

中国东部深部构造特征及其与矿集区关系

邢集善¹, 杨巍然², 邢作云², 刘建华³, 赵斌¹

1. 山西地质勘察局 地球物理与地球化学研究院, 山西 运城 044004

2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

Xing Jishan¹, Yang Weiran², Xing Zuoyun², Liu Jianhua³, Zhao Bin¹

1. Institute Geophysical and Geochemistry, Shanxi Geological & Exploration Bureau, Yuncheng 044004, China

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Xing Jishan, Yang Weiran, Xing Zuoyun, et al. Deep-seated structure characteristics of eastern China and its relation with metal mineralization-concentrated region. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 114-130

Abstract: Based on published seismic tomography and magnetotelluric data, combined with heat flow values, the authors constructed maps of lithosphere thickness, heat flow values, and of the relationship between lithosphere structure and metallogenic districts in eastern China. On this basis, the authors focused on the upper mantle lithosphere-asthenosphere structure of eastern China, and concluded the following: (1) seismic tomography images can distinguish between Mesozoic and Cenozoic deep-seated structures, using differences in heat flow values, magmatic rocks and metallogenic districts; (2) the principal features of deep-seated structure of eastern China may be summarized as follows: a) the upper mantle lithosphere-asthenosphere shows an undulating structure, with the lithosphere being thicker in the west and thinner in the east, and b) the mantle asthenosphere upwelling, can be divided into three blocks: ① south China block (structure line shows NWW), ② north China block (structure line shows nearly N-S), and ③ a northeast block (structure line shows ENE) with their respective different features, and for the deep-seated structure of eastern China, asthenosphere upwelling plays a dominant role; (3) Mesozoic asthenosphere upwelling is responsible for the formation and emplacement of Yanshanian granitic rocks and associated mineralization, and the Cenozoic asthenosphere upwelling is responsible for continental rifting, basaltic volcanism and larger oil-gas field; (4) lithosphere thinning is also related to asthenospheric upwelling, eastern China continental mass was thinned mainly in the Mesozoic (Yanshanian event) and the east coast in the Cenozoic.

Key words: deep-seated structure; lithosphere-asthenosphere structure; metalogeny; asthenosphere upwelling; lithosphere thinning

摘要:文中以地震层析原始数据为基础,结合大地电磁测深和热流值数据,对老资料重新开发,编制了中国东部岩石圈厚度图、大地热流值图、岩石圈构造与矿集区关系图等,在此基础上对中国东部上地幔岩石圈-软流圈构造及其变异进行了初步研究,认为:(1)中生代燕山期较大型深部构造(如软流圈上涌体)的地震层析影象可存留至今,运用大地热流值及其相应浅表岩浆岩、矿集区等特征差异可以将中、新生代深部构造加以区

收稿日期:2007-02-27;修回日期:2007-03-07

基金项目:中国地质调查局项目(200310400009)

作者简介:邢集善(1936—),男,教授级高级工程师,地球物理学专业,现从事深部构造研究。E-mail: xzy@cug.edu.cn

分;(2)中国东部深部构造总特征:上地幔岩石圈-软流圈构造起伏变化,岩石圈西厚东薄,软流圈上涌发育且形式各异。大体可分为华南(构造线呈 NWW)、华北(构造线近 SN)、东北(构造线呈 NNE)三大块,其基本特征各异。整个中国东部深部构造中,软流圈上涌起主导作用;(3)中生代软流圈上涌是相应浅表燕山期花岗质岩形成的根源,并与金属矿集区密切相关,新生代软流圈上涌则是大陆裂谷、玄武岩喷发及大型油气田形成的基础;(4)岩石圈减薄的主因是软流圈上涌,中生代燕山期主要减薄于中国东部大陆内部,新生代主要减薄于偏东部沿海区域。

关键词:深部构造;岩石圈-软流圈构造;金属矿集区;软流圈上涌;岩石圈减薄

中图分类号:P542.5;P611.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)03-0114-17

中国东部大陆地区在中生代早期(印支期)拼合后,便进入了一个崭新的发展时期,岩浆、构造活动十分活跃,一批重要的金属矿集区(中生代燕山期为主)和大型油气田(中、新生代)相继形成。马杏垣、翟裕生、李廷栋、任纪舜、邓晋福、肖庆辉等^[1-31]国内外众多学者对中国东部岩浆、构造活动及矿集区的深部根源作了大量研究工作。

本文是在前人工作的基础上,依托 P 波地震层析原始数据^[19-21],参考大地电磁测深资料^[14,32-33]和大地热流值相关成果^[16-17],结合相应浅表构造、岩浆活动及矿集区的差异特征,对老资料进行重新开发,编制了中国东部岩石圈厚度图、大地热流值图、岩石圈构造与矿集区关系图,在此基础上对本区构造岩浆活动与矿集区的形成机制进行了初步研究,认为上地幔岩石圈-软流圈构造及其变异,特别是软流圈上涌,与岩石圈减薄及其相应浅表岩浆构造活动、矿集区的形成关系密切。

文中“深部构造”系指上地幔岩圈-软流圈构造。应用地震层析^[19-21]研究深部构造,首先确认“模型速度”合理,则可将其相对高速层作为岩石圈层,而相对低速层作为软流圈层。另外,取大地电磁测深^[14,32-33]之上地幔高导层作为研究软流圈之参照。

1 中生代深部构造的识别及其特征

1.1 中生代深部构造的识别

1.1.1 中生代深部构造地震层析影像的存留

本文在研究中认识到,中国东部地区应有中生代深部构造的存留。赵永贵等^[34]依据热力学衰减原理认为:上地幔中构造差异是由温压条件决定的,一次构造运动后,应力场会随之快速变化,而温度场变化甚慢,可长时间存留。同深度的软流圈温度要比岩石圈高出 500~600℃,而不同温度的地震波速不同,温度越高,波速越低(软流圈),温度越低,波速越高(岩石圈)。通过计算得知,岩石圈中大约 100

km 宽的软流圈上涌柱体,如其熔融组分为 10%~15%,则其凝结(冷却)时间约为 250~470 Ma,表明其速度差异可存留 2~3 亿年之久。因此,中国东部地区中生代燕山期较大软流圈上涌柱体的地震层析影像在后期无剧烈干扰的情况下可以存留至今。

1.1.2 中、新生代深部构造的区分

(1)大地热流值(及 Q_0 值)差异是区分两个世代深部构造的首要依据^[35](图 1)。由于软流圈层比岩石圈层温度高出 500~600℃,故高温软流圈上涌到一定高度(深度 75~80 km),其向上的热传导,可使其上方地表的大地热流值形成高热异常区,一般达 80~90 mW/m²,也是典型低 Q_0 值区^[22],此为新生代深部构造特征。

对于中生代燕山期深度 70 km 左右软流圈上涌柱而言,虽经 1~2 亿年的热量衰减,其深部柱体影像仍可保留至今,但其向上传导至地面的热量则相对深部柱体的热量衰减要快得多,故其上方地表现今所测大地热流值为中等数值区,一般为 50~60 mW/m²,应属于冷值背景区,此为中生代燕山期的深部构造特征。

岩石圈厚区(硬块),则因岩石圈厚度大于 120~150 km,故其深源热量向上传导甚微,其地表大地热流值一般为 40~50 mW/m²,属典型冷值背景区,也是高 Q_0 值区^[22]。

(2)相应浅表构造、岩浆活动及矿集区的差异特征是区分两个世代深部构造的重要依据^[35]。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易形成幔壳混熔型或壳源型花岗质岩,以及不同类型的金属矿集区。

(3)区分两个世代深部构造的又一依据——莫霍面起伏(图 2)^[35-36]。华北地区莫霍面(Moho)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。上述表明,新生代软流圈上涌而致使其地壳下部(Moho)相

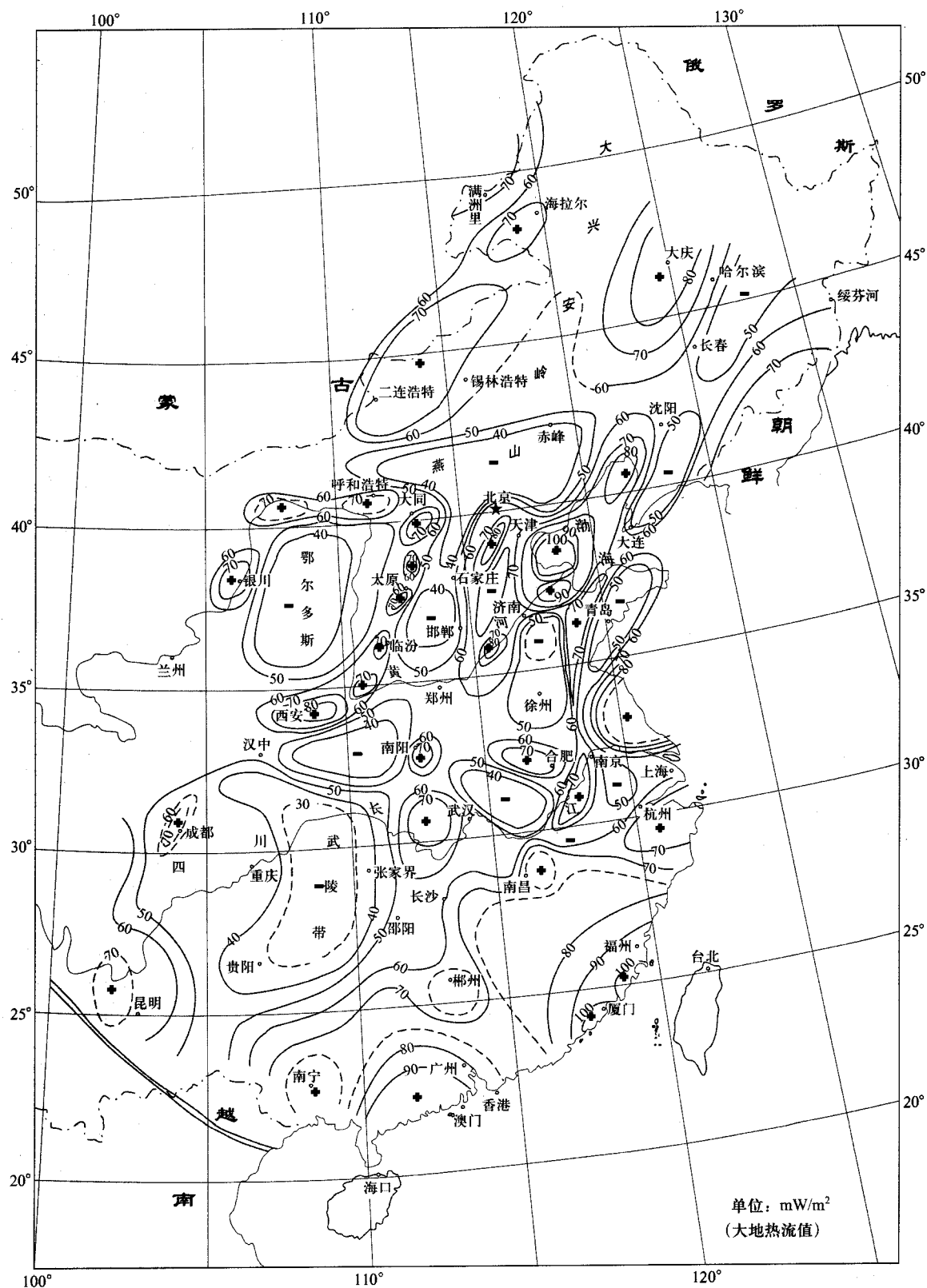


图1 中国东部(大陆)大地热流值图
(参考[14,16-17,35,38-40]文献资料编制)
Fig.1 Sketch of heat flow of eastern China

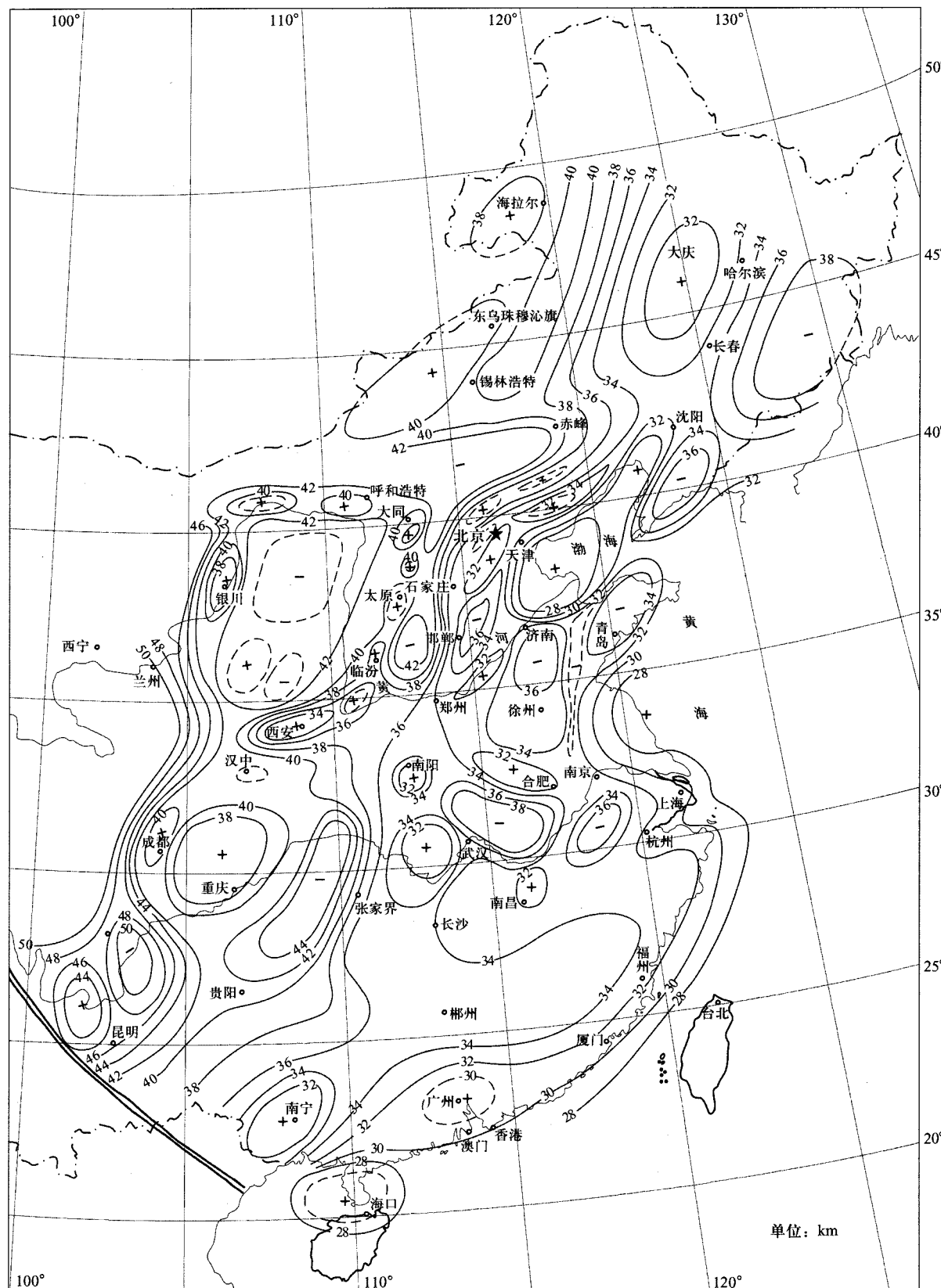


图2 中国东部(大陆)莫霍面深度图

(参照文献[10,13-14,28-29,32-33,40],结合深部构造特征,综合编制)

Fig. 2 Sketch of Moho depth of eastern China

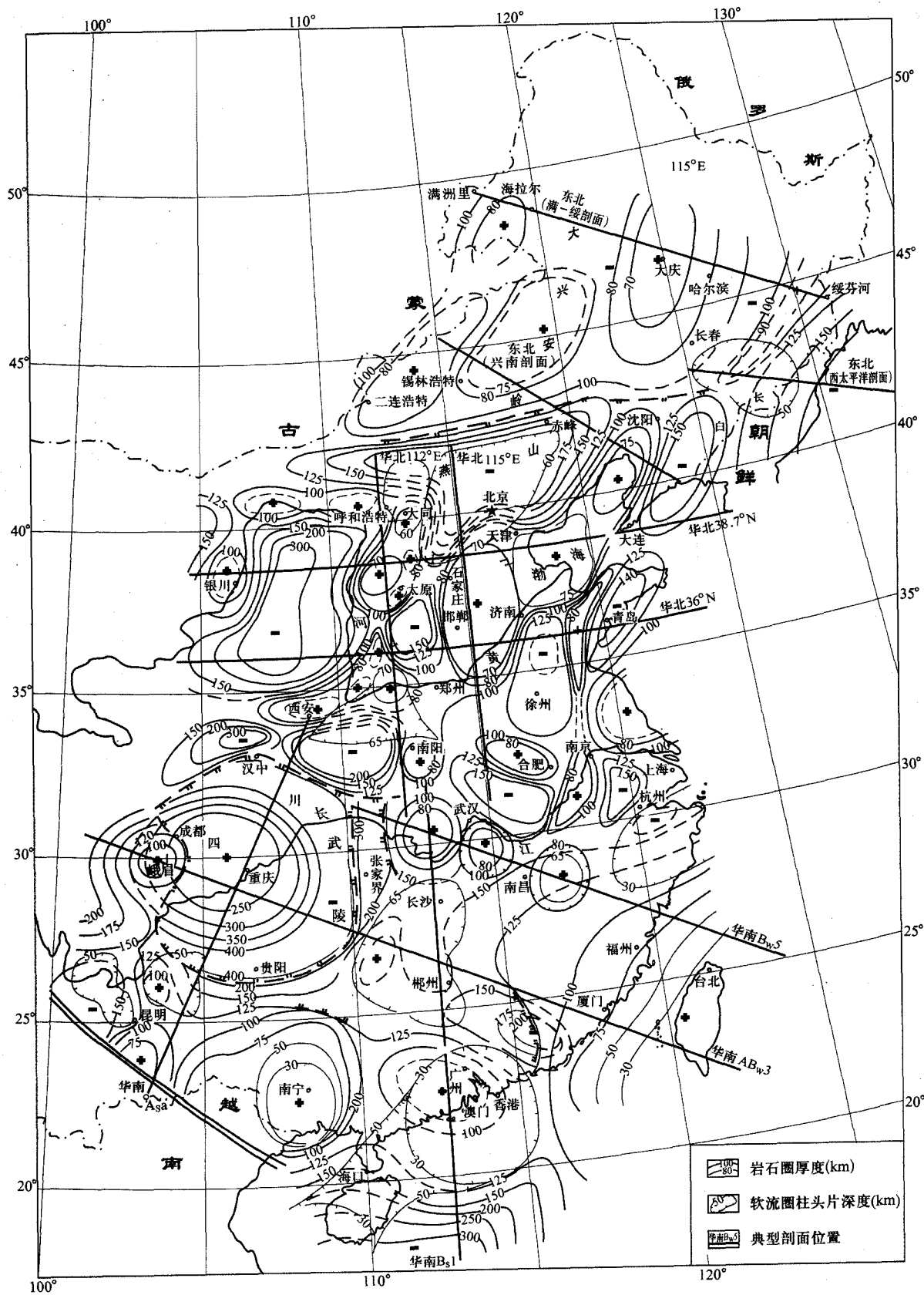


图3 中国东部(大陆)岩石圈构造图
(参考[18,32-33,35-37,41]文献资料及[20-21]文献原始数据编制)
Fig.3 Structure of lithosphere of eastern China

对隆起,并形成大地热流值高异常区;中生代软流圈上涌柱上方的地壳下部(Moho)因已调整而趋于平衡,现今已无明显隆起,其大地热流值也相对较低。

1.2 中国东部深部构造的基本特征

上地幔岩石圈-软流圈构造起伏变化,岩石圈西厚东薄,软流圈上涌发育且形式各异。大体可分为华南(构造线呈 NWW)、华北(构造线近 SN)、东北(构造线呈 NNE)三大块,其基本特征各异。整个中国东部深部构造中,软流圈上涌起主导作用(图 3)。

1.2.1 新生代软流圈上涌

大体分为两个时期,形成机制均为主动机制。(1)新生代早期形成的大型软流圈上涌柱,主要指华北平原区的渤海湾一下辽河柱(图 4)和苏北柱,均上涌至 75~80 km 深度,宽 300~400 km,范围大,其浅表为大型裂谷平原区,有玄武岩喷发,大地热流值高异常区($>80\sim90\text{ mW/m}^2$),典型低 Q_0 值区^[22],上涌时代以 E_2-E_3 期为主^[35]。(2)新生代晚期形成的软流圈上涌柱,一般上涌至 30~50 km 深度,上涌形式为柱状(大同、南宁区)、或斜坡状(台海区)、或柱头片状(长白山、粤海区)(图 5),均有玄武岩喷发,大地热流值有时很高($>80\sim90\text{ mW/m}^2$),上涌时代以 N_2-Q_1 期为主。

1.2.2 中生代软流圈上涌

中生代时期,中国东部(亚洲东部)上地幔深部“自始至终处于挤压构造背景下,其结果导致软流圈上涌”^[9],形成机制属主动机制。(1)华北地区:软流

圈柱状上涌^[35]。一般上涌约至 70 km 深度,大地热流值中等(60 mW/m^2),形成时代为燕山期(图 6,7,8)。邯郸软流圈上涌柱和中条软流圈上涌柱,均为不对称蘑菇状,具柱身和柱头(片)。邯郸软流圈上涌柱柱身巨大,柱头上方浅表为燕山地区,规模大,活动剧烈;中条软流圈上涌柱柱身中等,柱头上方浅表为豫西、东秦岭地区,活动较剧烈。两柱均沿古裂隙(燕山—太行古裂隙、中条—熊耳古裂隙)上涌,至上、下岩石圈间相对薄弱处侧涌形成柱头片。郯庐软流圈上涌柱沿构造带呈带状上涌,柱头不明显,可划分为三段:庐江-铜陵为南段,山东为中段,东北偏东部为北段。(2)华南地区:软流圈斜状(斜坡状)上涌。软流圈呈大面积斜状(斜坡状)上涌,一般由 150 km 深度上涌约至 80~90 km 深度,大地热流值相比华北地区高,分布于湘、赣、闽、浙地区。局部有软流圈上涌柱,如大冶和赣东北柱、粤海柱、个旧柱;有“柱头片”,如郴州柱头片、滇中柱头片等(图 9,10,11)。(3)东北地区:软流圈大范围上涌,埋深浅(一般深度 $<100\text{ km}$),且软流圈层巨厚(厚度约 300 km)(图 12,13)。依据大地电磁测深推断,大兴安岭南段,应为软流圈大范围上涌,时代为燕山期;大兴安岭北部,地震测深反映,莫霍面附近有一较厚特殊层,可能是软流圈上涌的残留层。松辽盆地软流圈上涌高度至 70 km 深度,范围广,面积约 $600\text{ km}\times400\text{ km}$,大地热流值较高($70\sim80\text{ mW/m}^2$),活动时间较长(燕山期—早新生代)。

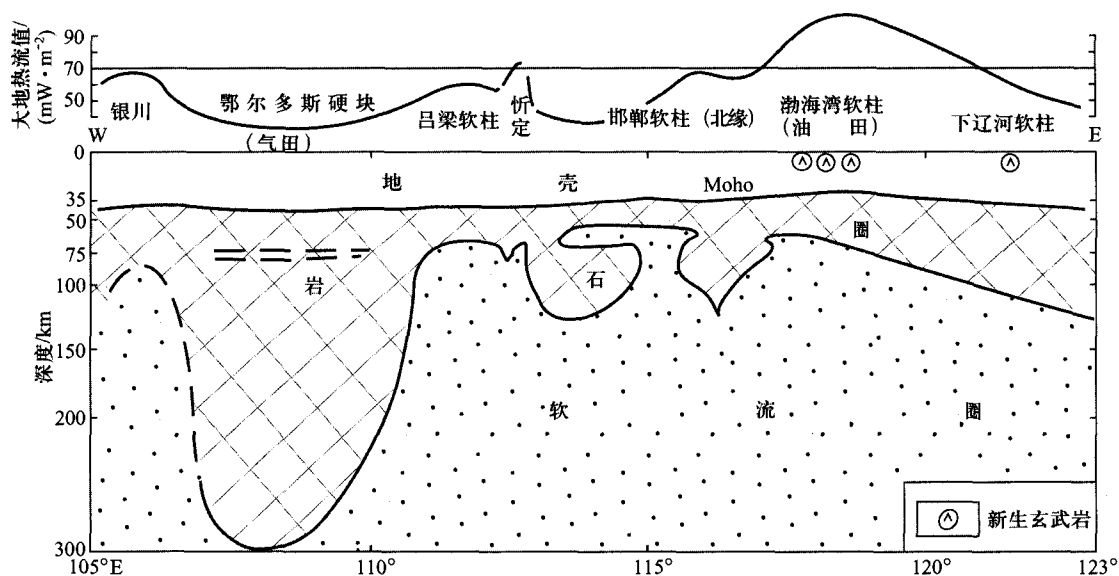
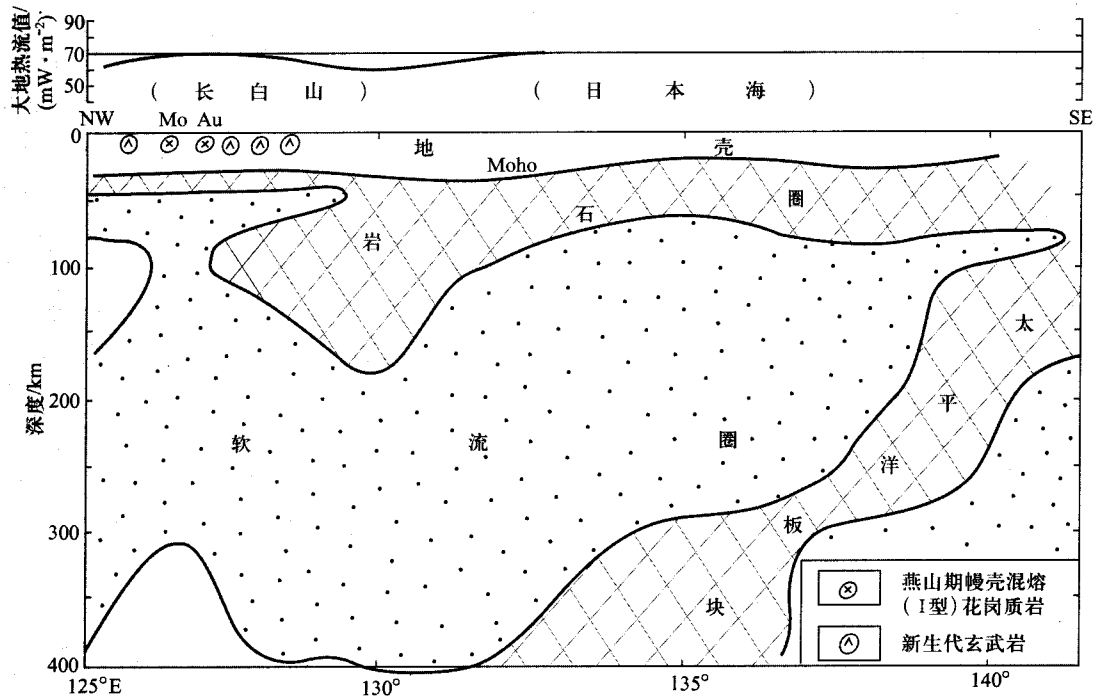
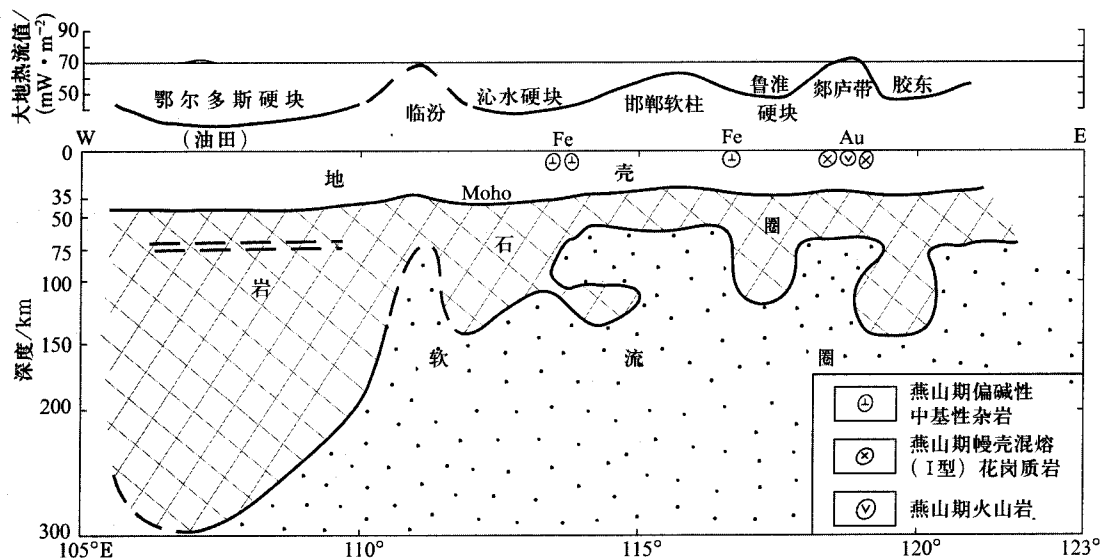


图 4 华北地震层析成像沿纬度 38.7°N 东西向剖面^[35]

Fig. 4 Seismic tomography image along 38.7°N E-W section of North China^[35]

图5 东北之西太平洋(北部)北东向地震层析剖面(东南段)^[18]Fig. 5 NW section (southeastern part) of northeast West Pacific^[18]图6 华北地震层析成像沿36°N之东西向剖面^[35]Fig. 6 Seismic tomography image along 36°N E-W section of North China^[35]

1.2.3 中、新生代软流圈上涌机制

形成机制均为被动机制,即在区域引张应力场作用下,其浅表首先裂陷沉盆,引发深部软流圈上涌(均衡调整),相应浅表无岩浆活动。(1)中生代晚期J₃—K₁形成的吕梁软流圈上涌柱,浅表为中生代NNE向宁武—静乐断陷盆地,盆地中心为J₂地层,盆地两侧依次分别是J₁—T、P—C、O—C、Pt地层,

地层产状甚陡。(2)中、新生代K₂—E₁形成的南阳、江汉、合肥软流圈上涌柱,浅表皆为断陷盆地。(3)晚新生代形成的海拉尔盆地、汾渭裂谷系,均引起软流圈不同程度上涌^[37]。

1.2.4 岩石圈厚度

形成于中生代,新生代时期受到一定程度改造(主要是边缘区)。鄂尔多斯和四川(含武陵带)盆地

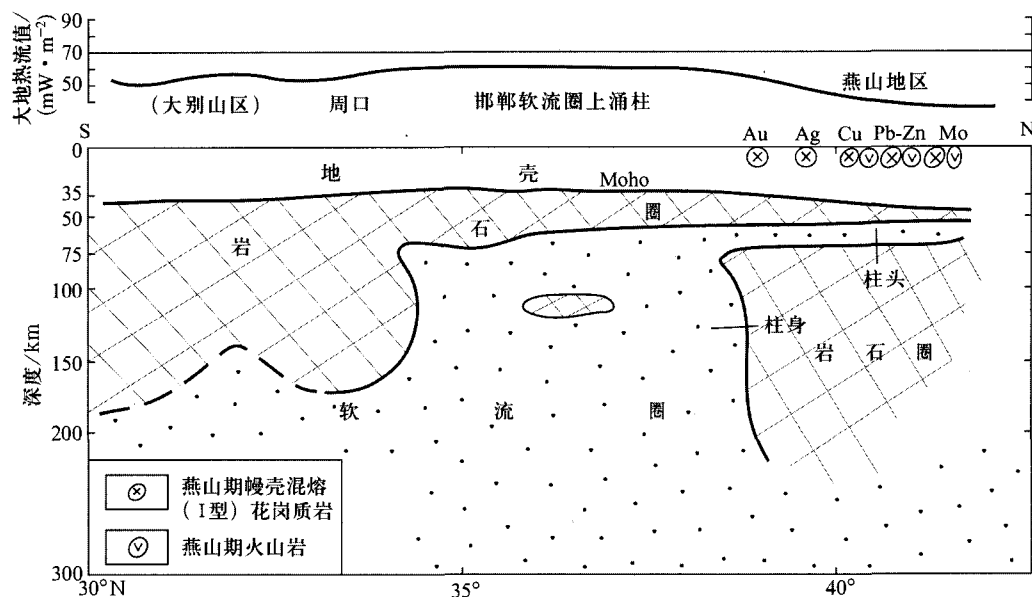


图7 华北地震层析成像沿115°E之南北向剖面^[35]
Fig. 7 Seismic tomography image along 115°E S-N section of North China^[35]

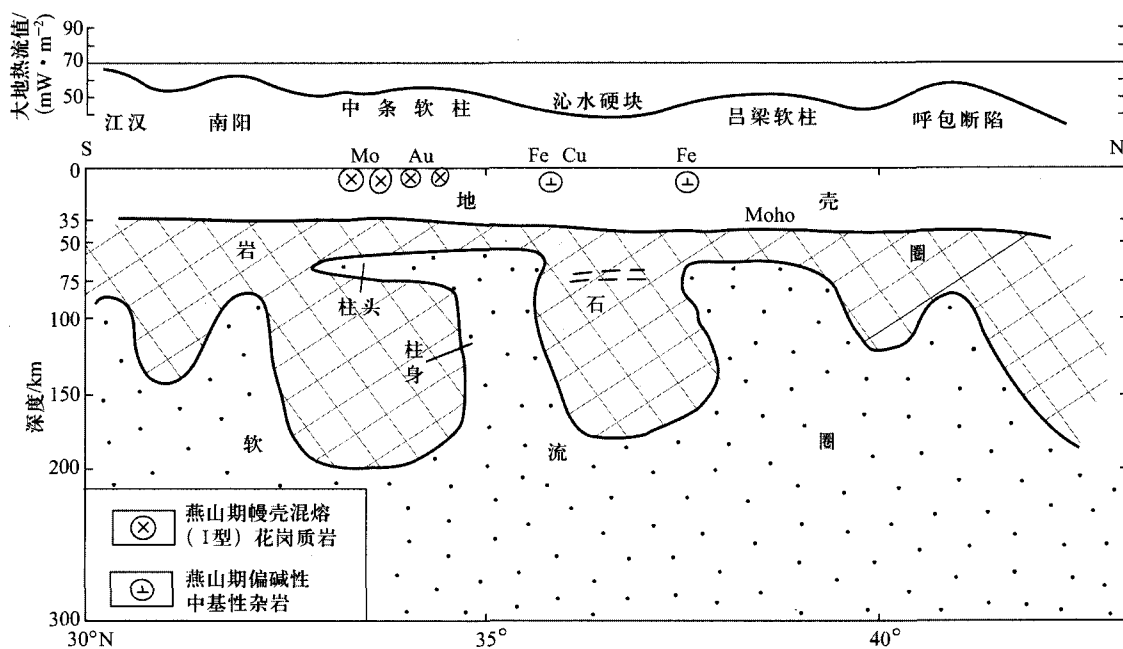


图8 华北地震层析成像沿112°E之南北向剖面^[35]
Fig. 8 Seismic tomography image along 112°E S-N section of North China^[35]

岩石圈皆厚。四川盆地(含武陵带)岩石圈周边巨厚,中部略薄(图14);鄂尔多斯则由东至西岩石圈逐步加厚。两者均位于中国东部的偏西地区,相应浅表皆为中生代大型构造沉积盆地。此外,还有一些较小的岩石圈厚区穿插于软流圈上涌体之间,如沁水、鲁淮、东秦岭、大别、苏南和粤东北等岩石圈厚区,相应浅表为构造盆地或造山带。

2 深部构造与矿集区

2.1 中生代软流圈上涌与金属矿集区

软流圈不同形式、不同程度的上涌,是形成浅表不同性质岩浆岩的根源,而岩浆活动又与多金属矿集区密切相关。

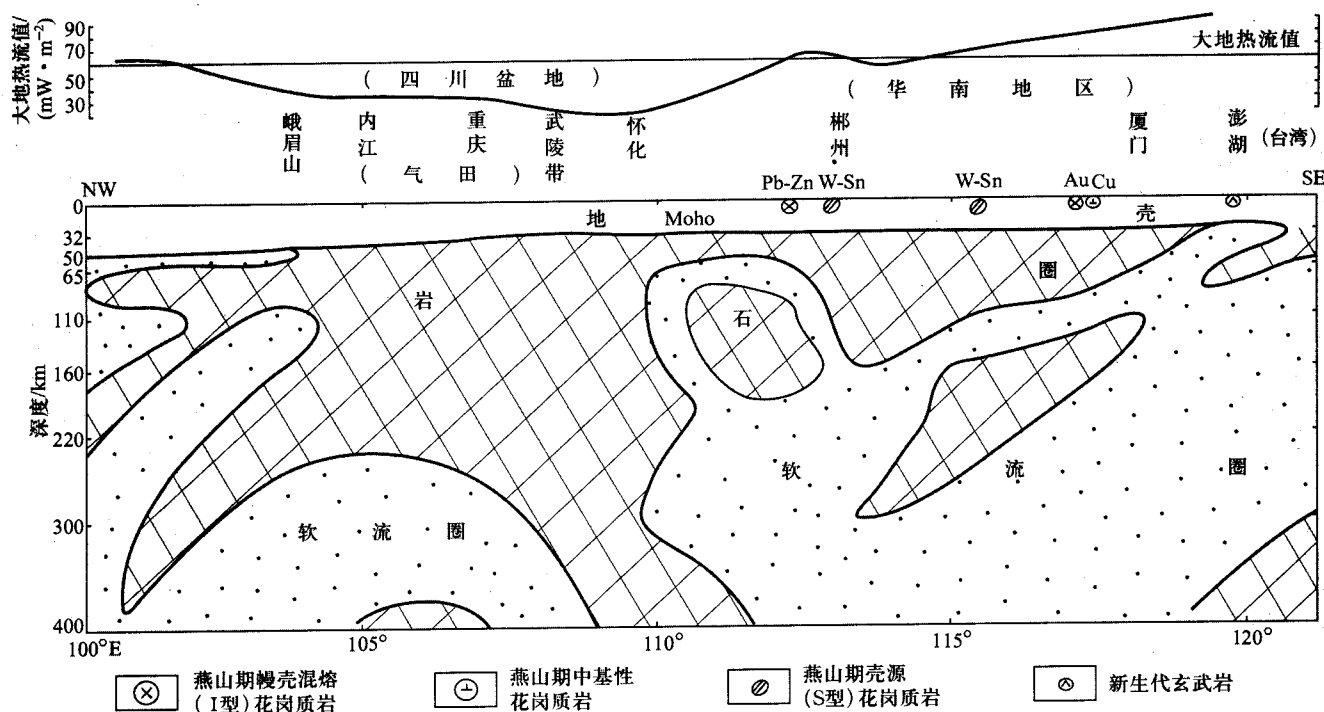


图9 华南AB_w3地震层析剖面

(据[20-21]文献原始数据编绘)

Fig.9 Seismic tomography of AB_w3 of South China

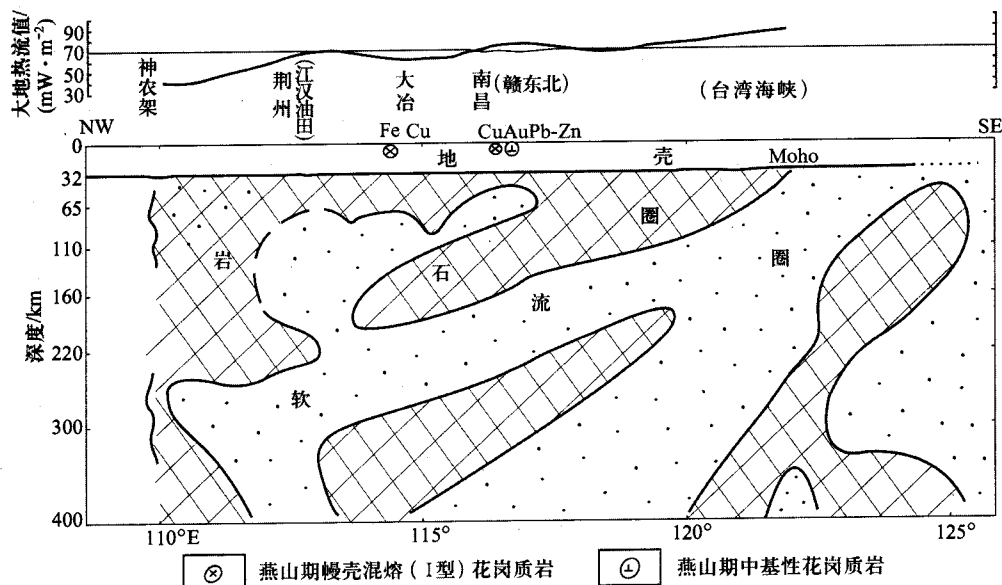


图10 华南B_w5地震层析剖面

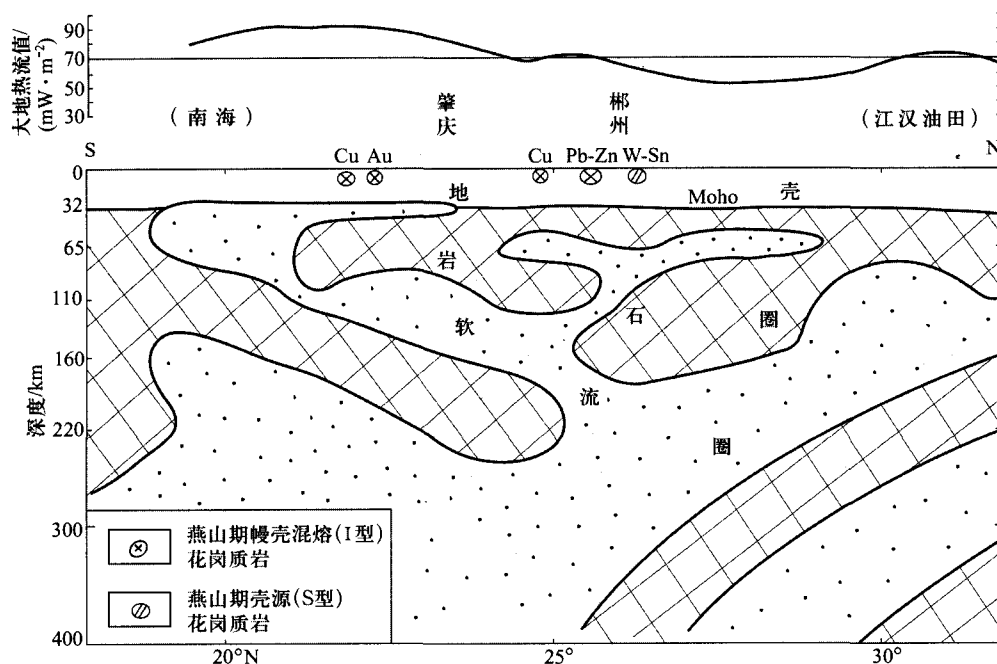
(据[20-21]文献原始数据编绘)

Fig.10 Seismic tomography of B_w5 of South China

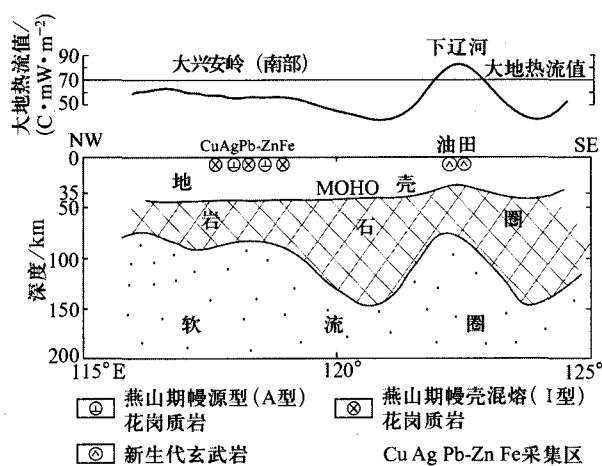
2.1.1 华北地区

中生代燕山期,由于上地幔深部处于强大的挤压应力场背景下,使华北克拉通中生代的岩石圈-软流圈动态平衡遭破坏,诱发软流圈沿岩石圈薄弱

环节——中、新元古代古裂隙熔融上涌,当热浮物质上涌至上岩石圈底界时,遇阻而沿上、下岩石圈之间的相对薄弱带侧涌,形成面积型柱头,柱身则与岩石圈厚区形成陡接触带^[35-36]。其与岩浆活动关系模式

图 11 华南 B₅₁ 地震层析剖面

(据[20-21]文献原始数据编绘)

Fig. 11 Seismic tomography of B₅₁ of South China图 12 东北大兴安岭(南部)大地
电磁测深剖面^[32]Fig. 12 Daxing'anling section of Northeast China^[32]

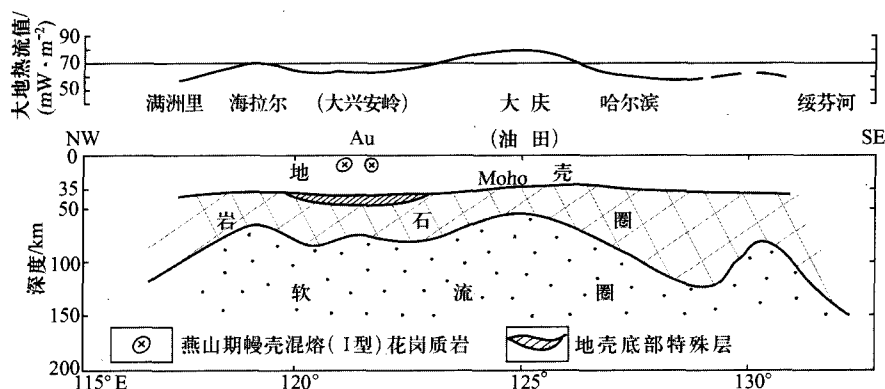
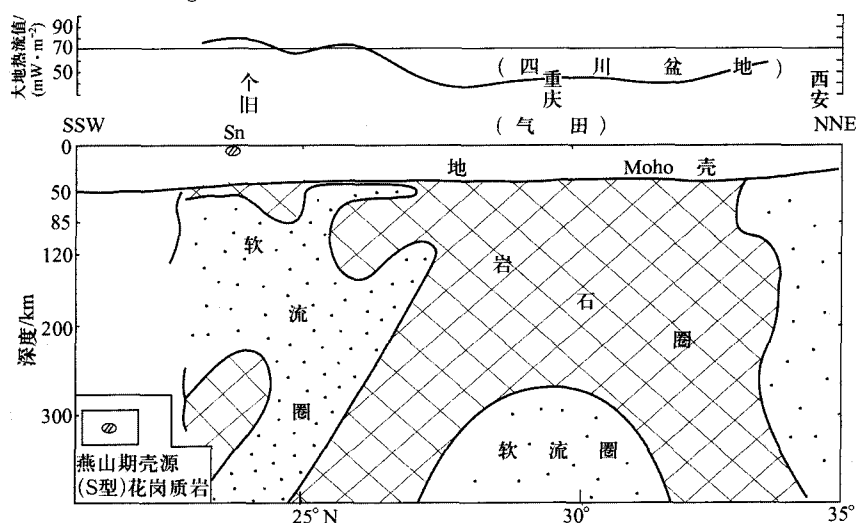
见图 15。

(1)柱头与金属矿集区。柱头一般埋深约 60~70 km,柱身上涌的热浮物质不断堆积于柱头中,通过热熔蚀薄的上岩石圈而注入壳层,并于浅表形成幔壳混熔的中酸性岩,出现相应的 Au、Mo、Cu、Pb-Zn、Ag 矿集区(图 16)。邯鄲柱:柱身巨大,宽 400~500 km,柱头向北分布于燕山造山带下,相应浅表形成燕山期岩浆岩(以 J₃—K₁期为峰期),包含大量中酸性侵入岩和火山岩,该区同时出现 Au、Mo、

Cu、Pb-Zn、Ag 矿集区。中条柱:柱身宽约 100 km,柱头向南分布于豫西—东秦岭造山带下,相应浅表形成燕山期岩浆岩(以 J₃—K₁期为峰期),主要是中酸性侵入岩,无火山岩,该区同时出现 Mo、Au 矿集区。郅庐柱:软流圈沿郅庐断裂带呈带状上涌,下窄(60~80 km)上宽(100 km),可划分为三段:庐江—铜陵为南段,山东为中段,东北偏东部为北段;其相应浅表(郅庐断裂带两侧)形成燕山期岩浆岩(以 J₃—K₁期为峰期),主要是中酸性侵入岩,出露少量火山岩,该区同时出现以 Au 为主体含 Cu、Fe、Mo 的矿集区。

(2)陡接触带与金属矿集区。柱身与岩石圈厚区形成的陡接触带,因热力集中,易使该处岩石圈破裂,热浮物质快速上涌至地壳底部(底侵),再注入浅表,形成一套偏碱性中基性侵入杂岩,此杂岩与浅表碳酸盐岩地层接触,便出现富 Fe(Fe、Cu)矿集区(图 16)。邯鄲柱与鲁淮岩石圈厚区陡接触带位于济南—邹平地区,邯鄲柱与沁水岩石圈厚区陡接触带位于南太行(邯鄲、平顺、安阳等)地区,中条柱与沁水岩石圈厚区陡接触带位于塔儿山—二峰山地区,吕梁柱与沁水岩石圈厚区陡接触带位于弧堰山地区^[36]。

2.1.2 东北地区(以大兴安岭地区为主)

图 13 东北满洲里—绥芬河大地电磁测深剖面^[33]Fig. 13 Manzhouli-Suifenhe section of Northeast China^[33]图 14 华南 A_{sa} 地震层析剖面

(据[20-21]文献原始数据编绘)

Fig. 14 Seismic tomography of A_{sa} of South China

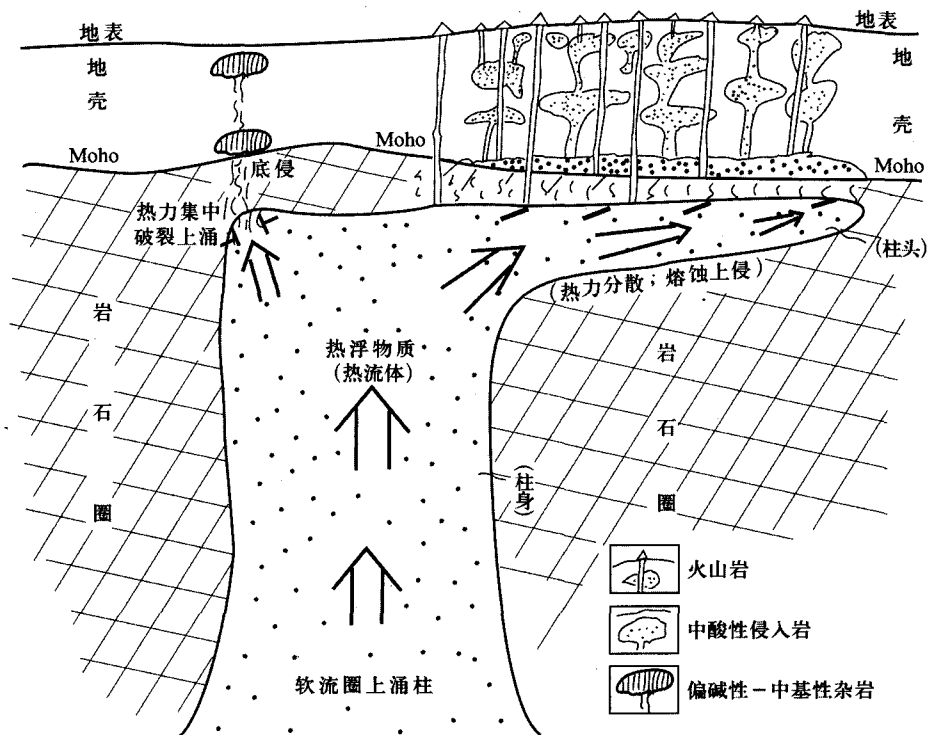
西太平洋地震层析剖面^[18]反映,大兴安岭南段岩石圈厚约 90~100 km,平稳无起伏。而国家地震局之地学断面^[32]中大地测深剖面反映,该区段上地幔高导层(相当于软流圈层)已上隆约至 80 km 深度。上述二成果明显矛盾。按邢作云等的“华北模式”^[35-36]推测,如软流圈上涌到 80 km 深度,其上部视电阻率又较低,加之本区莫霍面附近又有 5~10 km 厚特殊层,表明软流圈已涌至莫霍面附近,并可熔穿下壳,在浅表形成幔壳混熔的 I 型和 A 型花岗质岩,相应形成 Cu、Pb-Zn、Fe、Ag、Au 等矿集区。肖庆辉等^[8]对该区岩石和同位素地球化学特征及本区实际矿产分布规律研究则完全证实了上述论断。故而本文认为国家地震局之地学断面^[32](图 12)反映的成果较合理。

2.1.3 华南地区

(1)符合“华南模式”的主体区域(图 17)。指

湘、赣、闽、浙的大部分地区、广东地区和云南个旧地区。湘、赣、闽、浙的广大地区,软流圈由 130 km 深度斜上涌至 90 km 深度;广东地区,粤海软流圈上涌至 90 km 深度,范围较大(400~500 km 宽);云南个旧地区,软流圈上涌至 75 km 深度,范围小(100 km 宽)。该主体部分软流圈上涌为“华南模式”:由于大面积软流圈上涌至 130~90 km 深度,热浮物质虽不能熔穿上部岩石圈(厚约 60~100 km),但其大范围的热能通过热烘烤(热传导),可使壳层部分重熔,于浅表形成典型的壳源型(S 型)花岗质岩,且大地热流值较高(约 70~80 mW/m²),同时,相应出现 W、Sn、V、Nd、Ta 等矿集区。

(2)符合“华北模式”^[35]的局部地区。该类地区指鄂东南、赣东北(德兴一带)、滇中及浙、闽、粤沿海带。其软流圈上涌类似“华北模式”。鄂东南(及湘东北)地区:大冶软流圈上涌柱斜上涌至 75 km 深

图 15 华北地区中生代燕山期软流圈上涌与岩浆构造活动关系模式图^[35-36]Fig. 15 Relation of asthenosphere upwelling and magma structural action at Yanshanian of Mesozoic, North China^[35-36]

度,可熔穿上岩石圈,幔壳混熔,于浅表形成燕山期中酸性花岗质岩,并相应出现 Fe、Cu 矿集区。德兴地区:赣东北软流圈上涌柱斜上涌至 65 km 深度,可熔穿上岩石圈,于浅表形成燕山期幔源成分较重的中酸性花岗质岩,并相应出现 Cu、Pb-Zn、Au、Ag 矿集区。滇中地区:滇中软流圈呈柱头片状上涌,深度 50 km,浅表相应形成燕山期中酸性花岗质岩,并出现 Cu、Fe 等矿集区。浙、闽、粤沿海带:软流圈大范围上涌约至 80 km 深度上下,为中国东部高热流值区,大地热流值达 80~90 mW/m²,软流圈层的热浮物质可熔穿上部岩石圈而注入壳层,形成幔壳混熔的中酸性花岗质岩,浅表相应出现 Au、Cu 等矿集区(图 17)。

(3)两种模式兼有的混合地区。郴州附近(湘东南、南岭地区),软流圈上涌的柱头片深度约 65 km,柱头内热浮物质可熔穿上部岩石圈注入壳层(幔壳混熔),形成中酸性岩(I型),也可热烘烤(热传导)使壳层部分重熔形成壳源型花岗质岩(S型),使浅表相应出现 W、Sn 和 Pb-Zn、Cu 两类矿集区。

2.2 中、新生代软流圈上涌与油气资源

(1)松辽软流圈上涌柱:上涌达 70~75 km 深度,大地热流值较高,约 80 mW/m²,活动时间长

(K—E),范围大,浅表形成断陷盆地,并相应出现大型油田——大庆油田。

(2)南阳、合肥、江汉软流圈上涌柱:华北南缘的南阳、合肥、江汉软流圈上涌柱,被动机制形成,上涌达 80 km 深度,大地热流值略高,约 70 mW/m²,浅表形成断陷盆地,无岩浆活动,活动时间较长(K₂—E₁),范围较小,并相应形成较小型油田。

(3)华北地区东部的渤海湾—下辽河及苏北两个软流圈上涌柱:E₁—E₂时期,太平洋板块向西俯冲,深部为挤压应力场,促使软流圈上涌,致使浅表形成大型断陷盆地,并伴有大量玄武岩喷发,大地热流值为高热异常区,达 85~100 mW/m²,应为主动机制形成。浅表亦相应形成大型油田。

2.3 岩石圈厚区与能源矿产

岩石圈厚区形成于中生代燕山期,而新生代时期可能对其边缘进行些微改造。(1)华北地区的鲁淮、沁水及鄂尔多斯东缘,岩石圈厚约 120~150 km,其浅表为中生代构造盆地,存留上古生界地层,相应构成大型煤田区。(2)鄂尔多斯和四川块(包括武陵带),岩石圈巨厚,约 300 km,武陵带最厚达 400 km,其大地热流值甚低,约 40~30 mW/m²,浅表皆为中生代大型构造沉积盆地,是我国大型气田区。

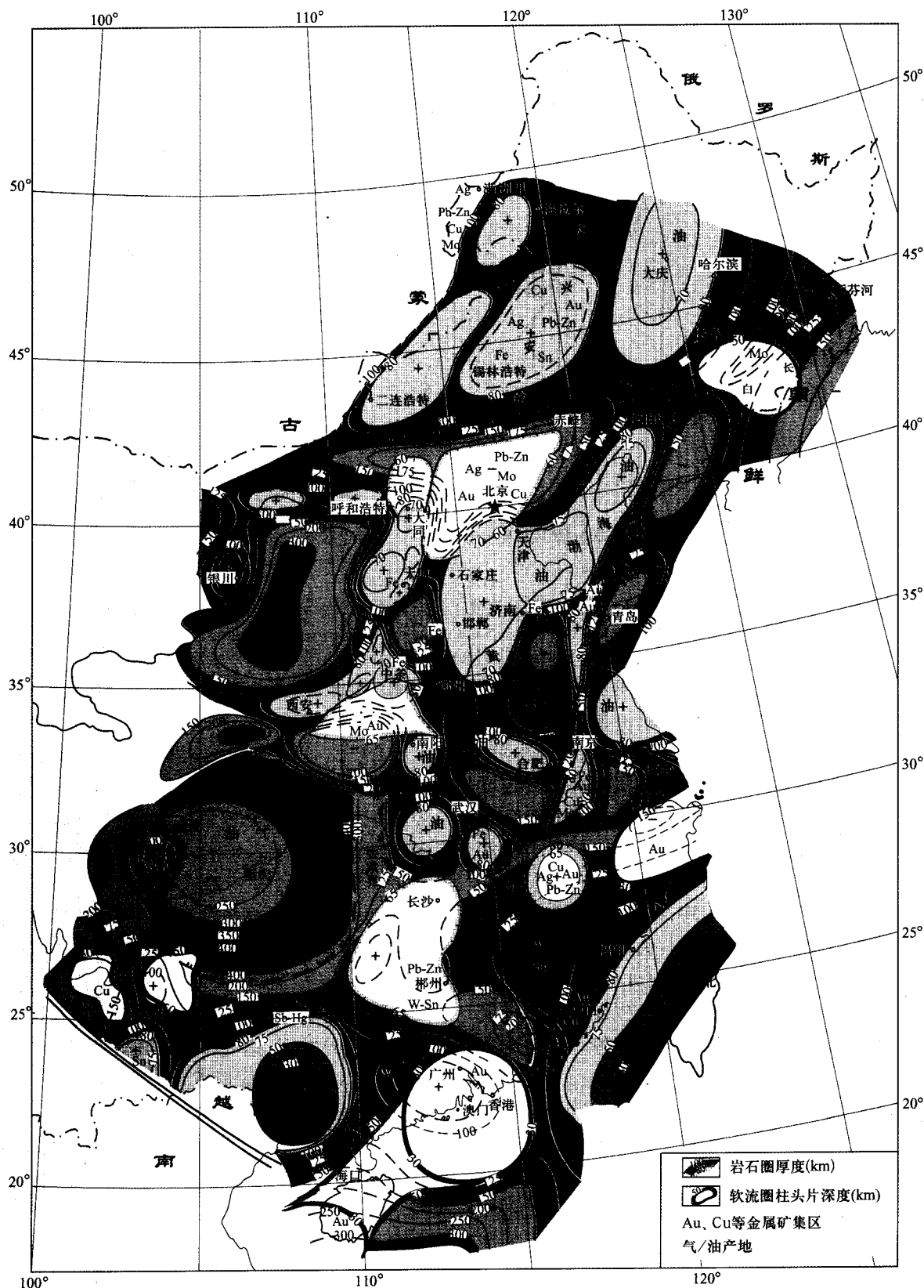


图 16 中国东部(大陆)岩石圈构造与矿集区分布图

(参考[18,32-33,35-37,41]文献资料及[20-21]文献原始数据编制,矿产部分参考[2-3,6,30-31,42]文献资料编制)

Fig. 16 Map of lithosphere structure and mineralization-concentrated region of eastern China

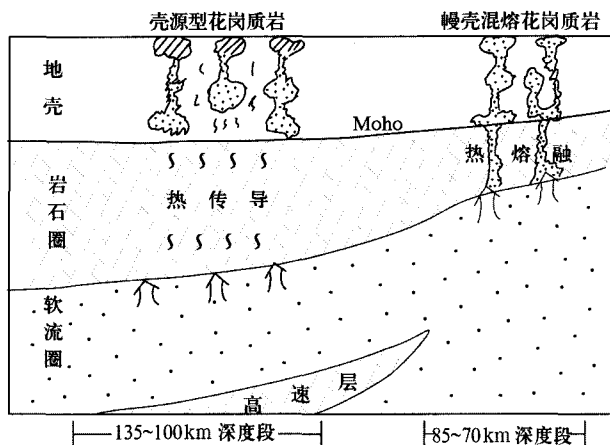


图 17 华南地区中生代燕山期软流圈上涌
与岩浆构造活动关系模式图

Fig. 17 Relation of asthenosphere upwelling and magma structural action at Yanshanian of Mesozoic, South China

3 小结

(1)关于中、新生代深部构造的识别。首先,中生代燕山期深部构造影像可存留至今。同深度的软流圈温度要比岩石圈高出 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,而决定地震波速的深部温度场变化甚慢,据热力学衰减计算可知,较大型(如 100 km 宽)软流圈上涌体,可存留 $2\sim 3$ 亿年之久。其次,要从地震层析成象中将中、新生代深部构造区分,除利用大地热流值的差异外,还应对应大地电磁测深、莫霍面特征、浅表岩浆、矿产的性质及时代等进行详细研究。

(2)中国东部深部构造基本特征。总特征是:上地幔岩石圈-软流圈起伏变化,岩石圈西厚东薄,东侧软流圈上涌明显,依特征可分为东北、华北、华南三大块及中、新生代两个世代,而其中软流圈上涌起主导作用。新生代软流圈柱状上涌,以华北渤海湾一下辽河及苏北为典型,上涌至 $75\sim 80\text{ km}$ 深度,时代以 E_2-E_3 为主,大地热流值甚高,达 $80\sim 90\text{ mW/m}^2$,浅表形成大型断陷盆地。

中生代软流圈上涌特色鲜明,时代为燕山期,特别是 J_3-K_1 期。华北以大型柱状为特色,上涌至 70 km 深度,如邯郸柱、中条柱、郯庐柱。华南以大面积斜上涌为特征,上涌至 $130\sim 90\text{ km}$ 深度。东北区则软流圈巨厚,岩石圈较薄,如松辽、大兴安岭软流圈柱,上涌至 $70\sim 80\text{ km}$ 深度。岩石圈厚区为中生代存留,如鄂尔多斯及四川(含武陵带)两大岩石圈厚区,厚度达 $300\sim 400\text{ km}$ 。另外,值得一提的

是,在四川西侧还发现“峨眉山幔柱”的深部影像,时代应为晚古生代(250 Ma)。

(3)软流圈上涌与浅表岩浆活动、矿集区分布密切相关。中生代燕山期岩浆活动的根源是软流圈上涌,并与金属矿集区的形成密切相关。华北软流圈沿元古宙古裂陷上涌,形成柱身和柱头,上涌高度约 70 km ,结合壳层特性,浅表相应形成燕山(邯郸柱头)、豫西—东秦岭(中条柱头)、郯庐三个区带的幔壳混熔型花岗质岩,并出现 Au 、 Mo 、 Cu 、 Pb-Zn 、 Fe 等矿集区。东北大兴安岭南段,软流圈大面积上涌,因壳层为显生宙,故形成幔源成分较重的花岗质岩,浅表相应出现 Cu 、 Pb-Zn 、 Fe 、 Ag 、 An 等矿集区。华南主体部分软流圈大面积斜上涌,浅表大地热流值较高,因长期烘烤(热传导),使地壳部分重熔,形成较大范围的壳源型花岗质岩,并相应出现 W 、 Sn 、 V 、 Nd 、 Ta 等矿集区。大冶、赣东北、滇中、沿海带的软流圈上涌至 $50\sim 70\text{ km}$ 深度,形成与华北类似的中酸性岩,浅表相应出现 Cu 、 Pb-Zn 、 Fe 、 Au 矿集区;郴州一带(湘东南、南岭地区)较特殊,软流圈上涌柱关深度达 65 km ,浅表相应出现 W 、 Sn 和 Cu 、 Pb-Zn 矿集区。中、新生代软流圈呈柱状上涌,浅表形成大型断陷盆地(松辽),相应矿集区为大型油田——大庆油田。新生代软流圈亦呈柱状上涌,浅表形成大陆裂陷盆地,如渤海湾一下辽河、苏北等地,伴有玄武岩喷发,相应形成较大型油田。中生代形成的岩石圈厚区则成为大型气田区。

(4)岩石圈减薄的主因是软流圈不同时代、不同形式、不同程度的上涌。中生代燕山期是中国东部大陆内部岩石圈减薄的主要时期,减薄时域为 J_1 晚期至 K_1 晚期($180\sim 100\text{ Ma}$), J_3-K_1 ($145\sim 120\text{ Ma}$) 为高峰期,减薄地域主要位于软流圈柱身上方。新生代是中国东部沿海地区岩石圈减薄的主要时期,减薄时域为 E_2 至 E_3 期($55\sim 24\text{ Ma}$),减薄地域也主要位于软流圈柱身上方。现今观测到的岩石圈减薄,应为中生代、新生代两个世代减薄的综合。

成文过程中得到了翟裕生院士、任纪舜院士和肖庆辉教授的悉心指导,得到了袁学成、邓晋福、路凤香、熊维纲、曾华霖、莫宣学、邵济安、王焰新、马昌前等教授及袁晓萍编审的热情帮助,更得到了《地学前缘》编辑部的大力支持,在此一并致谢!

References:

- [1] Ma Xingyuan. The lithosphere geodynamics compendium in

- China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 76 (in Chinese).
- [2] Zhai Yusheng, Zhang Hu, Song Honglin, et al. Large structure and superlarge deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(in Chinese).
- [3] Pei Rongfu, Zhai Yusheng, Zhang Benren, et al. Deep-seated tectonism and mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [4] Li Tingdong. Lithospheric tectonic units of China[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 700-710(in Chinese).
- [5] Ren Jishun, Yang Weiran. Lithosphere architecture and structure-magma evolution of East China[M]. Beijing: Atomic Energy press, 1998(in Chinese).
- [6] Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere-aesthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 309-314(in Chinese).
- [7] Deng Jinfu, Su Shangguo, Liu Cui, et al. Discussion on the lithospheric thinning of the North China Craton: delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism [J]? Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 105-119.
- [8] Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 343-352(in Chinese).
- [9] Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Wu Guangying, et al. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 730-750(in Chinese).
- [10] Yuan Xuecheng. Atlas of geophysics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996(in Chinese).
- [11] Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Zhang Ruisheng, et al. Phanerozoic mantle secular evolution beneath eastern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 61-67.
- [12] Yang Weiran. Some problems of opening-closing tectonics [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (3): 195-199(in Chinese).
- [13] Yang Weiran, Sun Jiyuan, Ji Kecheng, et al. Comparison of continental rift valley [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996(in Chinese).
- [14] Liu Guodong. Cenozoic rift system of North China plain and the deep internal processes[M]//Research on crustal movement(1). Beijing: Seismological Press, 1985: 17-25 (in Chinese).
- [15] Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. Study for three-dimensional structure of earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 497-503(in Chinese).
- [16] Wang Jiyang. Compilation of the Chinese continental geothermal value data[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4): 351(in Chinese).
- [17] Hu Shenbiao, He Lijun, Wang Jiyang. Heat flow in the continental area of China: a new data set[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179: 407-419.
- [18] Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui, et al. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (1): 56-63 (in Chinese).
- [19] Liu Futian, Qu Kexin, Wu Hua, et al. ST image of North China [J]. Journal of Geophysics, 1986, 29: 442-449 (in Chinese).
- [20] Liu Jianhua, Wu Hua, Liu Futian. Features of 3-D velocity distribution and lithosphere structure in South China and its contigious sea area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(4): 483-492(in Chinese).
- [21] Liu Jianhua, Liu Futian, Wu Hua, et al. Three dimensional velocity images of the crust and upper mantle beneath North-South zone in China[J]. Chinese Journal of Geophys, 1989, 32(2): 143-153(in Chinese).
- [22] Liu Jianhua, Liu Futian, Yan Xiaowei, et al. A study of Lg coda attenuation beneath North China: seismic imaging Lg coda Q₀[J]. Chinese Journal Geophysics, 2004, 47(6) : 1044-1052 (in Chinese).
- [23] Taylor S R, Toksoz M N. Three-dimensional crust and upper mantle structure of the northeastern United States [J]. J Geophys Res, 1979, 84(B13): 7627-7644.
- [24] Sergell, Guust N. The upper mantle beneath southeast Asia from S velocity tomography [J]. J Geophys Res, 2003, 108 (B1): 20-48.
- [25] Zhao Dapeng, Yamada Akira, O Hta Yuhei. Precisely measured travel times of mantle body waves; implications for mantle heterogeneity and tomography[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 37-47.
- [26] Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Mesozonic subducted slabs under Siberia [J]. Nature, 1999, 397(21): 246-249.
- [27] Depaolo D J, Daley E E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithosphere thinning during continental extension[J]. Chem Geol, 2000, 169: 157-185.
- [28] Sun Jiyuan, Xing Jishan, Ye Zhiguang, et al. Intraplate structure and deep process in the North China region[J]. Geological Science and Technology Information, 1992, 11(1): 4-19.
- [29] Xing Jishan, Liu Jianhua, Zhao Jinquan. Deep seated tectonics in the North intraplate [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2002, 111(4): 3-12(in Chinese).
- [30] Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. Min-

- eral Deposits, 2005, 24(2): 99-107 (in Chinese).
- [31] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188 (in Chinese).
- [32] GGTMC, CSB. Explannation of GGT from Dongwuzhumoxinpi of Inner Mongolia to Donggou of Liaoning Province [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 59 (in Chinese).
- [33] Changchun University of Geology. Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transects of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [34] Zhao Yonggui, Zhong Dalai, Liu Jianhua, et al. Fundamentals of geological interpretation for seismic tomography and its application to studying of West Yunnan's deep structure [J]. Chinese Journal of Geology, 1992(2): 105-113 (in Chinese).
- [35] Xing Zuoyun, Xing Jishan, Zhao Bin, et al. Identification of deep structure of two episodes in North China and its significance—Yanshanian movement and deep process [J]. Geological Review, 2006, 52(4): 433-441 (in Chinese).
- [36] Xing Zuoyun, Xing Jishan, Zhao Bin. Deep-seated structure of North China [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 26(6): 17-23 (in Chinese).
- [37] Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, et al. The coupling of Fenwei rift valley system and orogen and its formation [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 247-262 (in Chinese).
- [38] He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. Heat lithosphere structural characteristics of eastern China continent [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(9): 966-969 (in Chinese).
- [39] Wang Yang, Deng Jinfu, Wang Jiyang, et al. Terrestrial heat flow pattern and thermo-tectonic domains in the continental area of China [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001, 18(1): 52-58 (in Chinese).
- [40] Wang Liangshu, Li Cheng, Shi Yangshen. Distributions of geotemperature and terrestrial heat flow density in lower Yangtze area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(4): 469-476 (in Chinese).
- [41] Li Cheng, Wang Liangshu, Shi Yangshen. Deep thermal state and lithospheric thickness in the lower Yangtze area [J]. Journal of Nanjing University, 1996, 32(3): 494-499 (in Chinese).
- [42] Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. Large-scale metallogenesis and petroleum field formation in continental China—constraints from the lithosphere [J]. Geology in China, 2006, 33(4): 852-865 (in Chinese).
- 1987; 76.
- [2] 翟裕生, 张湖, 宋鸿林, 等. 大型构造与超大型矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [3] 裴荣富, 翟裕生, 张本仁, 等. 深部构造作用与成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [4] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元 [J]. 中国地质, 2006, 33(4): 700-710.
- [5] 任纪舜, 杨巍然. 中国东部岩石圈构造与构造岩浆演化 [M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
- [6] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境 [J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-314.
- [7] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代 [J]? 地学前缘, 2006, 13(2): 105-119.
- [8] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究 [J]. 中国地质, 2005, 32(3): 343-352.
- [9] 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 等. 中国东部中生代软流层上涌造山作用 [J]. 中国地质, 2006, 33(4): 730-750.
- [10] 袁学成. 中国地球物理图集 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [11] 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等. 华北克拉通东部显生宙地幔演化 [J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 61-67.
- [12] 杨巍然. 开合构造研究中的几个问题 [J]. 地质通报, 2004, 23(3): 195-199.
- [13] 杨巍然, 孙继源, 纪克诚, 等. 大陆裂谷对比 [M]. 中国地质大学出版社, 1996.
- [14] 刘国栋. 华北平原新生代裂谷系及其深部过程 [M] // 现代地壳运动研究 (1). 北京: 地震出版社, 1985: 17-25.
- [15] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 497-503.
- [16] 汪集旸. 中国大陆地区大地热流值数据汇编 [J]. 地震地质, 1990, 12(4): 351.
- [18] 邵济安, 刘福田, 陈琨. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用的关系 [J]. 地质学报, 2001, 75(1): 56-63.
- [19] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 华北地区的地震层面成像 [J]. 地球物理学报, 1986, 29: 442-449.
- [20] 刘建华, 吴华, 刘福田. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 483-492.
- [21] 刘建华, 刘福田, 吴华, 等. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图象 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 143-153.
- [22] 刘建华, 刘福田, 阎晓蔚, 等. 华北地区 Lg 尾波衰减研究—Lg 尾波 Q₀ 地震成像 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1044-1052.
- [28] 孙继源, 邢集善, 叶志光, 等. 华北地区板内构造及深部过程初探 [J]. 地质科技情报, 1992, 11(1): 4-19.
- [29] 邢集善, 刘建华, 赵晋泉. 华北板内深部构造 [J]. 山西地震, 2002, 11(4): 3-12.

参考文献:

[1] 马杏垣. 中国岩石圈动力学纲要 [M]. 北京: 地质出版社,

- [30] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 99-107.
- [31] 毛景文,谢桂青,张作衡,等. 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[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
- [32] 国家地震局地质断面. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面说明书[M]. 北京:地震出版社, 1992: 59.
- [33] 长春地质学院. 中国满洲里—绥芬河地质断面[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [34] 赵永贵,钟大赉,刘建华,等. 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[J]. 地质科学, 1992(2): 105-113.
- [35] 邢作云,邢集善,赵斌,等. 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[J]. 地质论评, 2006, 52(4): 433-441.
- [36] 邢作云,邢集善,赵斌. 华北地区深部构造特征[J]. 地质科技情报, 2006, 26(6): 17-23.
- [37] 邢作云,赵斌,涂美义,等. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 247-262.
- [38] 何丽娟,胡圣标,汪集旻. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征[J]. 自然科学进展, 2001, 11(9): 966-969.
- [39] 汪洋,邓晋福,汪集旻. 中国大陆热流分布特征及热-构造分区[J]. 中国科学院研究生院学报, 2001, 18(1): 52-58.
- [40] 王良书,李成,施央申,等. 下扬子区地温场和大地热流密度分布[J]. 地球物理学报, 1995, 38(4): 469-476.
- [41] 李成,王良书,施央申,等. 下扬子区深部热状态与岩石圈厚度[J]. 南京大学学报, 1996, 32(3): 494-499.
- [42] 邱瑞照,李廷栋,邓晋福,等. 中国大陆大规模成矿作用油气田形成——来自岩石圈的约束[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 852-865.

“白垩纪温室世界的快速环境/气候变化:海洋陆地相互作用与松辽盆地大陆科学深钻计划”国际研讨会

2007年2月,由我国学者领衔申请的IGCP 555(白垩纪温室世界快速环境/气候变化:海洋-陆地作用)项目在联合国教科文组织(UNESCO)和国际地科联(IUGS)所属的国际地球科学计划(IGCP)执行局第35届会议上得到批准;2007年4月,由我国学者领衔申请的又一国际地学项目——国际大陆科学钻探国际研讨会项目(白垩纪松辽盆地大陆科学深钻计划)又得到国际大陆钻探计划(ICDP)执行委员会的批准。此两项目的成功立项是我国在国际白垩纪研究科学领域取得的又一突破。

IGCP 555项目将主要对白垩纪“温室气候”期间发生的一系列快速气候/环境变化记录,如白垩纪广泛分布的富有机质黑色页岩、富集铁氧化物的大洋红层、陆地和海洋生物的快速变迁等开展重点研究;探讨白垩纪温室世界快速气候/环境变化发生的过程、原因和结果,为现代全球变化问题提供重要参照。而国际大陆科学钻探国际研讨会项目(白垩纪松辽盆地大陆科学深钻计划),将在松辽盆地现有大陆科学钻探项目“松科1井(SK-1, SK-2)”的基础上,着重探讨松辽盆地白垩系从阿尔比到白垩纪/侏罗纪界线的科学钻探——松科2井的设计和 implementation 问题。如松科2井深钻项目得以实施,松科2井将与松科1井一起构成世界上首例完整而连续的白垩纪陆相沉积记录,从而为IGCP 555项目的成功实施打下坚实的基础。

基于以上两个国际项目,由国土资源部国际合作与科技司、国家科学技术部基础研究司、国家自然科学基金委员会地球科学部、中国地质调查局、国际地球科学计划委员会(IGCP)、国际大陆钻探计划委员会(ICDP)、国际地球科学计划中国国家委员会、国际大陆钻探计划中国国家委员会共同发起,定于2007年8月28—30日在中国大庆召开“白垩纪温室世界的快速环境/气候变化:海洋陆地相互作用与松辽盆地大陆科学深钻计划”国际研讨会。此次会议由大庆油田有限责任公司、中国地质大学(北京)、地质过程与矿产资源国家重点实验室、科学钻探国家专业实验室共同承办。预计将有来自美国、俄罗斯、英国、奥地利、德国、日本、韩国等10多个国家和地区约40余名专家与会,就有关科学问题开展研讨和成果交流。此次研讨会还将对IGCP 555项目的研究目标、组织形式、地区合作等进行深入讨论,并对松科2井的井位选择、钻探和取心计划进行探讨。会议将对所有愿意参会的人员开放。欲参会者请与中国地质大学(北京)黄永建博士(huangyj@cugb.edu.cn)联系。