

文章编号: 1000-6524(2004)02-0127-14

# 华北地区三类岩石圈的壳幔岩石学结构与 化学结构及其大陆动力学意义

邱瑞照<sup>1</sup>, 李廷栋<sup>1</sup>, 邓晋福<sup>2</sup>, 周肃<sup>2</sup>, 李金发<sup>3</sup>, 肖庆辉<sup>1,4</sup>, 吴宗絮<sup>5</sup>, 赵国春<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 中国地质大学, 湖北武汉 430074; 4. 国土资源部信息中心, 北京 100812; 5. 国家地震局地质研究所, 北京 100029)

**摘要:** 根据地质和地球物理特征表现出的岩石圈不连续, 华北地区可区分出鄂尔多斯克拉通型、燕山-太行造山带型和华北平原裂谷型三类岩石圈。依据岩石学方法、壳幔演化模型、造山带形成过程以及地震波速与岩石化学成分之间的关系, 建立了华北地区三类型岩石圈的壳幔岩石学结构和化学结构, 讨论了不同岩石圈类型的壳幔物质结构、地壳和岩石圈地幔厚度的地质含义、岩石圈不连续在划分岩石圈单元中的作用及不同类型岩石圈形成的大陆动力学意义。

**关键词:** 岩石圈类型; 壳幔岩石学结构与化学结构; 地质解释; 大陆动力学意义; 华北地区

**中图分类号:** P588.1; P315.3<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

## Crust\_mantle petrological and petrochemical structures of three kinds of lithospheres in North China and their continental dynamic implications

QIU Rui\_zhao<sup>1</sup>, LI Ting\_dong<sup>1</sup>, DENG Jin\_fu<sup>2</sup>, ZHOU Su<sup>2</sup>, LI Jin\_fa<sup>3</sup>, XIAO Qing\_hui<sup>1,4</sup>,  
WU Zong\_xu<sup>5</sup> and ZHAO Guo\_chun<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Information Center of Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China; 5. Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on lithosphere discontinuity revealed by geological and geophysical characteristics of North China, the authors recognized three kinds of lithospheres in North China region, they are cratonic type lithosphere in Odros, orogenic type lithosphere in Yanshan\_Taihang and rift type lithosphere in North China plain. According to petrological means, crust\_mantle evolution models, the process of orogenic belt formation, and the relationship between seismic velocity and petrochemical composition, this paper has set up the crust\_mantle petrological and petrochemical lithospheric structures of craton, orogenic and rift types in North China. Some important problems are also discussed in this paper, such as the geological implications of the crust\_mantle structures and the thicknesses of crust and subcontinental lithospheric mantle in different types of lithospheres, the role of lithospheric discontinuities in the classification of the lithospheric units, and the continental dynamic significance of the formation of different types of lithospheres.

收稿日期: 2003-09-02; 修订日期: 2004-04-09

基金项目: 国土资源部科技专项计划资助项目(200010103 & 20001010202); 中国地质调查局资助项目(K1.4.1.2 & 200113900018); 国家自然科学基金重点资助项目(NSFC 402344048); 科技部 IGCP 国际合作资助项目(2001cb711002); 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资助项目(2003009 & 2003010)

作者简介: 邱瑞照(1963-), 男, 博士, 副研究员, 现主要从事岩石学与深部地质研究工作, E-mail: qiuruizhao@21cn.com.

**Key words:** lithosphere type; crust\_mantle petrological and petrochemical structure; geological explanation, continental dynamic implication; North China

## 1 研究方法

长期以来,对于地球深部物质的了解主要依靠地球物理学的研究,但是地球物理资料的多解性又要求对其成果有更多的约束,因此,如何建立既符合岩石学模型又符合地球物理模型的深部物质模型,是当前深部过程和大陆动力学研究的重要内容。岩石学模型与地球物理模型的结合是20世纪80年代以来研究岩石圈结构的一个新趋势,岩石学方法是对地球物理的成果进行约束的最理想方法。该方法强调岩石学与地球物理学的结合(吴宗絮等,1994;邓晋福等,1996a),其信息主要来自3个方面:①火山喷发可被喻为深达壳-幔的巨型超深钻,火成岩记录了源区物质的组成与温压等物理学信息,壳-幔混合型岩浆的侵入或喷发记录了壳-幔相互作用的各种信息;②前寒武纪变质岩系常常是抬升至地表的深部陆壳剖面,变质岩  $p-T-t$  轨迹记录了岩石圈形成与构造隆升的历史信息;③由岩浆或构造作用带到地表的深部岩石包体或块体是研究壳幔结构的最直接的标本,同时结合痕量元素与同位素地球化学深部物质与深部过程示踪、深部岩石高温高压实验与地球物理测深资料等提供的信息,可以对深部物质组成提供多方面的约束。

被誉为岩石圈探针的火成岩,是起源于地球深部的壳幔相互作用的直接产物,不同的岩浆性质反映了壳幔相互作用的强度和方式,同时直接指示壳幔物质组成的演化趋向<sup>①</sup>: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成分,则壳幔混合型岩浆发育,原有的陆壳和岩石圈地幔将同时受到强烈改造。因此,通过区分地表出露的不同时期岩浆-构造-热事件的强弱及岩浆性质的判断,结合大地构造

研究,可以推测壳幔相互作用的方式及对深部物质组成的影响,进而建立古壳幔岩石学结构(吴宗絮等,1994),从而使探讨岩石圈成分演化成为可能。

在漫长的地质演化过程中,由于壳幔物质化学与物理学的差异,它对于同一作用过程的反应不同;或在同一个新的动力学系统作用下,有的易于改造,有的则不易改造而保留;或者由于作用力的强弱不同,同一种物质在作用力强的地方易于改造,而在作用力弱的地方不易改造,因此,这种差异可以导致不同岩石圈块体之间成分或结构的不连续,进而区分出不同的岩石圈类型。壳幔岩石学结构是岩石圈演化过程的记录,通过深部过程的浅部响应事件的识别,如在地表的各种地质现象、岩浆活动性质、地热以及深部地球物理特征等,既可为区分不同岩石圈类型提供依据,又是追索不同岩石圈类型深部物质组成及所代表地质意义的重要线索。

华北地台是中国最古老的大陆克拉通区和重要的成矿区,也是地质与地球物理研究程度最高的地区之一。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,可以区分出华北地区克拉通型、造山带型和裂谷型岩石圈,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)、壳幔演化和造山带形成过程模型以及地震波速与成分的关系<sup>②</sup>可以建立相应类型的壳幔岩石学结构和化学结构(表1)。本文侧重阐述建立这些不同类型岩石圈深部物质模型的方法,并简要讨论其地质含义、岩石圈不连续在划分岩石圈单元中的作用及其大陆动力学意义。

## 2 华北地区岩石圈的岩石学结构和化学结构

### 2.1 鄂尔多斯克拉通型岩石圈

华北地台具有与全球主要克拉通相同的历史,形成于古太古代-古元古代(程裕淇,1994;张宗清,1998;沈其韩,1998;邓晋福等,1999;)。地质历史表明,华北地台在侏罗纪前是稳定的地台,侏罗纪以

① 邓晋福,邱瑞照,吴宗絮,等. 2003. 对流地幔输入大陆及过程与大规模成矿作用(第六章). 见:中国地球物理场特征及深部地质与成矿(专题报告,未刊).

② 邱瑞照,邓晋福,周肃,等. 2004. 陆壳岩石化学结构建立方法探讨. 地球学报(出版中).

表 1 华北地区三类岩石圈的岩石学结构和化学结构  
Table 1 Crust-mantle petrological and petrochemical structures of three kinds of lithospheres in North China

深度 /km	鄂尔多斯克拉通型岩石圈						燕山-太行造山带型岩石圈						华北平原裂谷型岩石圈													
	分 层	岩石学	地球物理			计算			分 层	岩石学	地球物理			计算			分 层	岩石学	地球物理			计算				
			Vp	Vs	SiO <sub>2</sub>	Q	Q+FP	DI			ρ	Vp	Vs	SiO <sub>2</sub>	Q	Q+FP			DI	ρ	Vp	Vs	SiO <sub>2</sub>	Q	Q+FP	DI
0-10	上地壳	花岗岩、 花岗闪长质、 花岗闪片麻岩	6.0	3.55	75	37	100	87	2.51	盖层, 花岗岩体 花岗闪长质 变粒岩	6.0	3.42	75	37	100	87	2.51	片岩、花岗岩 花岗片麻岩	6.0	3.45	75	37	100	87	2.0	上地壳
10-20	上地壳	花岗岩、 花岗闪片麻岩	6.3	3.68	67	26	83	68	2.64	花岗闪长质 角闪岩相片麻岩	6.4	3.42	65	22	78	62	2.68	花岗闪长岩	6.2	3.45	70	29	89	74	2.59	中地壳
20-30	中地壳	花岗岩、 TTG	6.5	3.80	62	18	72	55	2.73	酸性麻粒岩	6.1	3.70	72	33	94	81	2.55	酸性麻粒岩 玄武岩	6.4	3.75	65	22	78	62	2.68	中地壳
30-40	下地壳	花岗岩、 TTG 酸性榴辉岩 基性麻粒岩	6.8	4.40	54	7.0	56	36	2.86	花岗闪长质 低速体 辉石岩、玄武岩	6.5	3.61	62	18	72	55	2.73	酸性麻粒岩 玄武岩	6.6	3.80	59	15	67	49	2.77	下地壳
40-50	下地壳	酸性榴辉岩 基性麻粒岩	6.8	4.40	54	7.0	56	36	2.86	花岗闪长质 低速体 辉石岩、玄武岩	6.4	3.8	65	22	78	62	2.68	酸性麻粒岩 玄武岩	7.1	4.45	46	40	17	2.99	下地壳	
50-60	上地幔岩石圈	方辉橄 榄岩与纯橄岩 Fo=92.5	8.0	4.40					3.39	二辉橄岩 一方辉橄岩 Fo=91.1	7.0	4.4	49	45		2.95	二辉橄岩, 少量方辉 橄岩 Fo=89.5	8.0						3.39	上地幔岩石圈	
60-80	上地幔岩石圈	方辉橄 榄岩与纯橄岩 Fo=92.5	8.25						3.50	二辉橄岩 一方辉橄岩 Fo=91.1	8.14							二辉橄岩, 少量方辉 橄岩 Fo=89.5	8.1						3.43	上地幔岩石圈
80-100	软流圈																									软流圈
100-200	软流圈																									软流圈

表中 Q 为石英(w<sub>g</sub>/%); Q+FP 为石英+长石(w<sub>g</sub>/%); DI 为分异指数; ρ(密度)单位为 g/cm<sup>3</sup>; Vp、Vs 单位为 km/s; 转引自邓晋福等(2003)的华北地区三维岩石圈结构(专题报告,下同)。

来地台曾受到强烈的改造,即地台“活化”,表现在火成岩活动区域上是燕山期前的岩浆活动仅局限发生于地台的边部(图1),而燕山期岩浆活动却深入地台内部,分布遍及华北地台的中东部地区(图2);新生代裂谷作用伴随的玄武岩喷发主要发生在东部华北平原一带,在华北西部的鄂尔多斯块体自古太古代-古元古代最终形成之后,至今一直没有岩浆活动,表明一直没有对流地幔物质对陆壳和地幔岩石圈的注入,现今块体内无活动断层,无岩浆活动,保持了稳定的特点。

地球物理探测表明,该区壳内速度结构呈正梯度,无壳内低速层(图3),岩石圈厚度大(200 km)(马杏垣等,1991),至今仍然保留了巨厚的大陆根,近代无强地震,热流低( $44 \text{ mW/m}^2$ ,汪集等,1988),具有典型的大陆克拉通岩石圈结构特征,因此,鄂尔多斯块体可以作为华北地台“活化”后残留的克拉通型岩石圈。

### 2.1.1 陆壳组成

陆壳的岩石学结构可以根据地壳模型建立,即

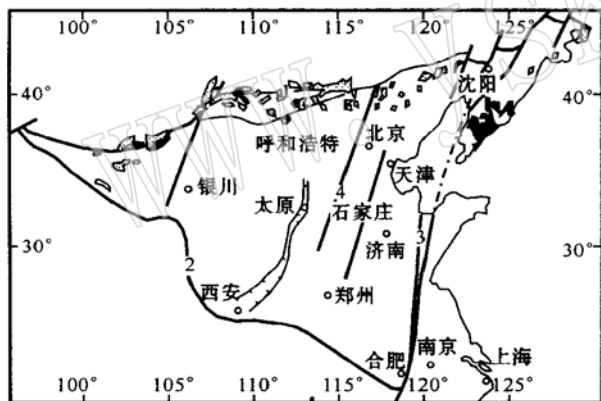


图1 华北地台加里东期、华力西期、印支期侵入岩分布示意图(据程裕淇,1994)

Fig. 1 Distribution of Caledonian, Hercynian and Indosinian plutons in North China platform (after Cheng Yuqi, 1994)

a—印支期侵入岩(黑块); b—华力西期侵入岩(小点); c—加里东期侵入岩(空心); 粗线为断裂带, 1~4为其编号: 1—华北陆块北缘断裂带; 2—华北陆块南缘断裂带; 3—郟城-庐江断裂带; 4—太行山断裂带

a—Indosinian pluton (black); b—Hercynian pluton (dot); c—Caledonian pluton (hollow); Thick lines are the fracture belts, and 1~4 mean serial number: 1—faulted zone on the northern edge of North China platform; 2—faulted zone on the southern edge of North China platform; 3—Tancheng-Lujiang faulted zone; 4—Taihangshan faulted zone

下地壳主要由麻粒岩相岩石组成,中地壳主要由角闪岩相岩石构成,上地壳主要由绿片岩相岩石组成。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(池际尚等,1996)表明,古生代时东部也具有与现今西部鄂尔多斯克拉通块体一样的巨厚岩石圈( $\geq 200 \text{ km}$ )和岩石圈根。这样,如果把“活化”前的华北地台看作一个整体,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“活化”后被抬升出露到地表的陆壳岩石,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。

由地壳模型限定的相当于下地壳麻粒岩相的岩石有集宁群下亚岩群、迁西群及阜平岩群下亚岩群下部,其中集宁岩群下亚岩群岩性为麻粒岩-片麻岩-花岗岩(包括英云闪长岩)杂岩(沈其韩等,1998),其表壳岩的岩性大致可以和迁西岩群对比;阜平岩群下亚岩群下部岩性以黑云(角闪)斜长片麻岩、二辉麻粒岩为主。

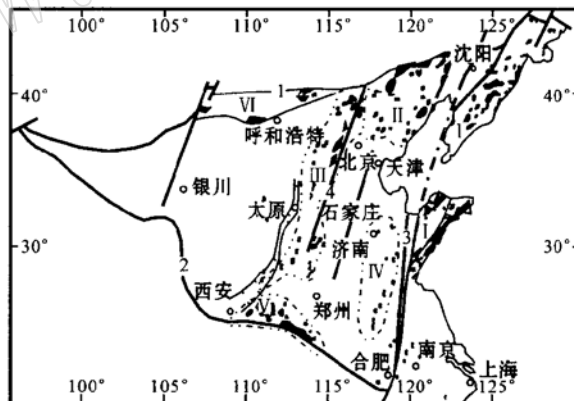


图2 华北地台燕山期侵入岩分布示意图(据程裕淇,1994)

Fig. 2 Distribution of Yanshanian pluton in North China platform (after Cheng Yuqi, 1994)

I—吉辽鲁东岩带; II—燕辽岩带; III—太行山岩带; IV—鲁淮岩带; V—豫陕岩带; VI—华北陆块北缘西段岩带; 1—华北陆块北缘断裂带; 2—华北陆块南缘断裂带; 3—郟城-庐江断裂带; 4—太行山断裂带

I—Jiliao-Ludong intrusive belt; II—Yanliao intrusive belt; III—Taihangshan intrusive belt; IV—Luhuai intrusive belt; V—Yushaan intrusive belt; VI—western section of the intrusive belt on the northern edge of North China platform; 1—faulted zone on the northern edge of North China platform; 2—faulted zone on the southern edge of North China platform; 3—Tancheng-Lujiang faulted zone; 4—Taihangshan faulted zone

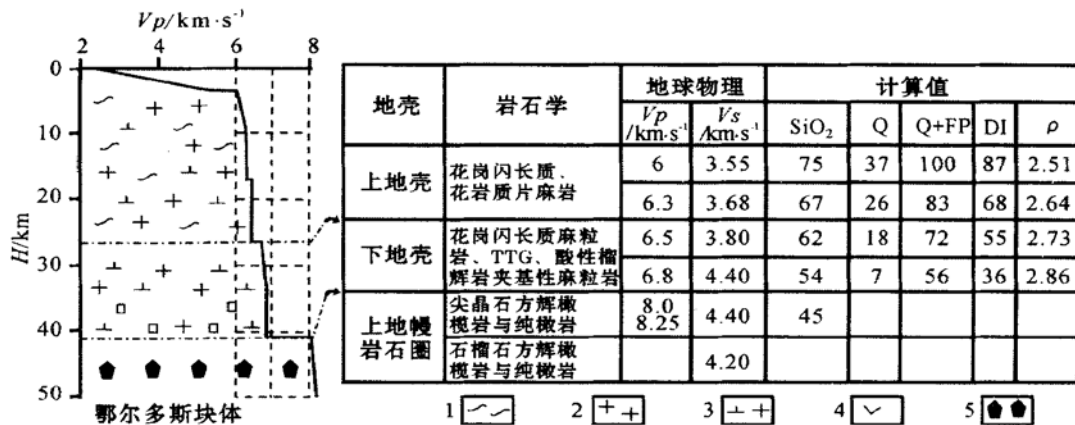


图 3 鄂尔多斯克拉通型岩石圈的岩石学结构和化学结构

Fig. 3 Petrological and petrochemical structure of cratonic type lithosphere in Ordos

1—片麻岩；2—花岗质岩石；3—花岗闪长质岩石；4—麻粒岩、榴辉岩；5—方辉橄榄岩  
1—gneiss；2—granitic rock；3—granodioritic rock；4—granulite, eclogite；5—harzburgite

可代表中上地壳的岩石有山西省的恒山杂岩(群)、阜平群、冀东的单塔子群和内蒙古的乌拉山群部分角闪岩相岩石等,岩石主要是黑云斜长(或二长)片麻岩、变粒岩、角闪岩、大理岩和云母石英片岩等(乌拉山群与二道洼群);还有绿片岩相—低角闪岩相的山西的五台群与滹沱群、河北省冀东地区的双山子群和朱杖子群等,岩性主要是云母石英片岩、板岩、变质砂砾岩等(二道洼群与冯家店群)以及未变质的盖层。

陆壳岩石化学结构可以通过地球化学方法和岩石成分与地震波速的关系建立。地球化学方法一般是对出露地表的岩石进行地球化学取样分析,然后结合地球物理探测的地壳结构、陆壳模型获得;在华北地区已有的研究中,鄢明才等(1997)对华北地台通过地球化学取样分析,结合地球物理探测的地壳

结构、陆壳模型获得华北地台的陆壳岩石组成(表 2);Gao 等(1996)通过对华北中段进行地球化学取样分析,选择典型岩石(代表陆壳的不同部位、岩性、变质程度等)进行波速测定、波速与成分拟合等方法,结合地球物理结构获得该段岩石的地壳组成(表 2)。尽管两者的研究范围大小不同,研究方法也不尽相同,但他们获得的上、中、下地壳 SiO<sub>2</sub> 含量基本一致(表 2)。

根据岩石化学成分和实验波速数据建立的  $V_p$  与岩石化学成分之间的线性回归方程<sup>①</sup>,也可以获得陆壳岩石的化学结构。

$$V_p = -0.0374 \text{ SiO}_2 + 8.8149 \quad (r = 0.915) \quad (1)$$

$$V_p = -0.0274 \text{ Q} + 7.0021 \quad (r = 0.915) \quad (2)$$

$$V_p = -0.0243(\text{Q} + \text{FP}) + 8.299 \quad (r = 0.888) \quad (3)$$

表 2 华北地台陆壳岩石化学组成

Table 2 Chemical compositions of the crust in North China platform

地区	实测或计算值	上地壳	中地壳	下地壳	下地壳上部	下地壳下部	采用方法	资料来源
华北地台	实测 $V_p$ /km·s <sup>-1</sup>	2~6.4	6.2~6.5		6.4~6.6	6.7~7.3		马杏垣等, 1991
	计算 SiO <sub>2</sub> (wB/%)	65	70~62		65~59	57~41	回归方程计算	本文
	实测 SiO <sub>2</sub> (wB/%)	65.05	62.24	56.64	60.15	48.15	地球化学	鄢明才等, 1997
	计算 $V_p$ /km·s <sup>-1</sup>	6.38	6.49	6.70	6.57	7.01	回归方程计算	本文
华北地台中段	实测 SiO <sub>2</sub> /wB/%	65.1	60.7	58.01	62.65	48.59	地球化学	Gao et al., 1996
	计算 $V_p$ /km·s <sup>-1</sup>	6.38	6.54	6.65	6.47	7.00	回归方程计算	本文
鄂尔多斯	实测 $V_p$ /km·s <sup>-1</sup>	6.0~6.3		6.5~6.8	陆壳平均波速=6.3			马杏垣等, 1991
	计算 SiO <sub>2</sub> (wB/%)	67.2~75.3		54~62	陆壳平均 SiO <sub>2</sub> =67.2		回归方程计算	本文

① 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 2004. 陆壳岩石化学结构建立方法探讨. 地球学报(出版中).

$$V_p = -0.0158 DI + 7.3737 \quad (r = 0.912) \quad (4)$$

$$V_p = 0.31 + 2.27R \quad (\text{据 Ringwood, 1975}) \quad (5)$$

从地震波速  $V_p$  与  $\text{SiO}_2$  含量回归关系方程(1)计算的  $\text{SiO}_2$  含量看(表2), 鄂尔多斯上中地壳  $V_p$  值(6.0~6.3 km/s)对应的  $\text{SiO}_2$  含量应该在 67.2%~75.3% 之间, 下地壳  $V_p$  值(6.5~6.8 km/s)对应的  $\text{SiO}_2$  含量应该在 54%~62% 之间, 由  $\text{SiO}_2$  含量反映的化学结构与岩石学结构基本一致。

鄂尔多斯克拉通陆壳的平均波速 6.3 km/s 对应的  $\text{SiO}_2$  含量为 67.2%, 与地球化学方法(鄢明才等, 1997; Gao *et al.*, 1996) 求得的华北地台平均地壳成分相当于花岗闪长岩基本一致, 同时也与由岩石学资料推导出的从古太古代→新太古代或古元古代华北大陆陆壳岩石总体组成为 TTG(邓晋福等, 1999) 相符。因此, 鄂尔多斯克拉通陆壳的岩石总体组成为 TTG(图3), 与世界主要克拉通的成分可以对比。

### 2.1.2 上地幔岩石圈组成

华北地区自晚太古代-古元古代形成以来至侏罗纪前一直保持稳定, 而根据辽宁复县和山东蒙阴的金刚石中包裹体的成分估算, 古生代时岩石圈厚度分别为 208 km 和 222.7 km(池际尚等, 1996), 与现今鄂尔多斯的岩石圈厚度类似; 根据热流估算的古地温(42 mW/m<sup>2</sup>, 汪集等, 1988) 及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)地质温压计估算的古地温(35~40 mW/m<sup>2</sup>) (Xu

*et al.*, 1995; Griffin *et al.*, 1998) 与鄂尔多斯地块现今的低温(44 mW/m<sup>2</sup>) 类似, 同时也与著名的南非 Kappvaal 克拉通的古地温类似。因此, 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。

根据地幔演化模型(Anderson, 1981; DePaolo, 1981) 和板块构造理论(Wyllie, 1973; Bird, 1979; Ringwood, 1975; Condie, 1982), 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了大陆岩石圈根, 由此, 大陆地壳与地幔岩石圈是对流地幔分异的互补产物。鄂尔多斯克拉通 TTG 陆壳对应的地幔岩石圈应该是强亏损的、以方辉橄榄岩为主的岩石组成。山东蒙阴和辽宁复县地幔捕虏体的岩性均以橄榄岩为主(池际尚等, 1996), 属于纯橄榄岩、方辉橄榄岩多于二辉橄榄岩的 P 型包体(周新华等, 2002), 支持了鄂尔多斯克拉通型上地幔岩石组成以方辉橄榄岩为主的推断。

岩石化学成分表明, 古生代金伯利岩和金刚石中的橄榄岩包体岩石化学成分变化大(表3), 但在  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  图上主体主要集中在耐火组分 MgO 端员(图4), 反映主体为亏损特征; 平均成分对

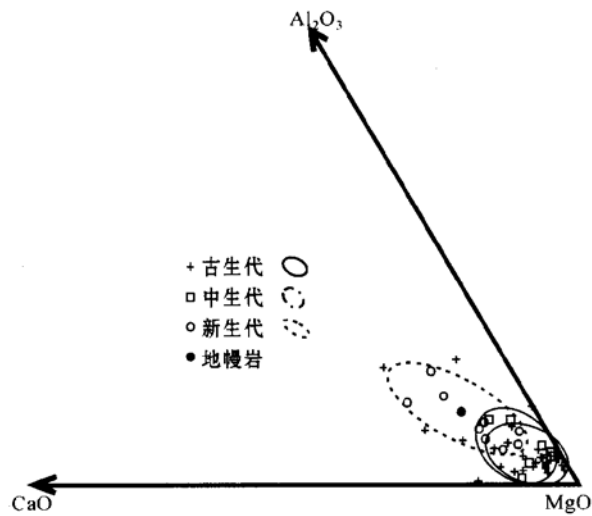
表3 不同时代地幔橄榄岩包体的岩石化学平均成分及变化范围

w<sub>B</sub>/%

Table 3 Average petrochemical composition and variation range of mantle peridotite enclaves in different epochs

时代 岩区 成分	古生代		新生代		地幔岩
	蒙阴、复县、铁岭		汉诺坝、蓬莱-栖霞等		
	平均(29)	变化范围	平均(55)	变化范围	
SiO <sub>2</sub>	45.09	39.29~47.51	46.23	44.38~54.12	45.48
TiO <sub>2</sub>	0.22	0.04~0.55	0.16	0.05~0.35	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.77	0.57~6.25	3.11	1.89~4.86	3.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.40	1.22~9.23	1.92	1.00~2.91	0.46
FeO	2.96	0.75~6.15	6.66	5.73~8.24	8.10
MnO	0.08	0.02~0.16	0.14	0.09~0.18	0.14
MgO	43.01	36.72~47.26	38.60	30.71~43.27	37.67
CaO	2.15	0.07~10.42	2.78	1.27~5.19	3.10
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.01~0.24	0.30	0.11~0.62	0.57
K <sub>2</sub> O	0.10	0.00~0.33	0.08	0.00~0.26	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.02~0.86	0.01	0.00~0.05	0.06
Ol	60.92	44.99~87.22	54.87	7.30~72.04	62.11
Mg <sup>#</sup>	0.92	0.86~0.95	0.89	0.88~0.92	0.89
资料来源	1	1	2	2	3

表中数据为根据原数据去除挥发分后的干组分及计算后统计结果; 1—据池际尚等(1996)、郑建平(1999); 2—据赵大升等(1987)、池际尚等(1996); 3—据 Ringwood(1975); Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg+TFe); TFe = FeO+0.9Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 括号内数字为样品数。

图 4 地幔橄榄岩包体 CaO - MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解Fig. 4 CaO - MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram of mantle peridotite enclaves

比模拟地幔岩 (Ringwood, 1975), MgO 含量 (43.01%) 明显偏高, SiO<sub>2</sub> 含量偏低和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O 含量显著偏低, 富 MgO、贫铝、钙、碱的特点表明属于地幔熔融残余, 具强亏损地幔特征。

从同位素特征上看, 华北地台太古宙幔源超镁铁火山岩 ( $t_{DM} = 2480 \sim 3470$  Ma) 均具正的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (+0.2 ~ +6.0, 平均 2.30) (李曙光等, 1987; 毛存孝等, 1989; 张宗清等, 1991; 涂湘林, 1991; 原振雷等, 1992; 李俊建等, 1996; 王汝铮等, 1997), 说明太古宙—古元古代陆壳形成时其地幔就是亏损的; 关于华北古生代地幔, 郑建平 (1999) 提供了金伯利岩中地幔捕虏体的 Sr、Nd 同位素资料。据报道 (郑建平, 1999; 郑建平, 1999; Zhang Hongfu *et al.*, 2002), 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体主元素是强亏损的, 而不相容元素 Sr、Nd 同位素则显示富集地幔特征; 6 个古生代深源捕虏体橄榄岩的 Sr、Nd 同位素, 在 Sr、Nd 图中 1 个点落在第 III 象限, 其余 5 个落在第 IV 象限, 具有向 EM II (富集地幔端员 II) 演变的特点, 这种现象被解释为是受到后期交代的结果 (郑建平, 1999)。从郑建平 (1999) 使用的 Nd 模式年龄反推可知用的是现代值, 而没有做时间校正, 为此, 笔者根据其 6 个橄榄岩包体 Sm、Nd 同位素分析数据, 取钙钛矿 U、Pb 年龄 457 Ma (Brlstow, 1988, 转引自郑建平, 1999) 为时间计算, 得到地幔橄榄岩捕虏体的  $\epsilon_{Nd}(t)$  也均为正值 (+0.9 ~ +3.9), 反映古生代时期华北岩石圈地幔也是亏损的, 并且

古生代  $\epsilon_{Nd}(t)$  平均值 (2.29) 与太古宙火山岩的平均值 (2.30) 基本一致。但是, 即便如此, 地幔橄榄岩的主量元素反映强亏损, 而 Nd 同位素却显示“弱亏损”, 两者反映的结果仍然有差异, 这种差异可以从 Leshner (1990) 的实验得到解释。Leshner (1990) 通过基性和酸性熔浆的实验研究, 提出岩浆混合作用时主元素和同位素交换解耦, 同位素的交换和混合明显地快于主元素的交换和混合, 不相容元素的交换和混合作用也快于主元素。这样, 古生代 Nd 同位素资料反映的“弱亏损”与主量元素反映的“强亏损”的“矛盾”就可以得到解释。所以, 由 Nd 同位素资料反映古生代与太古宙地幔都是“弱亏损”的, 暗示它们的地幔组成大体是一致的或自太古宙以来至古生代是稳定的。这在地质上也是合理的: 华北地区自形成以来至侏罗纪之前无大规模的幔源岩浆活动; 缺少古生代沉积记录, 指示这时是陆块隆升剥蚀期 (Wang Hongzhen *et al.*, 1995); 金刚石是稳定克拉通的标志矿物, 只是反映小规模的地幔热扰动 (邓晋福等, 1996b), 说明华北克拉通型岩石圈地幔组成自太古宙以来一直处于亏损状态, 符合大陆岩石圈稳定的特点, 其壳幔岩石圈结构长期保持稳定; 古生代金伯利岩中地幔橄榄岩捕虏体的橄榄石的 Fo 范围 91.5 ~ 94.5 (峰值 92.5) 与南非 Kappvaal 典型克拉通的 Fo 范围 91.5 ~ 93.5 (Boyd, 1989) 类似, 也说明克拉通型岩石圈地幔应该与南非 Kappvaal 一样, 主要由强亏损的方辉橄榄岩构成。所以, 鄂尔多斯主要由强亏损的方辉橄榄岩构成的克拉通型岩石圈地幔与 TTG 为主体的陆壳在成分上是互补的 (图 3)。

## 2.2 燕山—太行造山带型岩石圈

从燕山期侵入岩分布遍及华北地台中东部来看 (图 2), 伴随燕山造山运动对华北地台的改造区域主要在华北地台的中东部地区。同位素示踪研究表明 (周新华等, 2002; 张连昌等, 2002; 洪大卫等, 2003), 燕山期岩浆源区主要为壳幔混合来源, 并且花岗岩与同时代的镁铁质—超镁铁质岩 [包括碳酸岩 (山西大同)、煌斑岩 (河北太行山、北京西山、胶东)、辉长岩 (山东济南)、闪长岩 (太行山南段) 等] 以及地球化学性质类似埃达克岩的中生代 (124 ~ 119 Ma) 火山岩具有十分类似的 Sr、Nd 同位素性质 (洪大卫等, 2003)。虽然 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成反映成岩成矿物质来源具有多元性 (周新华等, 2002), 但重要的是反映了有幔源物质参与的信息 (Zhou Xinhua *et al.*,

2003), 并一致显示了 EMI 型富集地幔的源区特征(洪大卫等, 2003; 刘建明等, 2003), 说明伴随燕山造山运动确实有大量对流地幔物质输入, 并导致 TTG 陆壳岩石熔融, 壳内大规模熔融分异形成带状岩浆房, 使花岗岩与同时代的基性、超基性岩具有相似的 Sr、Nd 同位素组成。但是, 由于喜马拉雅期在华北东部地区还发育了大陆裂谷作用, 因此华北地台的造山带型岩石圈只在燕山、太行等大陆裂谷作用没

有涉及到的地区才得以保留。

地球物理探测表明, 燕山、太行山地区的地壳速度结构相似且有密度倒转(图 5), 分别在上地壳下部(16~20 km)和下地壳壳幔过渡带(32~40 km)存在 2 个低速体, 同时, 具有较高的地表平均热流值( $60 \text{ mW/m}^2$ )(汪集等, 1988), 这些特征与其西侧的鄂尔多斯块体(图 3)有明显的区别。

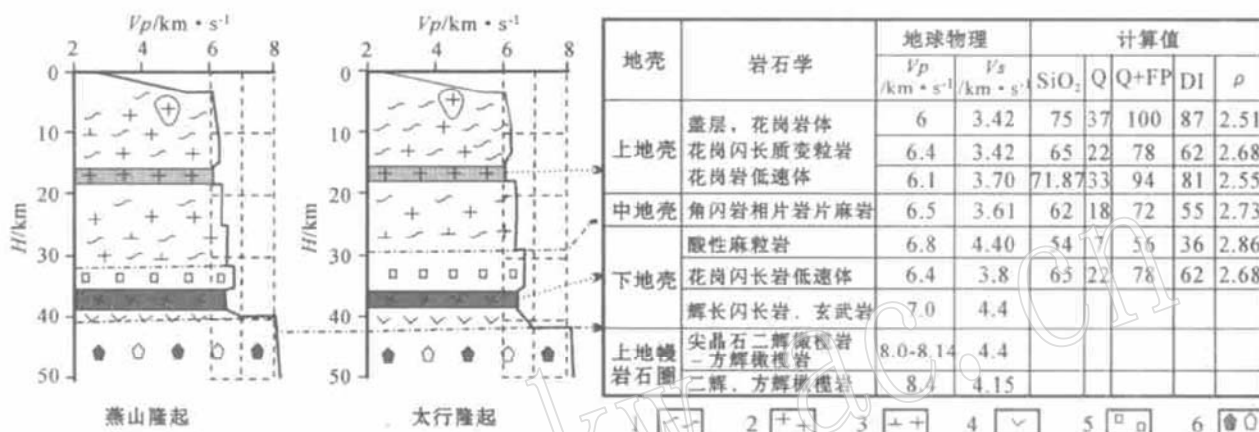


图 5 燕山-太行造山带型岩石圈岩石学结构和化学结构

Fig. 5 Petrological and petrochemical structure of orogenic type lithosphere in Yanshan-Taihang

1—片麻岩; 2—花岗质岩石; 3—花岗闪长质岩石; 4—玄武质岩石; 5—麻粒岩、榴辉岩; 6—方辉橄辉岩-二辉橄辉岩  
1—gneiss; 2—granitic rock; 3—granodioritic rock; 4—basaltic rock; 5—granulite, eclogite; 6—harzburgite, herzolite

## 2.2.1 陆壳组成

在造山带过程中地壳的加厚主要发生在地壳(Rudnick *et al.*, 1995)。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<sup>①</sup>, 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)。因此, 造山带陆壳成分会随着壳内分异的进行使岩石组成趋酸性, 以 TTG 为主体的陆壳组成将被改造转变为以花岗质为主体。

侵入岩同位素特征(洪大卫等, 2003; 刘建明等, 2003)提供了伴随燕山造山运动确实有大量对流地幔物质输入的证据。华北地区火山岩组合从  $J_1$  的玄武岩和玄武安山岩为主  $\rightarrow J_2$  以安山岩占优势  $\rightarrow J_3$  以粗面岩和流纹岩为主  $\rightarrow K_1$  以玄武安山岩-安山岩为主(刘厚祥, 1995, 邓晋福等, 1996a), 也表明由从地幔中分出的玄武质岩浆注入大陆开始、由下地壳向

中上地壳发展直至形成以花岗质陆壳端员为主的过程。在汉诺坝玄武岩中发现麻粒岩相斜长辉石岩和榴辉岩相石榴辉石岩(樊祺诚等, 1998), 其中麻粒岩相斜长辉石岩年龄为 120~140 Ma, 表明 J-K 时期有新形成的下地壳麻粒岩相岩石, 榴辉岩相岩石则表明曾有山根存在, 这与燕山期加厚陆壳的模型吻合。以上事实说明燕山-太行造山带型陆壳应该比鄂尔多斯陆壳更酸性。陆壳波速结构中的低速体往往是由岩浆熔体引起的。燕山地区的燕山期长园花岗闪长质片麻岩、八达岭岩基岩石化学分析的  $\text{SiO}_2$  含量为 64.72%~66.13%, 根据方程(1)计算得到的  $V_p$  值为 6.3~6.4 km/s; 太行地区晚侏罗世洪山超单元平均  $\text{SiO}_2$  含量为 58% (罗照华等, 1999), 对应的  $V_p$  值为 6.48 km/s, 两个地区由成分反演的波速与下地壳壳幔过渡带(32~40 km)的低速体  $V_p$  (6.4 km/s) 基本一致。燕山地区云蒙山花岗岩体为高硅( $\text{SiO}_2$  含量达 71.87%)、富钾( $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ )的酸性

① 肖庆辉, 李晓波, 白星碧等译. 1993. 美国大陆动力学研究的国家计划.



岩体, 计算的  $V_p$  值为 6.13 km/s, 与上地壳下部低速体 ( $V_p$  为 6.1 km/s) 大致相当。因此推测, 燕山-太行地区上地壳下部 (16~20 km) 和下地壳壳幔过渡带 (32~40 km) 的低速体分别相当于花岗岩与花岗闪长岩源区。石城辉长闪长岩体的平均  $\text{SiO}_2$  含量为 53.52%, 计算得到  $V_p$  值为 6.81 km/s, 与壳底侵的玄武岩高速层相当, 可能代表了从地幔中分出的新生陆壳。

燕山-太行山的陆壳平均波速 ( $V_p = 6.2 \sim 6.3$  km/s) 低于鄂尔多斯 ( $V_p = 6.3$  km/s), 对应的  $\text{SiO}_2$  含量 67%~70% 显示陆壳是花岗质的, 说明在 J-K 时期, 由于地幔物质和热的注入, 使华北中东部原有的太古宙-早元古代 TTG 陆壳遭受强烈改变, 形成新的花岗质陆壳 (图 5)。

### 2.2.2 上地幔岩石圈组成

造山带岩石圈根往往是不稳定的岩石圈根 (邓晋福等, 2004), 其原因是造山带过程中对流地幔的物质和热大量输入, 被加厚的陆壳底部会发生熔融, 熔出花岗岩岩浆后残余的是密度很大的偏基性的榴辉岩, 它的堆积将带动残留的岩石圈地幔一起拆沉发生大陆去根作用, 注入大陆的对流地幔在分出玄武岩岩浆后冷却将形成新的造山带岩石圈地幔。

近年相继在华北邯邢地区 (许文良等, 1991, 1993)、鲁西中生代金岭岩体 (许文良等, 2003)、山东莱芜铁铜沟岩体 (陈立辉等, 2003) 的闪长质岩石中发现了幔源包体, 这些包体都形成于壳幔过渡带附近, 因此可能代表燕山期形成的新的岩石圈地幔。以华北邯邢地区发现的幔源包体为例, 常见到幔源玄武岩岩浆底侵在壳底形成的属于岩浆房内结晶作用产物的超镁铁质堆晶岩, 其中辉长岩类为近似的原生岩浆, 基性程度最高的  $\text{SiO}_2$  平均含量约 44%。根据幔源玄武岩岩浆  $\text{SiO}_2$  含量与起源深度之间的线性关系估算, 岩浆起源压力约 2.6 GPa, 深度约 85 km (邓晋福等, 1996a)。地幔橄榄岩包体岩石化学成分变化范围相对较小, 在  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  图上向模拟地幔岩偏移 (图 4), 说明亏损程度较低 (相对于鄂尔多斯岩石圈地幔)。根据许文良等 (1993) 的统计数据, 邯邢地区幔源包体中镁橄榄石 Fo 含量平均值 91.1 (范围 88.5~93.1) 低于代表鄂尔多斯岩石圈地幔组成的古生代金伯利岩和金刚石中地幔橄榄岩捕虏体的橄榄石的 92.5 (范围 91.5~94.5) 与南非 Kappvaal 典型克拉通的 Fo (91.5~93.5) (Boyd, 1989), 也表明其亏损程度低于鄂尔多斯岩石圈地

幔, 因此其岩石圈地幔组成可能含有较多的二辉橄榄岩, 总体组成可能是方辉橄榄岩-二辉橄榄岩。

### 2.3 华北平原裂谷型岩石圈

华北东部平原在喜山期处于大陆伸展构造发育的环境, 曾发生典型的大陆裂谷火山作用, 以古近纪和新近纪-第四纪两个旋回的幔源玄武岩浆喷溢为特征 (图 6)。从燕山期侵入体分布来看 (图 2), 不难理解华北东部平原喜山期的裂谷作用是在燕山造山带型岩石圈基础上进行的, 燕山-太行造山带型岩石圈可作为认识华北平原裂谷型岩石圈的重要参照。汉诺坝新生代玄武岩的喷发可能与华北地台北缘的局部地质条件相关, 其岩石圈类型仍然可以归属为裂谷型岩石圈。



图 6 华北东部平原新生代玄武岩分布图

Fig. 6 Distribution of Cenozoic basalts in eastern part of North China plain

华北平原的总体陆壳厚度较薄 (30~34 km), 显示了纵向减薄、横向伸展、低速的新生地壳结构特点 (嘉世旭等, 2001)。在裂陷盆地拗陷区广泛含水、微裂隙和微孔隙发育、地温高等可极大地影响地震波速, 而在隆起区的  $V_p$  波速结构大体可代表去除这些影响之后的速度结构, 如鲁西, 由新生代玄武岩推导的岩石圈厚度约 70~80 km (图 7), 不同于巨厚的克拉通型和造山带型岩石圈 (邓晋福等, 1996a)。中生代末、古近纪初裂谷发育阶段古热流达  $80 \text{ mW/m}^2$ , 目前所观察到的约  $63 \text{ mW/m}^2$  (汪集等, 1988), 应随大陆裂谷发育岩石圈热状态呈逐步衰减态势。

### 2.3.1 陆壳组成

大量新生代玄武岩浆喷溢是这一时期有对流地幔物质注入的标志。华北平原地区缺乏喜山期侵入体表明无陆壳岩石的熔融作用,因此,华北裂谷型陆壳结构是燕山-太行造山带型陆壳基础上新生陆壳(玄武岩)的直接添加。反映在平均波速上,相对于燕山-太行造山带(陆壳平均  $V_p = 6.2 \sim 6.3 \text{ km/s}$ ),鲁西隆起的平均  $V_p$  增加(陆壳平均  $V_p = 6.3 \text{ km/s}$ ),即陆壳平均组成相当于花岗闪长质,因此,如果把燕山-太行造山带作为燕山期参照物的话,则鲁西隆起在燕山期的平均组成为花岗质,在喜山期时平均组成变为花岗闪长质,亦即陆壳被“基性化”了,这是大陆裂谷作用形成过程中对流地幔注入大陆的结果。

相关研究(吴宗絮等,1994)表明,冀东地区与大

同一带太古宙麻粒岩形成的最大压力可达  $1.2 \sim 1.4 \text{ GPa}$ ,表明华北大陆太古宙陆壳厚约  $45 \sim 50 \text{ km}$ ,类似现今的鄂尔多斯地块的陆壳厚度。但是,现今河北平原陆壳的平均厚度只有  $35 \text{ km}$ ,表明陆壳被强烈减薄。中生代时期是挤压造山时期,陆壳不可能减薄,因此,新生代大陆裂谷作用发育是陆壳被强烈拉伸而减薄的时期。前面提到,燕山期挤压造山带加厚的主要是下地壳,以鲁西隆起为例,现今的下地壳厚只有约  $12 \text{ km}$ ,因此,新生代被强烈减薄的也主要是下地壳。所以,华北平原裂谷型岩石圈经历了复杂的演化过程,中生代造山作用形成类似燕山-太行的造山带型岩石圈,伴随花岗岩的大量侵入地壳成分被酸性化;新生代以来强烈的玄武岩喷发,表明再一次对流地幔的注入,使 J-K 时期形成的造山带岩石圈遭受强烈改造,又使地壳成分被基性化(图 7)。



图 7 华北平原裂谷型岩石圈岩石学结构和化学结构

Fig. 7 Petrological and petrochemical structure of rift type lithosphere in North China plain

1—片麻岩; 2—花岗质岩石; 3—花岗闪长质岩石; 4—玄武质岩石; 5—麻粒岩、榴辉岩; 6—二辉橄榄岩  
1—gneiss; 2—granitic rock; 3—granodioritic rock; 4—basaltic rock; 5—granulite, eclogite; 6—lherzolite

### 2.3.2 上地幔岩石圈组成

新生代玄武岩中的橄榄岩包体是反映华北平原裂谷型岩石圈地幔组成的重要依据。在古近纪和新近纪-第四纪 2 个旋回的玄武岩中,前者以拉斑玄武岩为主,后者以碱性玄武岩为主并携带了大量的橄榄岩包体,包体绝大多数为二辉橄榄岩,少量为方辉橄榄岩,说明新生代的岩石圈地幔亏损程度较低。

地幔橄榄岩包体的岩石化学成分也具有较大的变化范围(表 3,图 4),主成分平均值  $\text{MgO}$  平均含量(38.60%) 和  $\text{Mg}^\#$  平均值(0.89) 与模拟地幔成分( $\text{MgO} = 37.67\%$ ,  $\text{Mg}^\# = 0.89$ ) (Ringwood, 1975) 基本一致,但  $\text{MgO}$  最大值(43.27%) 及在  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  图上较多的点靠近  $\text{MgO}$  端员一侧(图 4) 所显

示的亏损特征,与岩石组合中有少量方辉橄榄岩一致; $\text{Fo}$  平均值 89.5(80.2~92.7) 远低于南非 Kappvaal 克拉通型的  $\text{Fo}$ (91.5~93.5) (Boyd, 1989),具有类似“大洋”岩石圈地幔特征(Griffin *et al.*, 1998)。所以,华北平原岩石圈地幔是三类岩石圈中亏损程度最低的,岩石组成应该以二辉橄榄岩为主(图 7)。

## 3 华北岩石圈壳幔岩石学结构的地质含义及其大陆动力学意义

### 3.1 华北岩石圈壳幔岩石学结构的地质含义

地球物理方法是对长期地质演化过程中形成的

多种地质作用综合结果的“快照”,而现今的地球物理探测的结构并不一定代表地质历史时期或地质作用发生时的结构,所以,如何正确地使用和合理地解释地球物理资料是进一步开展大陆动力学研究的关键。由各种地球物理学方法获得的一个地区的现今地壳-上地幔结构,主要由最后和最强烈的一次岩浆-构造事件所决定,因此,对地球物理资料的地质解释应该结合地质历史-岩浆-构造史以及岩浆活动性质等进行综合约束,才可能比较合理地了解其地质含义,深入探讨岩石圈的演化。

以鄂尔多斯黄土高原主体的克拉通块体为代表的克拉通型岩石圈,与全球大克拉通一样具有一个浮力大和强度高的大陆根,陆壳平均波速  $V_p = 6.3 \text{ km/s}$ ,  $\text{SiO}_2$  含量为 67%,陆壳主体成分由 TTG 构成;地幔岩石圈主要由强亏损的方辉橄榄岩构成,它于晚太古代-古元古代最终形成以后,一直保持至今。它的华北地台“活化”后残留的属性,使其岩石圈的壳幔岩石学结构可以作为华北乃至中朝地台与克拉通相关的研究中的一个参照。

以燕山、太行山等为代表的造山型岩石圈,是在燕山期华北克拉通“活化”造山过程中形成的,强烈的以花岗质为主的壳幔混合岩浆侵入是其标志。大量对流地幔的物质与热注入,使原来的 TTG 陆壳组分熔融上侵,形成以花岗质为主的新的陆壳(陆壳平均波速  $V_p = 6.2 \sim 6.3 \text{ km/s}$ ,  $\text{SiO}_2$  含量 67% ~ 70%),相对于鄂尔多斯克拉通型 TTG 陆壳(平均波速  $V_p = 6.3 \text{ km/s}$ ,  $\text{SiO}_2$  含量 67%),陆壳成分被“酸性化”。它们是从地幔中分出的新生物质(辉长岩和闪长质)与太古宙-古元古代陆壳再熔融产生的再生花岗质岩浆混合的产物。原来的方辉橄榄岩为主的克拉通型岩石圈地幔被主要由方辉橄榄岩-二辉橄榄岩构成的燕山期岩石圈地幔所代替。也就是说, J-K 时期对流地幔物质和热输入使华北地台原来的陆壳和岩石圈地幔都受到强烈的改造。而从火成岩活动时空上看,燕山期岩浆活动遍及华北的中东部地区,而中部地区喜山期总体上没有火成岩侵入和喷出活动,即没有地幔物质的注入,所以,该区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。但对于地壳厚度和岩石圈地幔的厚度来说,因为经历了新生代的伸展减薄,所以现今地球物理探测的厚度不能代表燕山期造山时的地壳厚度和岩石圈地幔厚度。

属裂谷盆地型岩石圈的华北平原陆壳在经过燕

山期的“酸性化”改造,喜山期对流地幔物质和热输入又对其有重大改造,但改造的对象与燕山期有所不同:对陆壳而言,在拉张裂谷体制下大量喜山期玄武岩喷发,新生陆壳(玄武岩)直接添加于陆壳,使陆壳在喜山期又被“基性化”,缺乏同时期的侵入岩说明没有陆壳熔融作用发生,现在地球物理表现出较高的陆壳平均  $V_p$  值(相对于燕山-太行造山带)和较低的  $\text{SiO}_2$  含量(平均组成变为花岗闪长质,  $\text{SiO}_2$  含量 67%);对岩石圈地幔而言则有强烈改造,燕山期形成的方辉橄榄岩-二辉橄榄岩被弱亏损的二辉橄榄岩所代替。现今河北平原陆壳的平均厚度只有 30~34 km,地壳和岩石圈地幔厚度都是华北地区最薄的。中生代时期是挤压造山时期,陆壳不可能减薄,这表明华北平原陆壳和岩石圈地幔厚度是在新生代被强烈减薄的,所以,现今地球物理探测的岩石圈的地幔和陆壳的物质和结构是喜山期形成的。

### 3.2 岩石圈单元划分讨论

对于中国大陆内的构造单元或成矿单元,依据地表浅部的地、物、化、遥、矿产等进行不同尺度的单元划分、成矿预测等已有非常成熟的准则和比较一致的认识,但对于深部岩石圈单元如何进行划分?按什么标准划分?尚在争议之中。

华北地区三类岩石圈(克拉通型、造山型和裂谷型岩石圈)在空间上分别位于华北地台的西部、中部和东部。对比三类岩石圈之间的陆壳结构、成分、岩石圈地幔组成以及陆壳厚度、岩石圈地幔厚度等可以发现,它们之间都表现为不连续,而且这些不连续是岩石圈尺度的(表 1)。从华北地区岩石圈形成和演化来看,太古宙-晚元古代形成的华北克拉通是冷的大陆根,大陆根的特殊物理性质(密度小、厚度大、冷和强度大)使它长期稳定漂浮在软流圈上面(华北地台太古宙以来至侏罗纪前,鄂尔多斯至今)。在燕山期形成的造山带岩石圈根是密度大、温度低(冷)和保留时间短的不稳定岩石圈根,克拉通岩石圈根的长期稳定性和造山带岩石圈根的活动性,它们之间必定是岩石圈构造薄弱带或岩石圈不连续带。裂谷型岩石圈与地幔热柱上升、岩石圈伸展机制对应,与其西侧的造山带岩石圈之间也是以岩石圈不连续连接。不同岩石圈类型对应的动力学机制及其效应表明,不同岩石圈类型之间的连接带必定是岩石圈不连续带。因此,岩石圈不连续或许是可供选择的作为划分岩石圈类型、岩石圈单元的依据。

### 3.3 大陆动力学意义

华北地区三类岩石圈的形成及壳幔岩石学结构演化说明,大陆动力学演化的动力来自地球内部岩石圈/软流圈系统的变迁,对流地幔的物质和热输入是形成不同类型岩石圈的关键,不同性质的火成岩及其组合是其重要标志,也是深部过程在浅部响应的重要记录。因此,识别岩石圈的类型及其壳幔岩石学结构,对于大陆动力学研究具有重要意义。

**致谢:**在本文酝酿、成文过程中,得到袁学诚研究员的指导,赵志丹博士给予了许多的帮助;本文经过多次修改,地球物理与岩石学审稿人的意见迥然不同,可见地质与地球物理结合之艰难,审稿人对本文的评价、鼓励和批评对笔者今后的研究帮助很大,在此一并表示衷心的感谢!

### Reference

- Anderson D L. 1981. Hotspots, basalts and evolution of the mantle [J]. *Science*, 213: 82~ 89.
- Bird P. 1979. Continental delamination and the Colorado plateau [J]. *JGR*, 84(B13): 7561~ 7571.
- Boyd F R. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96: 15~ 26.
- Cheng Yuqi. 1994. *Generality of Chinese Areal Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chi Jishang, Lu Fengxiang, Liu Yongshun, *et al.* 1996. *The Study of Formation Conditions of Primary Diamond Deposits in China* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Condie K C. 1982. *Plate Tectonics and Crustal Evolution* [M]. New York: Pergamon, 1~ 310.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996a. Continental Root-Plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu and Zhao Changhe. 1996b. Tectonics of North China platform and its relations to the kimberlites [A]. Chi Jishang and Lu Fengxiang. *Kimberlites and Paleozoic Lithospheric Mantle in the North China Platform* [C]. Beijing: Sci. Press, 7~ 15 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Wu Zongxu, Zhao Guochun, *et al.* 1999. Precambrian granitic rocks, continental crustal evolution and craton formation of the North China Platform [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 190~ 198 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo D J. 1981. Nd isotopic studies: some new perspectives on Earth structure and evolution [J]. *EOS*, 162: 137~ 140.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin and Li Huiming. 1998. Zircon chronology and REEs geochemistry of granulite from Hannuoba [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133~ 137 (in Chinese).
- Gao S, Zhang B R and Zhao Z D. 1996. Radioactivity and thermal state of the lithosphere in the Qinling and adjacent margins of North China and Yangtze Cratons: Constraints on interpretation of geophysical profiling [J]. *Continental Dynamics*, 1: 56~ 63.
- Griffin W L, Zhang A D, O' Reilly S Y, *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton [A]. Flower M F, Chung S L, Lo C H, *et al.* *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* [C]. American Geophysical Union, *Geodynamics series* 27: 107~ 126.
- Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2003. Mesozoic granitoids from North China block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231~ 256 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: evidence from major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 144: 241~ 253.
- Jia Shixu, Zhang Xiankang and Fang Shengming. 2001. Research on the crustal structure and evolution of different blocks in North China rift depression basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 259~ 266 (in Chinese with English abstract).
- Leshner C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing [J]. *Nature*, 344: 235~ 237.
- Li Junjian, Shen Baofeng, Mao Debao, *et al.* 1996. The Sm-Nd isochron age of meta morphic mafic volcanic rocks in Qingyuan, Liaoning and its geological significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(3): 313~ 316 (in Chinese).
- Liu Houxiang. 1995. *Mesozoic lava and tectonic setting in Yanshan area* [D]. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Zhang Hongfu, Sun Jinggui, *et al.* 2003. The study of C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of mantle-derived magma in Shandong Province [J]. *Science in China (Ser. D)*, 33(10): 981~ 987 (in Chinese).
- Luo Zhaohua, Deng Jinfu and Han Xiuqing. 1999. On Characteristics of Magmatic Activities and Orogenic Process of Taihangshan Intraplate Orogen [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Ma Xingyuan, Liu Changquan and Liu Guodong. 1991. The geoscience section from Jiangsu Xiangshui to inner Mongolia Mandala [J]. *Acta Geologica Sinica*, 56(3): 427~ 447 (in Chinese with English abstract).
- Mao Cunxiao, Zhu Naijuan, Zhu Bingquan, *et al.* 1989. Determining techniques for Sm-Nd isotopic systematics and their application [J]. *Geochemica*, 1: 36~ 42 (in Chinese).
- Ringwood A E. 1975. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle* [M], McGraw-Hill.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the Continental crust: A lower crustal Perspective [J]. *Rev. Geophys*, 33: 267~ 309.

- Shen Qihan. 1998. Geological characteristics and geological setting of banded itabirite on the Early Precambrian in North China Platform [A]. Sheng Qihan and Cheng Yuqi. Contributions on the Early Precambrian Geology in North China Craton [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 31 (in Chinese).
- Wang Hongzhen and Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China [J]. Episodes, 18(1~ 2): 6~ 16.
- Wang Jiyang and Huang Shaopeng. 1988. Compilation of heat flow data in the China continental area [J]. Scientia Geologica Sinica, 2: 196~ 204 (in Chinese).
- Wang Ruzheng. 1997. A primary discussion on Rb/Sr and Sm/Nd isotopic systems of basaltic rocks of Hutuo Group of early Proterozoic Shanxi [J]. Process in Precambrian Research, 20(1): 35~ 43 (in Chinese).
- Wu Zongxu, Deng Jinfu, Zhao Hailing, et al. 1994. Crust-mantle petrological structure and evolution of North China continent [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(2): 106 ~ 115 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J. 1973. Experimental petrology and global tectonics — A review [J]. Tectonophysics, 17: 189~ 209.
- Zhou Xinhua and Sun Min. 2003. Major transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath the Sino-Korean Craton in Late Mesozoic: A possible global link [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(18s): 584.
- Xu Wenliang, Chi Xiaoguo, Yuan Chao, et al. 1993. Mesozoic Dioritic Rocks and Deep-seated Inclusions in Central North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xu Wenliang and Lin Jingqian. 1991. The discovery and study of mantle-derived in the Handan-Xingtai area, Hebei [J]. Acta Geologica Sinica, 1: 33~ 41 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Dongyuan, Gao Shan, et al. 2003. Discovery and its implication of dunite and gabbro enclaves from diorite intrusion of Mesozoic Jinling in Luxi area [J]. Chinese Science Bulletin, 48(8): 863~ 868 (in Chinese).
- Xu Y G, Fan W M and Lin G. 1995. Lithosphere-asthenosphere interactions: a comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai Area [J]. Geotectonica et Metallogenia, 19: 1~ 13.
- Yan Mingcai and Chi Qinghua. 1997. The Chemical Composition of Crust and Crustal Rocks in Eastern China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang Zongqing, Wu Jiashan and Ye Xiaojiang. 1991. Archean metamorphic rocks from the lower Fuping Group, in the M T. Taihang region, North China: REE Geochemistry, Rb/Sr and Sm/Nd ages and implication [J]. Geochemica, 2: 118~ 127 (in Chinese).
- Zhang Zongqing. 1998. On the continental growth periods of North China craton based on Sm/Nd isotopic characteristics of early Precambrian metamorphic rocks [A]. Shen Qihan and Cheng Yuqi. Contributions on the Early Precambrian Geology in North China Craton [C]. Beijing: Geological Publishing House, 133 ~ 136 (in Chinese).
- Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1999. Petrologic characteristics of kimberliteborne mantle xenoliths from the Shandong and Liaoning Peninsula: Paleozoic lithosphere mantle and its heterogeneity [J]. Acta Petrol Sin., 15(1): 65~ 74 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Yang Jinhui and Zhang Lianchang. 2003. Metallogensis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic [J]. Science in China (Ser. D), 46(Supplement): 14~ 25.

### 附中文参考文献

- 陈立辉, 周新华. 2003. 鲁西中生代闪长岩中的深源超镁铁质岩捕虏体及其富硅交代特征 [J]. 中国科学(D辑), 33(8): 734~ 744
- 程裕洪. 1994. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社.
- 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 等. 1996. 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.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996a. 中国大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福, 赵崇贺. 1996b. 华北地台的构造格局及其与金伯利岩的关系 [A]. 池际尚, 路凤香. 华北地台的金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征 [C]. 北京: 科学出版社, 7~ 15.
- 邓晋福, 吴宗絮, 邱瑞照, 等. 2004. 中国大陆两类岩石圈根及其动力学效应 [A]. 庆贺藤吉文院士从事地球物理工作 50 周年文集 [C]. 北京: 科学出版社.
- 邓晋福, 吴宗絮, 赵国春, 等. 1999. 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, 15(2): 190~ 198.
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学 [J]. 科学通报, 43(2): 133~ 137
- 洪大卫, 王涛, 童英, 等. 2003. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程 [J]. 地学前缘, 10(3): 231~ 256.
- 嘉世旭, 张先康, 方盛明. 2001. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究 [J]. 地学前缘, 8(2): 259~ 266.
- 李俊建, 沈保丰, 毛德宝, 等. 1996. 辽宁清原变质镁铁质火山岩 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义 [J]. 地球学报, 17(3): 313~ 316
- 李曙光, Hart S R, 郭安林, 等. 1987. 河南中部登封群全岩 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义 [J]. 科学通报, 32(21): 1728~ 1731.
- 刘厚祥. 1995. 燕山地区中生代火山岩及其构造背景 [D]. 北京: 中国地质大学.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究 [J]. 中国科学(D辑), 33(10): 981~ 987.
- 罗照华, 邓晋福, 韩秀卿. 1999. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演 [M]. 北京: 地质出版社.
- 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 1991. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面

- [J]. 地质学报, 56(3): 427~ 447.
- 毛存孝, 朱乃娟, 朱炳泉, 等. 1989. Sm- Nd 同位素体系测定技术与应用讨论[J]. 地球化学, 1: 36~ 42
- 沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[A]. 沈其韩, 程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1~ 31.
- 涂湘林. 1991. 内蒙、张宣地区麻粒岩相岩石同位素地质年代学和同位素体系特征的研究[J]. 地质地球化学, 19(5): 1~ 36
- 汪集, 黄少鹏. 1988. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 2: 196~ 204.
- 王汝铮. 1997. 早元古代溇沱群玄武岩 Rb- Sr Sm- Nd 同位素体系初论[J]. 前寒武纪研究进展, 20(1): 35~ 43
- 吴宗絮, 邓晋福, 赵海玲, 等. 1994. 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, 13(2): 106~ 115.
- 许文良, 迟效国, 袁超, 等. 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源包体[M]. 北京: 地质出版社.
- 许文良, 林景任. 1991. 河北邯邢地区角闪闪长岩中地幔纯橄岩包体的发现与研究[J]. 地质学报, 1: 33~ 41.
- 许文良, 王冬艳, 高山, 等. 2003. 鲁西中生代金岭闪长岩中纯橄岩和辉石岩包体的发现及其意义[J]. 科学通报, 48(8): 863~ 868.
- 郑明才, 迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社.
- 原振雷, 张荫树, 强立志, 等. 1992. 华北地台西南缘太古宙火山岩地球化学特征及构造环境初探[J]. 河南地质情报, 74(1): 9~ 15.
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 等. 2002. 山东胶莱盆地北缘金矿 Ar- Ar 法和 Rb- Sr 等时线年龄与成矿时代[M]. 中国科学(D 辑), 32(9): 727~ 734.
- 张宗清, 伍家善, 叶笑江. 1991. 阜平群下部太古代变质岩石的 REE- Rb- Sr 和 Sm- Nd 年龄及其意义[J]. 地球化学, 2: 118~ 127
- 张宗清. 1998. 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]. 沈其韩, 程裕淇. 华北地区早前寒武纪地质研究论文集[C]. 北京: 地质出版社, 133~ 136.
- 赵大升, 郑学正. 1987. 华北地区新生代玄武质火山岩及超镁铁岩包体[A]. 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体[C]. 北京: 地震出版社: 133~ 267.
- 郑建平, 路凤香. 1999. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. 岩石学报, 15(1): 65~ 74.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 周新华, 杨进辉, 张连昌. 2002. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J]. 中国科学(D 辑), 32(增刊): 11~ 20.

## 《岩石矿物学杂志》征稿启事

《岩石矿物学杂志》是由中国地质学会岩石学专业委员会、矿物学专业委员会、中国地质科学院地质研究所联合主办的学术性期刊, 属地质学类全国中文核心期刊, 国内外公开发行人。主要报道内容包括: 岩石学领域的专题性或区域性岩浆岩、变质岩、沉积岩的岩类学、岩理学、实验岩石学、宇宙岩石学、工艺岩石学等方面的基础理论和应用研究成果; 矿物学领域的描述矿物学、理论矿物学、材料矿物学、应用矿物学、宝玉石矿物学、环境矿物学、矿物药学、矿相学、新矿物及矿物中包裹体等方面的研究成果; 与岩石学、矿物学有关的边缘交叉学科中的构造岩石学、岩石大地构造学、岩石地球化学、同位素年代学、同位素地球化学、岩石成矿学、环境地质学、煤岩学、储层地质学等方面的创造性和综合性研究成果; 岩石和矿物鉴定的新方法、新技术、新仪器; 与岩石学和矿物学有关的最新地质科技信息、研究动态、研究简报、问题讨论、书刊简介、会议简讯等。现设有专题研究、问题讨论、综述与进展、方法与应用、环境矿物学、宝玉石矿物学、综合资料、简讯等栏目。为进一步提高本刊的学术质量, 本刊将对优秀来稿予以优先刊发, 并适当减免版面费。具体来稿要求详见近期本刊稿约。

热忱欢迎专业人士踊跃投稿!