

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.976



中国东部中、新生代软流圈上涌与构造—岩浆—矿集区

邢集善¹, 杨巍然², 邢作云², 刘建华³

1. 山西省地质勘查局地球物理化学勘查院, 山西运城 044004
2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 以深部地球物理资料为基础, 结合大地构造环境、岩浆岩同位素示踪及矿产资源分布规律, 加以综合分析。通过热力学计算可知, 中国东部近 2 亿年来的上地幔岩石圈/软流圈构造可以存留至今, 且能区分出中、新生代软流圈上涌与矿集区: (1) 中生代金属矿: (a) 克拉通区, 软流圈沿柱身上涌, 其柱头上方形成幔壳混熔花岗质岩及相应 Au、Cu、Mo、Pb-Zn 等矿集区, 并于柱身与岩石圈块体陡接触带, 形成中基性杂岩及相应富 Fe 矿集区; (b) 褶皱带区, 在软流圈上涌柱上方形成近幔源型花岗质岩, 相应为 Cu、Au、Pb-Zn、Mo、Ag 矿集区; (c) 南岭带, 软流圈层在适当深度、热量充足、较大范围内“平卧”, 因热传导而致使地壳内物质部分重熔, 形成壳源型花岗质岩及相应的 W、Sn、稀有元素矿集区; (2) 新生代油气田: (a) 与太平洋板块俯冲有关的软流圈上涌, 其上方出露玄武岩, 形成较大型油田; (b) 与裂陷盆地有关的软流圈上涌, 其上方形成大型油田, 也有中小型油田。软流圈上涌与大地构造: 中生代 J-K 时期, 通过构造力特征等的综合分析, 阐明燕山运动的根源及其影响; 新生代侧重剖析大陆裂谷相关特征。总之, 软流圈上涌是岩石圈减薄, 以及中、新生代构造—岩浆—矿集区形成的根源。

关键词: 深部构造; 软流圈上涌; 软流圈平卧; 柱身和柱头; 金属矿集区; 构造造山; 构造地质。

中图分类号: P31

文章编号: 1000-2383(2019)05-1570-14

收稿日期: 2019-02-20

Meso-Cenozoic Asthenosphere Upwelling of Eastern China and Its Impacts on Structure-Magma-Mineralization Concentration Region

Xing Jishan¹, Yang Weiran², Xing Zuoyun², Liu Jianhua³

1. *Geophysical and Geochemical Prospecting Institute, Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau, Yuncheng 044004, China*
2. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*
3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract: Based on the deep geophysical data, a comprehensive study is carried out by analyzing the tectonic environment, magma isotopic tracing and laws of distribution of mineral resources. The thermodynamic calculation indicates that the structure of the upper mantle lithosphere and asthenosphere of the eastern China which is near 200 Ma can be kept to now, and the time of Mesozoic and Cenozoic can be recognized. Results show the following asthenosphere upwelling and mineralization concentration regions. (1) Mesozoic metal deposit: (a) Craton area, asthenosphere upwelled along the plume body, above the plume head, there formed intermingling granitic rock of crust and mantle melts and corresponding Au, Cu, Mo, Pb-Zn etc mineralization concentrated region. And in the steep contact belt of the plume body and lithosphere body, there formed mediate-basic complex and corresponding Fe mineralization concentrated region. (b) Fold belt area, above the asthenosphere upwelling plume, there formed near mantle-source granitic rocks, and corresponding Cu, Au, Pb-Zn, Mo, Ag mineralization concentrated region. (c) Nanling belt, asthenosphere was “recumbent” at suitable depth, with adequate heat and to a great extent, for

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 1212010733802, 12120113012500, 1212011220529)。

作者简介: 邢集善 (1936—), 男, 教授级高工, 主要从事深部地球物理及构造地质研究。E-mail: ddyb@cug.edu.cn; cugzxy@icloud.com

引用格式: 邢集善, 杨巍然, 邢作云, 等, 2019. 中国东部中、新生代软流圈上涌与构造—岩浆—矿集区. 地球科学, 44(5): 1570—1583.

heat conduction, the interior of crust remelted partially, and the crust-source granitic rocks, corresponding W, Sn and rare elements mineralization concentrated regions were formed. (2) Cenozoic oil and gas field; (a) Asthenosphere upwelling related with the Pacific subduction, above them, there outcropped basalt, and formed large-scale oil field. (b) Asthenosphere upwelling related with the rift basin, above them, there formed large-scale oil fields, also medium- and small-scale oil fields. Asthenosphere upwelling and tectonic: at J-K of Mesozoic, through comprehensive analysis of tectonic force etc, the origin and influence of Yanshan movement are presented. For Cenozoic, the characters related with continental rift should be analyzed essentially. In conclusion, asthenosphere upwelling is the origin of lithosphere thinning and formation of Meso-Cenozoic structure-magma-mineralization concentration region.

Key words: deep structure; asthenosphere upwelling; asthenosphere recumbent; plume body and head; metal mineralization region; tectonic orogen; tectonics.

1 中国东部深部构造的研究与识别

深部构造研究,始于20世纪80年代,现已由地壳结构深入到上地幔结构的研究(马杏垣,1987;袁学诚,1996;任纪舜,2000;邢集善等,2002;邓晋福等,2003;杨巍然,2004;李廷栋,2006;路凤香等,2006;杨巍然等,2009),特别是马杏垣先生的论述,不仅具有前瞻性,更具指导性。

1.1 中国东部上地幔研究的基本方法

1.1.1 对 MOHO 面的研究 主要用地震测深,参考重力异常及其他资料,综合编制中国东部(大陆)莫霍面(MOHO)深度图(图1)。

1.1.2 对上地幔岩石圈/软流圈结构的研究 (1)地震层析成像.地震层析成像是利用天然地震波(以P波为主)的波速差异,研究上地幔岩石圈—软流圈构造的主要方法.华北、华南、南北带地震层析成像老资料的“模型速度”、“计算块元”的选取适当,分辨率精度相当高,足以编制三维岩石圈—软流圈构造图。(2)大地电磁探测.在华北和东北地区已探测到上地幔高导层(相当软流圈层),效果较好.本文编制“中国东部(大陆)岩石圈软/流圈构造图”(图2)所用资料,以上述地震层析成像(刘福田等,1986;刘建华等,1989,1996;邵济安等,2001)为主,而大地电磁测深(刘国栋,1985;国家地震局,1992;长春地院,1998;魏文博等,2006)则为补充(特别是东北及鄂尔多斯)。

1.1.3 关于大地热流值 上地幔热结构是研究岩石圈动力学的重要参数之一.地表观测到的大地热流值(刘国栋,1985;汪集暘,1990;王良书等,1995;李成等,1996;何丽娟等,2001)应主要反映上地幔软流圈层起伏特征(因软流圈层的温度要高于岩石圈层500~600℃).另外,Q值(刘建华等,2004)的研究也有一定作用。

1.1.4 大地构造与矿产 对于中国东部来说,深部构造的浅表响应主要有二:一是中生代燕山期构造造山、各类花岗岩及其相应金属矿集区;二是新生代时期之大陆裂谷、玄武岩与油气田.据统计,我国85%以上的大型、特大型金属矿床皆分布在中国东部,其主要成矿时期为中生代燕山中、晚期,很多地质学者发表了大量相关成果和资料(翟裕生等,1997,1999;陈毓川,1999;邓晋福等,1999,2008;裴荣富等,1999;毛景文等,2004,2005;华仁民等,2005),并对其规律性的认识不断深化.其中,翟裕生等(1997,1999)将大地构造环境与金属矿产分布有机结合的论述具有指导意义。

1.2 中国东部深部构造的识别

1.2.1 深部构造的地质时限 赵永贵等(1992)在运用地震层析成像研究滇西深部构造时,从理论上阐述了“古构造的消亡过程与地震层析成像构造解释的地质时限”,指出:“上地幔中的构造差异是由于岩石类型及矿物相的不同造成的,而岩石类型及矿物相的演化又是由温度压力条件决定的.一次构造作用之后,应力场会很快随之变化,但温度场的时间变化很慢,它需要很长的时间才能转变到新的状态.因而构造差异的消亡过程在很大程度上取决于岩石的热力学过程”.经过定量计算,可知“近百公里厚的俯冲的岩石圈和数十公里宽的软流圈上涌体都可以使其差异特征残存300~400 Ma.因而可以认为现存的深部构造形态是近3~4亿年来大地构造运动遗迹的综合”。

上述理论是建立在“南北构造带”中滇西哀牢山地区的.而对于广大中国东部大陆地区,自中生代印支期整体拼合后,前新生代剧烈构造只有燕山运动.由此推断,燕山运动时期的较大型深部构造信息是完全可以现今地震层析成像中存留的(由温度差异引发波速差异)。

1.2.2 深部构造的识别 大地热流值(及Q值)差

量向上传导甚微,浅表大地热流值一般为 40 mW/m^2 ,属典型冷值背景区,也是高 Q 值区。

区分两个世代深部构造的又一依据是莫霍面起伏(邢作云等,2006a,2006b;邢作云,2007)。一般来说莫霍面相对隆起部位对应于大地热流值高异常区,莫霍面相对凹陷部位对应于大地热流值低值异常区。这表明,新生代软流圈上涌而致使其地壳下部(MOHO)相对隆起,中生代软流圈上涌柱上方的地壳下部(MOHO)因已均衡调整而趋于平缓,现今已无明显隆起。

相应浅表地质构造、特别是岩浆岩和矿集区是区分两个世代深部构造的重要依据(邢作云等,2006a,2006b;邢作云,2007)。新生代软流圈上涌柱上方浅表一般出现玄武岩喷发、相应裂陷盆地和油气田。中生代软流圈上涌柱上方浅表往往形成壳幔混熔型或近幔源型、壳源型花岗质岩以及相应不同类型金属矿集区。

2 中国东部软流圈上涌与岩浆岩—矿集区

2.1 中生代软流圈上涌与岩浆岩—矿集区

2.1.1 克拉通区(陆块区) 克拉通区中心部位有一重要特征,即在岩石圈上部 $60\sim 70 \text{ km}$ 深处,有一波速异常带,构造较薄弱,故软流圈上涌时形成柱身及柱头。

(1)邯鄲软柱(华北)(图 3)。柱身似圆柱状,以邯鄲为轴心,宽约为 $400\sim 500 \text{ km}$,巨大且热量足。该柱上涌至 $65\sim 75 \text{ km}$,其上岩石圈较薄。柱头水平北向,厚约为 $15\sim 20 \text{ km}$,位于岩石圈偏上部 $55\sim 70 \text{ km}$ 深处。其浅表涵盖了五台东—燕山—辽西地区。柱头上方浅表不仅形成大量幔壳混熔花岗质岩,且出现大面积火山岩,相应形成 Au、Mo、Cu、Pb-Zn、Ag 等金属矿集区。成岩与成矿期为 J_2 、 J_3 - K_1^1 期, J_3 - K_1^1 为峰期。陡接触带,浅表为一套偏碱性中基性侵入杂岩(闪长岩 δ_5^2)。它与碳酸盐岩地层接触,形成富 Fe(Au、Cu)矿集区。该带东为济南—邹平地区,规模小;西为南太行(邯鄲、平顺、安阳等)地区,范围较大。

(2)中条软柱(华北)。柱身直径约为 120 km ,上涌至 70 km 深,位于山西垣曲至河南新安一带。柱头水平南伸,浅表涵盖小秦岭及豫西—东秦岭地区,出现壳幔混熔花岗质岩。其金属矿集区以 Mo、An 为主, J_3 - K_1^1 期为主要成矿期。陡接触带位于塔儿山—二峰山一带,其中中基性杂岩属二长岩类(η_5^2)。与浅表碳酸盐岩形成接触交代式富铁矿(Fe),具一定规模。

(3)修水软柱(华南)(图 4)。柱身上涌至 $75\sim 80 \text{ km}$ 深,宽约为 200 km ,软柱内热量充足。柱头向东面积为 $200\times 200 \text{ km}^2$,浅表对应赣东北(德兴地区),虽为幔壳混熔花岗质岩,但幔源成分较多。相应以 Cu、Pb-Zn 矿集区为主,兼有 Au。成矿期较早,为 J_2 时期。陡接触带位于湖北大冶地区,出露燕山期二长闪长岩($\delta\eta_5^2$)。浅表为碳酸盐岩地层,故形成接触

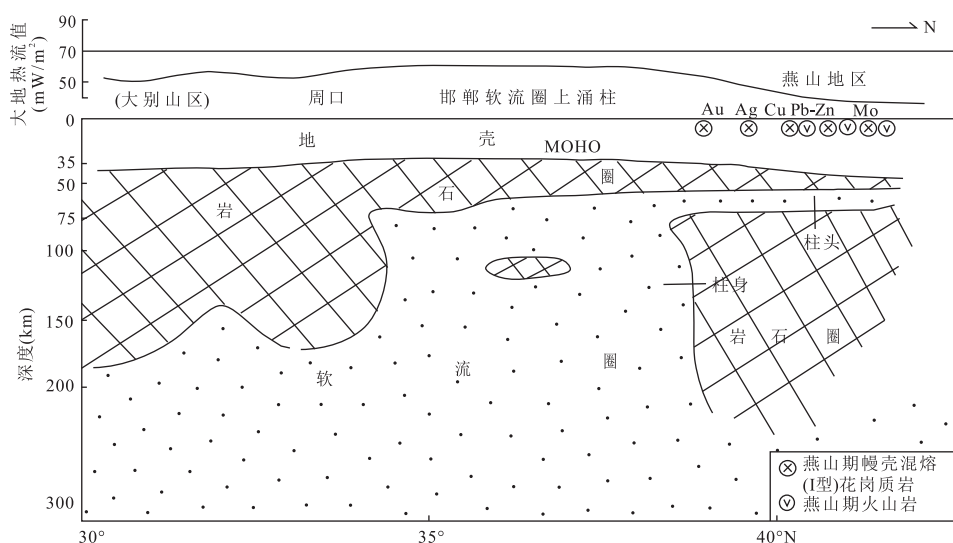


图 3 华北地震层折成象 115°E 南北向剖面

Fig.3 Seismic tomographic image along 115°E S-N section of North China

据邢作云等(2006a, 2006b)修编

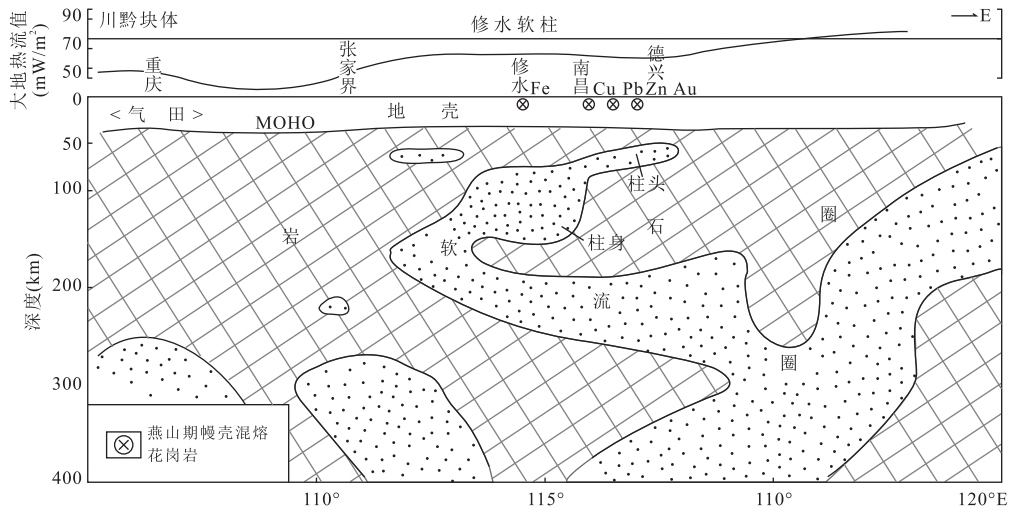


图 4 华南地震层析成像 HW9 东西向剖面

Fig.4 Seismic tomographic image along HW9 E-W section of South China

据邢集善等(2009)修编

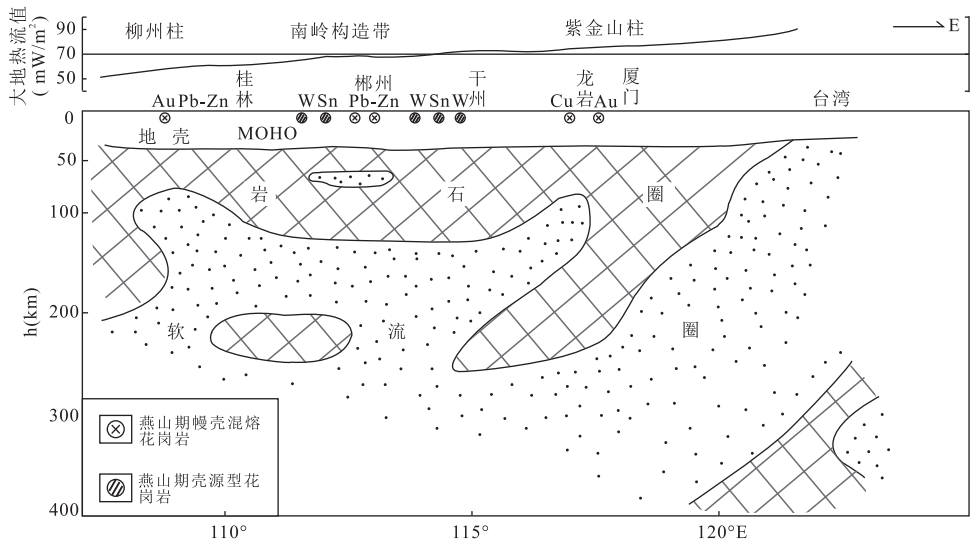


图 5 华南地震层析成像 HW5 东西向剖面

Fig.5 Seismic tomographic image along HW5 E-W section of South China

据邢集善等(2009)修编

交代式富 Fe 矿集区(大冶式),并含 Cu、Au 矿,较为典型。

(4)郴州软柱(华南)(图 5),柱身较小,柱头南伸,面积约为 100×100 km²,是重要 Pb-Zn 矿集区,成矿期为 J₂。

(5)其他软柱(无柱头),吕梁软柱(华北)(图 6):陡接触带(太原西孤堰山区),其浅表形成偏碱性中基性杂岩及接触交代式富铁矿(Fe)。郟庐软柱(华北):中段(山东片),软柱上涌至 70 km,浅表以 Au 矿集区著称,时代为 K₁¹期(120~135 Ma)。南段(铜陵片),以 Cu(Au)矿集区著称,时代为 J₃ 晚期,王强

等(2003)同位素测试结果证实了花岗质岩的幔壳混熔属性。昭通-六盘水软柱(扬子):NNW 向长轴状,浅表鲜见花岗质岩,但出现 Cu、Pb-Zn、Fe 矿集区。

2.1.2 褶皱带区 在褶皱带中,岩石圈处于被扰动状态,其内部岩性无明显差异,不形成柱头。

(1)大兴安岭(南段)软柱(东北)(图 7)。东北地区深部构造的重要特征(邵济安等,2001)是:上地幔内,软流圈层厚度大(300 km),热量足。该软柱上涌达 75~80 km 深,截面积为 200×500 km²,上方浅表出现以燕山期幔源成分为主的花岗质岩和火山岩。相应形成 Cu、Pb-Zn、Ag、Sn 矿集区和稀有金属

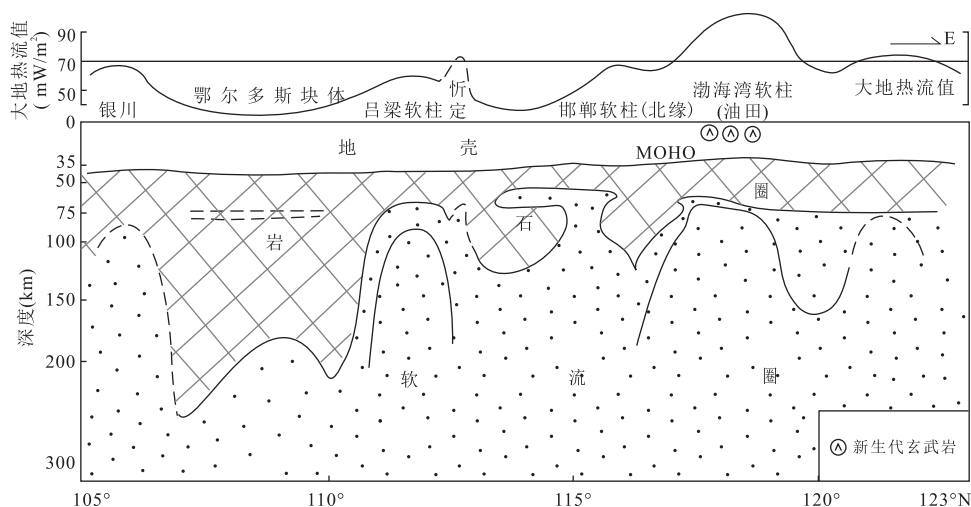


图 6 华北地震层析成像沿 38.7°N 东西向剖面

Fig.6 Seismic tomographic image along 38.7°N E-W section of North China

据邢作云等(2006a, 2000b)修编

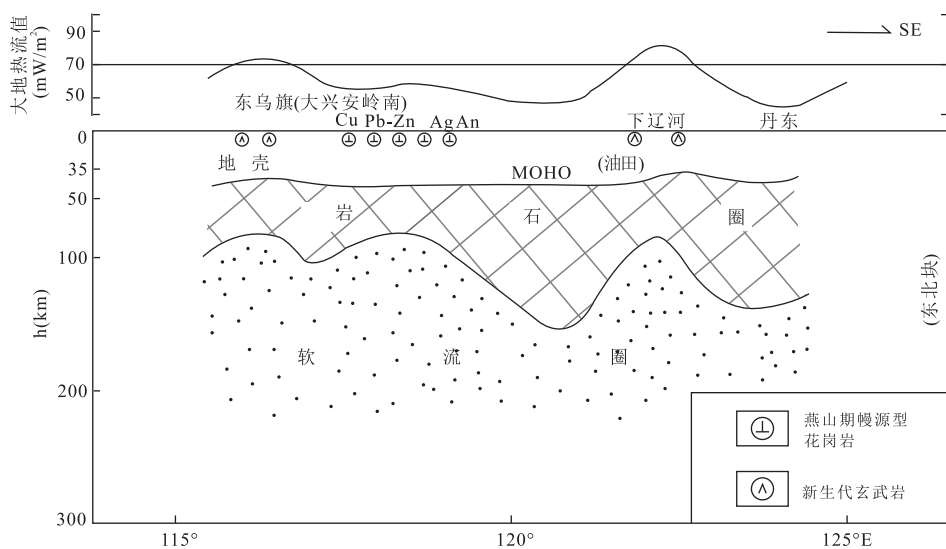


图 7 东北地区东乌旗—大兴安岭(南)—丹东大地电磁测深剖面

Fig.7 Magnetotelluric sounding profile of Dongwuqi-Daxing'anling (south)-Dandong in Northeast China

据国家地震局(1992)修编

矿.活动时代以 J_2 - J_3 期为主。

(2)西秦岭软柱.柱身最高上涌至 50 km 深,中心位于西安—宝鸡—汉中之间地带,向西北延伸至天水一带(深度为 55~80 km).其上方浅表出露燕山早期 J_1 近幔源型幔壳混熔花岗质岩,为重要的 Au 矿集区。

(3)紫金山(龙岩)软柱(图 5).该柱软流圈层上涌至 65~85 km 深,呈半圆状(东部被俯冲带破坏),面积约为 $100 \times 100 \text{ km}^2$.其浅表出露中生代燕山期幔壳混熔花岗质岩(幔源成分较多),相应矿集区为 Au(Ag)、Cu,时代为 J_3 - K_1 。

(4)岭南软柱(柳州—肇庆).时代较晚.上方少见花岗质岩,局部形成 Au(Ag)矿.另外,在百色—兴义地区及南宁地区,皆出现软流圈上涌至 MOHO 面,已无岩石圈存在,即开“天窗”.从时代看,它们应属燕山期。

2.1.3 特殊地段:南岭构造带(图 5) 南岭地区,作为构造剧烈的加里东褶皱带中心,岩石圈上覆的壳层性质呈现柔性,流变性较强.当软流圈层在适当深度,大范围内出现,热量相当充足(温度为 $1400 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$)时,虽无法熔融穿越岩石圈层,但足以将热能“热传导”至上覆地壳内部,使之部分熔融,从而

在浅表形成壳源型花岗质岩,相应形成 W、Sn 稀有金属矿集区。

主要特征:软流圈层埋深大体为 120~130 km,厚度约为 80~90 km,东西向,似平台状;该软流圈内 P 波速度很低,表明其热量相当充足;分布面积与地表南岭带大致相当;成矿时代为 J_2 、 J_3 - K_1 ¹。

2.1.4 中国东部中生代软流圈上涌的总体认识

中国东部中生代软流圈上涌,与近代大洋板块俯冲无关。公认的太平洋板块俯冲作用发生在晚白垩世中后期,且中生代花岗质岩中未发现古俯冲带物质或再循环地壳物质的混染。中国东部中生代软流圈上涌的动力源应来自上地幔下部,且为挤压上涌,这与传统观念认为“只有引张才可上涌”是不同的。中国东部中生代燕山期,因软流圈挤压上涌而形成的近幔源、幔壳混熔和壳源型花岗质岩(及部分火山岩),与该区造山带不同金属矿集区的形成密切相关。

2.2 新生代软流圈上涌与玄武岩—油气田

2.2.1 与太平洋板块俯冲有关(华北东部) 渤海湾—下辽河软柱(图 5,图 6):涌至 75~80 km 深,宽为 300~500 km,范围相当大,其浅表为大型华北裂陷平原带、渤海湾及辽东区。有玄武岩喷发,大地热流值高异常(大于 80~90 mW/m²),上涌时代以 E_2 - E_3 期为主。其上莫霍面上隆,深约为 28~30 km。苏北软柱:出现在苏北地区,并向东海延伸。总体与渤海湾柱相似。以上两者皆与太平洋板块俯冲有关,浅表形成大型裂陷盆地,并伴有玄武岩喷发,是我国重要新生代油气产地。

2.2.2 与裂陷盆地有关 松辽(大庆)软柱:大地电磁测深(长春地质学院,1998)表明,该软柱上涌达 70~75 km,大地热流值约为 80mW/m²,浅表形成断陷盆地,相应出现大型的大庆油田。软柱规模大,南北长约为 500~600 km,东西宽约为 300 km。活动时间主要为 K_1 ²- E_1 ,伴有玄武岩喷发。江汉、南阳软柱:江汉、南阳软流圈上涌柱,上涌至 80 km 深,活动时间为 K_2 - E_1 ,浅表形成断陷盆地,无岩浆活动,为中小型油田。其他:中国东部新生代时期,局部地区开“天窗”,即软流圈上涌至 MOHO 面,已无岩石圈层。台湾和宁波地区,时代为 E_2 - E_3 期;长白山地区,时代以 N_1 - N_2 期为主,到 Q_1 期又大规模火山喷发。

2.2.3 大陆裂谷 以汾渭裂谷为典型,它的特征某种意义上可以大体反映新生代时期的构造特征。

2.2.4 中国东部新生代软流圈上涌的总体认识

华北东部新生代软流圈上涌与太平洋板块俯冲有关。太平洋板块俯冲作用发生于晚白垩纪 84 Ma,其后并在华北东部及东北边缘区,逐步插入上地幔过渡层中,形成 150~200 km 厚的高速块体(Lehede and Nolet, 2003; Huang and Zhao, 2006; Li *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006),使上覆软流圈层受到剧烈扰动而上涌,由于时间延迟,使渤海湾软柱和苏北软柱皆主要形成于 E_2 - E_3 期(刘国栋,1985),并伴有玄武岩喷发,为主动机制。其他软流圈上涌则与裂陷盆地有关,为被动机制形成,即在区域引张应力场作用下,浅表先裂陷,而后均衡调整,引发软流圈上涌。中国东部新生代软流圈引张上涌而形成由铲式断裂控制的断陷盆地和玄武岩,与该区油气田的形成密切相关。

3 讨论:中国东部软流圈上涌与大地构造的关系

3.1 软流圈上涌与中生代构造

3.1.1 软流圈上涌与构造造山 中生代燕山期,深部软流圈强烈上涌的力源从何而来,本文认为:燕山期(特别是 J_2 以来),全球各大洋底先后扩张,其动力源从西、北、南各方向中国大陆挤压,而东侧的古太平洋板块,仅起阻挡作用,因此,深部软流圈物质不仅大量汇聚到中国东部,而且使这里具有强大的垂向挤压构造应力。故此中国东部 J-K 期软流圈上涌与构造造山关系的实质是在区域挤压应力场背景下深部巨大垂向构造力与水平构造力之间的相互转化,并共同作用于表壳的结果,这就构成了燕山运动。但是,由于中国东部各处深部地质构造特征的不均一性,促使燕山运动表现出明显差异。现仅依据构造力的状态,本文将其分为 3 类。

一类:垂向构造力与水平构造力作用并重。主要指克拉通区,软流圈上涌呈现柱身及柱头。起始于柱身内强大垂向构造力,至柱头后主要转化为水平构造力,而后又转化为较分散的垂向构造力(由柱头向上),形成表壳岩浆构造造山带。应是垂向、水平构造力并重。较典型:燕山—辽西岩浆构造造山带、中条—豫西—东秦岭岩浆构造造山带、赣东北—德兴岩浆构造造山带等。非典型:无柱头的吕梁软柱。该处早期 J_1 期是地壳抬升,随后中心急剧下凹,形成基底陡产状而 J_2 期沉积平缓的宁武—静乐盆地,周边抬升为山(芦芽山、云中山等), J_2 期后整体平缓抬升。

二类:以垂向构造力为主,同时兼有水平构造力作用。主要指褶皱带区,软流圈上涌仅有柱身、而无柱头,其上覆岩石圈相对较薄,起始于强大的垂向构造力,上涌穿越岩石圈进入壳层,呈面状展布,表现出一定程度的水平构造力,最终形成表壳岩浆构造造山带。故应是以垂向构造力为主,兼有一定的水平构造力。较典型:大兴安岭(南)岩浆构造造山带、西秦岭岩浆构造造山带、福建紫金山(龙岩)岩浆构造造山带等。非典型:南岭造山带。

三类:仅为垂向构造力,指“软”“硬”块陡接触带。起始于柱身强大垂向构造力,使该处局部岩石圈破裂,垂向进入壳层及浅表,从而形成特殊的小型区块状岩浆构造造山带。典型:大冶、塔尔山、孤堰山以及南太行地区。

3.1.2 肖庆辉等(2002)《花岗岩研究思维与方法》中的若干问题

(1)关于“燕山运动”。肖庆辉等(2002)认为燕山运动是一重大基础地质问题, J-K 时期,位于华北核心部位的燕山地区,突然发生强烈、大规模岩浆、构造、盆内充填作用,构成特殊的板内造山带,但燕山运动的动力源在哪里?如何形成“一个迷惑的造山带”?山西平顺、河北邢邯带的辉长岩、闪长岩类形成机理?上述问题本文有所涉及研究。中生代 J-K 时期,巨大的邯郸软柱中强烈上涌的灼热软流圈物质(邯郸软柱热通量相当于中条软柱的 10~20 倍),迅速聚集到柱头中,且向上熔蚀穿越上覆较薄的岩石圈层以及壳层,于是在柱头上方燕山地区,形成大量幔壳混熔花岗质岩及火山岩,同时该处受到垂向与水平构造力的共同作用,产生剧烈构造变动,促使燕山地区形成典型的板内造山带。然而,该区仅是整体燕山运动中的特例。邯郸软柱与沁水块体的陡接触带,即南太行—邯邢及平顺带,因柱身内软流圈物质上涌力源强大而集中,突破了上覆岩石圈层而直接上升到地壳浅表,形成幔源成分居多的辉长、闪长岩类侵入杂岩,但其构造范围相当小(仅为区块)。

(2)关于“兴蒙造山带大规模的幔源花岗岩”。该问题“褶皱带区软流圈上涌”本文进行了初步讨论。燕山期,大兴安岭(南)的深部,软流圈层巨厚(约 300 km 厚),且灼热程度甚高,在强大上涌力作用下,可迅速突破上覆较薄的岩石圈层(30 余 km),并穿越壳层(仅少量熔融),在浅表形成剧烈构造变动及大量近幔源型花岗质岩及火山岩。这属于典型的褶皱带区软流圈上涌(洪大卫等,2003;王德滋和沈渭洲,2003;肖庆辉等,2005,2006)。

(3)关于“华南过铝花岗岩的构造环境”特别是南岭壳源型花岗质岩形成机理。燕山期,南岭带深部特征,一是软流圈层巨厚、灼热程度高,且范围大;二是其上覆岩石圈具一定厚度,约为 80~90 km;三是壳层受到加里东强烈构造运动作用,流变性很强,表明该带即便受到强大垂向挤压构造力作用,软流圈层也无法熔蚀突破岩石圈层,只能通过热传导的高热能使壳层部分熔融而形成壳源型花岗质岩。另外,该软流圈层还向下延伸穿越过渡层,与下地幔热异常带联通,直至 1 000 km 深(Huang and Zhao, 2006),足见其热力之强大。总之,中生代 J-K 期,中国东部上地幔软流圈层受到强烈挤压并大规模聚集上涌,是燕山运动形成的根源。

3.2 软流圈上涌与新生代构造

3.2.1 软流圈上涌与伸展造山

新生代时期的伸展造山,是由马杏垣(1987)最早提出的,刘和甫等(2000)则将其纳入“盆山耦合”体系中。在此基础上,通过对比研究,本文认为:吕梁山系与汾渭裂谷系软流圈上涌相对应,形成时代最新,以 $N_2 + Q$ 期为主;太行山系与华北裂陷系大型软流圈上涌相对应,形成时代从 $E_2 - E_3$ 期始,延至 $N_2 + Q$ 期;华南武陵山系与江汉盆地软流圈上涌相对应,形成于 $K_2 - E_1$ 期;东北大兴安岭与松辽盆地、二连盆地软流圈上涌相对应,形成于 $K_1^2 - E_1$ 期等。

3.2.2 软流圈上涌与大陆裂谷

马杏垣院士曾指出,大陆裂谷必须具备 2 个条件:一是浅表为新生代断陷盆地;二是深部 MOHO 面隆升,特别是软流圈上涌。据此,汾渭裂谷应为典型大陆裂谷,华北大型裂陷系也有学者称其为裂谷。

“盆山耦合”:邢作云等(2005)在研究汾渭裂谷系时,从深部构造入手,提出“伸展造山—断陷沉盆—后推成台”模式,即“断陷盆地”。“断陷盆地”是由铲式断裂控制的箕状凹陷组成,大型盆地由若干箕状凹陷组合而成,小型盆地则由一两个箕状凹陷组成,因而该模式具有普遍意义。

地震灾害:大陆裂谷内强烈地震是其重要特征。新生代时期,中国东部(大陆)较强的地震活动主要发生在华北克拉通内,属板内地震。它分布在几个构造带:六盘山—贺兰山带(近 SN 向)、汾渭带(NNE 向 S 型)、邢台—唐山带(NE 向)、渤中—辽东带(NE 向)以及近 EW 向的阴山—燕山带。软流圈垂向上涌,使壳内低速高导层受到扰动,可能是浅源地震活动的重要根源(图 8)。

地热资源:中国东部(大陆)地热田可分为裂谷

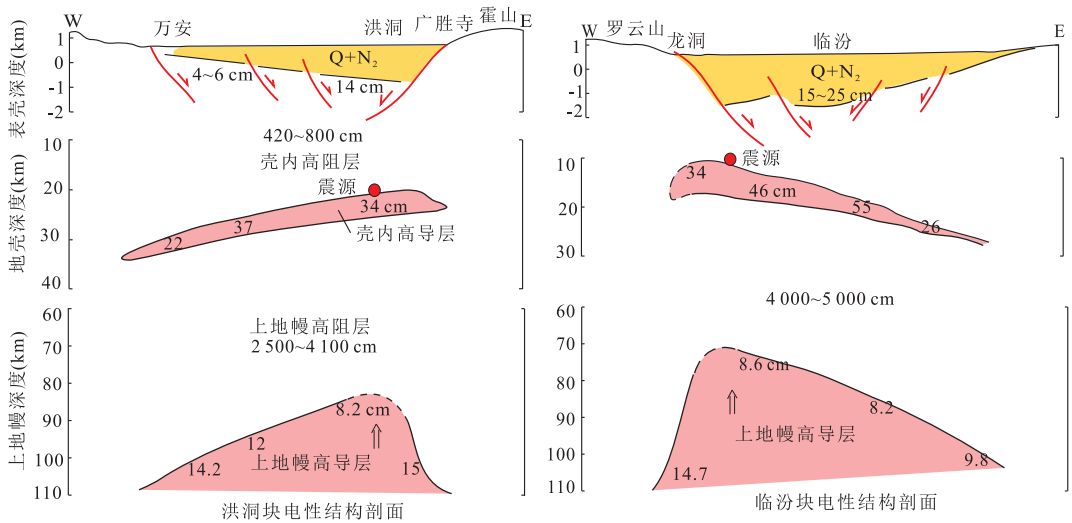


图 8 临汾断陷电性结构剖面与地震图

Fig.8 Faulted electricity structure section of Linfen subsidence

据邢作云等(2005)修编

型和“天窗”型.裂谷型:邢作云等(2005)提出的新生代裂谷型地热形成原理为:热源主要来自深部软流圈大幅度上涌而形成的大地热流值高异常.由深部热传导上来的高热能与表层冷水对流而发生能量交换(热对流),冷水转换成温热水,并储存于一定热储构造中,加上上覆松散保温层,便可构成地热田.但此类地热田皆以低温地热田($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$)为主.温度特征:汾渭裂谷系温度最低(约为 $50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$),渤海湾盆地、松辽盆地温度略高($80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下).“天窗”型:其形成机制是因软流圈上涌高,达 MOHO 面,因而在壳层顶部地面适于热储存的相应部位,形成中高温地热田($>90\text{ }^{\circ}\text{C}$),主要分布于闽东及长白山一带.

3.3 软流圈上涌与岩石圈减薄

初步研究发现,中国东部岩石圈减薄的时期是中、新生代,而减薄的主要根由则是软流圈上涌.在深部强大垂向构造驱动力作用下,使之软流圈层中高温热浮物质不断向上侵蚀,而熔蚀岩石圈层“冷”“硬”物质的过程,就是岩石圈减薄的过程.

对于褶皱带区来说,中、新生代软流圈上涌相当普遍,因而岩石圈减薄比较普遍.对于克拉通区,由于软流圈上涌而分割成若干岩石圈块体,尤以华北破坏最为严重.

3.3.1 扬子克拉通 仅局部软流圈上涌(如修水软柱等),总体破坏较轻,故而所存岩石圈块体巨大、完整.

巨大的川黔岩石圈块体:岩石圈厚度很大($250\sim 400\text{ km}$),面积巨大,是扬子克拉通的主体.波速甚大,大于 9.0 km/s ;大地热流值甚低,约为 $30\sim$

50 mW/m^2 ,表明本区为既“冷”又“硬”之特大型岩石圈稳定块体.出露地层为巨厚碳酸盐岩,主体(四川盆地)为中生界(J-K 为主)地层,偏东为古生界地层.四川盆地的油气田,属于碳酸盐岩油气藏,由于燕山期软流圈大规模上涌带来的巨大热量,促使其油气藏多为大型气田.

其他岩石圈块体:包含湘赣块体、丽江块体等.其岩石圈厚约 180 km 左右,它们范围也相当大,波速较高,热流值偏低,为既硬又冷的岩石圈块体.

3.3.2 华北克拉通 软流圈上涌强烈且普遍,致使华北克拉通破坏严重,东部仅残存若干小型岩石圈构造块体,西部较完整.

大型构造块体指鄂尔多斯块体.鄂尔多斯块体位于华北西部,岩石圈厚度南大、北小($250\sim 150\text{ km}$),周边分布软流圈上涌体.波速高约为 $8.6\sim 9.0\text{ km/s}$;大地热流值低,约为 $40\sim 50\text{ mW/m}^2$,表明本区为一个既“冷”又“硬”的大型岩石圈块体.主要出露 $O_2-C-P-T-J$ 地层,总体为南油北气的大型油气田.鄂尔多斯大型油气田,含气层主要为 T_3y ,而油气生成主要则在 J_2-K_1 期,时间差异明显.原因是燕山中晚期,软流圈物质大规模上涌而伴生的热异常,促进了上述地层中烃源岩系向油气资源演化,并在早于燕山期的地层中形成大型油气田.

小型构造块体有沁水、鲁淮、大别、豫中、辽东—胶东及阴山等岩石圈块体,皆位于华北中东北部,其间穿插软流圈上涌柱.

因此,所谓“华北克拉通破坏”,根源应是深部软流圈层大规模强烈上涌,不断熔蚀岩石圈层,从而导

致其分解成若干岩石圈块体和软流圈上涌柱而致。具体而言,中生代破坏较普遍,新生代偏东部破坏较重。

4 结论与展望

本文研究中发现,中国东部大陆在中生代燕山期的软流圈为挤压上涌,相应形成各类花岗岩及金属矿集区;而新生代的软流圈为引张上涌,相应形成裂隙、玄武岩及油气田。对于软流圈的上涌机制尚须深入探讨。

运用深部地球物理资料研究上地幔岩石圈—软流圈构造特征并编制三维立体图示,进而探讨其与浅表构造—岩浆—矿集区的关系,本文仅为初步尝试,尚待深化。

致谢:马杏垣先生,是我国著名的地质学家,在 20 世纪 50 年代北京地质学院求学时早已闻名遐迩,只因学生我专业主修地球物理,无缘当面请教。20 世纪 80 年代,我在山西物探队工作,承担了省局《山西及周边深部地球物理研究——大陆裂谷及其深部过程》项目,需要到国家地震局地质所收集资料,经刘国栋副所长介绍,有幸拜见马杏垣先生。马先生十分平易近人,不仅给予项目诸多指导,介绍了国际前沿的深部构造研究,而且将其专著《中国岩石圈动力学纲要》赠送给我,受益匪浅。后多次向先生请教,先生总是耐心细致、通俗易懂地阐述深部地质构造相关知识,并且对于我的工作、生活关心备至,倍感亲切。

项目评审原计划安排在早秋,先生答应亲自评审,后诸多原因拖至深冬,先生因身体原因未能成行,由李廷栋院士代其主审。李院士在评审会上说,马先生十分关心深部构造研究,你们是第一家,今后全国都要搞!我们深受感动。后去北京拜访先生,谈了自己想试点研究华北深部构造的设想,先生十分高兴,并给予大力支持和指导。1994 年初,经过长期探索,我们利用深部地球物理和地质综合资料,作出华北地区结晶基底、大地热流值、岩石圈厚度、莫霍面深度 4 张草图,请先生审阅,1995 年 6 月 17 日,接先生来信,让我尽快修改并附说明,准备参加第三十届世界地质大会,后因故拖延。1996 年底去北京面见先生,时先生身体已欠佳,我作了简短汇报,先生说,先缓一缓,等我身体好一些,咱们好好地吧华北深部构造搞一搞,但未曾想,此一别竟是永别!

回想这些年与先生的交往,实为我人生之大幸,

先生不仅知识渊博、思想深邃,而且人品高尚、正直,为人师表。为完成先生“研究深部”的遗愿,经 10 余年努力,终于完成了《中国东部中、新生代软流圈上涌与构造—岩浆—矿集区》。谨以此文缅怀无比尊敬的马杏垣先生!

感谢已故马杏垣院士的亲切关怀与指导,感谢翟裕生院士的指导与帮助,感谢任纪舜院士,刘国栋、刘福田教授以及袁学诚、邓晋福、路凤香、莫宣学、肖庆辉、邵济安、赵永贵、张克信教授的帮助与支持!

References

- Changechun University of Geology, 1998. Manzhouli-Suifenheng Geoscience Transects of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y. C., 1999. The Prospective Evaluation of Mineral Resources in the Main Metallogenic Regions in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- China Seismological Bureau, 1992. Explanation of GGT from Dongwuzhumuqinqi of Inner Mongolia to Donggou of Liaoning Province. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 1999. The Yanshanian Lithosphere-Asthenosphere Catastrophe and Metallogenic Environment in East China. *Mineral Deposits*, 18 (4): 309—315 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Su, S. G., Zhao, H. L., et al., 2003. Deep Processes of Mesozoic Yanshanian Lithosphere Thinning in North China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41—50 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Teng, J. W., Peng, C., et al., 2008. Features and Deep Geology of Geophysical Field and Mineralization in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- He, L. J., Hu, S. B., Wang, J. Y., 2001. Heat Lithosphere Structural Characteristics of Eastern China Continent. *Progress in Natural Science*, 11(9): 966—969 (in Chinese).
- Hong, D. W., Wang, T., Tong, Y., et al., 2003. Mesozoic Granitoids from North China Block and Qinling-Dabie-Sulu Orogenic Belt and Their Deep Dynamic Process. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 231—256 (in Chinese with English abstract).
- Hua, R. M., Chen, P. R., Zhang, W. L., et al., 2005. Three Major Metallogenic Events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24 (2): 99—107 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J., Zhao, D., 2006. High-Resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 111 (B9): 396. <https://doi.org/10.1029/2005JB004066>

- Lehede, S., Nolet, G., 2003. Upper Mantle beneath Southeast Asia from S Velocity Tomography. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 108 (B1): 165. <https://doi.org/10.1029/2000JB000073>
- Li, C., Robert, V. H., Nafl, T. M., 2006. Constraining P-Wave Velocity Variations in the Upper Mantle beneath Southeast Asia. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 154: 180—195.
- Li, C., Wang, L. S., Shi, Y. S., 1996. Deep Thermal State and Lithospheric Thickness in the Lower Yangtze Area. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 32(3): 494—499 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. D., 2006. Lithospheric Tectonic Units of China. *Geology in China*, 33(4): 700—710 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. T., Qu, K. X., Wu, H., et al., 1986. ST Image of North China. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5): 442—449 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. D., 1985. Cenozoic Rift System of North China Plain and the Deep Internal Processes. In: Research on Crustal Movement (1). Seismological Press, Beijing, 17—25 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F., Liang, H. S., Li, X. Q., et al., 2000. The Coupling Mechanisms of Mesozoic-Cenozoic Rift Basins and Extensional Mountain System in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 477—486 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Liu, F. T., Wu, H., et al., 1989. Three Dimensional Velocity Images of the Crust and Upper Mantle beneath North-South Zone in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(2): 143—152 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Liu, F. T., Yan, X. W., et al., 2004. A Study of Lg Coda Attenuation beneath North China: Seismic Imaging Lg Coda Q. *Chinese Journal Geophysics*, 47(5): 822—832 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Wu, H., Liu, F. T., 1996. Features of 3-D Velocity Distribution and Lithosphere Structure in South China and Its Contiguous Sea Area. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(4): 483—492 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Hou, Q. Y., et al., 2006. Zones of Crust-Mantle and Lithosphere-Asthenosphere Interaction in Eastern China: Characteristics and Timing of Transformation. *Geology in China*, 33(4): 773—781 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. Y., 1987. The Lithosphere Geodynamics Compendium in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Li, X. F., et al., 2004. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple Lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45—55 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Zhang, Z. H., et al., 2005. Mesozoic Large-Scale Metallogenic Pulses in North China and Corresponding Geodynamic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169—188 (in Chinese with English abstract).
- Pei, R. F., Zhai, Y. S., Zhang, B. R., et al., 1999. Deep-Seated Tectonism and Mineralization. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. S., 2000. The Tectonic Map of China and Neighbour Area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shao, J. A., Liu, F. T., Chen, H., et al., 2001. Relationship between Mesozoic Magmatism and Subduction in Da Hinggan-Yanshan Area. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 56—63 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Shen, W. Z., 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209—220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Y., 1990. Compilation of the Chinese Continental Geothermal Value Data. *Seismology and Geology*, 12(4): 351—363 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Li, C., Shi, Y. S., et al., 1995. Distributions of Geotemperature and Terrestrial Heat Flow Density in Lower Yangtze Area. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 469—476 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., et al., 2003. Petrogenesis of the Mesozoic Intrusive Rocks in the Tongling Area, Anhui Province, China and Their Constraint on Geodynamic Process. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33(4): 323—334 (in Chinese).
- Wei, W. B., Jin, S., Ye, G. F., et al., 2006. MT Sounding and Lithosphere Thickness in North China. *Geology in China*, 33(4): 762—772 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. The Way of Investigation on Granitoids. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiao, Q. H., Qiu, R. Z., Deng, J. F., et al., 2005. Granitoids and Continental Crustal Growth Modes in China. *Geology in China*, 32(3): 343—352 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Qiu, R. Z., Wu, G. Y., et al., 2006. Mesozoic Asthenospheric Upwelling Orogeny in Eastern China. *Geology in China*, 33(4): 730—750 (in Chinese with English abstract).
- Xing, J. S., Liu, J. H., Zhao, J. Q., 2002. Deep-Seated Tectonics in the North China Intraplate. *Earthquake Research in Shanxi*, (4): 3—12 (in Chinese with English abstract).
- Xing, J. S., Yang, W. R., Xing, Z. Y., et al., 2007. Deep-Seated Structure Characteristics of Eastern China and Its Relation with Metal Mineralization-Concentrated Region. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 114—130 (in Chinese)

- with English abstract).
- Xing, J. S., Yang, W. R., Xing, Z. Y., et al., 2009. Mesozoic As-thenosphere Upwelling of Eastern China and Its Effects on Structure-Magma-Mineralization-Concentrated Region. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 225–239 (in Chinese with English abstract).
- Xing, Z. Y., 2007. Deep-Seated Structural Characteristics of North China and Its Near-Surface Response (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xing, Z. Y., Xing, J. S., Zhao, B., 2006a. Deep-Seated Structure of North China. *Geological Science and Technology Information*, 25(6): 17–23, 36 (in Chinese with English abstract).
- Xing, Z. Y., Xing, J. S., Zhao, B., et al., 2006b. Identification of Deep Structure of Two Episodes in North China and Its Significance—Yanshanian Movement and Deep Process. *Geological Review*, 52(4): 433–441, 578 (in Chinese with English abstract).
- Xing, Z. Y., Zhao, B., Tu, M. Y., et al., 2005. The Formation of the Fenwei Rift Valley. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 247–262 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., 2004. Some Problems of Opening-Closing Tectonics. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 195–199 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Zeng, Z. X., Li, D. W., et al., 2009. Three-Level Tectonic Model for Intraplate Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., 1996. Atlas of Geophysics of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Li, X. B., 1999. Essentials of Metallogeny. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y. S., Zhang, H., Song, H. L., et al., 1997. Large Structure and Superlarge Deposit. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, D. P., Yamada, A., Hta, Y. O., 2006. Precisely Measured Travel Times of Mantle Body Waves: Implications for Mantle Heterogeneity and Tomography. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 37–47.
- Zhao, Y. G., Zhong, D. L., Liu, J. H., et al., 1992. Fundamentals of Geological Interpretation for Seismic Tomography and Its Application to Studying of West Yunnan's Deep Structure. *Scientia Geologica Sinica*, 27(2): 105–113 (in Chinese with English abstract).
- 陈毓川, 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价. 北京: 地质出版社.
- 国家地震局, 1992. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面说明书. 北京: 地震出版社.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等, 1999. 中国东部燕山期岩石圈—软流圈系统大灾变与成矿环境. *矿床地质*, 18(4): 309–315.
- 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等, 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. *地学前缘*, 10(3): 41–50.
- 邓晋福, 滕吉文, 彭聪, 等, 2008. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿. 北京: 地质出版社.
- 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸, 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征. *自然科学进展*, 11(9): 966–969.
- 洪大卫, 王涛, 童英, 等, 2003. 华北地区和秦岭—大别—苏鲁造山带中生代花岗岩与深部地球动力学过程. *地学前缘*, 10(3): 231–256.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等, 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2): 99–107.
- 李成, 王良书, 施央申, 1996. 下扬子区深部热状态与岩石圈厚度. *南京大学学报(自然科学版)*, 32(3): 494–499.
- 李廷栋, 2006. 中国岩石圈构造单元. *中国地质*, 33(4): 700–710.
- 刘福田, 曲克信, 吴华, 等, 1986. 华北地区地震层面成像. *地球物理学报*, 29(5): 442–449.
- 刘国栋, 1985. 华北平原新生代裂谷系及其深部过程. 见: 现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社, 17–25.
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等, 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. *地学前缘*, 7(4): 477–486.
- 刘建华, 刘福田, 吴华, 等, 1989. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图像. *地球物理学报*, 32(2): 143–152.
- 刘建华, 刘福田, 阎晓蔚, 等, 2004. 华北地区 Lg 尾波衰减研究——Lg 尾波 Q 的测量. *地球物理学报*, 47(5): 822–832.
- 刘建华, 吴华, 刘福田, 1996. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构. *地球物理学报*, 39(4): 483–492.
- 路凤香, 郑建平, 侯青叶, 等, 2006. 中国东部壳—幔、岩石圈—软流圈之间的相互作用带: 特征及转换时限. *中国地质*, 33(4): 773–781.
- 马杏垣, 1987. 中国岩石圈动力学纲要. 北京: 地质出版社.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等, 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 11(1): 45–54.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等, 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 21(1): 169–188.
- 裴荣富, 翟裕生, 张本仁, 等, 1999. 深部构造作用与成矿. 北京: 地质出版社.
- 任纪舜, 2000. 中国及邻区大地构造图. 北京: 地质出版社.

附中文参考文献

长春地质学院, 1998. 中国满洲里—绥芬河地学断面. 北京: 地质出版社.

- 邵济安,刘福田,陈辉,2001.大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用的关系.地质学报,75(1):56—63.
- 王德滋,沈渭洲,2003.中国东南部花岗岩成因与地壳演化.地学前缘,10(3):209—220.
- 汪集旻,1990.中国大陆地区大地热流值数据汇编.地震地质,12(4):351—363.
- 王良书,李成,施央申,等,1995.下扬子区地温场和大地热流密度分布.地球物理学报,38(4):469—476.
- 王强,许继峰,赵振华,等,2003.安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约.中国科学(D辑:地球科学),33(4):323—334.
- 魏文博,金胜,叶高峰,等,2006.华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论.中国地质,33(4):762—772.
- 肖庆辉,邓晋福,马大拴,等,2002.花岗岩研究思维与方法.北京:地质出版社.
- 肖庆辉,邱瑞照,邓晋福,等,2005.中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究.中国地质,32(3):343—352.
- 肖庆辉,邱瑞照,伍光英,等,2006.中国东部中生代软流层上涌造山作用.中国地质,33(4):730—750.
- 邢集善,刘建华,赵晋泉,2002.华北板内深部构造.山西地震,(4):3—12.
- 邢集善,杨巍然,邢作云,等,2007.中国东部深部构造特征及其与矿集区关系.地学前缘,14(3):114—130.
- 邢集善,杨巍然,邢作云,等,2009.中国东部中生代软流圈上涌与构造—岩浆—矿集区.地学前缘,16(3):225—239.
- 邢作云,2007.华北地区深部构造特征及其浅表响应(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 邢作云,邢集善,赵斌,2006a.华北地区深部构造特征.地质科技情报,25(6):17—23,36.
- 邢作云,邢集善,赵斌,等,2006b.华北地区两个世代深部构造的识别及其意义——燕山运动与深部过程.地质论评,52(4):433—441,578.
- 邢作云,赵斌,涂美义,等,2005.汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究.地学前缘,12(2):247—262.
- 杨巍然,2004.开合构造研究中的几个问题.地质通报,23(3):195—199.
- 杨巍然,曾佐勋,李德威,等,2009.板内地震过程的三层次构造模式.地学前缘,16(1):206—217.
- 袁学诚,1996.中国地球物理图集.北京:地质出版社.
- 翟裕生,邓军,李小波,1999.区域成矿学.北京:地质出版社.
- 翟裕生,张湖,宋鸿林,等,1997.大型构造与超大型矿床.北京:地质出版社.
- 赵永贵,钟大赉,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,27(2):105—113.