. Beijing: Seismological Press, 1–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan. 2001. Geochemical provinces and abrupt belt of geochemistry. Beijing: Science Press (in Chinese).

## DYNAMIC PROCESS OF SUBSTANCE AND ENERGY EXCHANGES IN DEPTHS OF THE EARTH AND FORMATION OF MINERAL RESOURCES

TENG Ji-wen

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; Jilin University, Jilin 130026, China)

**Abstract:** The scientific subject——substance and energy exchanges in depths of the earth and dynamic process, has been put forward in the past years, which is the base exploring a series of abstract problems on geoscience frontier, it is necessary that earth science advances towards quantification gradually. No geological phenomenon seen in the surface of the earth such as abnormality of geophysical field, geological structural framework and variation of geochemical components are not constrained by them. For example, formation and evolution of spheres and layers of the earth, continent extension and rift as well as mineral and energy resources, etc. all are the coupling products among deep substances migration, physical-chemical effects and geological structures. Dynamic response of metallic mineral resources and crust, mantle structure and deep substance migration is discussed in this paper. Through several typical mineral deposits and their forming essential factors the metallogenic deep dynamic process is analyzed. Five problems in the following are chiefly discussed: first, ore formation and distribution of metallic mineral resources and crust, mantle structure and deep substantial migration and metallogenic belts; second, precipitation of gold and its deep process; third, formation, evolution and occurrence of metallic ore deposits; forth, mantle plume and its metallogenesis and; fifth, deep dynamic process and fluid migration within the earth and problems necessarily further studied.

Nowadays, the study on this scientific subject in geoscience circle is just beginning, some results or explanations are still qualitative, of outline or supposition so that some of them are still little known or not known so far. Therefore, this paper proposes a series of scientific problems remaining to be further studied on relative substance and energy exchanges in depths and deep processes of formation of mineral resources having been discussed in the text, and brings forward an main body field to deepen knowledge and solve these problems.

**Key words:** Exchanges of substance and energy; Deep process of metallogenesis; Structure of crust and mantle; Mantle plume and ore formation; Coupling of spheres and layers