

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.06049

深部地质结构对浅层地质与成矿作用的制约 ——以中国东部大陆及海区为例

耿树方, 刘平, 寇彩化

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要:根据十余年来参加中国岩石圈三维结构研究和国际合作编图资料,将深部地质结构与浅层地质、成矿特征进行统一的综合分析研究,对中国东部及邻近海域地质构造取得一些新认识,提出一些新观点:(1)在中国大陆及邻近海域 400 km 深度内,划分出 5 层地质结构,其中第 3、4 层之间的变化制约了浅层地质与成矿作用;(2)中国大陆及海区受周边动力挤压,其中西部挤压力大于东部,导致西部软流圈物质经 4 条路径向东流动,使东部汇聚巨大巨厚的软流圈,形成独特的软流圈巨量热能(力)-动力主体动力区,构成了亚洲大陆第 4 个主体动力区;(3)太平洋板块俯冲力制约了北纬 42°40′ 以北的完达山及俄罗斯远东地区,菲律宾海板块俯冲力制约了台湾和中国东南沿海地区,二者的动力之和构成了阻挡软流圈物质向东部洋区流动的“远程力效应”;(4)软流圈巨量热能(力)-动力作用的主体动力区打造了中国东部及海区 7 项地质、地貌特征和三大类矿产资源效应。其中岩浆活动与化石燃料矿产(石油、天然气、煤)之间不是“水火不相容”,而是岩浆活动为提升油气成熟度和煤化作用及变质作用提供了重要的温度条件;(5)软流圈巨量热能(力)-动力作用打造了中国东部及海区一些独有的地质作用:①形成了新生代南海小洋盆,并向巴拉望岛俯冲。②产生了新生代陆缘裂谷带,形成了琼州海峡、台湾海峡,并向台湾岛轻度俯冲。③大面积的巨厚软流圈是一座“巨型岩浆山”,成为东部及海区“地幔柱”的统一“根基”。地幔柱实际上是巨大“岩浆山”中的“岩浆山峰”,今后会发现更多“地幔柱”(即“岩浆山峰”)。④中国东部地震除吉林省珲春地区的深源地震(540 km)外,朝鲜半岛及其以西的中国东部和海区均为浅源与中深源地震(震源深度小于 100 km),其主体动力都来自本区巨量热能(力)-动力源,太平洋板块—菲律宾海板块的联合俯冲力只起了“远程力效应”的深部侧向挤压辅助作用。⑤巨量热能(力)-动力作用形成了一系列盆-山耦合带,组成了中国东部及海区中—新生代“盆-山耦合群”,“盆”里有油气资源,“山”里有内生矿产。

关键词:深部地质结构;软流圈巨量热能(力)-动力作用;主体动力区;远程力效应;巨型“岩浆山”

中图分类号:P541

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)06-0049-13

在从事区域地质、区域矿产综合研究和相应的地质、矿产编图工作基础上,21 世纪以来,先后参加组织和主持了几个重要研究项目,这就是:(1)“中国岩石圈三维结构”(2001—2006)的研究^[1],承担“中国岩石圈三维结构图集”的总设计和总编辑,对中国岩石圈三维结构特征有了比较全面的了解和认识。(2)“北—中—东亚及邻区地质图系(1:250 万)”项目(2002—2012),在 5 种同比例尺的编图(地理图、地质图、大地构造图、能源矿产(石油、天然气、煤)成矿规律图和固体矿产成矿规律图)中,负责地质图和能源矿产成矿规律图的总体设计和图件的主编^[2-3]工作,对编图面积约 3 300 万 km² 范围内的区

域地质及区域成矿基本特征,有了比较全面的了解和认识。(3)“西太平洋大陆边缘深部过程与成矿作用研究”(2011—2015)。因此,有机会将十多年来对中国岩石圈三维结构的资料与北—中—东亚地区的地质特征和成矿特征资料有机结合在一起,系统分析研究深部结构与浅层地质矿产之间的相互关系,故本文是对中国东部(指鄂尔多斯盆地—四川盆地以东)和海区进行深部与浅层综合研究的概略总结。

1 400 km 深度内的 5 层地质结构特点

中国东部大陆及海区,即沿纬度带的 V_s 速度剖面图(图 1)从南(8°N)到北(50°N)的图 1a—图 1h 8 张图^[4],可以清楚地看出:

(1)在每个 V_s 速度剖面中,都可以清楚地划分出不同深度的 5 层结构——从上(地表)向下可以明

基金项目:“西太平洋大陆边缘深部过程与成矿作用研究”(1212011120181)

作者简介:耿树方(1934—),男,从事区域地质、区域成矿规律综合研究和地质、矿产编图工作,E-mail:gengshufang2013@163.com

收稿日期:2014-03-21;改回日期:2014-03-28. 张光威编辑

显分出上-中地壳(A1)、下地壳(A2)、岩石圈地幔(B1)、软流圈(B2)和固结圈(B3)。

(2)在这5层结构中,可以看出变化最大的是岩石圈地幔(B1)与软流圈(B2)之间的物质交换——软流圈物质上涌导致了岩石圈地幔遭受破坏:被熔融、被拆沉等等,使岩石圈减薄,从而在原始岩石圈地幔中生成了新的混熔岩浆层,这就是与海洋和盆地呈现出镜像关系的上地幔隆起区。正是这个从南(南海)到北(鄂霍次克海及其以北)多个隆起区构成的一条巨大的上地幔隆起带在深部的不断活动及其热力—动力的强烈作用,导致中国东部及海区岩石圈形成犬牙交错的“蘑菇云状结构”^[5]和出现岩石圈“年龄”下新上老的独特特征,同时,形成中国东部及海区地质、成矿、地震、地热等一系列特有的地质作用。

(3)根据8张 V_s 速度剖面图显示的5层结构的共同特点,可以概略总结出地质(层圈)结构的基本模型及各层圈对浅层地质和成矿作用的制约状况(图2)。

(4)地表为海洋或大中型盆地(含火山岩盆地)时,深部对应的是地壳减薄地区,也就是软流圈物质上涌地区——南海(12°N 、 20°N)、东海(30°N)、黄海(34°N)、日本海(42°N)、鄂霍次克海(50°N),以及各大中型盆地全部如此。

(5)在 42°N 的 V_s 剖面中,可以清楚地看出太平洋板块的高速体像一堵“墙”一样阻挡住了软流圈物质向东部海洋流动。这表明:软流圈物质上涌不是太平洋板块俯冲作用形成的,但是,它却起到软流圈物质继续向东流动的重要阻挡作用。这个“阻挡作用”就是太平洋板块由东向西俯冲挤压力的远程力作用,因此称它为“远程力效应”。

2 巨大巨厚的软流圈物质来源

图1各 V_s 速度剖面中显示了中国东部及邻区和广大海域存在着巨大巨厚的软流圈。巨量软流圈物质来自何处?从图3中可以清楚地看出:中侏罗世以来,中国及其邻区大陆受到了来自不同方向的动力挤压^[6-7]。

2.1 不同方向的动力挤压

(1)北方既有北冰洋海底扩张力(当今的罗蒙诺索夫海岭和门捷列夫海岭就是北冰洋底的原扩张中脊);也有地球在自转和公转中高纬度向低纬度的挤压力;还有蒙古—鄂霍次克形成 J_3K 裂谷带的扩

张,形成向南北两侧的挤压力,三者之和的动力通过西伯利亚陆块(板块)向中国大陆北部挤压。

(2)南方有印度洋底“入”字型洋中脊扩张动力,通过印度陆块(板块)向中国大陆西南部挤压。

(3)东部既有太平洋板块向东亚大陆边缘的俯冲力(主要影响中国吉林省与黑龙江省东部和俄罗斯远东地区),也有菲律宾海板块向中国东南部(尤其是台湾及闽、赣、浙、皖等省)的俯冲力,二者之和构成了联合向整个中国东部及海区的挤压动力。

(4)在3个不同方向的动力同期向中国大陆挤压的进程中,由于南北方向的强烈挤压互相“对抗”,导致在表层形成了高耸的帕米尔构造结,深部则发生了被强烈挤压的软流圈物质,由中国西部的“强压区”向东部“弱压区”不断地缓慢流动的地幔流。

(5)邓晋福等曾提出地幔流从西向东流动可能有3条通道^[8],本文根据深部层析成像和浅层岩浆岩(主要是晚中生代—新生代岩浆岩)分布特征,初步追踪出了地幔流的流动路径,认为可能有4条路线,但其“发源地”却都来自帕米尔构造结及其周边。4条流动路径从南往北(图3)分别是:①由西向东沿冈底斯山→南迦巴瓦构造结北缘→横穿三江→沿红河走滑断裂带进入南海区。②从塔里木盆地西南缘沿西昆仑→东昆仑南缘断裂带→勉略断裂带及扬子陆块北缘断裂带→长江中下游,进入东海区。③从塔里木盆地西北缘→南天山→东天山→阿拉善及华北陆块北缘(西段)断裂带→燕山,进入渤海区。④最北面的一条从帕米尔构造结北麓向东北,沿西准噶尔→阿尔泰,经蒙古国西北湖区到外贝加尔,沿鄂霍次克裂谷带进入鄂霍次克海区。

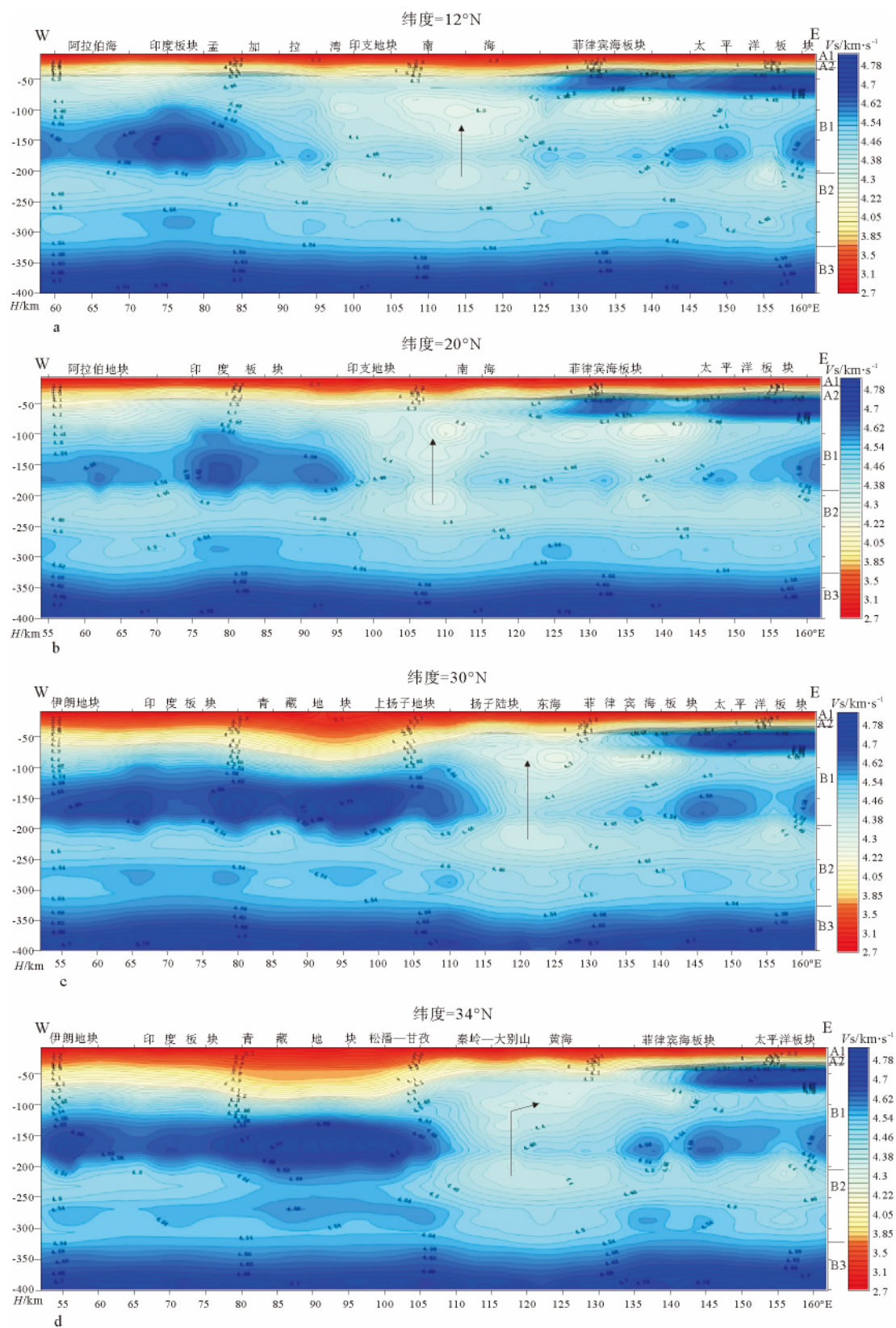
(6)这些从中国最西部向东部不断流动的地幔流,由于太平洋板块和菲律宾海板块由东向西的俯冲与海沟的联合阻挡,由此形成了包括中国东部和海区在内的整个东亚大陆边缘大范围(东西宽约4 000 km,南北长约12 000 km)、巨厚的(200~250 km)软流圈汇聚区(图3橙色横线覆盖区)。

2.2 4个主体动力区的划分

根据上述中侏罗世以来中国及邻区的动力来源和深部地幔流(软流圈)流动特点,可以将整个亚洲大陆划分出4个不同动力来源的主体动力区(图3)。

2.2.1 北亚主体动力区(图3 I)

此动力区是古亚洲动力系统,从地球诞生以来就起“主体动力”的作用。因为从地球诞生开始就有了自转和围绕太阳的公转,而自转和公转动力本身



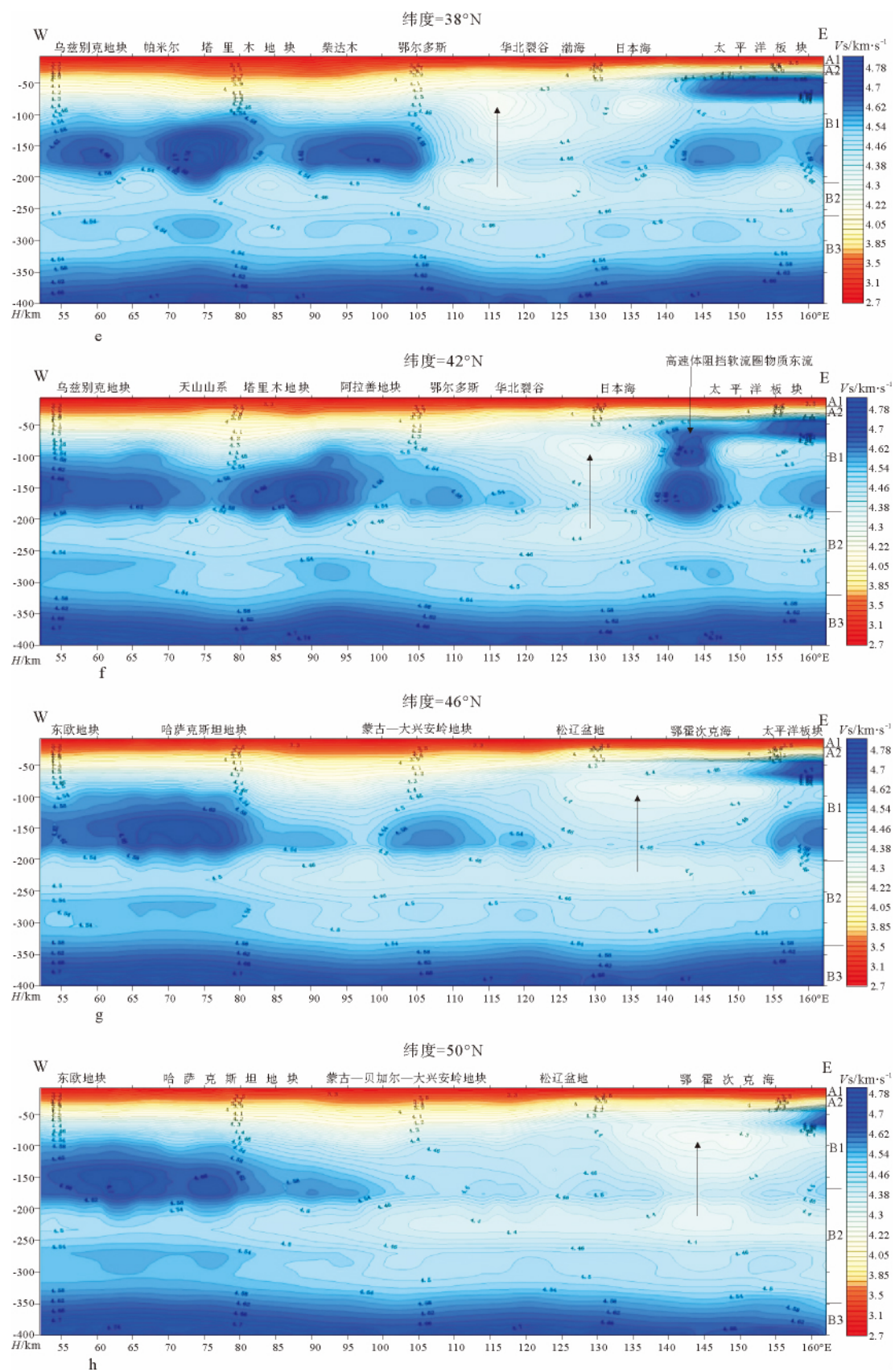


图 1 中国东部大陆及海区 V_s 速度剖面图(据文献[4]补充)

Fig. 1 Velocity sections of East China continent and offshore areas(replenished after[4])

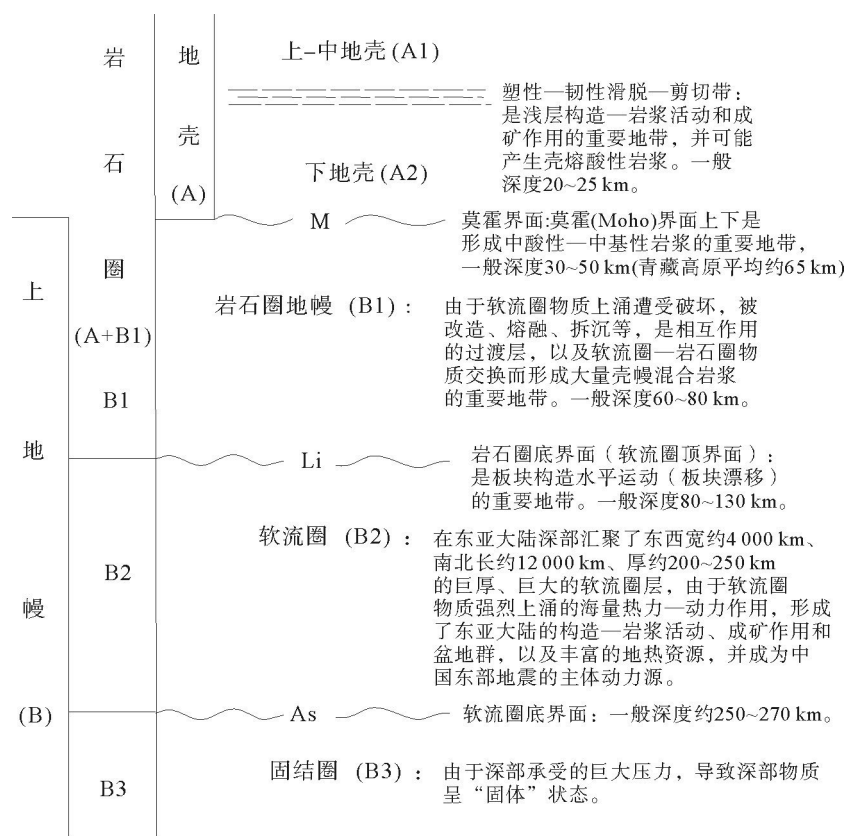


图2 深部地质结构基本模型及各层圈对浅层地质和成矿作用的制约

Fig. 2 Basic model of deep structures and constraints on shallow geology and metallogenesis

就包括有从高纬度向低纬度挤压的动力。这一动力系统在亚洲大陆构造地质中的明显表现就是近东西方向的造山带和断裂系统。这就是李四光先生创建的地质力学学说中的纬向构造带，它从太古宙到新生代始终强势存在。其他任何地球动力学学派和学说，实际上都是在地球自转和公转动力的基础上产生和形成的，因此，地球自转和公转的自身动力是地球动力学的基础，作者称它为地球动力学的“本底动力”^[6]，并可进一步分为（本底）挤压力和拉张力。中生代的北冰洋海底扩张力和蒙古—鄂霍次克 J_3 K裂谷带向南北两侧的挤压力，增强了地球从高纬度向低纬度挤压的动力，由此形成了由北向南强烈挤压的北亚主体动力区。

2.2.2 南亚主体动力区(图3Ⅱ)

此动力区是特提斯动力系统，至少从新元古代以来，虽然历经原—古—中—新特提斯洋的不断演化，但此动力系统所起的主体动力作用始终未改变。而且在晚中生代（中—晚侏罗世）以来由于印度洋洋底“入”字形洋中脊巨大扩张力的叠加，大大增强了该主体动力由南向北的强大推力。正是由于此动力的强大，才推动了古老的印度陆块（板块）由南向北迅速移动，并插入到亚欧大陆之下。由此不仅形成

了具有双层地壳结构的世界“第三极”青藏高原和高耸的帕米尔构造结，而且导致了深部软流圈物质因被强烈挤压只能从西部不断流向东部。因此，在形成中国东部及海区巨大巨厚的软流圈汇聚进程中，南亚主体动力区比北亚主体动力区起了更大的挤压推动作用。

2.2.3 太平洋板块俯冲和菲律宾海板块俯冲动力区(图3Ⅲa和Ⅲb)

长期以来乃至当今，许多地质学家写文章时仍然笼统地说“太平洋板块俯冲对中国东部的制约作用”等，但事实并非如此。从图3的Ⅲa和Ⅲb中清楚看出：太平洋板块的俯冲动力主要制约着Ⅲa区，也就是日本列岛及其以北的俄罗斯远东地区。而琉球群岛及其以南的台湾和菲律宾（Ⅲb），则是菲律宾海板块向西俯冲直接作用的结果，太平洋板块俯冲力对菲律宾海板块向西俯冲只是起了“后浪推前浪”的助推作用。根据板块俯冲力制约的地震震源深度的特点^[9]，太平洋板块（Ⅲa）和菲律宾海板块（Ⅲb）对中国东部及海区的俯冲力强度，大致以北纬 $42^{\circ}40'$ 吉林省珲春为界（图4）。 $42^{\circ}40'$ 以北主要受太平洋板块俯冲力的影响和制约，而且越往北（俄罗斯远东）制约强度越大； $42^{\circ}40'$ 以南主要受菲律宾

热能转换为动能或者动能转换为热能,是能量转换定律中最普遍的规律,因此,热力-动力学理论在人类日常生活和社会发展中是应用最广泛的理论。核能的应用和航天技术,都是以巨量的热能在“点火”的一刹那突然转化成为强大动力的热(力)-动力学理论为基础的。中国东部及邻区主体动力区(图3Ⅳ)的动力来源同样如此。正是软流圈物质上涌的强大热力-动力作用打造了中国东部及海区一系列特殊的地质与地貌特征。

3.1 南海新生代洋盆的形成

从图3软流圈物质由西向东流动的路径①和图4a剖面图清楚看到:西藏的软流圈物质沿红河断裂带直入南海深部并强烈上涌,导致南海被拉张、裂解形成新生代有限洋盆。由此使南海新生洋壳向其东面的巴拉望岛俯冲,并在巴拉望岛和吕宋岛西缘形成了新生代蛇绿岩带。

需要说明和注意的是:从空间分布的地理位置看,南海常常被误认为是菲律宾海板块俯冲带“沟-弧-盆”体系中的“盆”,但事实是,南海是新生代时期大陆边缘新生的有限小洋盆。(顺便指出:当今的红

海,在未来几十万年或一二百万年后,可能会演化扩展成为像当今南海这样的宽阔小洋盆)。

3.2 中国东部晚中生代强烈的岩浆侵入和喷发活动

众所周知,中侏罗世—白垩纪是中国东部岩浆活动的鼎盛时期。在图3Ⅳ的“主体动力区”内,中侏罗世(J_2)以大规模的岩浆侵入、形成众多大岩基为主;晚侏罗—早白垩世(J_3-K_1)以形成小岩体和大规模火山喷发为主;晚白垩世(K_2)以形成局部地区火山喷发和岩脉、岩墙等为主。

需要指出的是:晚三叠世—早侏罗世(T_3-J_1)时期,是中国大陆以海相沉积为主转化为以陆相沉积为主的过渡阶段,地球动力系统仍然属于古生代古亚洲主体动力区(“Ⅰ”)和特提斯主体动力区(“Ⅱ”)的范畴。因为那个时期尚未形成印度洋洋底“入”字形扩张脊和太平洋扩张脊,因此,既没有印度洋扩张动力推动印度陆块(板块)迅速向北漂移与亚欧大陆碰撞等地质作用,也没有太平洋板块和菲律宾海板块分别向东亚大陆俯冲等地质作用,进而既无软流圈物质从西向东流动,更无中国东部及海区软流圈

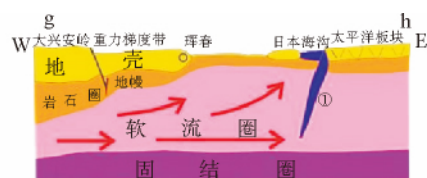
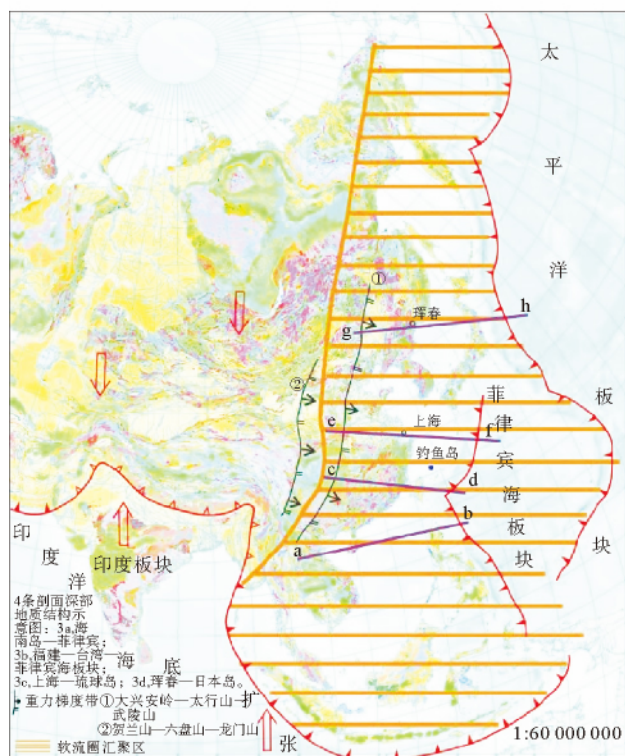


图4d:①太平洋板块俯冲陡、深,导致深源地震(540 km)抵达痒春

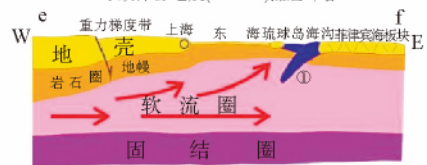


图4c:①菲律宾海板块俯冲



图4b:①菲律宾海板块俯冲
②软流圈上涌导致形成陆缘裂谷带和台湾海峡,并向台湾俯冲

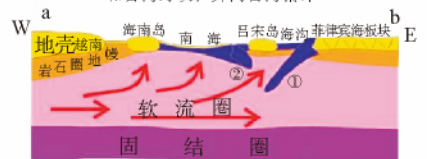


图4a:①菲律宾海板块俯冲
②软流圈上涌导致南海拉张形成新洋盆,并向巴拉望岛和吕宋岛俯冲

图4 中国东部及海区深部地质结构剖面示意图

Fig. 4 Section for deep geological structure in East China and sea area

物质的汇聚。简言之:晚三叠世—早侏罗世时期,亚洲大陆还处于只有南北 2 个主体动力区 I、II 的阶段,地球动力系统比较单一,故前侏罗纪中国大陆的构造—岩浆活动形成的方向以近东—西向(即纬向方向)为主。

3.3 中国东部及海区晚中生代—新生代裂谷盆地群和盆-山耦合群

软流圈物质上涌的强大热(力)—动力导致了浅层产生大量拉张裂陷盆地,形成了“雁行式”排列的盆地群(图 5)。这些盆地的特点是:(1)大陆区的多在晚三叠世—侏罗纪拗陷盆地基础上,从晚侏罗世或早白垩世开始拉张形成不同规模的裂谷盆地或者走滑拉分盆地。(2)大多数盆地中都赋存不同层位、不同岩性的火山岩。(3)裂谷盆地的形成时代,有从陆地到海区时代渐新的趋势(即陆地的 $T_3J \rightarrow J_3K_1 \rightarrow K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow E \rightarrow$ 海区 $E \rightarrow N$)。(4)由盆地群中的盆-山耦合带组成了中国东部特有的盆-山耦合群。“盆”中有能源资源或盐类等矿产,“山”里有内生矿产,由此形成了东部丰富的矿产资源。

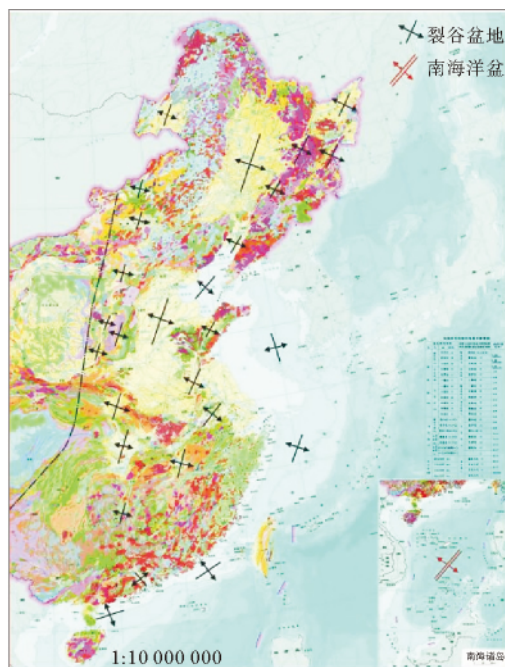


图 5 中国东部及海区裂谷系和盆地群

Fig. 5 Rift systems and basin groups in the East China and its sea area

3.4 新生代玄武岩发育

古近纪(E)玄武岩主要赋存在各裂谷盆地内,新近纪(N)玄武岩有的赋存在盆地内,有的分布在地表层,第四纪(Q)玄武岩主要发育在地表。其中

出露在地表的新近纪玄武岩普遍发育有良好的柱状节理,成为中国东部一些地质公园的重要景观之一。时代最新的五大连池玄武岩(1719—1721 年喷发,距今只有 293 年)完整的熔岩流,是展示喷发时岩流流动原貌的绝好遗迹。

需要特别说明的是:中国东南沿海伴随陆缘裂谷带的产生而发育的上新世—更新世玄武岩,形成了雷州半岛和澎湖列岛(此列岛除玄武岩外还有安山玄武岩和安山岩等),塑造了当今的琼州海峡、台湾海峡、海南岛和台湾岛,并且导致了台湾海峡向台湾岛轻度俯冲(图 4b 剖面)。

3.5 软流圈是地幔柱的根基

一些地质学家在中国东部及海区不断发现地幔柱,并进行了深入研究。今后必将继续发现更多不同规模的地幔柱。因为在图 3 IV 主体动力区的深部蕴藏着 200 多千米厚的软流圈,它是一座巨大的“岩浆山”,浅层和表层发现的地幔柱,都是软流圈物质上涌距地表不同深度(即上涌不同高度)的“岩浆山峰”。故全部地幔柱都是软流圈物质上涌的具体显示,换句话说,巨厚的软流圈是所有地幔柱统一的“根基”。可以说,现今存在的每个大岩基和岩体密集区(如长江中下游、燕山等),以及渤海、黄海、东海、南海等深部地区都存在规模不等的地幔柱,即“岩浆山峰”。因此,今后随着地质找矿、尤其是深部探测工作的开展,将会不断乃至层出不穷地发现新的软流圈物质上涌的“岩浆山峰”地幔柱。

需要指出的是:晚中生代(J—K)时期,中国东部由于软流圈巨量过饱和热能对岩石圈的熔融、拆沉、减薄等,形成了新的壳—幔混熔岩浆。故侏罗—白垩纪阶段地幔柱的岩浆岩成分主要是酸性—中酸性岩类,以及岩浆后期的分异作用产生的偏碱性和少量碱性岩类。到了新生代时期,由于晚中生代形成的壳—幔混熔岩浆凝固结、重新加厚了岩石圈地幔,上侵岩浆直接来自地幔。因此,在新生代(E—Q)阶段无论是沿深大断裂活动,还是以“地幔柱”方式活动的岩浆,其成分均以基性为主,喷出地表者则是新生代玄武岩。

3.6 新生代地壳均衡运动塑造了中国东部地貌地势特征

众所周知,中国大陆的地势由东往西逐渐升高,直至帕米尔高原。其中有 2 个明显的“阶梯”:第一阶梯是大兴安岭—太行山—武陵山;第二阶梯是贺兰山—六盘山—龙门山。地表的地貌地势特征是地

壳深部的镜像显示。由于中侏罗世—白垩纪时期中国东部及海区巨厚的软流圈物质的巨量热能熔融了原岩石圈下部,使原岩石圈遭受了被熔融、拆沉、减薄裂解等多种破坏,并形成了浅层和表层一系列的构造—岩浆岩带和盆地群,由此导致了东部被减薄的岩石圈整体下沉,产生了大兴安岭—太行山—武陵山重力梯度带(图4),使梯度带以东的地壳厚度比以西的厚度减薄了5 km左右^[5],从而构成了梯度带以东的松辽、华北、南襄、江汉等众多大—中型盆地;而梯度带之西则是内蒙古、山西、云贵等高原。

经过晚中生代岩石圈强烈剧变之后,新生代产生了地壳重力均衡活动,导致东部各地发生了不同程度的升降运动,形成了许多不同规模的断裂,在山区出现了大量互相对应的陡直的山峰和山谷,成为发展地质旅游的景点。因此,现今的中国东部地貌地形特征是被巨厚的软流圈物质上涌强烈改造后,又经过新生代(主要是 $E_3-Q_p^1$ 时期)重力调整的均衡活动塑造的结果。

3.7 现今中国东部地震的主体动力主要来自深部过饱和的巨量热能阶段性的释放

由于一方面深部巨厚的软流圈蕴藏有巨量热能,一方面北、西南、东3个主体动力区(图3Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区)仍然有向本区深部挤压的远程力效应,因此,当深部巨量热能达到过饱和时必然向上部运移,在地壳脆弱地带(如活动断裂带),当压力减小时的一刹那巨量热能突然转化为强大动力,导致地震发生。

长期以来,人们一直把中国东部地震的动力归结为太平洋板块的俯冲力。这一方面是由于对中国东部的深部地质了解不够,而且尚未划分出独立的软流圈物质上涌产生的热能(力)—动力区“Ⅳ”,另一方面是过高估计了太平洋板块俯冲作用的能量。从图3、图4和图6清楚看出:太平洋板块向东亚大陆俯冲打造了完整的“沟—弧—盆”体系后,已经没有强力继续向西“制造”地震等的能量,剩余的能量只能起到“远程力效应”的作用。因此,在图6中清楚显示出强烈地震带出现在海沟、俯冲带地带,只有很少数的深源地震产生在伴随俯冲深度的加大而远离海沟到达了我国吉林省珲春地区^[5,9]。在日本海以西的朝鲜半岛未曾发生过强烈地震。这表明:朝鲜半岛之西的中国东部及海区的地震动力不是来自太平洋板块的俯冲动力,而只能是来自本区深部的热能(力)—动力区。

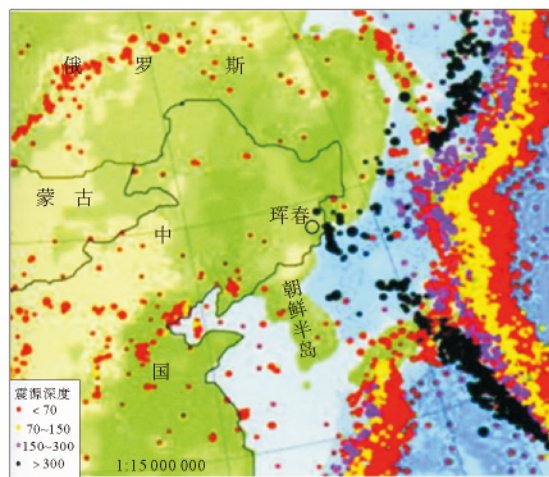


图6 中国东北及周边地震震中和震源深度分布(据文献[9]补充)

Fig. 6 Distribution of earthquake epicenters and focal depth in the Northeast China and adjacent regions(replenished after[9])

4 中国东部软流圈巨量热力—动力作用产生的资源效应

对于中国东部中—新生代成矿特征论述的文章可能多达数千篇、乃至上万篇,但是,对其动力学根源可能几乎都归结为一点——受太平洋板块俯冲力的制约。本文则以中国东部及海区软流圈物质上涌产生的巨量热力—动力作用为依据,阐述东部及海区的成矿作用及其基本特征。由于篇幅所限,只能宏观的概述3类资源(内生矿产、能源矿产和地热)与巨量热力—动力作用之间的内在关系。

4.1 内生矿产

从图7及图7a—7c4张图中可清楚看出:由于软流圈物质上涌而形成的构造—岩浆带,即盆—山耦合带中的“山”,是内生矿产的聚集带。从南往北的3条断面图(图7a、7b和7c)穿越的构造—岩浆带中,内生成矿作用分别有:(1)响水—满都拉剖面(图7a):从东往西,郯庐断裂带西侧有Au、Cu、Pb矿;太行山阜平地区有Cu、Mo、Au矿;五台山繁峙地区有Mo、Au矿;阴山大青山地区有Fe、Au矿等。(2)东沟—东乌旗剖面(图7b):从东往西,东沟有Pb、Zn、Au矿;海城有Cu、Pb、Zn、Au矿;赤峰有Fe、Au、Pb、Zn、Mo矿;翁牛特旗有Cu、Pb、Zu、Au矿;西拉木伦河北岸有Pb、Zn、Au矿;林西有Cu、Pb、Zu矿等。(3)绥芬河—满洲里剖面(图7c):从东往西,绥芬河有Cu、Au矿;牡丹江有Fe、Pb、Zn矿;哈

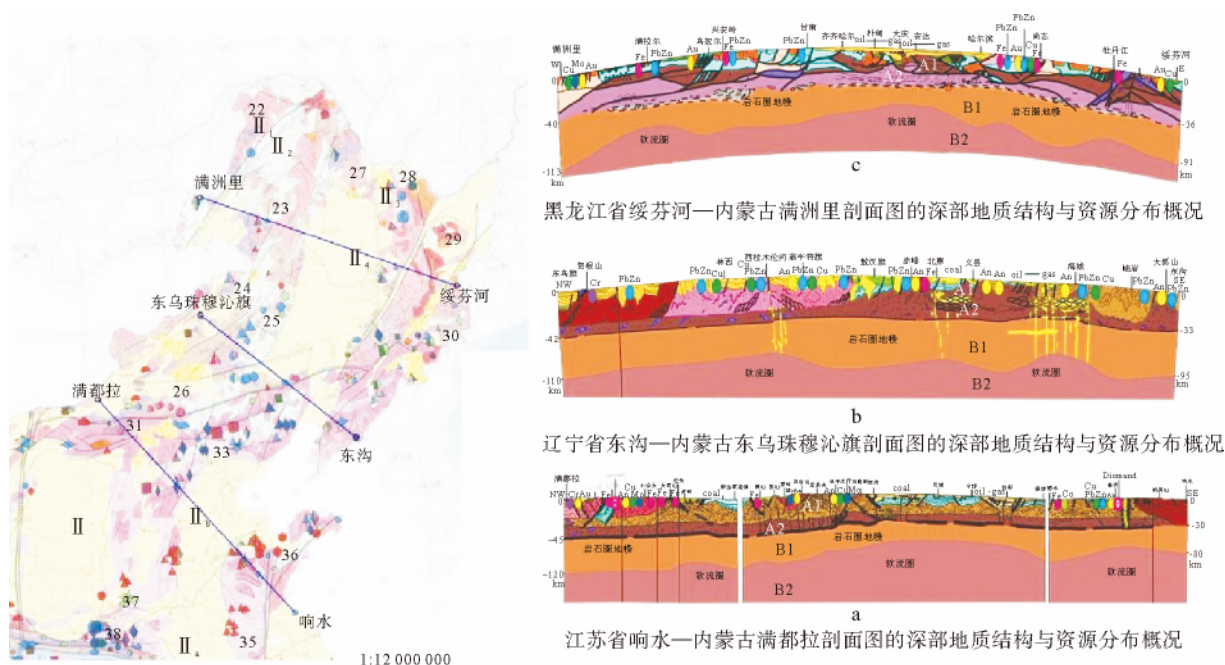


图 7 内生矿产^[12]与深部软流圈的关系剖面示意图

Fig. 7 Sections showing the relationship between endogenous minerals^[12] and deep asthenosphere

尔滨东部翠宏山有 Fe、Pb、Zn、Cu、Au、W 矿；兴安岭有 Pb、Zn、Au、Fe 矿；海拉尔有 Pb、Zn、Fe、Mo、Au、Ag 矿；满洲里有 Mo、Cu、Au、Pb、Zn 矿等。

上述 3 个断面图中穿越的各成矿带，无论什么矿床类型（矽卡岩型、斑岩型、不同特点的热液型等等），都由软流圈提供了两个关键条件：第一是成矿作用的温度（热力）条件，第二是多数成矿物质的来源和富集运移（动力）条件。任何矿种和任何矿床类型的内生矿产，对这两项成矿条件都是缺一不可的，软流圈热力-动力作用是内生成矿作用的基础和前提。因此，中国东部内生矿产的 80%~85% 形成在中—新生代阶段。

4.2 能源矿产

本文的能源矿产是指化石燃料矿产石油、天然气和煤。通常认为，这些化石燃料矿产都是沉积盆地中有机物质演化的产物，与岩浆活动“水火不相容”。然而从热力-动力学的理论观点进行分析研究可以清楚地看到：

（1）这些化石矿产的成矿首要条件“沉积盆地”需要有适合的动力条件创造良好的盆地环境。以石油、天然气为例，各种不同类型的盆地有十几种，但有利于形成大型巨型油气田的盆地只有 5 种，即①大型拗陷盆地；②拗陷→裂陷→再拗陷盆地；③裂陷→拗陷盆地；④前陆盆地；⑤大型拉分盆地。无论哪一种盆地类型，首先需要动力作用为其创造条件。

图 5 显示了软流圈物质上涌的动力作用塑造了中国东部及海区广泛的中—新生代盆地群。

（2）沉积盆地内烃源岩系中的“烃”伴随温度的提高向高成熟度的烷类演化，当温度约为 50~65 °C 时形成生物气甲烷（CH₄），即天然气；温度约为 65~149 °C 时为液态石油，高于 149 °C 时石油被气化成为“裂解气”。可见温度的高低与油-气性质有直接关系。对于煤，温度具有同样的重要作用：伴随温度的升高，煤化作用的成熟度和煤的变质作用也随之提高，由最低级的泥炭、褐煤逐渐向高变质的烟煤→无烟煤、直至天然焦炭演化。因此，一般认为地温高（地热流值 $\geq 65 \text{ mW/m}^2$ ）的“热盆地”有利于成油气和成煤作用。中国东部及邻区软流圈巨量热能为“热盆地”提供了永不衰竭的热能源泉，所以，岩浆活动与化石燃料矿产之间不是“水火不相容”，而是岩浆作用的巨量热能为确保油气成熟度和煤化及其变质作用提供了必须的温度条件。

上述事实清楚看出：软流圈的热力-动力作用是形成油气田和煤田重要的基本条件之一。

4.3 地热资源

中国东部及海区软流圈物质上涌为东部地区提供了取之不尽的极丰富的地热资源。图 8^[13] 清楚显示出：在地下 4.25 km 深度 100 °C 地热资源分布的广阔区域，几乎涵盖了东部全部省（市），为各省（市）地热资源开发、发展绿色能源提供了雄厚的物质基础。

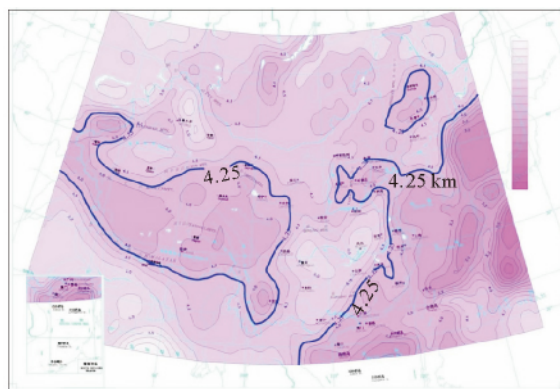


图8 中国东部和青藏地区丰富的地热资源
(100 °C以上埋藏深度)分布示意图

Fig. 8 Distribution of rich geothermal resources (the burial depth above 100 °C) (replenished after Wangyang[13])

上述3大类矿产与热力-动力学的关系可以用一句话概括:软流圈物质上涌的巨量热力-动力作用是中国东部各种矿产资源形成的重要条件之一。

5 结论

(1)中国大陆及海区深部400 km深度内普遍存在5层地质结构,其中变化最大的是第3层(岩石圈地幔)和第4层(软流圈层),二者之间的厚薄变化和物质交换制约了浅层的全部地质作用和成矿作用。

(2)以中国大陆为中心的亚洲地球动力作用的力源,来自北、西南和东不同方向,并共同向中国大陆挤压。由于西部挤压力大于东部,导致软流圈物质经4条路径由西向东流动。东部太平洋板块和菲律宾海板块联合由东向西的挤压力,阻挡了软流圈继续向东部洋区流动,由此在中国东部及海区形成了巨大巨厚的软流圈物质汇聚区。

(3)软流圈的巨量热能转换为强大动力构成了中国东部及海区新的独特的主体动力区。据此,首次将中-新生代阶段的亚洲大陆划分出4个主体动力区。虽然各主体动力区之间都存在相互作用、互相影响的远程力效应,但各主体动力在“自己区域内”起着主导作用。

(4)软流圈巨量热力-动力作用形成的主体动力区,塑造了中国东部及海区至少7项地质地貌基本特征,同时打造了三大类矿产资源效应。

(5)太平洋板块俯冲力并没有制约整个中国东部及海区,它制约的区域在北纬42°40′(吉林省珲春)以北,即黑龙江省东北的完达山地区和整个俄罗

斯远东地区。北纬42°40′以南主要受菲律宾海板块俯冲力的影响,尤其是台湾岛及其附近陆区最甚。

(6)南海初期的“原始海”可能是菲律宾海板块俯冲形成的“沟-弧-盆”体系中的“盆”,但是,以后在软流圈巨量热力-强大动力作用下被“改造”和进一步拉张裂解,形成了新生代以来的小洋盆,并且向它东缘的巴拉望岛和吕宋岛西缘俯冲。因此,现今不能再把南海误划归到菲律宾海板块的“沟-弧-盆”体系中。

(7)东南沿海陆缘拉张裂解形成了琼州海峡和台湾海峡,并导致台湾海峡向台湾岛轻度俯冲,同时产生了海南岛和台湾岛。

(8)中国东部及海区软流圈如同一座巨大的“岩浆山”,已被发现的众多个地幔柱实际是这座“岩浆山”中向浅层凸起的“岩浆山峰”。伴随地质工作迅速发展、尤其是深部探测工作的深入开展,在中国东部和海区将会不断发现埋藏在不同深度具有不同规模的许多软流圈“岩浆山峰”,即地幔柱。

(9)中国东部地震的主体动力来源是软流圈巨量热能达到过饱和时向浅层运移,当压力减小时的一刹那巨量热能转换为强大动力而发生地震。因此,要转变“中国东部地震是太平洋板块向东亚大陆俯冲的结果”的传统观念。由于中国东部地震的主体动力来自软流圈巨量热能,因此,在各地震台的地震监测中如果增加地热流值监测设备,开展热能(热力)-动力统一的动态监测,是否有可能提高地震预测预报的准确率?值得探讨和试验。

(10)巨量热力-动力作用塑造了中国东部特有的中-新生代“雁行式”盆地群和盆-山耦合群,“盆”里有能源资源,“山”里有内生矿产。

(11)要改变岩浆活动与化石燃料矿产之间是“水火不相容”的传统观念,建立起“岩浆活动的巨量热能是确保油气成熟度和煤化与煤变质作用所需温度的重要条件”的新理念,为寻找新的油气田开发区,首先要寻找“热盆地”。

致谢:李廷栋院士在百忙中对本文进行了全面审阅,提出了多项宝贵意见,在此表示衷心感谢!

参考文献(References)

- [1] 李廷栋,袁学诚,肖庆辉,等. 中国岩石圈三维结构(上、中、下卷)[M]. 北京:地质出版社,2013. [LI Tingdong, YUAN Xuecheng, XIAO Qinghui, et al. 3D Model of Lithospheric Structure in China Series (Upper, Middle, Lower)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]
- [2] 李廷栋,耿树方,范本贤,等. 1:250万北-中-东亚及邻区地质

- 图[M]. 北京:地质出版社,2012. [LI Tingdong, GENG Shufang, FAN Benxian, et al. 1:250 Million Geological Map of Northern-Central-Eastern Asia and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]
- [3] 耿树方, 范本贤, 易荣龙, 等. 1:250 万北-中-东亚及邻区能源矿产(石油、天然气、煤)成矿规律图[M]. 北京:地质出版社, 2012. [GENG Shufang, FAN Benxian, YI Ronglong, et al. 1:250 Million Minerogenic Map of Energy Resources in Northern-Central-Eastern Asia and Adjacent Areas (Oil, Gas and Coal) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.]
- [4] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东南沿海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2005. [ZHU Jieshou, CAI Xuelin, CAO Jiamin, et al. 3D Model and Evolution of Lithospheric Structure in South and Southeast Coast of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.]
- [5] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因[J]. 中国地质, 2007, 34(5):737-758. [YUAN Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited [J]. Geology in China, 2007, 34(5):737-758.]
- [6] 耿树方, 刘平, 王振洋, 等. 中国大陆侏罗纪以来六大动力体系和资源预测[J]. 中国地质, 2009, 36(3):490-503. [GENG Shufang, LIU Ping, WANG Zhenyang, et al. Six major dynamic systems since Jurassic in China's Mainland and resource prognosis[J]. Geology in China, 2009, 36(3):490-503.]
- [7] 耿树方, 刘平, 王振洋, 等. 亚洲地球动力系统的演进与东亚矿产资源效应[J]. 中国地质, 2010, 37(4):866-880. [GENG Shufang, LIU Ping, WANG Zhenyang, et al. Geodynamic evolution in Asia and its effects of mineral resources[J]. Geology in China, 2010, 37(4):866-880.]
- [8] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006, 33(4):751-761. [DENG Jinfu, XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, et al. Cenozoic lithospheric extension and thinning of North China: Mechanism and process[J]. Geology in China, 2006, 33(4):751-761.]
- [9] 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 等. 中国兴蒙—吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4):816-823. [ZHANG Xingzhou, YANG Baojun, WU Fuyuan, et al. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China[J]. Geology in China, 2006, 33(4):816-823.]
- [10] 耿树方, 刘平, 郑洪伟, 等. 对中国东部中生代动力学机制的新认识[J]. 地质通报, 2012, 31(7):1061-1068. [GENG Shufang, LIU Ping, ZHENG Hongwei, et al. A tentative discussion and new recognition of Mesozoic geodynamic mechanism in eastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7):1061-1068.]
- [11] 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. [XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, WU Guangying, et al. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China[J]. Geology in China, 2006, 33(4):730-750.]
- [12] 王永勤, 刘兰笙, 李永森, 等. 中国黑色有色矿产图集[M]. 北京:地质出版社, 1996. [WANG Yongqin, LIU Lansheng, LI Yongsan, et al. Ferrous and Nonferrous Metal Maps of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.]
- [13] 邓晋福, 魏文博, 汪洋, 等. 中国华北地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2007. [DENG Jinfu, WEI Wenbo, WANG Yang, et al. 3D Model and Evolution of Lithospheric Structure in North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.]

DEEP GEOLOGICAL STRUCTURE CONSTRAINTS ON SHALLOW GEOLOGY AND MINERALIZATION: A STUDY IN THE LAND AND SEA AREAS OF EAST CHINA

GENG Shufang, LIU Ping, KOU Caihua

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Abstract: Based on the research of the 3D Model of Lithospheric Structure supported by the international cooperation mapping project among China and surrounding countries, and the comprehensive analysis and study of deep geological structures, shallow geology and mineralization, the authors proposed the following ideas in this paper: ① up to the depth of 400 km, in the land and sea areas of East China, there are five tectonic layers. The variations of the third and fourth layers constrains the shallow geology and mineralization; ② The land and sea areas of East China are under the squeezing pressure from surrounding areas, in which the pressure from the west dominates, resulting in the accumulation of great amount of asthenospheric materials and the formation of a large thermal energy and dynamic region. As the result, the forth power area is formed in the Asian Continent; ③ the subduction of the Pacific Block ends at the latitude of 42° 40' N along the Wandashan Mountain and the Far East of Russia, while the subduction of the Philippine Sea Block ends along Taiwan and Southeast coastal area of China. The joint action of the above-mentioned two forces drives the asthenospheric materials flowing to the Eastern sea area; ④ the huge amount of energy from the asthenosphere, and the dynamic effect derived from the movement caused the formation of seven geological and morphologic features and three kinds of mineral resources in the land and sea areas of East China. The relationship between magmatism and the fossil fuel resources, such as petroleum, natural gas and coal, is not always negative. Magmatic activities may provide important thermal conditions necessary for oil-gas maturation, coalification and metamorphism; ⑤ the huge amount of energy from the asthenosphere as well as its dynamic effect, may bring about some unique geological effects in the land and sea areas of East China; a, formation of some Cenozoic small oceanic basins, which have subducted to the Palawan Island; b, formation of some Cenozoic continental margin rift belts and the formation of the Qiongzhou Strait and Taiwan Strait, and the slight subduction towards the Taiwan Strait; c, the enormous accumulation of the asthenospheric materials caused the formation of a "giant Magmatic Mountain", which is in fact the source and foundation of the mantle plumes in the land and sea areas of East China. Each mantle plume is the peak of the Magmatic Mountain. It is believed that more mantle plumes or Magmatic Mountain peaks will be discovered in the future; d, except the deep earthquake (540 km) happened in Huichun of Jilin Province, most of the earthquakes in the Eastern China, as well as those occurred in Korean Peninsula and to the west of it in the land and sea areas of East China are mainly shallow and intermediate ones (<100 km), the main energy of which is from the giant thermal accumulation, the source of the earthquakes and the subduction of the Pacific Block and the Philippines Sea Block only play a limited role as a supplement to provide remote stresses; e, The giant thermal energy and dynamic movement results in a series of basin-mountain coupling belts in the land and sea areas of East China. There are energy resources in basins, and mineral resources in mountains.

Key words: deep geological structure; the huge amount of energy from asthenospheric and dynamic movement; major dynamic area; the remote effect of stress; giant "Magmatic Mountain"