

# 中国北方大陆及邻区岩石圈演化 及与大规模成矿作用关系

邱瑞照<sup>1</sup> 周 肃<sup>2</sup> 谭永杰<sup>1</sup> 祁世军<sup>3</sup> 高 鹏<sup>3</sup> 李文渊<sup>4</sup> 陈秀法<sup>1</sup>  
王靛靛<sup>1,2</sup> 陈 正<sup>1,2</sup> 元春华<sup>1,2</sup> 韩九曦<sup>1</sup> 王圣文<sup>2</sup> 冯艳芳<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 新疆地质矿产研究所, 新疆 乌鲁木齐 853000; 4. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:**根据地质和地球物理特征, 中国北方大陆可区分为造山带型和裂谷型两类岩石圈, 其中造山带型又可区分出分别代表古生代、中生代和新生代物质结构的造山带型岩石圈; 在从空间上, 自西向东分别由以天山为代表的新生代造山带型、以额济纳旗为代表的古生代造山带型、以大兴安岭为代表的燕山期造山带型和张广才岭为代表的新生代裂谷型岩石圈组成, 反映了古生代形成的中亚造山带在中新生代大陆动力学过程中的分异演化, 导致不同类型岩石圈形成和陆壳、岩石圈地幔物质组成、结构的不均一性, 以及构成大规模成矿作用大体上以 E110° 为界, 西部主要为晚古生代, 东部主要为中生代的格局。简要讨论了不同岩石圈类型的壳幔物质、结构的地质含义, 以及区域找矿方向和深部找矿空间问题。

**关键词:**岩石圈类型; 深部过程; 大规模成矿作用; 区域找矿方向和深部找矿空间; 中国北方大陆及邻区  
**中图分类号:** P544, P612      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2009)03-0544-20

1984 年, 美国科学家从地球物质的整体性出发, 充分强调了地球深部物质的组成、运动和演化对解决地球整体演化和动力学问题的重要性, 以及对地球表面和浅层矿产资源的开发、自然灾害的预测方面的意义, 提出了美国大陆动力学研究的国家计划<sup>①</sup>, 该报告对其后的国际地学界产生了重要影响。随着对地球内部结构了解的深入, 20 世纪 90 年代以来地质学家们普遍认识到成岩成矿作用与壳-幔相互作用, 特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统变迁对其有重要的控制作用, 把成岩成矿作用与大陆形成演化联系起来<sup>[1-6]</sup>, 从壳幔相互作用和物质-能量交换传递新视角研究大陆成岩成矿作用过程已

成为重要方向<sup>[1-2, 7-15]</sup>。

本文所述中国北方大陆及邻区是泛指华北—塔里木地台以北、西伯利亚地台以南的中亚造山带区域, 包括中国新疆北部、内蒙古、东北三省, 以及哈萨克斯坦、蒙古国、俄罗斯远东地区, 该区是地球上显生宙大陆地壳生长的最重要地区<sup>[4, 16]</sup>和全球最重要的巨型成矿带之一(图 1)。从岩石圈角度, 该区也是一条巨型岩石圈不连续带<sup>[7-8]</sup>, 不同地段在后续的地质作用下成为再活化岩石圈不连续<sup>[13]</sup>。笔者试图从地质过程解析角度<sup>[17]</sup>, 探讨这一区域岩石圈演化、深部过程及与大规模成矿作用关系, 简要讨论不同区域岩石圈的壳幔物质、结构的地质含义, 以及区域找

收稿日期: 2009-03-16; 改回日期: 2009-04-28

基金项目: 国家科学技术部国际科技合作重点项目(2007DFA21380)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB01A03)、中国地质调查局地质大调查项目(1212010811066、1212010813046、1212010711814)和国家自然科学基金项目(40572063)联合资助。

作者简介: 邱瑞照, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 从事深部地质、区域成矿和境外地质矿产研究; E-mail: qjurrzz@yahoo.com.cn。

① 肖庆辉, 李晓波, 白星碧, 等. 美国大陆动力学研究的国家计划. 中国地质矿产信息研究院, 1993.

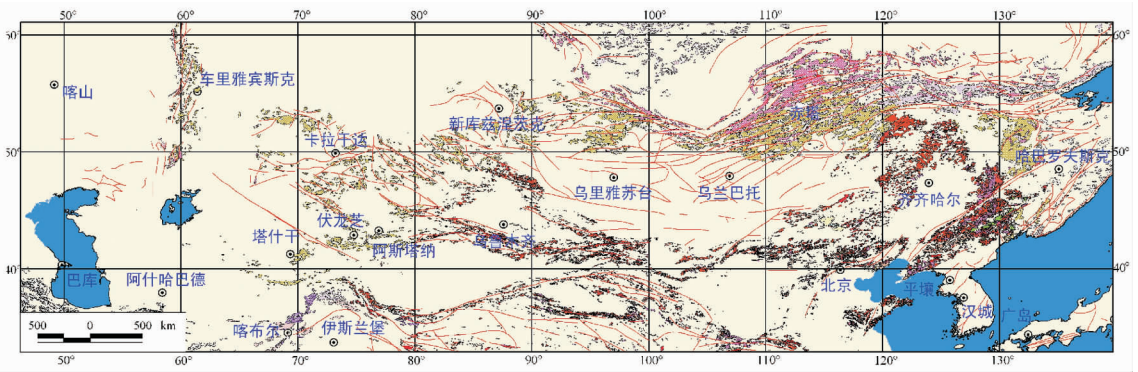


图 1 中国北方大陆及邻区构造-岩浆分布

Fig.1 Distribution of tectonic-magmatic belts in the continent of northern China and adjacent areas

矿方向和深度空间找矿在找矿勘查部署中的意义。

### 1 中国北方大陆岩石圈类型

岩石圈类型如何划分,地质学家、地球物理学家的认识不尽相同。各种地球物理方法是获得地球内部结构的主要方法,地震层析成像技术(ST)的快速发展<sup>[18]</sup>,大大扩展和丰富了人们对地球内部结构的认识,如地球内部的高速区,往往对应冷的、更具刚性的物质区,如大陆地盾和古老洋盆;低速区,往往对应炽热的或部分熔融的软物质区,如洋脊。在不同地区或不同地质单元的地壳、地幔结构变化很大;在大陆内基于地表的地质构造类型划分,可分为地台和地盾地壳、深部拗陷地壳、褶皱区地壳、裂谷带地壳等<sup>[19]</sup>。全球地学断面对比研究发现,地球内部结构在横向或纵向上都很不均一<sup>[20]</sup>,地台区地壳结构相对简单,造山带和裂谷区远比过去认为的双层或三层结构复杂得多,不同构造单元之间的岩石圈结

构往往表现为不连续;大陆地壳和海洋地壳是差异最明显的两大类,洋陆过渡带是地球上最显著的侧向不连续带<sup>[21]</sup>。基于区域构造、岩石学、地球物理的综合研究,邓晋福等<sup>[22]</sup>指出中国大陆乃至全球的大陆构造可以用根-柱构造进行描述,在地壳浅部主要表现为 3 种构造形态:挤压造山带、大陆裂谷带和克拉通,它们分别与造山岩石圈根、地幔热柱和大陆(岩石圈)根对应,相应的是造山带、大陆裂谷和克拉通岩石圈类型。根据岩石圈的动力学性质,邱瑞照等<sup>[6,23]</sup>把中国大陆划分为克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧等五大岩石圈类型。

中国北方大陆是中亚造山带区域,不同地质块体各具特色(图 2),现今地球物理特征表明,自西向东呈现明显的差异,这一区域大致可以分出 4 个不同的区(表 1)。

位于准噶尔盆地北缘的阿尔泰山、准噶尔盆地南缘和塔里木盆地北缘的天山,在地形上都为海拔

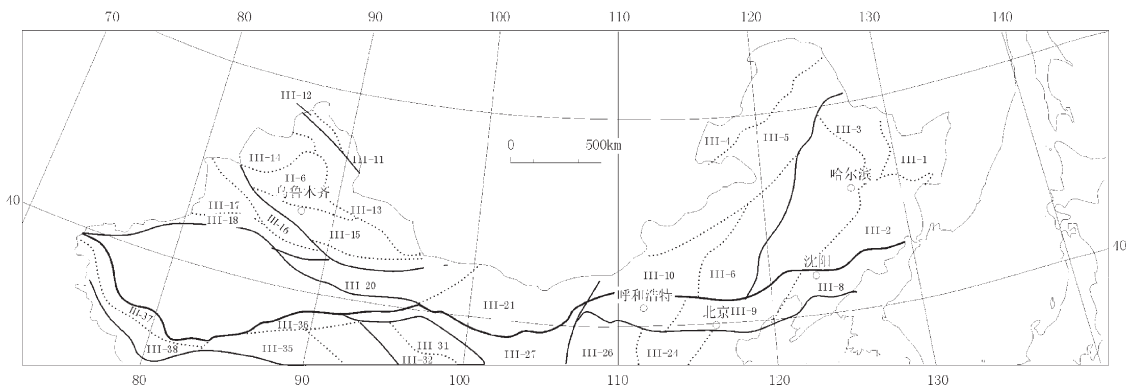


图 2 中国北方大陆主要地质块体分布图(据陈毓川<sup>[32]</sup>修改)

Fig.2 Distribution of main geological blocks in the continent of northern China and adjacent areas (modified after Chen Yuchuan<sup>[32]</sup>)

表 1 中国北方大陆岩石圈结构单元及其总体特征

Table 1 Lithosphere structural units and their general characteristics in the continent of northern China

序号	单元	天山新生代造山带	额济纳旗古生代造山带	大兴安岭中生代造山带	松辽盆地新生代裂谷
1	地貌	盆地与周边高山, 海拔 2500~4000m	西蒙古高原, 海拔 800~1500m	平均海拔 1000m 以上	200~1000m
2	地壳平均厚度/km	55	45	39	37
3	岩石圈平均厚度/km	140~180	90	110	60~80
4	地表平均热流/ $mW \times m^{-2}$	50~100	62~76	40	47~70
5	燕山期岩浆活动	无	弱, 块体边部	强	强
6	喜马拉雅期岩浆活动	弱, 仅在西南局部地区	无	限于大兴安岭地区的东侧、南侧	强
7	活动构造	走滑、逆冲断裂	走滑断层	走滑断层、正断层	走滑断层、正断层
8	地震	逆冲断裂褶皱型、走滑型破裂和走滑型地震, 多和强	不多, 较弱	多, 较弱	正走滑断裂和断陷盆地型地震, 多和强
9	地壳结构	发育低速带	发育低速带	发育低速带	高、低速互薄层
10	陆壳平均波速 $V_p/km \times s^{-1}$	6.3	6.38	6.45	6.43

大于 3000 m 的高山, 地壳厚度 (50~55 km) 大于大陆平均地壳厚度 (45 km), 陆壳内有低速层 (在 18~35 km 不同深度范围) (图 3 中 1~7) 及地表平均热流值较高<sup>[24-25]</sup> (表 1) 区别于准噶尔、塔里木盆地<sup>[26]</sup>。岩石圈厚度 170~200 km (根据沙雅—布尔津断面、可可托海—阿克塞断面和独山子—泉水沟断面资料)。总体特点符合造山带结构模型, 岩石圈厚度较大说明其属于具有山根的造山带。

位于银川盆地西部的额济纳旗地块, 属于西蒙古高原 (东经 105° 以西), 在全国的重力图上位于两个明显的重力梯度带之间<sup>[27]</sup>。虽然陆壳内有低速层, 但其具有正常的地壳厚度 (平均地壳厚度 45 km) (图 3 中 8), 岩石圈厚度仅 90 km, 明显不同于其西段的阿尔泰山与天山壳—幔结构。地质历史表明, 它们同属于古亚洲洋发展而来的古生代造山带。世界范围地球物理探测表明, 古老造山带往往没有山根 (古生代), 而年轻造山带往往具有山根 (如青藏高原); 现今额济纳旗地块具有正常的地壳厚度、没有山根, 在中国大陆的应力场上处于西部挤压与东部拉张的过度带, 因此, 其壳—幔结构大致可以代表古

亚洲洋造山带的古生代造山带结构。

位于大兴安岭重力梯度带以西的额尔古纳、大兴安岭等地, 以大兴安岭山脉为主体构成平均海拔 1000 m 以上山地 (西起额尔古纳河, 东至松辽盆地西缘), 属于中国大陆三大阶梯状地势中第二大阶梯的北东端。该区地表热流值较低 (额尔古纳平均值为  $30 mW/m^2$ , 大兴安岭平均值为  $40 mW/m^2$ ), 具有正常的地壳厚度 (35~43 km, 平均厚度 40 km), 其中以大兴安岭的地壳厚度最厚 (43 km), 向外地壳厚度逐渐减薄, 向西最薄约 37 km, 向东最薄约 35 km<sup>[28-31]</sup>; 陆壳内速度结构, 中上部地壳速度结构相对稳定, 表现为高速体与低速体相间分布, 中下地壳速度变化大, 不具明显的水平速度层 (无稳定的速度层), 而且越向深部速度层起伏变化越大 (图 3 中 9~12); 壳下 Moho 面的形态起伏变化大, 构成一个具有一定厚度和内部结构的过渡带。岩石圈平均厚度约 110 km。在 90~180 km (MT) 存在上地幔高层<sup>[6,33]</sup>, 在岩石圈剖面上呈现双层结构特点, 因此, 大体可以看成是正在拆沉、去根的造山带岩石圈。

位于大兴安岭重力梯度带以东的松辽盆地、张

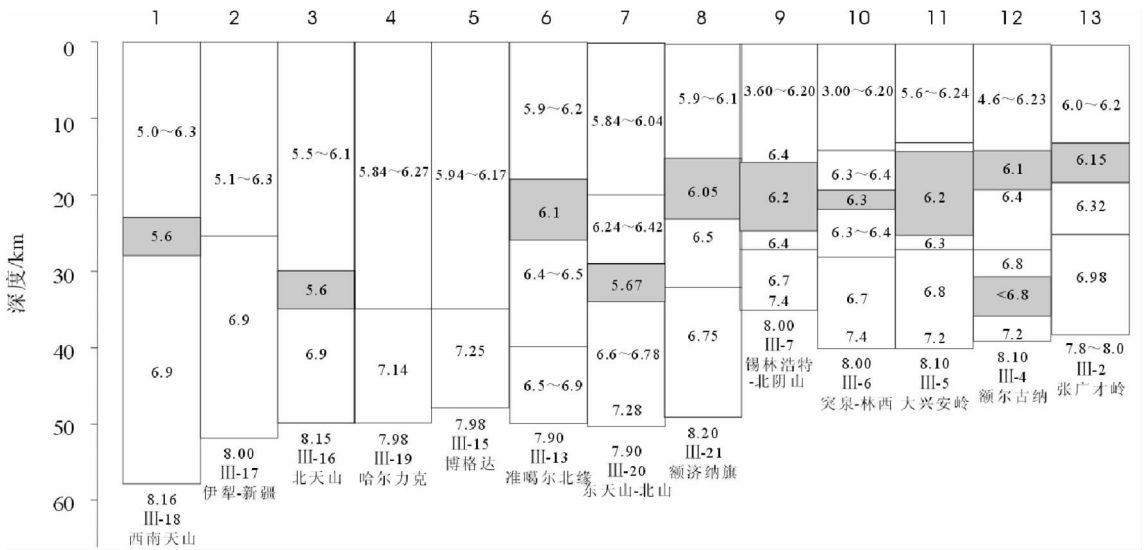


图 3 中国北方大陆主要地质块体的地壳速度结构(据彭聪等<sup>[33]</sup>修改)

Fig.3 Seismic velocity structure of main blocks in the continent of northern China (modified after Peng C et al.,<sup>[33]</sup>)

广才岭、佳木斯和饶河地区(图 3 中 13),海拔多为 200~1000 m(其中长白山最高海拔达 1500 m),松嫩平原呈阶梯状呈坡陡状与大兴安岭相接,构成西东向的“盆山”体系。总体上岩石圈结构较复杂,陆壳厚度较薄(33~39 km,平均 37 km),岩石圈厚度 60~80 km。电性结构揭示饶河地体电性结构极不规则,没有明显的岩石圈底部界限,在 60~80 km 深度区域整体上表现为以高导为主夹有高阻块体,其上为相互叠置的高阻层和高导层;佳木区块体在 15 km 深度具有稳定连续的壳内高导层,高导层之上是一系列被高导体所分隔的高阻片体和块体。松辽盆地内地震速度可能因为盆地内广泛含水、微裂隙和微孔隙发育,以及地温高等原因,致使陆壳岩石的密度减小、结晶基底界面不清以及出现高、低速互薄层等结构,在地壳 23 km 之上总体表现为低速 ( $V_p$  为 6.00~6.08 km/s)。张广才岭地区的  $V_p$  波速结构大体可代表去除这些影响之后的速度结构(图 3 中 13)。

中国大陆可以分为东部(东北、华北、华南)和西部(西北、西南)2 个一级构造单元<sup>[34]</sup>,期间浅部以银川盆地、鄂尔多斯、四川盆地西边界和贝加尔湖西侧为界(或者说沿贝加尔湖西侧和贺兰山—六盘山—龙门山东侧一线);深部以扬子、鄂尔多斯克拉通型岩石圈和喜马拉雅、冈底斯、昆仑、祁连山、三江等新生代造山型岩石圈,以及额济纳旗为代表的古生代

造山型岩石圈之间的岩石圈不连续为界。中国大陆西部挤压、东部拉张伸展的动力学背景是新生代以来大地构造单元总体格局<sup>[34]</sup>。

上述 4 个区域中,阿尔泰山、西南天山和额济纳旗它们都曾是在古亚亚洲基础上发展起来的古生代造山带<sup>[35-40]</sup>,但是,现今的阿尔泰山造山带、西南天山都是具有山根的造山带型岩石圈,类似于年轻的造山带(如青藏高原),在晚古生代火成岩中识别出的 C 型埃达克岩<sup>[41-42]</sup>,表明他们曾经发生过岩石圈拆沉、去根作用;那么,现今的岩石圈山根显然是重新加厚的。欧亚—印度板块碰撞发生于 65 Ma 左右<sup>[43-44]</sup>,此后中国大陆进入西部挤压、东部伸展拉张的新格局<sup>[34]</sup>,中国西北大陆上新世晚期以来,在山前都出现巨厚的粗大砾石层,伴随强烈的构造运动、地震活动活跃<sup>[45-46]</sup>,说明该区确实重新经历了强烈挤压,而缺乏中生代岩浆活动,说明并没有地幔物质输入,因此,属于新生代“重新崛起”的新生代造山带型岩石圈。

现今额济纳旗地块具有正常的地壳厚度、没有山根,在中国大陆的应力场上处于西部挤压与东部拉张的过渡带西侧,其壳—幔结构大致可以代表中亚造山带的古生代造山带结构,属于中亚造山带西段新生代“重新崛起”后残留的古生代造山带型岩石圈。

东北地区是在中亚造山带基础上卷入滨西太平洋构造域的,以伴随燕山运动的中生代花岗岩广泛

分布为标志,形成的是以大兴安岭为代表的燕山期造山带型;但是,由于新生代以来包括贝加尔湖西侧和贺兰山—六盘山—龙门山东侧一线以东的中国大陆东部总体拉张伸展的格局<sup>[34]</sup>,在东部沿海并以大量新生代玄武质岩浆喷溢为标志形成裂谷型岩石圈。这样,西起额尔古纳河,东至松辽盆地西缘,以大兴安岭为代表的燕山期造山带型岩石圈是在新生代裂谷作用下残留的燕山期造山带型岩石圈。

这样,总体上中国北方大陆包含裂谷型和造山带型两类岩石圈,其中造山带型又可区分出分别代表古生代、中生代和新生代物质结构的造山带型岩石圈:从空间上,自西向东分别由以天山为代表的新生代造山带型、以额济纳旗为代表的古生代造山带型、以大兴安岭为代表的燕山期造山带型和张广才岭为代表的新生代裂谷型岩石圈组成(图4)。

依据岩石学方法(出露的前寒武系岩石、火成岩和深源包体资料)<sup>[23]</sup>、壳幔演化和造山带形成过程模型<sup>[47-50]</sup>以及地震波速与成分的关系<sup>[51]</sup>,建立的相应类型的壳幔岩石学结构和化学结构表明,造山带型岩石圈的陆壳岩石组成相当于花岗闪长质,裂谷型岩石圈陆壳相当于石英闪长质;岩石圈地幔造山带型主要由方辉橄榄岩—二辉橄榄岩(天山、额济纳旗)或二辉橄榄岩—方辉橄榄岩(大兴安岭)组成,裂谷型主要由二辉橄榄岩(张广才岭)组成,由岩石圈岩石学结构反映出中国北方大陆陆壳、岩石圈地幔物

质组成、结构的不均一性。

## 2 中国北方大陆及邻区大规模成矿作用

从造山带岩石圈演化的基本过程来看(图5a→b→c),造山带过程中岩石圈根失稳、去根(图5-b),才促使大量对流地幔物质和热输入大陆,而大规模软流圈物质上涌、强烈的壳幔相互作用致使岩浆活动达到峰期、形成大规模成矿作用,大规模岩浆活动和大规模成矿作用是相互依存的深部过程产物。因此,岩石圈根失稳、去根的深部事件,对于大规模成矿作用发生具有决定性的作用<sup>[6,8]</sup>。

高压熔融实验结果表明只要岩石达到某种深度(压力)和具有足够的热能,几乎所有常见的地壳岩石(从酸性岩到基性岩)的部分熔融,都可以产生类似于埃达克岩特征的岩浆,因为榴辉岩相条件下,高铝、高锶、重稀土和Y的极度亏损与显著的石榴子石固相残留有关,轻稀土的富集与其强不相容性有关,不发育负锶异常与大量斜长石分解进入熔体有关;至于部分熔融熔体中富钠或富钾可能更多地反映源岩的特征。因此,具有类似于埃达克岩地球化学特征的岩石,与其说是受形成机制的制约,不如说是元素配分行为受岩石矿物相约束的结果<sup>[8]</sup>。在造山带岩石圈演化过程中,陆壳加厚引起的壳内分异残留的是偏基性的榴辉岩相岩石,高密度的榴辉岩相

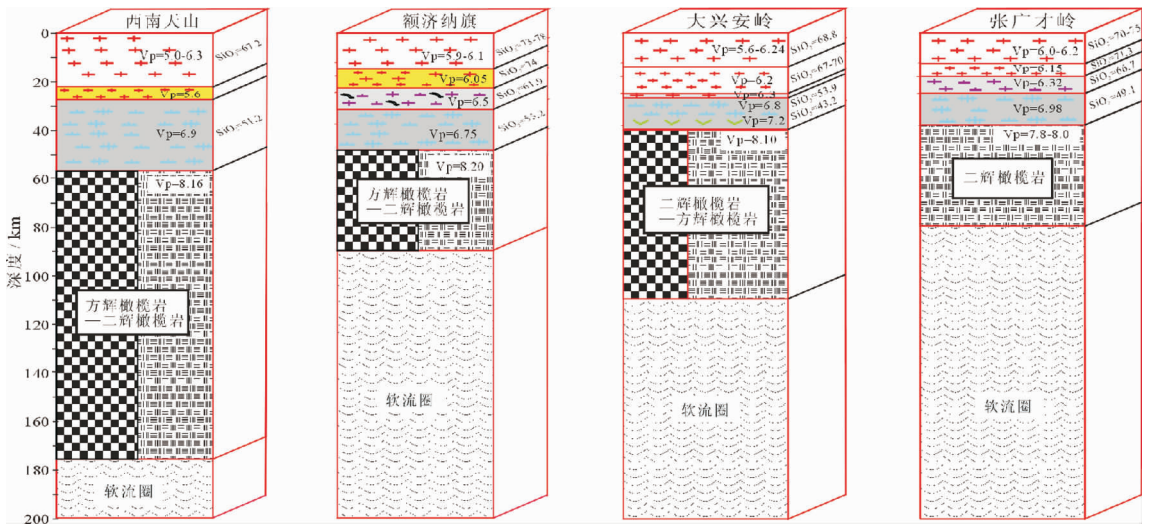


图4 现今中国北方大陆岩石圈类型及壳—幔岩石学结构

Fig.4 Present lithosphere types and structures of crust-mantle petrology in the continent of northern China

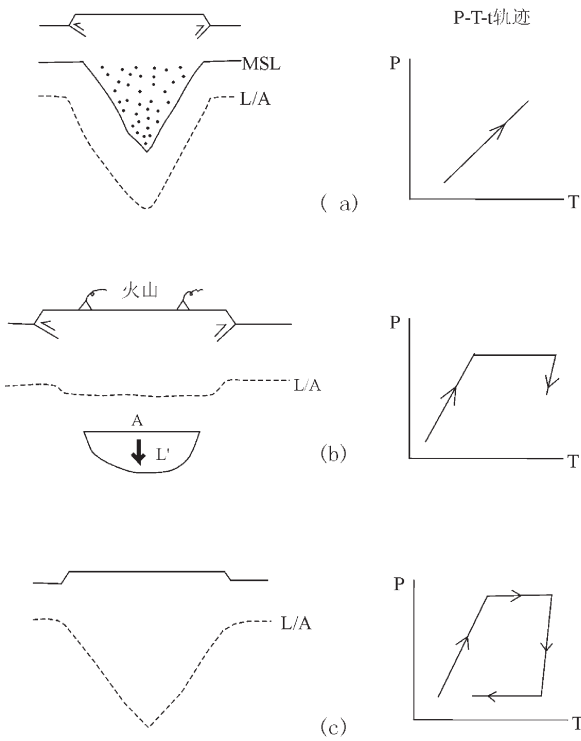


图 5 造山带岩石圈演化过程(据邓晋福等<sup>[52]</sup>)

MSL—强的力学岩石圈边界(黑点示中源地震);L/A—热学岩石圈边界;L—拆沉的岩石圈;A—软流圈

Fig.5 Sketch map showing a three-stage-model of tectonic phases for the evolution of the lithosphere beneath the Tibetan Plateau (after Deng J F, et al.<sup>[52]</sup>)

MSL—boundary of strong mechanic lithosphere (black dots represent meso-earthquakes). L/A—boundary of thermal lithosphere; L—delaminated lithosphere; A—asthenosphere

岩石堆积将导致其下的造山带岩石圈失稳、去根,如果在壳底残留有榴辉岩相岩石的话,上涌的软流圈物质和热导致去根后残留的榴辉岩相岩石部分熔融

将产生 C 型埃达克岩浆,从这个意义上说 C 型埃达克岩是造山岩石圈根拆沉去根的记录<sup>[7]</sup>,或者说 C 型埃达克岩的出现是一个地区曾发生大规模成矿作用的标志之一<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 中国西北及毗邻地区

位于西伯利亚和中朝—塔里木地台之间的中亚造山带,形成于古亚洲洋背景。该大洋大约在 1000 Ma 前开始张开,新元古代—早古生代是古亚洲洋发育和主要俯冲时期,至晚泥盆—早石炭世最终封闭<sup>[35,37,53-59]</sup>,大陆边缘增生明显、构造和岩浆活动强烈,形成丰富的矿产<sup>[60-63]</sup>;东段(东北)在中生代卷入环太平洋成矿构造域,伴随造山带演化发育强烈的岩浆活动和成矿作用<sup>[64]</sup>;遍布整个中亚造山带的以 Cu、Au 为特色的多金属矿床(图 6),成因上绝大多数与岩浆作用关系密切,在空间上常成群成带分布,产出矿种、火成岩、矿石均显示为幔源特征等<sup>[62,65]</sup>与其具有大洋发育历史的造山带相符。

统计新疆境内出露的火成岩体,11.2 万 km<sup>2</sup> 的火成岩岩体中,超镁铁岩 0.7%,镁铁岩 2.1%,闪长岩 6.5%,花岗闪长岩 18.8%,斜长花岗岩 4.1%,二长花岗岩 38.0%,钾长花岗岩 26.6%,碱长花岗岩 0.9%,石英二长岩、正长岩类 2.0%,碱性正长岩类 0.3%,其中花岗闪长岩—二长花岗岩—钾长花岗岩占 83.4%,说明以花岗岩类为主体;按花岗岩类岩体生成时代统计,前震旦纪 13.6%,早古生代 7.9%,晚古生代 69.5%,中生代 8.9%,新生代 0.0001%,可见在花岗岩类中又以晚古生代花岗岩类占主要地位,其中,石炭纪花岗岩类最多,占 46.9%。显示该区岩浆活动主要是加里东期和华力西期,其中又以华力西期最强烈(图 7-a),而中生代时期岩浆活动不发育(图 7-c)。

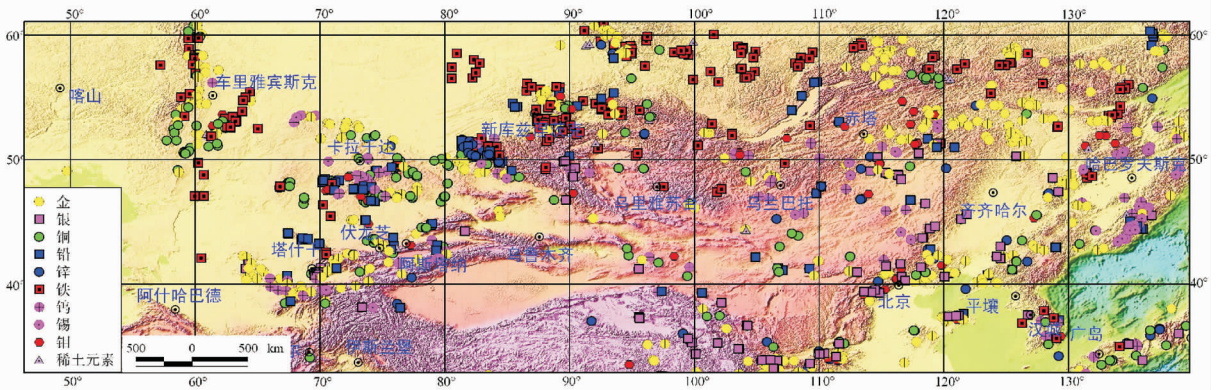


图 6 中国北方大陆及邻区主要金属矿床分布图

Fig.6 Distribution of main metallic ore deposits in the continent of northern China and adjacent areas

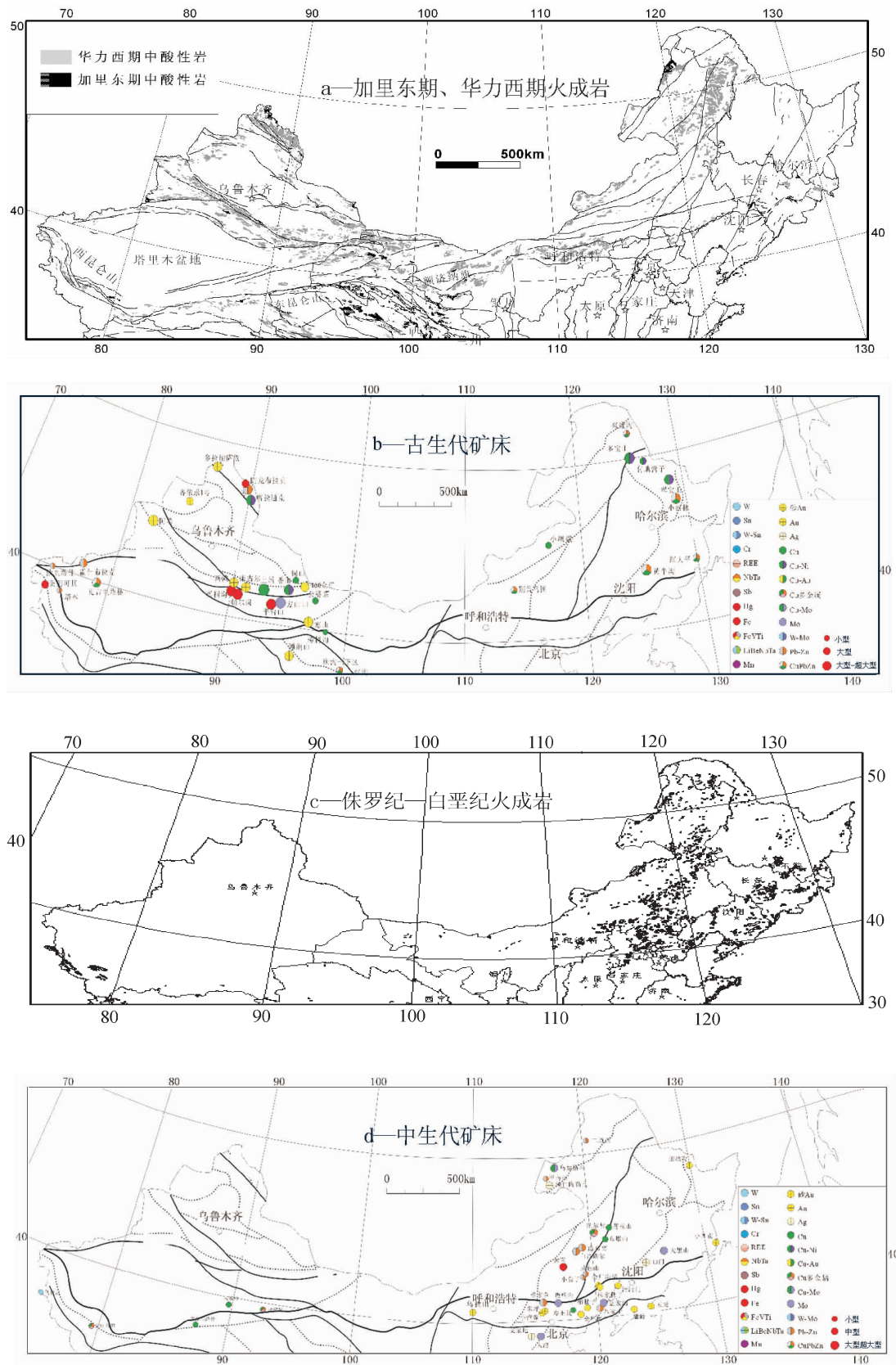


图7 中国北方大陆古生代、中生代火成岩、矿床分布图

Fig.7 Distribution of igneous rocks and ore deposits of Paleozoic and Mesozoic epochs in the continent of northern China

与岩浆活动密切相关的金属成矿作用成矿时代统计表明,在中国西北及邻区,在空间上,古生代大陆边缘成矿作用主要集中在两个时期,在北部阿尔泰山缘主要为早中泥盆世,在南部的天山主要为早石炭世;在时间上,虽然新元古代(例如内蒙古白乃庙铜矿)和早古生代(例如哈萨克斯坦的科克塔斯扎尔铜金矿、博谢库利铜钼矿、库斯莫龙铜锌矿、阿克巴斯套铜锌矿、热依桑铜钼矿等)也有成矿活动,但成矿作用的高峰期主要为晚古生代(图 7-b, 图 8),与晚古生代大规模岩浆作用相对应(图 7-a)。Sr、Nd 同

位素示踪指示成岩成矿物质大量来源于地幔<sup>[65]</sup>,是有对流地幔物质和热输入的标志;已经报道的 C 型埃达克岩主要是晚古生代的<sup>[41-42]</sup>,说明中亚造山带在晚古生代确实发生过岩石圈拆沉、去根作用以及大规模成矿作用。

由中国境内中亚造山带(西北地区)往西延的中、哈、蒙、俄毗邻地区,对 339 个铜矿床进行研究表明(图 9),按不同成因类型统计,与岩浆活动相关的矿床占绝大多数,即岩浆作用是该区成矿的主导因素;从形成时代上看,339 个矿床中,元古宙铜矿

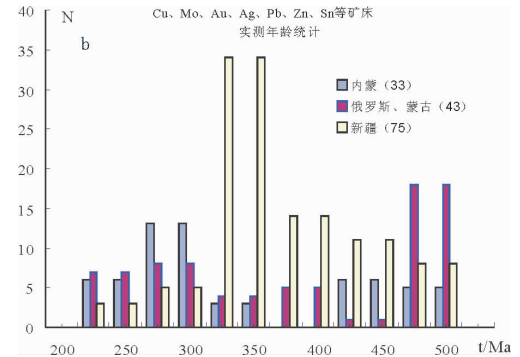
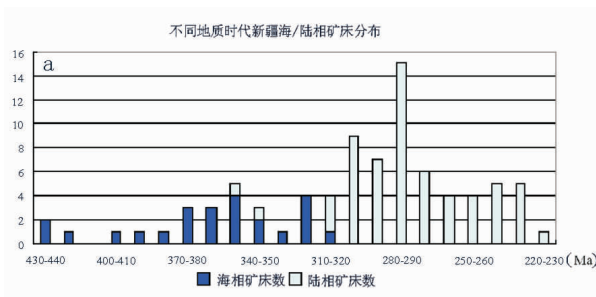


图 8 中国西北及邻区矿床年龄直方图

a—中国新疆北疆地区(转引自肖文交等<sup>[11]</sup>);b—中国西北及邻区(据邱瑞照等<sup>[8]</sup>)

Fig.8 Age distribution of ore deposits in northwest China and adjacent areas

a—north Xinjiang, China (quoted from Xiao W J, et al.<sup>[11]</sup>); b—northwest China and adjacent areas (after Qiu R Z, et al.<sup>[8]</sup>)

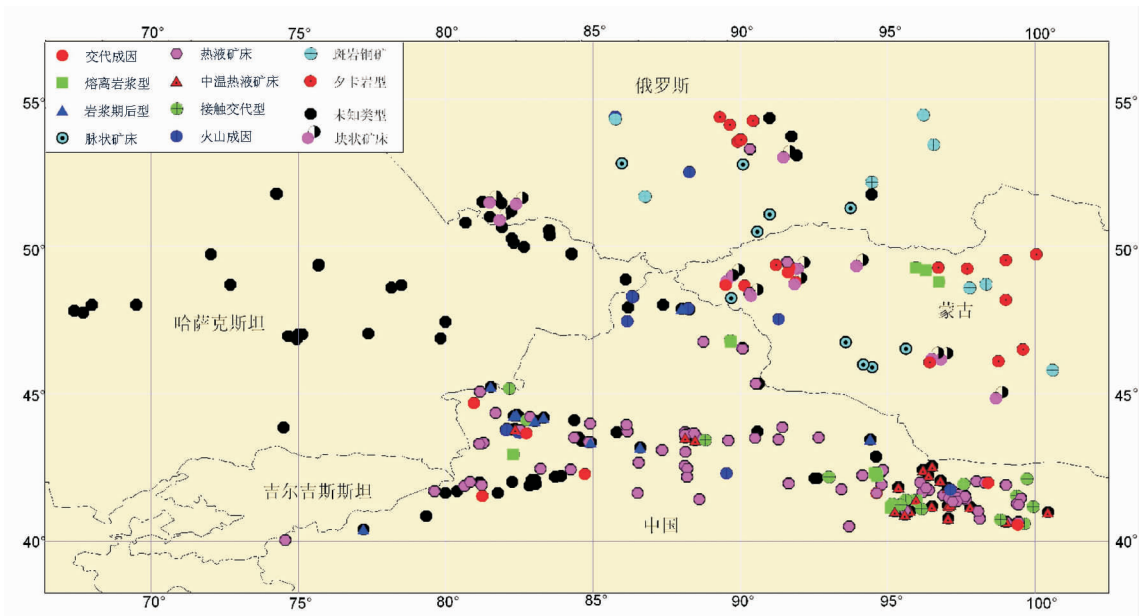


图 9 中、哈、蒙、俄毗邻地区铜矿床分布图

Fig.9 Distribution of copper deposits in the bordering areas of China, Kazakhstan, Mongolia and Russia

①邱瑞照, 陈秀法. 中哈合作巴尔喀什-准噶尔斑岩铜矿带地质和矿产地数据库建设(阶段性报告), 2007.



床 5%, 早古生代 13%, 晚古生代 56%, 中生代 1.5%, 新生代 4.5%, 时代不明的矿床 20%, 即该区与岩浆作用有关的成矿作用主要发生在晚古生代时期 (图 10)。这样, 包括中国境内西北地区中亚造山带区域<sup>[8,66]</sup>、往西延至中、哈、蒙、俄毗邻地区以及中亚 5 国地区<sup>[17]</sup>等, 其大规模成矿作用都主要发生在晚古生代时期。

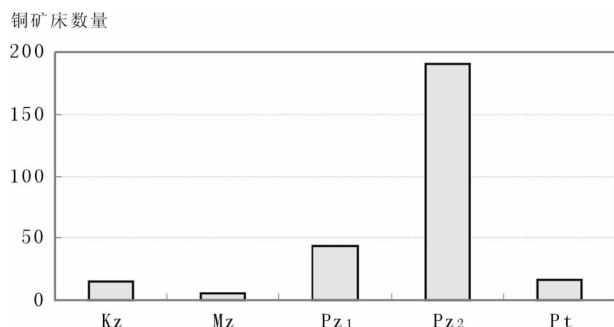


图 10 中、哈、蒙、俄毗邻地区铜矿床时代分布

Fig.10 Age distribution of copper deposits in the bordering areas of China, Kazakhstan, Mongolia and Russia

## 2.2 中国东北地区

中亚造山带东段的东北地区, 传统上就作为巨大的东亚华力西地槽褶皱带的一部分<sup>[67]</sup>, 属于多旋回地槽褶皱系<sup>[68-71]</sup>。李春昱<sup>[39]</sup>根据板块构造划分的 4 条俯冲带, 其中的 3 条古生代俯冲带均可与西部的俯冲带相连。俄罗斯学者也明确提出兴安-鄂霍茨克带是布列亚地块与锡霍特阿林构造带之间的一个活动大陆边缘带等, 而由岗仁、马门和图兰等几个裂解的块体组成的布列亚地块是在古生代期间加入到华北和西伯利亚板块之间的, 这一认识也反映在最新出版的中俄等国际合作编图成果中<sup>[72]</sup>。近年资料显示佳木斯地块的麻粒岩相变质作用发生在 500 Ma 的泛非期<sup>[28,73]</sup>, 并鉴定出存在泛非期的花岗质侵入体<sup>[74]</sup>; 佳木斯地块麻粒岩相变质的孔兹岩系及在变质过程中形成的石榴石花岗岩, 其年龄在 500 Ma 左右; 在柳毛地区一个经历过麻粒岩相变质的闪长岩, 其变质年龄与其他岩石一样也是 500 Ma 左右<sup>[74]</sup>, 可以认为这些是区内确实经历了古亚洲洋历史的早古生代地质记录。在黑龙江省东部那丹哈达褶皱带

的岩石中发现的鲕类和放射虫化石<sup>[75]</sup>, 则可能曾属于海西期地槽褶皱带的证据; 从火成岩来看, 尽管近年重新厘定东北地区的花岗岩时代以中-晚侏罗世为主<sup>[9,76-77]</sup>, 但确实存在古生代花岗岩, 如加里东期的大玉山岩体、石场屯岩体和华力西期的后庙岭、林稻垛岩体等<sup>[60]</sup>, 以及采自松辽盆地西部杜 1-4 井中未变形的 305 Ma 的花岗岩<sup>[78]</sup>。上述证据说明东北地区经历了古亚洲洋演化, 确实是中亚造山带的组成部分。

在内蒙中部相继确定的一系列反映板块构造作用证据的蓝片岩、蛇绿岩、火山-深成岩带及相关的古生物学和放射性同位素年代学证据<sup>[38-40,53,56,79-80]</sup>, 这些标志性的构造岩相带向东和北东方向均无确切的去向。可以认为正是东北地区中生代被卷入太平洋构造域, 从而导致区内的古生代花岗岩、构造岩相带被中生代强烈“改造”后的具体体现。

对比中亚造山带不同地区的火成岩岩石组合 (图 11), 新疆阿尔泰、天山和内蒙古地区的古生代火成岩岩石组合具有相似性, 岩石组合以花岗闪长岩+花岗岩为特征 (图 11-d,e,f); 而东北地区的中生代火成岩, 从早中侏罗世→晚侏罗世→早白垩世, 岩石组合从花岗闪长岩+花岗岩 (图 11-a)→少量花岗闪长岩+花岗岩 (图 11-b)→无花岗闪长岩+花岗岩 (图 11-c)。其中反映古生代大陆地壳生长成熟度的花岗闪长岩, 在中生代对流地幔物质和热输入下, 花岗闪长岩渐次消失, 反映了中生代对流地幔物质和热输入下改造古生代陆壳的过程; 由于中生代再次输入的对流地幔改造的是显生宙陆壳, 因此多数燕山期火成岩、矿石仍保留了与西部一样呈  $\epsilon \text{Nd}(t)$  正值特征<sup>[69]</sup>和以 Cu、Au 为主的成矿特色 (图 7-d)。已经报道的 C 型埃达克岩主要是燕山晚期的<sup>[42]</sup>, 说明中亚造山带东段 (东北地区) 在燕山晚期确实发生过岩石圈拆沉、去根作用, 120~140 Ma 大规模岩浆活动和大规模成矿作用峰期与此深部事件相对应。

## 3 岩石圈演化与成矿关系

根据地质历史, 位于西伯利亚和中朝-塔里木地台之间的中亚造山带形成于古亚洲洋背景。该大洋约在 1000 Ma 前开始张开, 新元古代-早古生代是古亚洲洋发育和主要俯冲时期, 在经历过若干微陆块之间、微陆块与南北大陆之间的碰撞之后, 直至

① 纳吉宾娜 M.C. 东北北部的地质构造. 黑龙江流域综合考察学术报告, 1959.

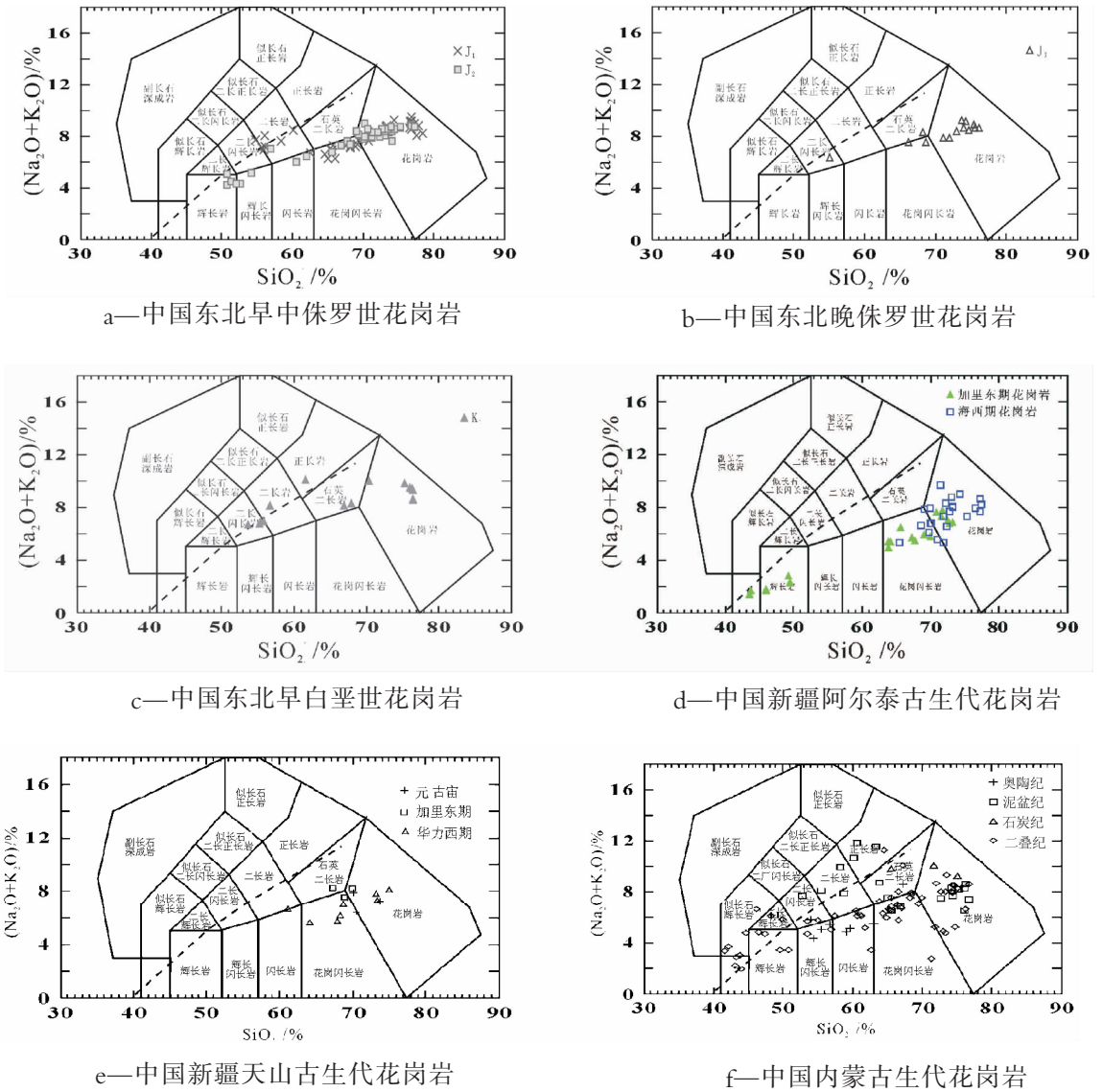


图 11 中国北方大陆不同地段火成岩 SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)图

Fig.11 SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) diagram of igneous rocks from different segments of the continent of northern China

晚泥盆—早石炭世最终封闭<sup>[82-84]</sup>;伴随西伯利亚、蒙古、中朝—塔里木拼合,由中亚造山带焊接构成北方大陆。由此,中亚造山带经历了大洋张开、俯冲、碰撞完整过程,经历了陆缘增生、后碰撞和陆内造山作用3个阶段<sup>[83]</sup>,在陆缘增生造山和后碰撞地壳垂向增生过程中,发生了强烈的壳幔相互作用<sup>[5,11-12,16,49]</sup>,保存了亚欧大陆形成和演化的完整信息。因此,中国北方大陆及邻区造山带型岩石圈主体形成于古生代。理论上讲,整个中亚造山带同属于古生代造山带型

岩石圈,但是,现今自西向东至少可识别出4个岩石圈单元(图4),说明该造山带由于经历了中生代大陆动力场的变化,不同地段岩石圈的物质或者结构发生了程度不同的演化。

从地质事件序列来看,中生代时期中国大陆最重要的地质事件是:西部发育特提斯洋和东部发育造山带;新生代时期,中国大陆西部挤压、东部拉张伸展<sup>[34,72]</sup>。中国北方大陆与南方大陆三叠纪拼合形成中国主体大陆后,随着中国大陆动力学机制由以南

北向为主向以东西向为主转变,西部中生代张开发育特提斯洋、新生代挤压造山形成特提斯-喜马拉雅成矿域,在中国大陆西部(南北双向)挤压、东部伸展的动力学背景下,在高原扩展卷入秦祁昆造山带西段(祁连山、昆仑山)使之成为新生代造山型岩石圈的同时,也使新疆境内的天山、阿尔泰山等古生代中亚造山带“重新崛起”成为新生代造山型岩石圈,鉴于该区自早中生代以来无大规模的岩浆活动,因此后期经历的深部过程主要是壳-幔内物质循环、重组,即岩石圈壳-幔物质是古生代形成的,而结构则是新生代形成的(老物质新结构),这些地区“重新崛起”后残留了以额济纳旗为代表的古生代中亚造山带型岩石圈(老物质老结构)。中新世代陆内构造作用,形成的盆地对砂岩型铜矿、铀矿和 MVT 型铅锌矿等改造型矿床的形成有重要影响,而金等矿床的时空分布大多沿大型断裂系统出露,即呈现大型线性构造控矿特征。

在中国东部则中生代挤压造山、新生代拉张裂谷构成滨西太平洋成矿构造域;中亚造山带东段(东北地区),在燕山期造山过程中对流地幔物质和热输入,使古生代形成的中亚造山带造山型岩石圈陆壳、岩石圈地幔都被强烈改造,形成了东北燕山期造山带岩石圈;燕山期造山带岩石圈山根,在  $J_3-K_1$  时期的再次失稳、去根、大规模软流圈物质和热上涌,导致该区 120~140 Ma 大规模岩浆活动和大规模成矿作用发生,由于再次输入的对流地幔改造的是显生宙陆壳,因此多数燕山期火成岩、矿石仍保留了与西部一样呈  $\varepsilon Nd(t)$  正值特征和以 Cu、Au 为主的成矿特色;新生代以大量玄武岩喷发为标志经历的裂谷作用,对流地幔物质和热输入的再次输入,又使东北地区燕山期造山带型岩石圈的陆壳、尤其是岩石圈地幔受到强烈改造,形成以松辽盆地为代表的新生代裂谷型岩石圈,现今只在没有被新生代玄武岩喷发“涉及”的大兴安岭,“残留”了以大兴安岭为代表的燕山期造山带型岩石圈,因此其陆壳和岩石圈地幔物质、结构都是燕山期形成的。

由此可见,不同岩石圈类型的形成、大规模成矿作用发生与大陆动力学演化过程密切相关。

## 4 有关问题探讨

成矿作用和矿床是壳-幔物质分异作用的表现和产物<sup>[1]</sup>,因此,也可以说矿床是聚集了一定数量有

用组分(在现今技术条件下有经济价值)的深部岩石圈壳-幔物质。造山带是壳-幔相互作用最强烈的地区,绝大多数的金属矿床成矿作用与造山带的岩浆作用有关,其中的岩浆岩又以花岗质岩石为主体。因此,从岩石圈演化角度来审视成矿作用是现代矿床研究的必然趋势;但是,由于地球历史是漫长的,在漫长的地质演化过程中,每一次大地构造的活动,除了留下其本身的痕迹外,还会对原有的地质构造事件留下的遗迹进行改造,特别是对于经历过多次拼合形成的复杂中国大陆来说,多次造山作用可以使同一地区的岩石圈、岩石圈不连续受到多次“改造”,展现在人们面前的是一幅更加复杂的景象,因此,笔者强调从岩石圈深部地质过程来识别成矿作用过程<sup>[7]</sup>。以下笔者概略探讨有关区域找矿方向和深部空间找矿的问题。

### 4.1 区域找矿方向

对于中亚造山带而言,位于银川盆地以西的额济纳旗地块(西蒙古高原)属于古生代造山带,中生代仅在块体边界有岩浆活动,因此其主体属于古生代的物质和结构(老物质老结构),找矿目标无疑主要是古生代时期形成的矿床。

对于中亚造山带西段(西蒙古高原以西)的天山、阿尔泰山,乃至昆仑山地区,自早中生代以来无大规模的岩浆活动,但上新世晚期之后地壳构造运动强烈,后期经历的主要是壳-幔内物质循环、重组,即岩石圈壳-幔物质是古生代形成的,而结构是新生代形成的(老物质新结构),因此在该区域的找矿目标依然主要是古生代时期形成的矿床。

对于中亚造山带东段乃至中国东部而言,残留的燕山期造山型岩石圈区域无疑是寻找燕山期矿床的重要区域,在其东侧的裂谷型岩石圈分布区域,就整体而言,虽然它们是由新生代对流地幔输入改造燕山期造山型岩石圈而形成裂谷型岩石圈,但在对流地幔输入方式上是玄武岩喷发添加在燕山期造山型岩石圈陆壳上的,在垂向输入方式上是线状的,因此玄武岩覆盖下的陆壳仍然主要是燕山期形成的,所以,在中亚造山带东段目前被玄武岩覆盖的大片区域依然是寻找燕山期矿床的重要区域。

另外,还需要提及的是中国大陆是个复杂的大陆系统,经历过多期多次造山作用和多期次岩浆作用,笔者认为,一个地区的大规模成矿作用主要取决于最后一次的最强烈的岩浆-构造事件<sup>[8]</sup>。对于东北

地区而言,尽管经历过晚古生代大规模成矿作用,但是中国东部“中生代成矿大爆发”对该区进行了强烈的改造、叠加,因此东北地区主体应该以燕山期形成的矿床为主,而对于寻找晚古生代以及更早形成的矿床,宜从改造后残留的、至今相对完整的块体中去寻找。

从大尺度来看,中国北方大陆 4 类岩石圈所代表的区域,额济纳旗和大兴安岭岩石圈所代表的区域的相对完整性,使其更有希望找到分别为古生代和中生代的世界级规模的矿床;而天山和张广才岭岩石圈所代表的区域,后期经历的变化使其可能找到数量更多且变化性更大的古生代、中生代矿床。如中国西北地区的古生代金等矿床,大多沿大型断裂系统出露、呈现大型线性构造控矿特征,与内蒙地区矿床产出特点相比,可被看作是该区“重新崛起”后的体现。

#### 4.2 深部找矿空间

20 世纪 80 年代中期以来,中国地质科学家们对深部成矿作用、深部找矿进行了积极探索<sup>[85-94]</sup>,取得多方面的重要成果<sup>[95-107]</sup>。近年来,随着一批深部找矿项目的实施,特别是全国危机矿山接替资源找矿的实施,深部找矿工作取得重要进展<sup>①</sup>,如湖北大冶铁矿、辽宁红透山铜矿、阜新煤矿、辽阳市弓长岭铁矿、迁安铁矿、广西南丹县铜坑锡矿、湖南瑶岗仙钨矿、宝山铅锌银矿、黄沙坪铅锌矿<sup>②</sup>等。这些实例,展示了深部找矿的前景,并蕴育着地球科学理论创新、方法创新的重要机遇<sup>③</sup>。

从岩石圈角度看大陆成矿的基本过程<sup>[108]</sup>:在一个被扰动的非正常状态的岩石圈-软流圈动力学系统中,①岩石圈的巨大减薄或增厚作用,为对流地幔向大陆的输出提供条件,从软流圈(或对流地幔)中分出的灼热的新生物质,和由它诱发的陆壳物质的被加热和再活化,萃取壳-幔中元素,最终导致岩浆-流体-成矿系统的形成;②岩浆-流体-成矿系统沿岩石圈尺度不连续向上运移,随着该系统的

演化,岩浆定位于与岩石圈尺度不连续有成因联系的断裂系统中,并对周围地壳加热,同时萃取周边岩石中的有用成矿元素进入多个子系统;③随演化,这个被扰乱的系统在它的后期或末期,逐渐趋于平衡和稳定,整个系统逐渐冷却,岩浆大部分固结,岩浆中将放出大量含矿流体,这时被加热的地壳也将放出大量脱水流体,加上深部软流圈和岩浆房冷却放出的大量流体,以及可能加入进来的被加热的大气降水,它们一起汇入了这个巨大的流体成矿系统中,可能成为最好的成矿流体系统,在某些特定的构造部位汇聚成矿(图 12);对于一个有多次对流地幔注入的构造单元来说,大规模成矿作用主要取决于最后一次的最强烈的岩浆-构造事件。

目前,中国现有的金属矿山探采深度多在 300~500 m,只有少数铁、铜和金矿开采深达 1000 m。国外开采超过千米的金属矿山有 80 多座,其中美国和加拿大的一些矿山采深超过 2000 m,最深的南非金-铀砾岩型金矿采深超过 4500 m;近年来发现的,如加拿大 Sudbry 铜镍矿 2600 m,中国华北鞍山式铁矿、云南会泽铅锌矿、辽宁红透山铜矿、胶东和小秦岭金矿等都在千米以下找到工业矿体。俄罗斯科拉半岛科学钻探中,在 10 km 上下深度发现了变超基性岩中的铜-镍硫化物和基性岩中的铁-钛矿化;中国东海科学深钻发现 600 m 厚的金红石矿资源。其实,这些深度与地壳平均厚度(45 km)相比,仍然属于地球表层很浅的一部分(图 13)。由于地壳中主量元素的种类(化学成分)决定了地壳中天然化合物(矿物)的类型,而主要矿物种类及组合关系决定了其集合体(岩石)的分类,上、中、下地壳中不同的岩石组成,蕴涵着不同的矿产组合(图 13);在中国大陆下地壳(如迁安铁矿)、中上地壳(如红透山、金川)产出的矿床实例,说明地壳不同深度确实蕴藏着丰富的资源。上述模型和相关实例表明,深部资源前景是乐观的,“第二找矿空间”(500~2000 m)<sup>[109-110]</sup>、“第三找矿空间”(2000~4500 m),乃至更深部的资源值得期待。

①危机矿山专项实施以来找矿成效显著. [http://www.mlr.gov.cn/zt/qgwjks/gzdt/200711/t20071102\\_90388.html](http://www.mlr.gov.cn/zt/qgwjks/gzdt/200711/t20071102_90388.html). 2007.3.6. 国土资源部地质勘查司.

②湖南三家危机矿山获新生. [http://www.mlr.gov.cn/xwtd/dfdt/200903/t20090326\\_116956.htm](http://www.mlr.gov.cn/xwtd/dfdt/200903/t20090326_116956.htm). 2009.03.26. 信息来源:中国国土资源报.

③汪民在第九届全国矿床会议上提出 创新具有中国特色的大陆成矿理论. [http://www.mlr.gov.cn/xwtd/jrxw/200811/t20081119\\_112055.htm](http://www.mlr.gov.cn/xwtd/jrxw/200811/t20081119_112055.htm). 2008.11.19. 信息来源:中国国土资源报.

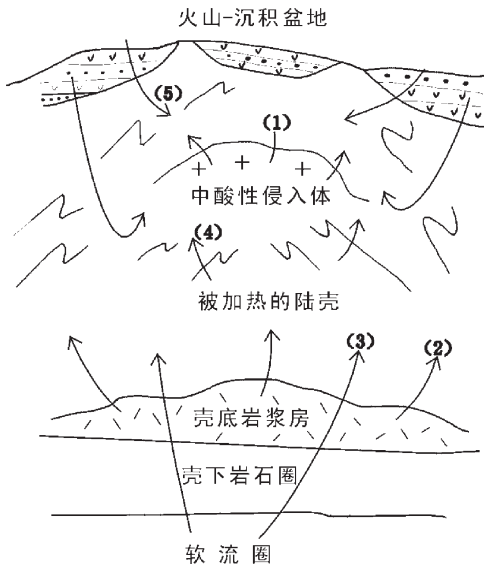


图 12 岩石圈-软流圈成矿系统示意图(据邓晋福等<sup>[108]</sup>)

(1)—区域岩浆活动临近结束,花岗岩侵入体冷却放出的热液;(2)—壳底及壳内岩浆房冷却放出的热液;(3)—软流圈冷却放出的热液;(4)—被加热的陆壳放出的热液;(5)—地壳水循环系统的热液;(1)~(4)为内生流体成矿系统,(5)为外生流体成矿系统

Fig.12 Sketch diagram showing the metallogenic system of lithosphere-asthenosphere (after Deng Jinfu et al. <sup>[108]</sup>)

(1)-hydrothermal liquid ejected by cooling granitic intrusion towards the end of regional magmatic activity; (2)-hydrothermal liquid ejected by cooling magma chamber at the bottom of or within the crust; (3)-hydrothermal liquid ejected by cooling asthenospheric material; (4)-hydrothermal liquid ejected by heated crust; (5)-hydrothermal water of the crustal cyclical system. (1)~(4)-belongs to the metallogenic system of endogenous fluids, and (5) belongs to the metallogenic system of exogenous fluids

综上所述,无论是在研究程度较高的中东部地区,在研究程度较低的西部地区,还是境外资源勘查,以及深部找矿,对于选区和找矿部署,这是个非常现实的课题,着眼点不仅仅是“曾经拥有”,而更重要的是辨别现今矿产资源的存留状态差异,才能为选区部署提供依据。举例来说,新疆境内的阿尔泰山、天山和昆仑山地区的成矿作用与古亚洲洋演化密切相关,大规模成矿作用都是主要发生在晚古生代,虽然在新生代以来它们伴随西部挤压都“重新崛起”,经历的是壳内、幔内物质循环、重组,但是昆仑山地区由于受青藏高原拓展的影响总体向塔里木盆地逆掩,同时期、同水平的晚古生代矿床总体呈现被掩埋特征,而与阿尔泰山、天山地区的晚古生代矿床呈现不同的存留状态。因此,从壳幔深部演化角度来审视地质过程、成矿作用过程是值得提倡的<sup>[17]</sup>,以一个地区的大规模成矿作用为主线,阐明大规模成矿作用发生的动力学背景、时期以及波及的地区;对大规模成矿作用发生的区域,研究、判别大规模成矿作用发生后的地质作用对哪些地区进行了叠加改造,区分哪些地区改造得强,哪些地区改造得弱,复原其地质过程,才有可能更好地认识成矿过程,更好地为勘查找矿、部署服务,提高找矿效果。

致谢:感谢专辑特约组稿人耿树方研究员、《中国

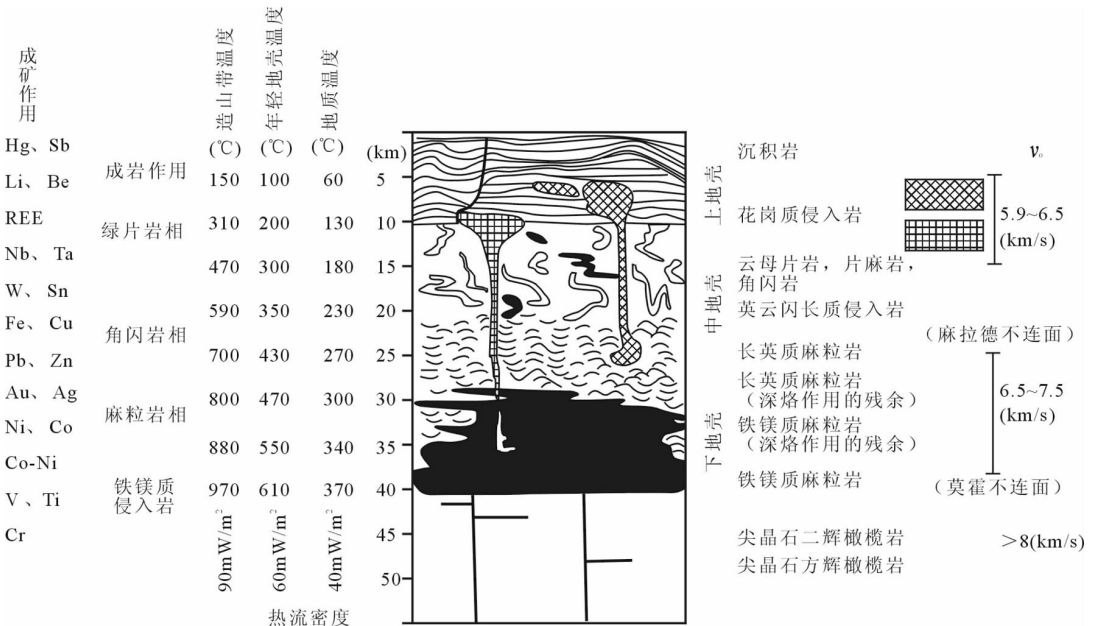


图 13 大陆地壳组成模型(转引自文献[6],左侧成矿作用为作者添加)

Fig.13 Composition model of continental crust (map quoted from reference [6], metallogenic elements on the left side added by the authors)

地质》编辑部王学明研究员邀请撰写本文。研究工作得到李廷栋院士、肖庆辉研究员、邓晋福教授、耿树方研究员等专家指导,谨致谢忱。

### 参考文献(References):

- [1] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):309-315.  
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China [J]. Mineral Deposits, 1999, 18 (4):309-315 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邓晋福,吴宗絮. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游Cu-Fe成矿带[J]. 安徽地质, 2001, 11(2):86-91.  
Deng Jinfu, Wu Zongxu. Lithospheric thinning event in the Lower Yangtze Craton and Cu-Fe metallogenic belt in the Middle and Lower Yangtze river reaches[J]. Geology of Anhui, 2001, 11(2):86-91(in Chinese with English abstract).
- [3] 杜建国,戴圣潜,莫宣学,等. 安徽沿江地区燕山期火成岩成矿地质背景[J]. 地学前缘, 2003, 10(4):551-560.  
Du Jianguo, Dai Shengqian, Mo Xuanxue, et al. Petrogenic and metallogenic settings of area along Yangtze River in Yanshanian, Anhui Province [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (4):551-560 (in Chinese with English abstract).
- [4] 肖庆辉,邢作云,张昱,等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地学前缘, 2003, 10(3):221-229.  
Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (3):221-229(in Chinese with English abstract).
- [5] 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):336-343.  
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. Geology in China, 2005, 32(3):336-343(in Chinese with English abstract).
- [6] 邱瑞照,李廷栋,周肃,等. 中国大陆岩石圈物质组成及演化[M]. 北京:地质出版社, 2006:1-308.  
Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Zhou Su, et al. The Composition and Evolution of Lithosphere in China Continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006:1-308 (in Chinese with English abstract).
- [7] 邱瑞照,邓晋福,李廷栋,等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用[J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊):32-40.  
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Li Tingdong, et al. Lithospheric discontinuity and continental metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(Supp.): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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.  
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 with English abstract).
- [9] 孙德有,吴福元,林强,等. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用[J]. 岩石学报, 2001, 17(2):227-235.  
Sun Deyou, Wu Fuyuan, Lin Qiang, et al. Petrogenesis and crust-mantle interaction of early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001,17(2):227-235(in Chinese with English abstract).
- [10] 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.  
Zhai Yusheng, Zhang Hu, Song Honglin, et al. Large Structural and Superlarge Deposit [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1997 (in Chinese with English abstract).
- [11] 肖文交,舒良树,高俊等. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. 新疆地质, 2008, 26(1):4-8.  
Xiao Wenjiao, Shu Liangshu, Gao Jun, et al. Continental dynamics of the central asian orogenic belt and its metallogeny [J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(1):4-8(in Chinese with English abstract).
- [12] 王涛,李伍平,李金宝,等. 东天山东段同造山到后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长意义——Sr、Nd同位素证据[J]. 岩石学报, 2008. 24(4):762-772.  
Wang Tao, Li Wuping, Li Jinbao, et al. Increase of juvenile mantle-derived composition from syn-orogenic to post-orogenic granites of the east part of the eastern Tianshan (China) and implications for continental vertical growth: Sr and Nd isotopic evidence [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008. 24 (4):762-772 (in Chinese with English abstract).
- [13] 邓晋福,藤吉文,洪大卫,等. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿[M]. 北京:地质出版社, 2008:1-212.  
Deng Jinfu, Teng Jiwen, Hong Dawei, et al. Characteristics of the Geophysical Fields, Deep Geology and Mineralizing Processes in China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2008:1-212 (in Chinese with English abstract).
- [14] Kutina J. Metallogeny of mantle-rooted structure extending across the western edge of the Proterozoic North American craton [J]. Glob. Tect. Metall., 1991, 4(1/2):21-51.
- [15] Kutina J. Regional mantle-rooted discontinuities extending transversely to the margins of cratons and adjacent mobile belts [J]. Glob. Tect. Metall., 1995, 5(1/2):7-18.
- [16] Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Alaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature[J].1993, 364:299-307.
- [17] 邱瑞照,周肃,李文渊,等. 中亚地区矿产资源勘查开发方向[J]. 地质通报, 2009, 28(2/3):307-314.  
Qiu Ruizhao, Zhou Su, Li Wenyuan, et al. Study on the direction of the exploration and exploitation for mineral resources in the central Asia area[J]. Geological Bulletin of China, 28(2/3):307-314 (in Chinese with English abstract).
- [18] Dziewonski A M, Anderson D. Preliminary reference earth model [J]. Phys. Earth Planet. Inter., 1981, 25:297-356.
- [19] B·B·别洛乌索夫. 地球构造圈[M]. 北京:地震出版社, 1983:1-476.

- Белоусов В. В. Tectonosphere of the Earth [M]. Beijing: Seismological Press, 1983:1-476 (in Chinese).
- [20] 黄怀曾. 全球地质断面研究现状及存在问题 [C]//张炳熹, 洪大卫, 吴宣志. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 1997:8-19. Huang Huaizeng. research status of geoble geoscience transect and its problems [C]//Zhang Bingxi, Hong Dawei, Wu Xuanzhi(ed.). The New Study on Lithosphere. Beijing: Atomical Energy Publishing House, 1997:8-19(in Chinese).
- [21] National Research Council (NRC). Solid-Earth Science and Society[M]. Washington D C, National Acad. Press, 1993:47-83.
- [22] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996. Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Root-Plume Tectonics of China——Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [23] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大陆岩石圈岩石学结构、类型与不均一性[J]. 中国地质, 2006, 33(4):842-851. Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. Petrological structure, type and inhomogeneous of the lithosphere beneath continental China[J]. Geology in China, 2006, 33(4):842-851(in Chinese with English abstract).
- [24] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 1988, 2:196-204. Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area [J]. Scientia Geologica Sinca, 1988, 2: 196-204 (in Chinese).
- [25] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5):611-626. Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of the terrestrial heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. Chinese Journal of Sinica, 2001, 44 (5): 611-626 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王良书, 李成, 杨春. 塔里木盆地岩石层热结构特征 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(6):794-303. Wang Liangshu, Li Cheng, Yang Chun. The lithospheric thermal structure beneath Tarim Basin, Western China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39 (6):794-303 (in Chinese with English abstract).
- [27] Yuan X C. Atlas of Geophysics in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [28] 张贻侠, 孙运生, 张兴洲, 等. 中国满洲里-绥汾河地质断面[M]. 北京: 地质出版社, 1998. Zhang Yixia, Sun Yunsheng, Zhang Xingzhou, et al. The Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [29] 卢造勋, 夏怀宽. 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. Lu Zaoxun, Xia Huaikuan. Specification of Dongwuzhumuqinqi Area, Inner Mongolia - Donggou in Liaoning Province Geoscience Transect [M]. Beijing: Seismological Press. 1992 (in Chinese).
- [30] 孙武城, 马宝林, 宋松岩, 等. 湖北随州至内蒙古喀喇沁旗地质断面说明书[M]. 北京: 地震出版社, 1992. Sun Wucheng, Ma Baolin, Song Songyan, et al. Explanation of Suizhou, Hubei -Kalaqinqi Inner Mongolia Geotransect [M]. Beijing: Seismological Press. 1992(in Chinese).
- [31] 孙武城, 徐杰, 扬主恩, 等. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质断面说明书[M]. 北京: 地震出版社, 1992:1-66. Sun Wucheng, Xu Jie, Yang Zhuen, et al. The Specification of Fengxian, Shanghai - Alca Zuoqi, Inner Mongolia Geoscience Transect[M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-66(in Chinese).
- [32] 陈毓川. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 1999:1-536. Chen Yuchuan. Evaluation Value of Mineral Resources in the Main Ore-forming Zones of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:1-536 (in Chinese).
- [33] 彭聪, 高锐. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究[M]. 北京: 地震出版社, 2000:1-121. Peng Cong, Gao Rui. Study on the Landscape Orientation Change of the Lithosphere/Asthenosphere Structure in China Continent and Adjacent Sea Area[M]. Beijing: Seismol. Press, 2000:1-121 (in Chinese).
- [34] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大地构造单元新格局——从岩石圈角度的思考[J]. 中国地质, 2006, 33(2):401-409. Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. A new pattern of tectonic units of China considered in the light of lithosphere [J]. Geology in China, 2006, 33(2):401-409(in Chinese with English abstract).
- [35] 冯益民. 新疆西部构造发展史[C]//中国北方板块构造文集(第一集). 北京: 地质出版社, 1986. Feng Yimin. Conformation Phylogeny in Xinjiang Westward[C]// PlateTectonics Corpus in the North of China (the first volume ). Beijing: Geological Publishing House, 1986(in Chinese).
- [36] 高振家. 再论天山地区前寒武纪地层问题[J]. 新疆地质, 1990, 8(1):80-90. Gao Zhenjia. Second discussion about stratigraphy problems of the Precambrian of Tianshan Region[J]. Xinjiang Geology, 1990, 8(1): 80-90 (in Chinese with English abstract).
- [37] 胡嵩琴, 张国新, 李启新, 等. 新疆北部同位素地球化学与地壳演化 [C]//涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993:27-38. Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Li Qixin, et al. Isotopes geochemistry and crustal evolution in Northern Xinjiang[C]//Tu Guangzhi. The New Process of Solid Geoscience in Northern Xinjiang. Beijing: Science Press, 1993:27-38(in Chinese).
- [38] 胡晓. 内蒙古地槽区的蓝片岩及其地质特征[M]. 北京: 地质出版社, 1983. Hu Xiao. Glaucofane Schists and Their Geological Nature in Nei Mongol Geosynclinal Region [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1983(in Chinese).
- [39] 李春昱,王荃,刘雪亚,等.亚洲大地构造的演化[J].中国地质科学院院报 (“庆祝李春昱教授从事地质科学事业60周年”专辑), 1984, 10:3-11.
- Li Chunyu, Wang Quan, Liu Xueya, et al. The evolution of geotectonics of Asian [J]. Acta Geoscientia Sinica (Celebrating the 60th Anniversary of Engaging in the Geological Geophysical Work in the Life of Pro. Li Chunyu), 1984,10: 3-11 (in Chinese with English abstract)
- [40] 邵济安. 内蒙古中部早古生代蛇绿岩及其在恢复地壳演化历史中的意义[C]//中国北方板块构造论文集(第一集). 北京:地震出版社, 1986:87-101.
- Shao Ji'an. Paleozoic ophiolite and its significance of the historical recovery of crustal evolution in Central Nei Mongol (Inner Mongolia), China [C]//Plate Tectonics Corpus in the North of China (the first volume). Beijing:Seismological Press, 1986:87-101(in Chinese).
- [41] 熊小林,赵振华,白正华,等.西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd和Sr同位素组成的限制[J].岩石学报, 2001, 17(4):514-522.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, et al. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 514-522(in Chinese with English abstract).
- [42] 张旗,秦克章,许继峰,等.中国与埃达克质岩有关的矿床分布、找矿方向及找矿方法刍议[J].华南地质与矿产, 2004, 3(2):1-8.
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Xu Jifeng, et al. Discussion of distribution, prospecting principle and method for deposits related to adakites in China [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004, 3(2):1-8(in Chinese with English abstract).
- [43] 周肃,莫宣学,董国臣,等.西藏林周盆地林子宗火山岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年代格架[J].科学通报, 2004, 49(20):2095-2103.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, et al. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology of Cenozoic Linzong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18):1970-1979.
- [44] 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等.印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J].地学前缘, 2003, 10(3):135-148.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 135-148 (in Chinese with English abstract).
- [45] 新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京:地质出版社, 1993.
- Geology Minerals Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Geology Reports of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993(in Chinese with English abstract).
- [46] 刘训.中国西北盆地地区地壳结构及其演化[J].新疆地质, 2004, 22(4):343-350.
- Liu Xun. Crustal tectonics and its evolution of the basin - mountains area in northwestern China [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(4): 343-350(in Chinese with English abstract).
- [47] Anderson D L. Hotspots, basalts and the evolution of the mantle[J]. Science, 1981, 213:82-89.
- [48] DePaolo D J. Nd isotopic studies: some new perspectives on Earth structure and evolution [J]. EOS, 1981, 162:137-140.
- [49] Patchett P J. Isotopic studies of Proterozoic crustal growth and evolution [C]//Candie K C (ed.). Proterozoic crustal evolution. Amsterdam: Elsevier. 1992, 481-508.
- [50] Ringwood A E. Composition and Petrology of the Earth's Mantle [M]. McGraw-Hill. 1975. 1-618.
- [51] 邱瑞照,邓晋福,周肃,等.陆壳岩石化学结构建立方法探讨[J].地球学报, 2006, 27(3): 259-270.
- Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou Su, et al. Study on the method of setting up the petrochemical structure for continental crust[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27(3):259-270(in Chinese with English abstract).
- [52] 邓晋福,莫宣学,罗照华,等.青藏高原岩石圈不均一性及其动力学意义[J].中国科学(D辑), 2001, 44(增刊):56-63.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. The inhomogeneity of the lithosphere in Tibetan Plateau and its significance on the dynamic mechanism[J]. Science in China(Series D:Earth Sciences), 2001,44(Supp.):56-63 (in Chinese).
- [53] 李春昱.中国板块构造的轮廓[J].中国地质科学院院报, 1980, 2(1):11-20.
- Li Chunyu. The outline of plate tectonics of China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1980,2 (1):11-20 (in Chinese with English abstract).
- [54] 任纪舜,牛宝贵,刘志刚.软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J].地学前缘, 1999,6(3): 85-93.
- Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 85-93(in Chinese with English abstract).
- [55] 王鸿祯,郑国铨,王训练.中国及邻区石炭纪构造古地理及生物古地理[J].现代地质, 1989, 3(2):137-154.
- Wang Hongzhen, Zheng Lvren, Wang Xunlian. Carboniferous Tectono-paleogeography and Paleobiogeography of China and its Neighbor Area [J]. Geoscience, 1989, 3 (2):137-154 (in Chinese with English abstract).
- [56] 王鸿祯.中国地壳构造发展的主要阶段 [J].地球科学, 1982, 3: 155-178.
- Wang Hongzhen. Major evolutionary stages of crust structure in China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1982, 3:155-178(in Chinese with English abstract).
- [57] Gao J, John T, Klemd R, et al. Mobilisation of Ti-Nb-Ta during subduction:evidence from rutile-bearing segregations and veins hosted in eclogites, Tianshan, NW China[J]. Geochim. Cosmochim Acta, 2007, 71: 4974-4996.
- [58] Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, et al. Neoproterozoic Paleozoic tectonostratigraphic framework of Eastern Xinjiang, NW China[C]//



- Mao J W, Goldfarb R, Seltnann R, et al. Editors, Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan, IAGDO, CERAMS, Natural History Museum. London. 2003, 31-74.
- [59] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32, 102-117.
- [60] 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 中国新疆矿床成矿系列类型 [J]. *矿床地质*, 1996, 15(3):207-217.  
Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. Metallogenic series of ore deposits in Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*. 1996, 15 (3): 207-217(in Chinese).
- [61] 张连昌, 夏斌, 牛贺才, 等. 新疆晚古生代大陆边缘成矿系统与成矿区带初步探讨 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(5):1387-1398.  
Zhang Lianchang, Xia Bin, Niu Heca, et al. Metallogenic systems and belts developed on the late Paleozoic continental margin in Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (5):1387-1398(in Chinese with English abstract).
- [62] 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学 [M]. 北京:地质出版社, 1998.  
Li Huaqing, Xie Caifu, Chang Hailiang, et al. Geochronology of mineralization of nonferrous and precious metallic deposits in Northern Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [63] Yang F Q, Mao J W, Bierlein F P, et al. A review of the geological characteristics and geodynamic mechanisms of Late Paleozoic epithermal gold deposits in North Xinjiang, China [J]. *Ore Geology Reviews*, DOI:10.1016/j.oregeorev.2008.09.003.
- [64] 方文昌. 吉林省花岗岩类及成矿作用 [M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1992:1-271.  
Fang Wenchang. The Granitoid and Mineralization of Jilin Province, China [M]. Changchun: Jilin Science and Technologic Publishing House, 1992:1-271(in Chinese).
- [65] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 试析地幔来源物质成矿域——以中亚造山带为例 [J]. *矿床地质*, 2003, 22 (1):41-55.  
Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Metallogenic province derived from mantle sources: A case study of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(1): 41-55 (in Chinese with English abstract).
- [66] 邱瑞照, 李文渊, 周肃, 等. 中国西北大陆岩石圈类型、岩石学结构及其意义 [J]. *西北地质*, 2008, 41(2):1-21.  
Qiu Ruizhao, Li Wenyuan, Zhou Su, et al. Lithospheric types, petrological structures and their implication in Northwestern China Continent [J]. *Northwestern Geology*, 2008, 1(2):1-21(in Chinese with English abstract).
- [67] 黄汲清. 中国主要地质构造单位 [M]. 北京:地质出版社, 1954:1-162.  
Huang Jiqing. The Main Geological Tectonic Unites [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1954:1-162(in Chinese with English abstract).
- [68] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造基本轮廓 [J]. *地质学报*, 1977, (2): 117-135.  
Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, et al. The basic outline of geotectonics of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1977, (2): 117-135(in Chinese with English abstract).
- [69] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京:地质出版社, 1980:1-124.  
Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, et al. Geotectonics of China and its Evolution [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980:1-124(in Chinese with English abstract).
- [70] 王鸿祯. 亚洲地质构造发展的主要阶段 [J]. *中国科学 (A 辑)*, 1979, 12:1187-1197.  
Wang Hongzhen. Major evolutionary stages of asian geological structure [J]. *Science in China (Series A)*, 1979, 12:1187-1197(in Chinese).
- [71] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造 [J]. *地质学报*, 1983, 1(1): 22-31.  
Ma Xingyuann, Liu Hepu, Wang Weixiang, et al. The Mesozoic - Cenozoic rifting and extensional structures in eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, 1(1):22-31(in Chinese with English abstract).
- [72] 李廷栋, 董树文, 耿树方, 等. 1:250 万亚洲中部及邻区地质图系 [M]. 北京:地质出版社, 2008.  
Li Tingdong, Dong Shuwen, Geng Shufang, et al. Atlas of Geological Maps of Central Asia and Adjacent Areas, 1:2 500 000 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [73] 宋彪, 李锦轶, 牛宝贵, 等. 黑龙江省东部麻山群黑云斜长片麻岩中锆石的年龄及其地质意义 [J]. *地球学报*, 1997, 18(3):306-312.  
Song Biao, Li Jintie, Niu Baogui, et al. The source componet of  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  of the earth's atmosphere and It's Geological Implication [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(3) :306-312(in Chinese with English abstract).
- [74] Wilde S A, Xinhua Zhou, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gonwanaland and accretion of Asia [J]. *Geology*, 2003, 31(9): 817-820.
- [75] 李文元, 韩建修, 张树新, 等. 那丹哈达岭北段上古生界基本地质特征 [J]. *中国地质科学院院报*, 1979, 1(1): 104-120.  
Li Wenkang, Han Jianxiu, Zhang Shuxin, et al. The Paleozoic principal geological features of Northern Nadanhada Mountain [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1979, 1 (1):104-120 (in Chinese with English abstract).
- [76] 吉林省地质矿产局. 吉林省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1988:1-698.  
Geology&Mineral Resources of Jilin Province. The Historical Record of Regional Geology in Jilin Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-698(in Chinese).
- [77] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(2):174-181.

- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, et al. The final closing time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2): 174-181(in Chinese with English abstract).
- [78] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379-388.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, et al. Deep geodynamics of Yanshan Movement [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 379-388(in Chinese with English abstract).
- [79] 李春昱. 中国北方板块构造文集(1)·序(代发刊词) [C]//中国北方板块构造文集(1). 中国地质科学院沈阳地矿所, 1983.
- Li Chunyu. Plate tectonics of northern China(1): Preface[C]//Plate Tectonics of Northern China (1). The Shenyang Geological and Mineral Institute of Chinese Academy of Sciences. 1983 (in Chinese).
- [80] 王荃. 板块构造与岩浆活动 [C]//李春昱, 郭令智, 朱夏, 等. 板块构造基本问题. 北京: 地震出版社, 1986, 221-253.
- Wang Quan. Plates tectonic and magmatism [C]//Li Chunyu, Guo Lingzhi, Zhu Xia, et al (eds.). Fundamental Questions of Plates Tectonic. Beijing: Seismological Press, 1986, 221-253 (in Chinese).
- [81] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 华北地区岩石圈类型: 地质与地球物理证据[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(8): 689-711.
- Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou Su, et al. Lithosphere types in North China-Evidences from geology and geophysics [J]. Science in China (Ser. D), 2005, 48(11): 1809-1827.
- [82] Dobretsov N L, Berzin N, Buslov M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. Int. Geol. Review, 1995, 37: 335-360.
- [83] Khain E V, Bibikova E V, Kroner A, et al. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt, U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 199(3-4): 311-325.
- [84] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消滅的证据 [J]. 地质学报, 2003, 77(3): 317-327.
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi. SHRIMP dating of Adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: evidence for the Early Paleozoic subduction[J]. Acta Geologica Sinica. 2003, 77(3): 317-327(in Chinese with English abstract).
- [85] 陈仕炎, 高建国. 会泽铅锌矿矿厂矿段趋势面分析及深部预测[J]. 云南地质, 2005, 24(4): 442-449.
- Chen Shiyan, Gao Jianguo. Trend surface analysis and deep prediction of Kuangshanchang ore-block in Huize Lead-Zinc deposit [J]. Yunnan Geology, 2005, 24 (4): 442-449 (in Chinese with English abstract).
- [86] 王可勇, 卢作祥, 廖群山. 山东烟台南张家金矿黄铁矿的标型特征[J]. 地球学报, 1999, 20(2): 3-189.
- Wang Keyong, Lu Zuoxiang, Liao Qunshan. Typomorphic characteristic of pyrite in the Nanzhangjia gold mineral deposit, Shandong Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1999, 20 (2): 3-189(in Chinese with English abstract).
- [87] 李体刚, 肖一兵, 卫万顺, 等. 辽宁绥中小盘岭金矿地球化学特征及深部成矿预测[J]. 黄金地质, 1994(2): 36-42.
- Li Tigang, Xiao Yibing, Wei Wanshun, et al. The geochemical characteristics and prospecting potential in the deep of Xiaopanling Gold Deposit in Suizhong County, Liaoning Province [J]. Gold Geology, 1994(2): 36-42(in Chinese).
- [88] 黄启声, 陈进宝. 屏障过渡激发极化法在深部找矿中的应用[J]. 江苏地质, 1994, 18(2): 97-102.
- Huang Qisheng, Chen Jinbao. Application of the shield transitional induced polarization method in deep-prospecting[J]. Jiansu Geology, 1994, 18(2): 97-102(in Chinese with English abstract).
- [89] 刘国兴, 王喜臣, 张小路, 等. 大功率激电和瞬变电磁法在青海锡铁山深部找矿中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 551-554.
- Liu Guoxing, Wang Xichen, Zhang Xiaolu, et al. The combined application of high-power induced polarization and transient electromagnetic method in the deep mineral exploration in Xitieshan Area of Qinghai [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2003, 33 (4): 551-554 (in Chinese with English abstract).
- [90] 樊金生, 周云海, 王备战, 等. 直流电法在陕南某铜矿深部找矿中的应用及效果[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 528-533.
- Pan Jinsheng, Zhou Yunhai, Wang Beizhan, et al. Application of DC methods to searching for deep buried deposit in a copper deposit in South Shaanxi and its application Result [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20 (4): 528-533 (in Chinese with English abstract).
- [91] 刘先洲, 李大明. 根据综合物探信息初探鄂东南地区的深部找矿问题[J]. 地球科学, 1987, 12(1): 75-81.
- Liu Xianzhou, Li Daming. An approach to the deep prospecting in Southeast Hubei according to synthetic geophysical prospecting information [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1987, 12(1): 75-81(in Chinese with English abstract).
- [92] 张晓春. 微重力测量在深部铝土矿找矿中的应用 [J]. 河南地质, 1997, 15(3): 211-215.
- Zhang Xiaochun. The application of minigravity survey to the prospecting of deep bauxite[J]. Henan Geology, 1997, 15(3): 211-215(in Chinese with English abstract).
- [93] 虞景毓. 瞬变电磁法在深部找矿中的应用[J]. 地质与勘探, 1991, 27(8): 39-43.
- Yu Jingyu. The application of transient electromagnetic technique to the deep mineral exploration[J]. Geology and Peospecting, 1991, 27(8): 39-43(in Chinese).
- [94] 牛如宝, 王轮吉, 王友芳, 等. 电阻率测深法寻找焦家式金矿深部构造蚀变带的应用研究[J]. 矿产与地质, 2004, 18(1): 69-72.
- Niu Rubao, Wang Lunji, Wang Youfang, et al. Application of

- resistivity depth sounding to the deep alteration zone of the Jiaojia type gold deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2004, 18(1): 69-72(in Chinese with English abstract).
- [95] 张德会, 周圣华, 万天丰, 等. 矿床形成深度与深部成矿预测[J]. *地质通报*, 2007, 26(12): 1509-1518.
- Zhang Dehui, Zhou Shenghua, Wan Tianfeng, et al. Depth of ore deposit formation and prognosis of deep-seated ore deposits[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(12): 1509-1518(in Chinese with English abstract).
- [96] 高秋斌, 范永香, 王可勇, 等. 金矿床深部成矿预测的主要途径[J]. *黄金地质*, 1998, 4(2): 21-26.
- Gao Qiubin, Fan Yongxiang, Wang Keyong, et al. The main geological means of deep metallogenic prognosis of gold deposits[J]. *Gold Geology*, 1998, 4(2): 21-26(in Chinese with English abstract).
- [97] 翟裕生, 邓军, 王建平, 等. 深部找矿研究问题[J]. *矿床地质*, 2004, 23(2): 142-149.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Wang Jianping, et al. Researches on deep ore prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(2): 142-149(in Chinese with English abstract).
- [98] 舒广龙, 马诗敏, 刘继顺. 基于斑岩成矿体系结构的深部找矿预测——以鄂东丰山铜金矿田为例[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(2): 1-7.
- Xu Guanglong, Ma Shimin, Liu Jishun. Prediction for deep ore prospecting based on the structure of a porphyry metallogenic system: according to Fengshan Au-Cu ore field[J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(2): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [99] 李树海, 皮清明, 刘海兴, 等. 滇西宝兴厂金矿用构造叠加晕预测深部找矿方向——以人头箐矿段为例[J]. *四川地质学报*, 2007, 27(4): 262-265.
- Li Shuhai, Pi Qingming, Liu Haixing, et al. Deep-seated ore potentiality based on structurally superimposed halo for the Baoxingchang Au Deposit in West Yunnan—By the example of the Rentouqing ore block[J]. *Acta Geological Sichuan*, 2007, 27(4): 262-265(in Chinese with English abstract).
- [100] 刘显凡, 刘家铎, 张成江, 等. 地幔柱和地幔流体作用与深部找矿应用研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(Supp.): 93-101.
- Liu Xianfan, Liu Jiaduo, Zhang Chengjiang, et al. The processes of mantle plume and mantle fluid and their applying study for the deep prospecting[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(Supp.): 93-101(in Chinese with English abstract).
- [101] 赵鹏大. 成矿定量预测与深部找矿[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 1-10.
- Zhao Pengda. Quantitative mineral prediction and deep mineral Exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 1-10(in Chinese with English abstract).
- [102] 熊盛青, 于长春, 王卫平, 等. 直升机大比例尺航空物探在深部找矿中的应用前景[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 270-275.
- Xiong Shengqing, Yu Changchun, Wang Weiping, et al. Large scale aero geophysical survey with helicopter and its application to deep ore prospecting[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(3): 270-275(in Chinese with English abstract).
- [103] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 855-869.
- Ye Tianzhu, Xue Jianling. Geological study in search of metallic ore deposits at depth[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 855-869(in Chinese with English abstract).
- [104] 张洪培, 刘继顺, 张宪润, 等. 云南蒙自白牛厂银多金属矿区深部找矿的新发现[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(4): 361-365.
- Zhang Hongpei, Liu Jishun, Zhang Xianrun, et al. New finding of ore-prospecting in the deep of Bainiuchang silver-polymetallic deposit, Mengzi, Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(4): 361-365(in Chinese with English abstract).
- [105] 宋明春, 崔书学, 杨之利, 等. 山东焦家金矿带深部找矿的重大突破及其意义[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(1): 1-8.
- Song Mingchun, Cui Shuxue, Yang Zhili, et al. Great progress and far-reaching significance of deep exploration in the Jiaojia Metallogenic Belt, Shandong Province[J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [106] 王雷, 韩润生, 吴鹏, 等. 云南大姚地区六直铜矿床小河—石门坎矿段三维可视化模型[J]. *地质通报*, 2008, 27(6): 866-874.
- Wang Lei, Han Runsheng, Wu Peng, et al. 3D visualization model of the Xiaohe-Shimenkan ore block in the Liuju copper deposit, Dayao, Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(6): 866-874(in Chinese with English abstract).
- [107] 袁文花. 深部找矿的重大突破——莱州寺庄镇境内发现特大金矿[J]. *西北地质*, 2007, 40(4): 26-26.
- Yuan Wenhua. Great progress of deep exploration——the discovery of the extra-large gold deposit at Laizhou County, Laizhou, Shandong Province[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(4): 26-26(in Chinese with English abstract).
- [108] 邓晋福, 邱瑞照, 吴宗絮, 等. 中国大陆深部作用与成矿[J]. *矿床地质*, 2004, 23(增刊): 24-31.
- Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Xiao Qinghui, et al. Input of Material and Heat from Convective Mantle into Continent and Continental Metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(supp.): 24-31(in Chinese with English abstract).
- [109] 滕吉文. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发[J]. *地质通报*, 2006, 25(7): 767-771.
- Teng Jiwen. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(7): 767-771(in Chinese with English abstract).
- [110] 滕吉文, 刘建明, 刘财, 等. 第二深度空间金属矿产探查与东北战略后备基地的建立和可持续发展[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(4): 633-651.
- Teng Jiwen, Liu Jianming, Liu Cai, et al. Prospecting for metal ore deposits in second deep space of crustal interior, the building of strategy reserve base of Northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(4): 633-651(in Chinese with English abstract).

## Relationship of the evolution of the lithosphere to large-scale mineralization in the continent of northern China and adjacent areas

QIU Rui-zhao<sup>1</sup>, ZHOU Su<sup>2</sup>, TAN Yong-jie<sup>1</sup>, QI Shi-jun<sup>3</sup>, GAO Peng<sup>3</sup>, LI Wen-yuan<sup>4</sup>,  
CHEN Xiu-fa<sup>1</sup>, WANG Liang-liang<sup>1,2</sup>, CHEN Zheng<sup>1,2</sup>, YUAN Chun-hua<sup>1,2</sup>, HAN Jiu-xi<sup>1</sup>,  
WANG Sheng-wen<sup>2</sup>, FENG Yan-fang<sup>1,2</sup>

(1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3. *Xinjiang Institute of Geology and Mineral Resources, Urumqi 853000, Xinjiang, China*; 4. *Xian Institute of Geology and Mineral Resources, Xian 710054, Shaanxi, China*)

**Abstract:** Based on geological and geophysical characteristics, the authors recognized two kinds of lithospheres in northern China, which are orogeny-type lithosphere and rift-type lithosphere, and the former can be divided into three orogeny-types of lithospheres, representing Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic substantial structures respectively. In space, these orogeny-type lithospheres are composed of Cenozoic orogeny-type, Paleozoic orogeny-type, Yanshanian orogeny-type and Cenozoic rift-type lithospheres, represented respectively by Tianshan, Ejin Banner, Da Hinggan Ling and Zhangguangcai Ling. These phenomena reflect the differential evolution of the Central Asia orogenic zone formed in Paleozoic during the Meso-Cenozoic continental dynamic process, which led to the formation of different types of lithosphere and nonuniformity of the materials and structures of the continental crust and the mantle as well as the large-scale mineralization. These activities on the whole have E110° as the boundary, with the western part being mainly of the Late Paleozoic pattern and the eastern part of the Mesozoic pattern. Some important problems are also discussed briefly in this paper, such as geological implications of the crust-mantle structures in different types of lithospheres and regional orientation and deep space for ore prospecting.

**Key words:** lithospheric type; deep process; large-scale mineralization; regional orientation and deep space for ore prospecting; continent of northern China and adjacent areas

---

**About the first author:** QIU Rui-zhao, male, born in 1963, engages in the study of deep geology, regional metallogenesis and geology and mineral resources abroad; E-mail: qiurzz@yahoo.com.cn.