

中国大陆岩石圈岩石学结构、类型与不均一性

邱瑞照^{1,2} 李廷栋^{3,4} 邓晋福⁵ 周肃⁵ 肖庆辉⁶ 叶天竺¹ 耿树方²

(1.中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;2.中国地质科学院地质研究所,北京 100037;

3.中国地质科学院,北京 100037;4.吉林大学地球科学学院,吉林 长春 130061;

5.中国地质大学,北京 100083;6.国土资源部信息中心,北京 100812)

提要:根据中国大陆的地质特征和现今地球物理特征,区分不同地区的岩石圈类型;依据岩石学方法、地球演化模型、地震波速与成分的关系等综合方法,建立了相应类型岩石圈的岩石学结构;根据岩石圈的动力学性质,划分出中国大陆克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧等5大岩石圈类型,首次构建出中国大陆岩石圈岩石学结构模型,展示了中国大陆岩石圈的不均一特征。

关键词:岩石圈类型;岩石学结构;岩石圈不均一性;中国大陆

中图分类号: P313.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3657(2006)04-0842-10

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,因此,展现在人们面前的是一部残缺不全的地球演化历史书,如何准确或比较准确地阅读这部“历史书”、复原其地质过程,是摆在地球科学家们面前长期而艰巨的任务。

各种地球物理学方法,大大延伸了人们的视野,丰富了人们对地球深部的了解,但是由于方法自身的局限性,它反映的只是现今的状态,并且存在多种可能的解释。就如现今中国大陆,它是由多个小陆块镶嵌而成的复杂大陆,造山作用是其镶嵌的主要机制,而造山带是地球上构造变动最剧烈的地区,它经历的板块张开、俯冲、碰撞以及后期地质作用,尤其是多次造山作用的叠加,可以使原来的岩石面目全非而呈现出复杂的景象。尽管如此,由于岩浆起源于地球深部,其残留的岩浆作用产物是其所经历过程的见证,也是追索岩石圈深部过程演化的重要线索。邓晋福等^①指出,对于一个地区而言,如果只有幔源玄武岩岩浆注入大陆,那么,岩石圈地幔将被强烈改造,地壳部分的改造则相对较弱;如果主要是再循环古老陆壳局部形成的强过铝花岗岩质岩浆,则陆壳将被强

烈改造,而岩石圈地幔的改造相对较弱;如果岩浆来源同时有地幔软流圈和深部陆壳,则壳幔混合型岩浆发育,那么,原有的陆壳和岩石圈地幔将同时受到强烈改造。因此,把起源于地球深部的壳-幔相互作用产物——火成岩记录,以及其他地质记录,与反映现今状态的地球物理成果等结合起来,可望建立起现今的和古壳幔岩石学结构^[1],从而使探讨岩石圈组成、演化和岩石圈不均一性等成为可能,并且把深部与浅部联系起来。

笔者以已有的地质、地球物理资料为基础,依据中国大陆地质、地球物理特征差异,区分不同岩石圈类型,依据岩石学方法建立相应类型的壳幔岩石学结构和化学结构,初步构建出中国大陆的岩石圈岩石学结构模型,展示中国大陆岩石圈在空间、物质组成、结构和形成时间等方面的不均一特征。

1 中国大陆岩石圈岩石学结构模型

根据华北地区的地质特征和现今地球物理特征表现出的岩石圈不连续,华北地区可以区分出克鄂尔多斯拉通型、燕山—太行山造山带型和华北平原裂谷型岩石圈^[2],依据岩石学

收稿日期: 2006-06-12;改回日期: 2006-06-28

基金项目:国土资源部科技专项计划项目(200010103);国家自然科学基金项目(NSFC 402344048, No.40572063);中国地质调查局地质大调查项目(1212010561502, 1212010561510, 1212010561504);中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室开放课题(2003009, 2003010)联合资助。

作者简介:邱瑞照,男,1963年生,博士,岩石矿物矿床专业,现主要从事境外地质矿产研究;E-mail: qjurrzz@yahoo.com.cn。

①邓晋福,邱瑞照,吴宗絮,等.对流地幔输入大陆及过程与大规模成矿作用.见:邓晋福等.中国地球物理场特征及深部地质与成矿(科研报告),2003.

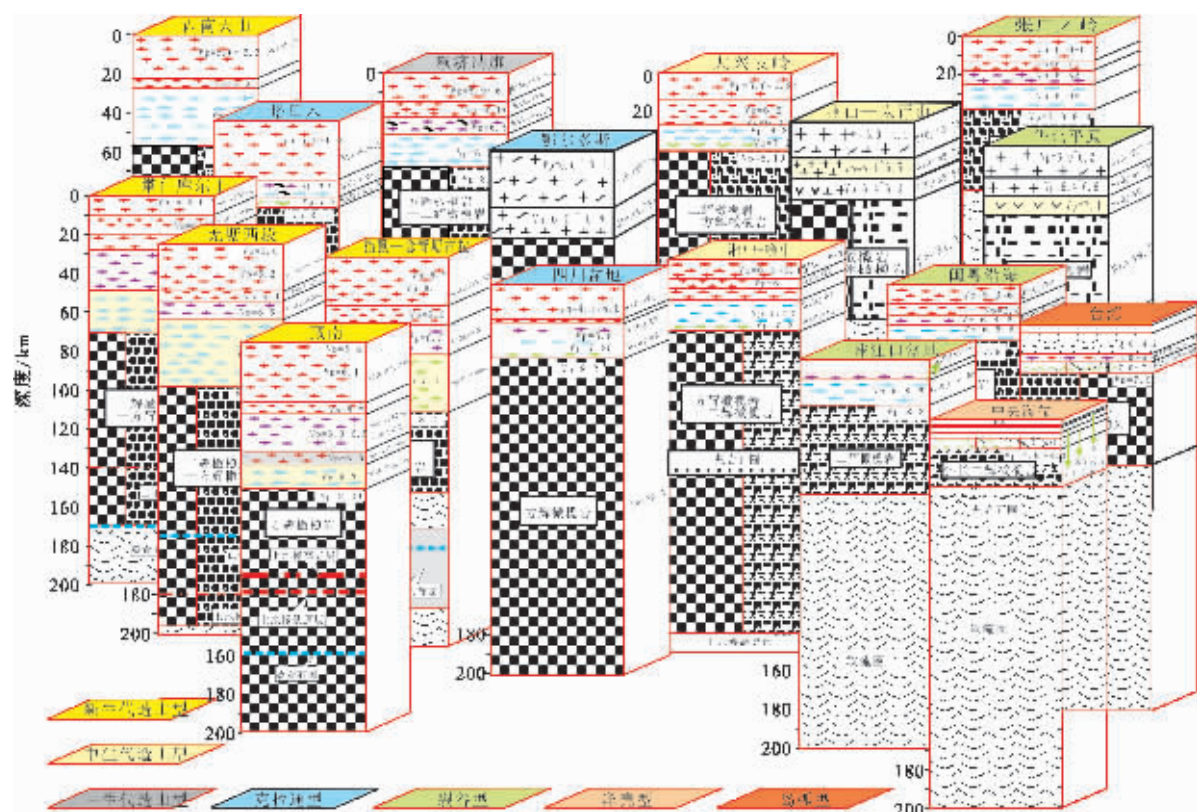


图 1 现今中国大陆岩石圈的主要类型及壳-幔岩石学结构(据邱瑞照等^[9])

Fig.1 Main types and crust—mantle petrological structures of the present lithosphere beneath continental China (after Qiu Ruizhao et al^[9])

方法(出露的前寒武系岩石、火成岩和深源包体资料)^[13]、壳幔演化和造山带演化模型^[14]和板块构造理论^[3,6-7]以及地震波速与成分的关系^[9],建立了相应类型的壳幔岩石学结构和化学结构。继华北之后,依据同样方法,相继区分了东北、华南、南海、西北和青藏高原地区的岩石圈类型,建立了相应的岩石圈岩石学结构。根据这些地区的岩石圈岩石学结构空间位置,建立的中国大陆岩石圈岩石学结构初步模型见图 1。

2 中国大陆岩石圈类型

2.1 克拉通型岩石圈

地球早期演化主要通过壳幔分异作用。根据地幔演化模型^[4-5]和板块构造理论^[3,6-7],地壳由对流(或软流圈)地幔通过局部熔融作用分离出,伴随低熔的玄武质岩浆分离及陆壳从不成熟转变为成熟的过程,地幔内将不断亏损易熔组分,留下的是难熔的强亏损地幔物质构成大陆岩石圈根,轻的花岗质陆壳“漂浮”其上。因此,克拉通岩石圈具有长期稳定性的特点。地震层析成像技术^[10]和岩石学、地球化学研究^[11]揭示,古老的大陆可分为两个年龄省:(1)太古—古元古克拉通

(>1700 Ma),岩石圈(地震高速异常)深度大,通常具有(地震高速异常)深度大(≥ 200 km)的大陆根;(2)中元古大陆(800~1700 Ma)下面,则没有深的岩石圈根。在中国大陆塔里木、扬子、中朝克拉通(侏罗纪以后是鄂尔多斯),地壳厚度为 42~43 km,岩石圈厚度大(≥ 200 km),大地热流低(多数 <45 mW/m²),近代无强地震、无活动断层,中新世以来无岩浆活动,具有典型的大陆克拉通岩石圈特征。陆壳主体成分为 TTG 的陆壳(陆壳平均波速 $V_p=6.3$ km/s, $SiO_2=67\%$),岩石圈地幔主要由强亏损的方辉橄榄岩构成。

在中国大陆内中朝地台的鄂尔多斯、塔里木和扬子地块,它们的基底大多被掩埋在沉积盖层的下面,如何认识它们的壳-幔物质结构时代? 根据上述壳-幔演化模型,克拉通 TTG 陆壳与以方辉橄榄岩为主的强亏损地幔岩石圈岩石组成是对流地幔分异的互补产物,在壳-幔物质、结构形成时间上应该一致。以华北的鄂尔多斯块体为例,虽然现今的鄂尔多斯块体被黄土覆盖,并无古老变质岩系出露,但是华北地台东部地区(复县、蒙阴等地)金伯利岩和金刚石包体研究提供的证据表明^[12],古生代时华北东部地区也具有与现今西部

鄂尔多斯克拉通块体一样的巨厚的岩石圈根 ($\geq 200\text{ km}$)^[12], 这样, 如果把“活化”前的华北地台看作一个整体(中朝地台), 则现今在华北中东部地区出露的中下地壳岩石可以认为是华北地台被“活化”后抬升出露到地表的深部陆壳岩石, 这些岩石可以大致代表西部鄂尔多斯型克拉通陆壳的岩石组成^[9]; 已有的地质证据表明华北地台陆壳形成于古太古代—古元古代^[13-16]。根据热流估算的华北地台东部地区古地温 (42 mW/m^2)^[17] 和根据金伯利岩中金刚石固相包裹体和重砂矿物(尖晶石、石榴子石)地质温压计算的古地温 ($35\sim 40\text{ mW/m}^2$)^[18-19]与鄂尔多斯地块现今的低温 (44 mW/m^2)类似, 同时也与著名的南非 Kappaal 克拉通的古地温类似。同理, 华北地台东部的古生代金伯利岩及金刚石包裹体中的地幔橄榄岩, 也可代表华北地区“活化”前的克拉通岩石圈的地幔组成, 也就是现今“残留的”鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔的组成。新近获得的复县金伯利岩中的地幔岩包体 Re—Os 测定的 TRD 模式年龄 2.6 Ga 和 2.8 Ga ^[20]与陆壳时代一致, 说明鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔与陆壳确实是同时形成的。

中国大陆的塔里木和扬子克拉通型岩石圈具有与华北的鄂尔多斯克拉通型岩石圈类似的地球物理结构特征, 克拉通型岩石圈稳定的特点说明它们的壳—幔物质和深部结构形成时代也应该是太古宙—古元古代。目前这些地块尽管上部被沉积物覆盖、周缘被造山带包裹, 仍然保留了克拉通稳定的特点和结构, 具有大陆根。

2.2 造山带型岩石圈

造山带型岩石圈形成于挤压机制, 岩石物理性质决定了在造山带过程中地壳的加厚主要发生在地壳^[3, 21]。如果造山过程中有对流地幔的物质和热大量注入岩石圈, 则可对陆壳加热直至熔融分异产生花岗质的陆壳, 同时收缩变形的加厚陆壳, 在壳底榴辉岩相的压力条件下可发生局部熔融, 熔出花岗岩岩浆后留下的将是偏基性的榴辉岩残余(中性榴辉岩), 随着壳内分异残留的榴辉岩堆积, 其高密度诱发造山带岩石圈根失稳, 导致岩石圈大规模去根减薄, 从而促使大量对流地幔物质和热输入大陆, 使岩石圈地幔部分熔融、软流圈物质上涌、大规模的壳幔相互作用致使大规模岩浆活动等发生, 上涌软流圈物质冷却又形成新的厚岩石圈。因此, 从造山带岩石圈演化加厚—拆沉—再加厚的过程看, 造山带岩石圈根具有保留时间短、不稳定(活动)的特点。

由于中国大陆是经历了多次造山作用拼合形成的大陆, 目前至少可以识别出古生代、中生代和新生代 3 个时代的造山带型岩石圈。

2.2.1 古生代造山型岩石圈

位于银川盆地西部的额济纳旗地块, 属于内蒙古高原 (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。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), 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); 现今额尔纳旗地块具有正常的地壳厚度、没有山根, 因此, 其壳—幔结构大致可以代表古亚洲洋闭合时形成的中亚造山带的古生代造山带结构, 根据地质历史推测, 该区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。

2.2.2 中生代造山型岩石圈

三叠纪以后, 整个中国大陆已拼合成为一个整体^[3, 22-23], 中国东部经历了著名的燕山运动。中国东部广泛分布的燕山期花岗岩是造山型岩石圈形成的标志, 它们是在统一的中国大陆动力学系统控制下^[2-3], 中国大陆岩石圈/软流圈系统与古太平洋板块俯冲共同作用的结果^[9]。由于新生代时期中国东部又经历了裂谷作用, 在东北地区残留了以大兴安岭为代表的燕山期岩石圈, 在华北地区, 残留了以燕山—太行山为代表的燕山期岩石圈, 在华南地区残留了以湘中赣中和南岭中段为代表的燕山期岩石圈(图 1), 其中除了湘中赣中具有较厚的岩石圈外, 其他地区的岩石圈因为经历了新生代的伸展减薄, 现今的厚度不能代表燕山期造山时的地壳和岩石圈地幔厚度, 但岩石圈地幔和陆壳的物质及其结构仍然是燕山运动期间造山时形成的。

2.2.3 新生代造山型岩石圈

新生代以来, 中国大陆的总体格局是西部挤压、部拉张、伸展。青藏高原是伴随印度—欧亚大陆在 65 Ma ^[6]开始碰撞形成的新生代造山带。地球物理探测揭示现今青藏—喜马拉雅岩石圈的主要特征是具有双倍陆壳(陆壳平均厚度 70 km)和造山岩石圈根(岩石圈平均厚度 150 km), 造山岩石圈的地幔物质的密度大(青藏高原下平均为 $3.40\sim 3.65\text{ g/cm}^3$)。在空间上不同块体在南北向差异占主导的同时^[25-26], 还显示明显的东西向差异^[26-27]。冈底斯地块既不同于北部羌塘、昆仑等地, 又不同于南部的喜马拉雅地区。从地质历史上看, 青藏高原北部的秦祁昆造山带形成于晚古生代—早中生代, 新生代时期高原拓展使昆仑山、祁连山被卷入特提斯—喜马拉雅新生代造山系, 缺乏新生代岩浆活动, 说明其物质仍然是晚古生代—早中生代形成的, 但其结构是新生代的, 是具有“老物质新结构”特点的造山型岩石圈, 不同于羌塘是拆沉后又被加厚的造山型岩石圈^[3, 28]、冈底斯是已拆沉或正在拆沉去根的造山带型岩石圈^[3, 28]和喜马拉雅是正在加厚的造山型岩石圈。

在西北地区(属于中亚古生代造山带西段), 准噶尔和塔里木盆地两侧的山岭; 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, 在地形上都为海拔大于 $3\ 000\text{ m}$ 的高山, 地壳厚度 ($50\sim 55\text{ km}$) 大于大陆平均地壳厚度, 陆壳内有低速层(在 $18\sim 35\text{ km}$ 不同深度范围)及地表平均热流值较高 ($>50\text{ mW/m}^2$) 区别于准噶尔、塔里木盆地克拉通型岩石圈。岩石圈厚度 $170\sim 200\text{ km}$ (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)。层析成像剖面揭示, 现今在天山、准噶尔和塔里木之下都有明显的“层间插入”现象, 塔里木岩石圈有向天山之下俯冲的

趋势。地质历史上,沉积历史表明,上新世早期在天山山间以及山前坳陷中堆积的沉积物,以泥岩与砂岩互层为主,但到了上新世晚期在天山、昆仑山山前都出现巨厚的粗大砾石层,最大厚度可达2500 m,说明天山、阿尔泰山、昆仑山等西部山系是在上新世晚期之后“重新崛起”的;该区自早中生代以来缺乏大规模的岩浆活动,即没有新的地幔物质的输入,后期经历的主要是壳内、幔内物质循环,但现今地球物理探测的岩石圈的地幔和陆壳的结构是喜马拉雅期形成的。因此,它们与青藏高原北部的昆仑山、祁连山一样,属于“老物质新结构”的新生代造山带型岩石圈。

这样,新生代造山带型岩石圈包括具有“老物质新结构”特点的阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等新生代造山型岩石圈,和具有“新物质新结构”特点的羌塘、冈底斯、喜马拉雅等新生代造山型岩石圈。

2.3 裂谷型岩石圈

大陆裂谷型岩石圈形成于岩石圈伸展环境,往往与岩石圈伸展、地幔热柱等事件对应^[3,30]。在中国东部新生代时期的大陆裂谷作用,以广泛的玄武岩喷发为重要标志,使活动陆缘转化为张裂的大陆边缘,裂陷作用及伸展构造的普遍发育,幔源玄武岩浆大量、频繁地喷出地表,形成了以玄武岩类占绝对优势的新生代火山岩广布于中国大陆东部的东北平原、华北平原、闽粤桂沿海、江汉平原、沿海大陆架区等地。地球物理探测表明,这些地区具有陆壳厚度(30~37 km)、岩石圈厚度(多在60~80 km)较薄,热流值高(极值>60 mW/m²)的特点。在东北地区形成以松辽平原为代表的裂谷型岩石圈,在华北地区形成以华北平原为代表的裂谷型岩石圈,在华南地区形成以闽粤沿海(包括江汉平原、沿海大陆架、闽粤桂等)裂谷型岩石圈。由于大陆裂谷作用是在燕山期造山带型岩石圈基础上发育的,随着大量玄武岩喷发,使燕山期的“酸性化”陆壳又被“基性化”,燕山期形成的岩石圈地幔被破坏形成以二辉橄榄岩为主体的岩石圈地幔;地壳和岩石圈地幔经历了岩石圈尺度上伸展减薄和热侵蚀,现今地球物理探测的岩石圈地幔和陆壳的物质和结构是新生代形成的。

2.4 岛弧型岩石圈

包括日本列岛、吕宋岛、巴拉望岛等在内的以台湾为代表的岛弧型岩石圈,形成于俯冲挤压的洋-陆岩石圈相互作用环境,地球物理探测显示台湾为不对称的俯冲岩石圈结构。台湾岛弧型岩石圈,陆壳总体成分相当于花岗闪长质,岩石圈地幔组成以方辉橄榄岩为主,少量二辉橄榄岩。

2.5 边缘海洋壳型岩石圈

边缘海洋壳型岩石圈在中国东部边缘海中以南海中央海盆为代表,总体上属于大洋岩石圈的范畴,因为它应该是在中国东部新生代大陆裂谷作用下进一步发展的结果,故把它作为中国大陆岩石圈的一个类型;南海中央海盆洋壳型岩石圈,洋壳厚度6~14 km,岩石圈厚度30~40 km;地表热流自西部沿海向东热流增大,在中央海盆最热,再往东至岛弧区热流逐步降低;陆壳主要为辉长质,地幔组成主要为斜长二

辉橄榄岩。

由此,根据岩石圈的动力学性质,中国大陆可以区分出克拉通型、造山带型、裂谷型、岛弧型和边缘海洋壳型等5类岩石圈,它们是构成中国大陆的岩石圈基本单元。

3 中国大陆岩石圈不均一性

从岩石圈类型、岩石学结构上看,中国大陆岩石圈显示强烈的不均一性。

中国北方大陆岩石圈:中国北方大陆自西向东分别由天山新生代造山带型、额济纳旗古生代造山带型、大兴安岭燕山期造山带型和张广才岭新生代裂谷型岩石圈组成(图2)。陆壳岩石成分由偏酸性到偏基性;岩石圈地幔由方辉橄榄岩—二辉橄榄岩→二辉橄榄岩—方辉橄榄岩→二辉橄榄岩,反映岩石圈地幔亏损程度逐渐降低。从岩石圈壳幔物质、结构形成时代看,自西向东分别是:古生代物质新生代结构→古生代物质古生代结构→中生代物质中生代结构→新生代物质新生代结构。

中国南方大陆岩石圈:中国南方大陆岩石圈类型多,自西向东分别由青藏高原新生代造山带型、扬子克拉通型、湘中赣中燕山期造山带型、闽粤沿海裂谷型、南海中央海盆洋壳型和台湾岛弧型岩石圈组成(图3)。陆壳成分和岩石圈地幔岩石组成变化大。陆壳成分总体变化趋势是由内陆向沿海岩石组成的基性增加;藏南、扬子岩石圈地幔主要由方辉橄榄岩构成,南岭中段燕山期造山带和台湾新生代岛弧主要由方辉橄榄岩—二辉橄榄岩构成,闽粤沿海裂谷型主要由二辉橄榄岩构成,南海中央海盆洋壳型岩石圈地幔亏损程度最低,主要由斜长二辉橄榄岩构成。自西向东岩石圈壳幔物质、结构形成时代分别是:藏南新生代物质新生代结构→四川盆地太古宙物质太古宙结构→湘中赣中中生代物质中生代结构→闽粤沿海新生代物质新生代结构→南海中央海盆晚新生代物质晚新生代结构→台湾岛新生代物质新生代结构。

中国西部大陆岩石圈:中国西部属于盆山体系,自北向南分别由天山新生代造山带型、塔里木克拉通型、青藏高原新生代造山带型组成(图4)。其中阿尔泰山、天山、青藏高原北部的昆仑山、祁连山属于具有“老物质新结构”特点的新生代造山型岩石圈,青藏高原南部的羌塘、冈底斯、喜马拉雅等属于具有“新物质新结构”特点的新生代造山型岩石圈。总体上,除了塔里木克拉通型岩石圈外,藏北以北属于“老物质新结构”,藏南属于“新物质新结构”特点的造山型岩石圈。

中国东部大陆岩石圈:中国东部经历了燕山期造山作用和喜山期裂谷作用,在东北地区残留了以大兴安岭为代表的燕山期岩石圈,在华北地区,残留了以燕山—太行山为代表的燕山期岩石圈,在华南地区残留了以湘中、赣中和南岭中段为代表的燕山期岩石圈(图5);这些地区的岩石圈陆壳岩石组成主要为花岗质,因为对流地幔物质或热的输入,使陆壳岩石组成酸性化;岩石圈地幔主要由方辉橄榄岩—二辉橄

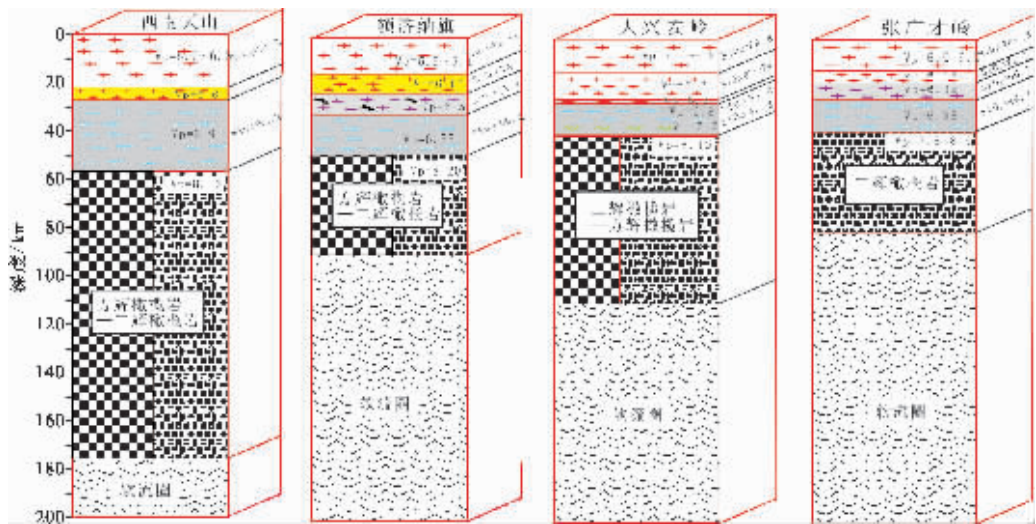


图 2 现今中国北方大陆岩石圈的主要类型及壳—幔岩石学结构

Fig.2 Main types and crust—mantle petrological structures of the present lithosphere beneath northern continental China

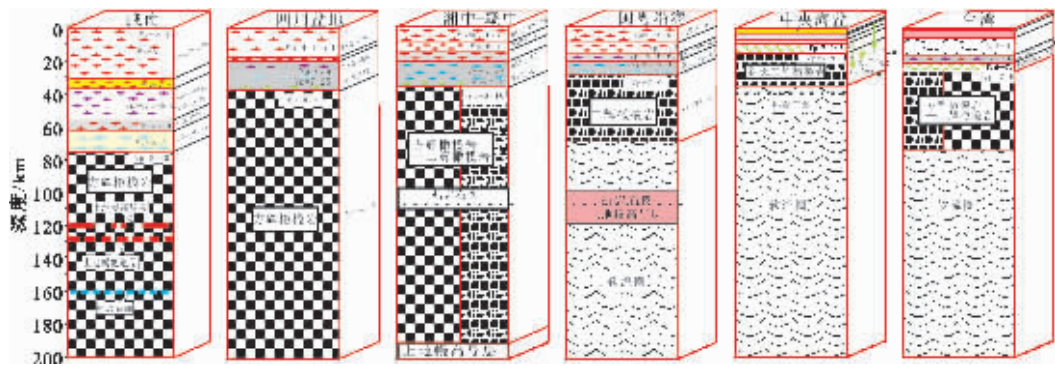


图 3 现今中国南方大陆自西向东岩石圈类型及壳—幔岩石学结构

Fig.3 Main types and crust—mantle petrological structures of the lithosphere beneath present southern continental China
(from west to east)

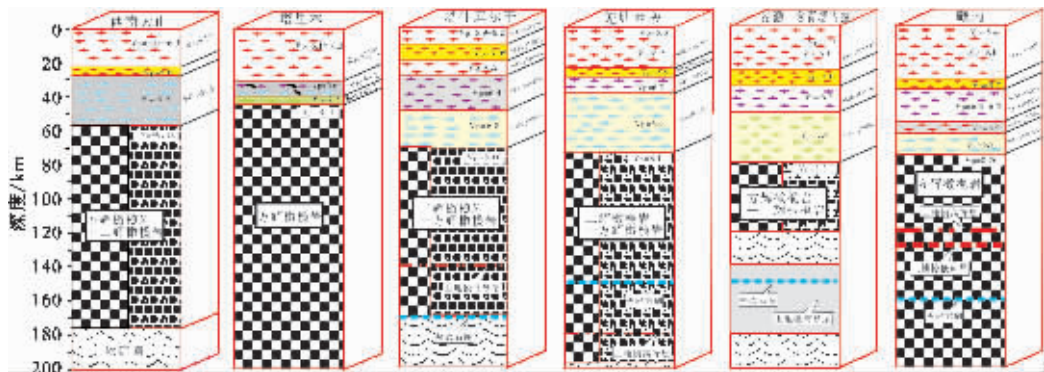


图 4 现今中国西部大陆自北向南岩石圈类型及壳—幔岩石学结构

Fig.4 Main types and crust—mantle petrological structures of the lithosphere beneath present western continental China
(from north to south)

榄岩构成;新生代时期,中国东部的大陆裂谷作用,在东北地区形成以松辽东部平原为代表的裂谷型岩石圈,在地区形成以华北东部平原为代表的裂谷型岩石圈,在华南地区形成闽粤沿海(包括江汉平原、沿海大陆架、闽粤桂等)裂谷型岩石圈,随着裂谷发育大量玄武岩喷发,使燕山期的“酸性化”陆壳又被“基性化”,燕山期形成的岩石圈地幔被破坏形成以二辉橄榄岩为主体的喜山期岩石圈地幔;在裂谷型岩石圈基础上进一步扩张,形成了以南海中央海盆为代表的洋壳岩石圈,洋壳主要为玄武质,岩石圈地幔主要为未亏损的斜长二

辉橄榄岩。由中国东部陆缘分离出去的陆块与太平洋板块相互作用,形成了以台湾岛弧为代表的岛弧岩石圈,岩石圈地幔主要由方辉橄榄岩—二辉橄榄岩构成(图 6)。

中国东部岩石圈壳幔物质、结构形成时代可以区分为两大序列:形成于挤压体制的中生代物质中生代结构特点的造山型岩石圈(图 5)和新生代物质新生代结构特点的岛弧型岩石圈(图 6—台湾);形成于伸展体制的具有新生代物质新生代结构特点的裂谷型岩石圈和洋壳型岩石圈。

上述岩石圈的壳幔物质形成时代、壳幔结构形成时代

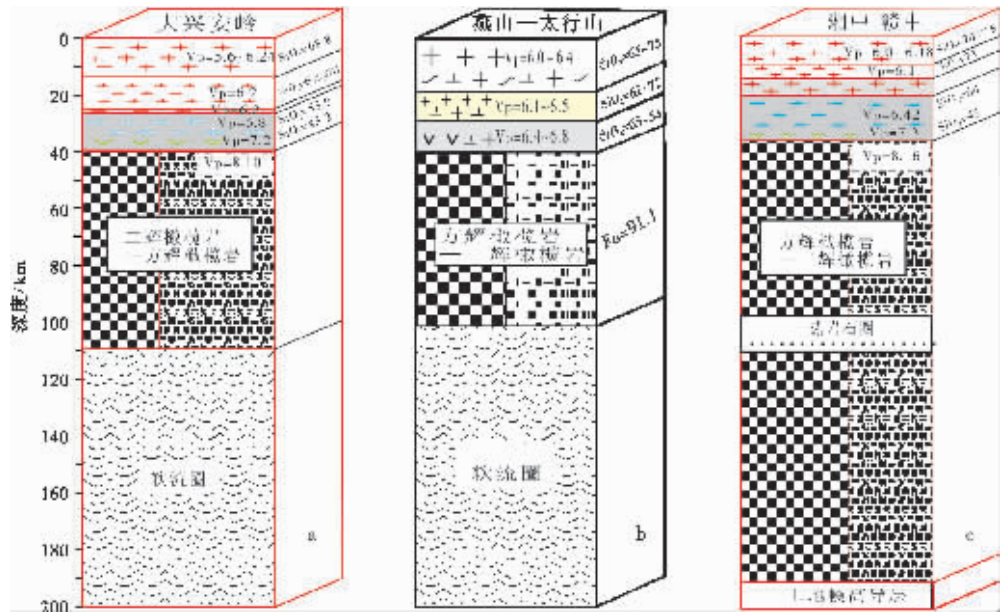


图 5 现今中国东部大陆燕山期造山带型岩石圈及壳—幔岩石学结构

Fig.5 Main types and crust—mantle petrological structures of the orogenic zone—type lithosphere beneath present eastern continental China

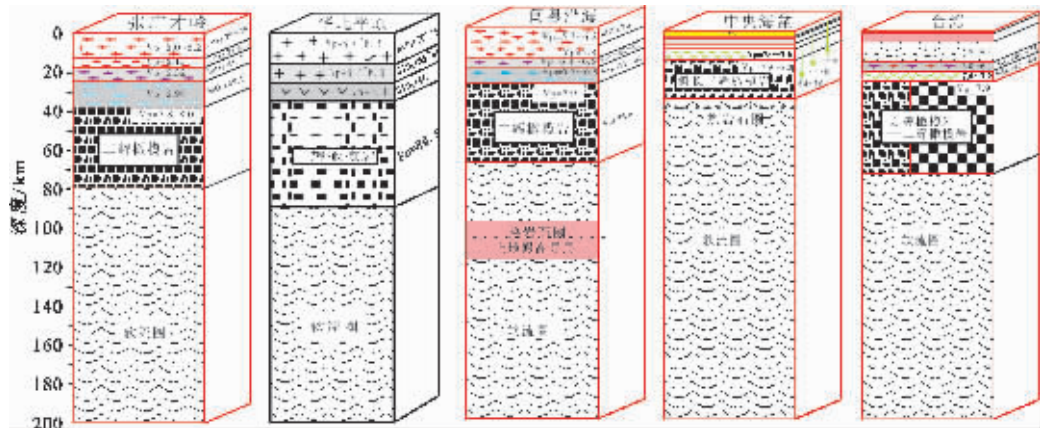


图 6 现今中国东部大陆裂谷型、大洋型和岛弧型岩石圈及壳—幔岩石学结构

Fig.6 Main types and crust—mantle petrological structures of the rift—, ocean— and island arc—type lithosphere beneath present eastern continental China

(表 1)说明,中国大陆岩石圈的不均一性不仅表现在不同类型岩石圈的空间展布上,而且表现在物质组成、结构以及它们的形成时代上。

4 中国大陆岩石圈陆壳岩石组成

根据中国大陆地学断面 V_p 资料统计,按照 V_p 与成分方程^[9]计算的相应 SiO_2 成分如表 2。图 1 中展示出中国大陆岩石圈深部壳-幔物质结构的强烈不均一性,与中国大陆经历了多次造山特点相对应,中国大陆岩石圈陆壳岩石组成中,造山带型岩石圈尤其显示出其区域多样、复杂性和不均一性(表 2)。

(1)中国大陆平均陆壳的岩石化学组成相当于花岗闪长质($SiO_2=65\%$,陆壳的平均速度 6.37 km/s),陆壳的酸性程度高于全球陆壳平均值(全球平均值=6.45 km/s,相应的 $SiO_2=63\%$),可能归因于中国大陆岩石圈陆壳经历了多次造山作用的结果。

(2)中国东、西部陆壳平均岩石组成都相当于花岗闪长质;两者对比,东部陆壳($SiO_2=65.12\%$,陆壳的平均速度 6.3752 km/s,表 2)的酸性程度略高于西部($SiO_2=64.32\%$,陆

壳的平均速度 6.3746 km/s,表 2)。

(3)中国西部,西南的青藏高原与西北大陆相比,西南的陆壳平均岩石组成的酸性程度($SiO_2=65.43\%$)略高于西北($SiO_2=64.88\%$),造成这种差异的可能原因是大陆地壳生长方式的不同;西北的中亚造山带形成背景是古亚洲洋,其大陆地壳生长可能为对流地幔物质和热输入及上中地壳混合为主的方式(图 7-a);而西南是对流地幔输入改造元古代造山带 TTG 基底的方式(图 7-b)。

(4)中国东部的陆壳,以华南的酸性程度最高($SiO_2=65.98\%$),其次是华北($SiO_2=64.88\%$),东北($SiO_2=63.18\%$)最低。它们在侏罗纪以来在同一中国大陆动力学系统作用下,经历了燕山期造山作用和喜马拉雅期裂谷作用两次对流地幔物质输入大陆^[9]。由燕山期花岗岩反映出它们改造的对象及生长方式不同;①东北是对流地幔输入改造显生宙陆壳与新陆壳生长的方式(图 7-c),东北燕山期花岗岩以 I 型和 A 型为主而几乎没有 S 型,岩石富 Na、矿产组合以 Cu、Au 为主、含矿岩石、花岗岩的 Sr、Nd 同位素与兴蒙造山带西部的同位素组成一致,绝大多数铈同位素初始值都小于 0.706、钕同位素 ϵ_{Nd} 值绝大多数为正值的的特点均与中亚造山带西段类

表 1 中国大陆岩石圈壳-幔物质时空结构

Table 1 Temporal-spatial structures of lithospheric crust-mantle material beneath continental China

	岩石圈类型	代表性地区	壳幔结构形成时代	壳幔物质形成时代	现今岩石圈根状态	时空结构
中国 大陆 西部	克拉通	塔里木	太古宙	太古宙	大陆根	老物质老结构
	造山带	西南天山	新生代	晚古生代—早中生代	造山带根	老物质新结构
	造山带	额济纳旗	古生代	古生代	已去根	
	造山带	昆仑	新生代	晚古生代—早中生代	造山带根	老物质新结构
	造山带	羌塘	新生代	新生代	造山带根	新物质新结构
	造山带	冈底斯	新生代	新生代	已去根	新物质新结构
	造山带	喜马拉雅山	新生代	新生代	造山带根	新物质新结构
	克拉通	印度	太古宙	太古宙	大陆根	老物质老结构
中国 大陆 东部	造山带	大兴安岭	中生代	中生代	已去根	
	裂谷岩石圈	松辽盆地	新生代	新生代		新物质新结构
	克拉通	鄂尔多斯	太古宙	太古宙	大陆根	老物质老结构
	造山带	燕山—太行山	中生代	中生代	已去根	
	裂谷岩石圈	华北平原	新生代	新生代		新物质新结构
	克拉通	扬子	太古宙	太古宙	大陆根	老物质老结构
	造山带	湘中赣中	中生代	中生代	造山带根	
	裂谷岩石圈	东南沿海	新生代	新生代		新物质新结构
	边缘海洋壳岩石圈	南海中央盆地	晚新生代—第四纪	晚新生代—第四纪		新物质新结构
	岛弧岩石圈	台湾	新生代	新生代		新物质新结构

注:中国东部(东北、华北、华南)、西部(西北、西南)一级构造单元,浅部以银川盆地、鄂尔多斯和四川盆地西边界为界;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。

表 2 中国大陆陆壳化学组成统计

Table 2 Chemical composition of continental crust of continental China

区域	平均速度 v_p	计算 $\text{SiO}_2/\%$	计算 $Q(\text{CIPW})/\%$	计算 $(Q+FP)/\%$	计算 DI 指数	计算 ρ 密度
中国大陆	6.37	65.24	22.89	79.31	63.22	2.67
中国西部	6.37	64.32	21.63	77.43	61.03	2.69
中国东部	6.38	65.12	22.72	79.06	62.92	2.67
西北	6.39	64.88	22.39	78.57	62.35	2.68
西南	6.37	65.43	23.16	79.71	63.67	2.67
东北	6.45	63.18	20.08	75.11	58.35	2.71
华北	6.39	64.88	22.40	78.57	62.36	2.68
华南	6.35	65.98	23.90	80.82	64.97	2.66

注:Q-石英;(Q+FP)-石英+长石;DI-分异指数; ρ -密度(单位: g/cm^3)。中国东部(东北、华北、华南)、西部(西北、西南)一级构造单元,浅部以银川盆地、鄂尔多斯和四川盆地西边界为界;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。

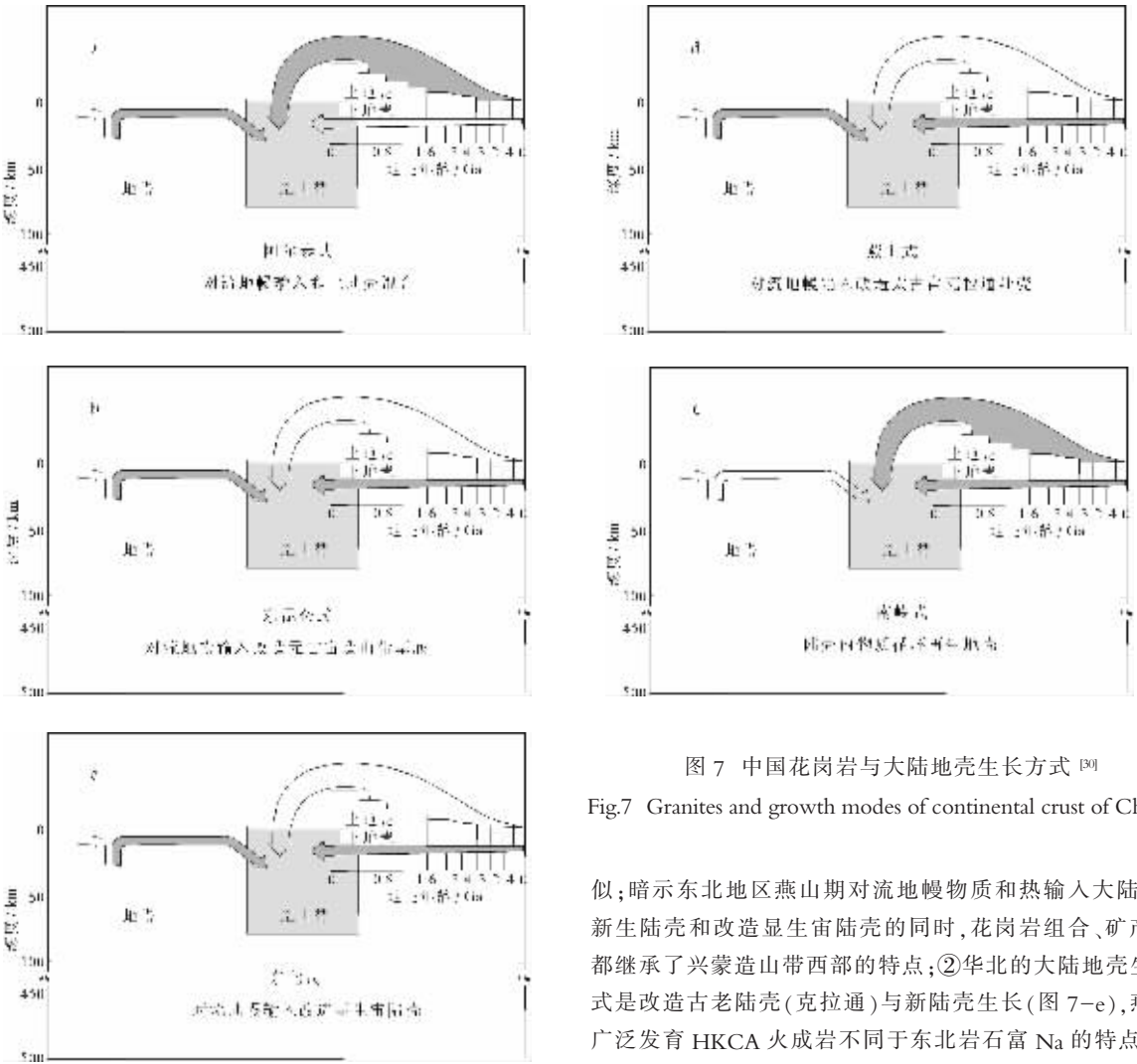


图 7 中国花岗岩与大陆地壳生长方式 [30]

Fig.7 Granites and growth modes of continental crust of China [30]

似;暗示东北地区燕山期对流地幔物质和热输入大陆,形成新生陆壳和改造显生宙陆壳的同时,花岗岩组合、矿产组合都继承了兴蒙造山带西部的特点;②华北的大陆地壳生长方式是改造古老陆壳(克拉通)与新陆壳生长(图 7-e),燕山期广泛发育 HKCA 火成岩不同于东北岩石富 Na 的特点,岩石

组合为 I 型+A 型+非典型 S 型, 以及以 Au、Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 为主的成矿作用, 与对流地幔物质和热输入大陆既形成新陆壳又改造古老陆壳的特点相符;③华南是对流地幔输入大陆的是以热为主、物质为辅, 大陆地壳生长是以陆壳物质再循环为主(零增长)的生长方式(图 7-f), 燕山期花岗岩以高钾、过铝、S 型花岗岩为特征、 ε_{Nd} 值绝大多数为负值, 以及矿产组合以 W、Sn、Bi、Mo、Nb、Ta 等为主与此相符。

参考文献(References):

- [1] 吴宗絮, 邓晋福, 赵海玲, 等. 华北大陆地壳—上地幔岩石学结构与演化[J]. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(2): 106~115.
Wu Zongxu, Deng Jinfu, Zhao Hailing, et al. Crust — mantle petrological structure and evolution of North China continent [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1994, 13(2): 106~115 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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): 1 809~1 827 (in Chinese).
- [3] 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 Xuanxun, et al. Continental Root—Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1996 (in Chinese with English abstract).
- [4] Anderson D L. Hotspots, basalts and the evolution of the mantle [J]. Science, 1981, 213: 82~89.
- [5] DePaolo D J. Nd isotopic studies: some new perspectives on Earth structure and evolution [J]. EOS, 1981, 162: 137~140.
- [6] Ringwood A E. Composition and Petrology of the Earth's Mantle [M]. McGraw—Hill. 1975. 1~618.
- [7] Condie K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. New York: Pergamon, 1982. 1~310.
- [8] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 华北地区三类岩石圈的壳幔岩石学结构与化学结构及其地球动力学意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23 (2): 127~140.
Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. The crust—mantle petrological —and petrolchemical structures of three kinds of lithosphere and their continental dynamics implication in North China [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23 (2): 127~140 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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).
- [10] Polet J, Anderson D L. Depth extent of cratons as inferred from

tomographic studies [J]. Geol., 1995, 23: 205~208.

- [11] Boyd F R. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. EPSL, 1989, 96: 15~26.
- [12] 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 等. 中国原生金刚石成矿地质条件研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 1~58.
Chi Jishang, Lu Fengxiang, Liu Yunshun, et al. The Study of Formation Conditions of Primary Diamond Deposits in China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. 1~58.
- [13] 程裕淇. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Cheng Yuqi. An Introduction to the Regional Geology of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).
- [14] 邓晋福, 吴宗絮, 赵国春, 等. 华北地台前寒武纪花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成 [J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 190~198.
Deng Jinfu, Wu Zongxu, Zhao Guochun, et al. Precambrian granitic rocks, continental crustal evolution and craton formation of the North China Platform [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(2): 190~198 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张宗清. 从华北古陆早前寒武纪变质岩的 Sm—Nd 同位素特征论其地壳的主要生长时期 [A]. 见: 沈其韩, 程裕淇主编. 华北地区早前寒武纪地质研究论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1998. 133~136.
Zhang Zongqing. On the continental growth periods of North China craton based on Sm—Nd isotopic characteristics of early Precambrian metamorphic rocks [A]. In: Sheng Qihan, Cheng Yuqi (eds). Contributions to the Early Precambrian Geology in North China Craton [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 133~136 (in Chinese).
- [16] 沈其韩. 华北地台前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景 [A]. 见: 沈其韩, 程裕淇主编. 华北地台前寒武纪地质研究论文集 [C]. 1998, 1~31.
Sheng Qihan. Geological characteristics and geological setting of banded itabirite on the Early Precambrian in North China Platform [A]. In: Sheng Qihan, Cheng Yuqi (eds). Contributions to the Early Precambrian Geology in North China Craton [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 1~31 (in Chinese).
- [17] 汪集旸, 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 Sinica, 1998, 2: 196~204 (in Chinese).
- [18] Xu Y G, Fan W M, Lin G. Lithosphere —asthenosphere interactions: a comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai Area [J]. Geotectica et Metallogenia, 1995, 19: 1~13.
- [19] Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino—Korean craton [A]. In: Flower M F, Chung S L, Lo C H, et al (eds). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C]. American Geophysical Union, 1998, Geodynamics Series 27: 107~126.
- [20] 高山, Rudnick R L, Carlson R W, et al. 华北克拉通岩石圈地

- 幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re—Os 同位素证据 [J]. 地学前缘, 2003, 10(3):61~67.
- Gao Shan, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Removal of lithospheric mantle in the North China craton: Re—Os isotopic evidence for coupled crust—mantle growth [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3):61~67(in Chinese with English abstract).
- [21] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. Rev. Geophys, 1995, 33:267~309.
- [22] 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).
- [23] Wang Hongzheng, Mo Xuanxue. An outline of the tectonic evolution of China. Episodes [J]. 1995. 18(1~2):6~16.
- [24] 周 肃, 莫宣学, 董国臣, 等. 西藏林周盆地林子宗火山岩 ^{40}Ar — ^{39}Ar 年代格架[J]. 科学通报, 2004, 49(20):2 095~2 103.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, et al. ^{40}Ar — ^{39}Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18):1 970~1 979.
- [25] 肖序常, 李廷栋. 青藏高原的构造演化与隆升机制 [M]. 广东科技出版社, 2000.1~313.
- Xiao Xuchang, Li Tingdong. Tectonic Evolution and Uplift Mechanism of Qinghai—Tibet Plateau [M]. Guangzhou: Science and Technology Press of Guangdong, 2000(in Chinese).
- [26] 吴功建, 高锐, 余钦范, 等. 青藏高原“亚东—格尔木地学断面”综合地球物理调查与研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(5):552~562.
- Wu Gongjian, Gao Rui, Yu Qinfan, et al. Integrated investigations of the Qinghai—Tibet plateau along the Yadong—Golmud geoscience transect[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(5): 552~562(in Chinese with English abstract).
- [27] 马晓冰, 孔祥儒. 青藏高原岩石圈热状态及其东西部差异 [J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3):12~20.
- Ma Xiaobing, Kong Xiangru. The thermal status of qinghai—tlbet plateau and the differences between the western and the eastern plateau[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3):12~20(in Chinese with English abstract).
- [28] 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).
- [29] Burke M M, Fountain D M. Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust—new laboratory measurements from the Ivrea Zone[J]. Tectonophysics, 1990, 182:119~146.
- [30] 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).

Petrological structure, types and inhomogeneity of the lithosphere beneath continental China

QIU Rui—zhao^{1,2}, LI Ting—dong^{3,4}, DENG Jin—fu⁵, ZHOU Su⁵, XIAO Qing—hui⁶,
YE Tian—zha¹, GENG Shu—fang²

- (1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
4. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;
5. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
6. Information Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China)

Abstract: On the basis of the geological and geophysical characteristics of continental China, different lithospheric types in various regions are distinguished. In light of the petrological method, model of Earth's evolution and relationships between the seismic velocity and rock composition, eighteen petrological structure prisms corresponding with different lithospheric types have been set up. According to the dynamic properties, five types of lithosphere, i.e. cratonic, orogenic belt, rift, marginal oceanic crust and island—arc, are recognized in continental China. A petrological structure model of lithosphere beneath continental China is constructed and the inhomogeneous characteristics of the lithosphere beneath continental China are displayed for the first time.

Key words: lithospheric type; petrological structure; inhomogeneous characteristics of lithosphere; continental China

About the first author: QIU Rui—zhao, male, born in 1963, doctor and associate senior researcher, now mainly engages in the study of geology and mineral resources in foreign countries; E—mail: qiurzz@yahoo.com.cn.