中国东部地壳的结构和组成*

高 山 骆庭川 张本仁 张宏飞 韩吟文 赵志丹
(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

Hartmut Kern
(Mineraqlogisch-Petrographisches Institut, Universität Kiel, Olshausenstrasse 40, 24098 Kiel, Germany)

摘要 根据已发表的 12 条地学大断面和 6 条折射地震剖面资料, 获得了中国除塔里木以外 9 个大的构造单元的地壳结构. 在中国东部华北克拉通、秦岭造山带和扬子克拉通 950 000 km^2 范围内采集了 11 451 件岩石样品. 由这些样品组合而成了 905 件组合样品. 对这些组合样品分析了 63 种元素和组分的含量. 根据分析结果, 结合所建立的各构造单元地壳结构、对区域典型深部样品高温高压下岩石物理性质的实验研究以及对出露地壳剖面和下地壳包体的综合研究成果, 获得了中国东部地壳各结构层元素丰度. 结果表明, 除塔里木和秦岭造山带外, 中国各构造单元地壳结构可分为上地壳、中地壳、下地壳上部和下地壳下部 4 层. 其中, 下地壳和地壳整体 V_p 波速较全球大陆地壳相应平均值低 0.2~ 0.5 km/s. 中国东部下地壳整体平均地震波速与中性麻粒岩一致, 其 SiO_2 含量约为 58%. 这种中性下地壳成分特征与目前普遍认为的基性下地壳模型明显不同. 中国东部地壳整体成分亦比现有大陆地壳成分估值的演化程度高, 其特征为 SiO_2= 64%, 具明显负 Eu 异常(Eu/Eu* = 0.80), 相对亏损 Sr 和过渡金属元素, La/Nd(3.0) 比值近于岛孤岩浆岩, 计算出的 μ 值($^{238}U/^{204}Pb$) 约为 5, 以下相容性相近的元素对比值与原始地幔的比值相同或接近: Zr/Hf= 37, Nb/Ta= 17.5. Ba/Th= 87. K/Pb= 0.12×10^4. Rb/Cs= 25. Ba/Rb= 8.94. Sn/Sm= 0.31. Se/Cd= 1.64, La/As= 10.3, Ce/Sb= 271, Pb/Bi= 57, Rb/T1= 177, Er/Ag= 52, Cu/Au= 3.2×10^4, Sm/Mo= 7.5, Nd/W= 40, C1/Li= 10.8, F/Nd= 21.9 和 La/B= 1.8.

关键词 大陆地壳结构 大陆地壳组成 大陆地壳化学成分 中国东部

大陆地壳化学成分及其时空变化是认识地壳形成、演化以及定量研究地球动力学过程的地球化学前提. 自地球化学学科诞生以来, 这一直是地球化学家们努力解决的基本地球化学问题之一, 如 Clarke 和 Washington 以及 Goldschmidt 的开创性工作. 然而这一问题迄今并未得到很好解决. 研究的难点和存在的问题主要为: (1) 如何确定通常难以直接观测的深部地壳, 特别是下地壳的组成, 这是需要解决的首要难题; (2) 由于缺少大面积区域岩石地球化学

1998-07-15 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49625305, 49573183, 49673184, 49794043)、国家教委基金、原地质矿产部基金(批准号: 8505014)、原地质矿产部壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室基金以及德国洪堡基金项目联合资助

研究, 现有大陆地壳成分模型基本未考虑地壳化学组成的横向区域性变化. 80 年代以来国际上不同学者[1~4]提出的地壳化学成分模型中, 上地壳成分均主要采用 Shaw 等对加拿大前寒武纪地盾地表成分的研究结果, 而未包括造山带这一大陆生长主要部位; (3) 缺乏利用统一分析方法获得的地壳元素丰度值. 现有的各类地壳成分估值中所依据的岩石元素丰度数据来自不同研究者采用质量各不相同的方法分析获得, 从而使得分析数据本身缺乏内部一致性.

下地壳是壳-幔交换和地壳生长的关键部位, 同时也是岩石圈研究最薄弱的领域. 出露地表的大陆地壳剖面和产于火山岩中的麻粒岩包体(应来自下地壳) 为下地壳提供了直接样品. 然而, 这两类样品时空分布十分有限, 难以用来研究区域大尺度的下地壳组成. 地球物理测深(特别是可提供纵波 V_p 和横波 V_s 速度的折射地震法) 是目前研究区域大尺度下地壳组成的主要手段. 但岩石的物理性质取决于多种因素(如矿物和化学组成、温度、压力、各向异性以及流体存在与否), 这就决定了地球物理测深资料的地质解释是非唯一的. 深部岩石物理性质的实验研究是制约地球物理测深成果解释的重要途径. 榴辉岩具有与上地幔岩石相同的 V_p, 从而产生了地震确定的 Moho 面是否与岩石学意义上的壳-幔边界吻合的问题. 另一方面, 幔源岩浆底侵作用(underplating) 可导致壳-幔边界在物理和化学性质上呈过渡状态.

上述不确定性和复杂性充分说明了区域地壳成分研究的重要性, 同时表明任何合理的大陆地壳成分模型必须建立在地球化学、地球物理和地质学综合研究基础之上.

本文总结了作者对我国东部地壳结构和化学组成长达 12 年的研究成果[5~10], 在此期间我们分别对秦岭造山带、华北和扬子克拉通进行了两轮大规模的单样和组合样品系统元素含量分析. 其中以单样分析为基础获得的秦岭地区地壳化学成分和以组合样品分析为基础获得的中国东部主要构造单元地壳各结构层化学成分已另文发表[5,6]. 本文重点讨论中国东部作为一个整体的地壳结构以及根据组合样获得的 63 种元素或组分的组成特征.

1　地壳结构

中国大陆地壳地球物理测深和地壳结构研究已取得丰硕成果. 现有成果已以各种展示二维变化的剖面图(如地学断面图) 和平面图(如地球物理图集) 形式发表[11]. 然而对于大尺度地壳组成来说, 最重要的是了解各构造单元作为一个整体的一级地球物理特征. 为此, 我们根据我国已发表的 12 条地学大断面和 6 条折射地震剖面资料[12~28](图 1), 计算了除塔里木以外我国 9 个大的构造单元以及代表地球化学采样区域的中国中东部、中国东部、中国西部和中国大陆整体的平均地壳结构(图 2). 为了消除温度、压力对地震波速度的影响以及可与新近提出的全球大陆地壳结构模型[3]对比, 图 2 中所有速度值均为观测值校正至 600 MPa 和室温下的结果. 校正方法同 Rudnick 等人[3], 即采用地壳岩石的常见压力系数(2×10^{-4} km•s^{-1}•MPa^{-1}) 和温度系数(-4×10^{-4} km•s^{-1}•℃$^{-1}$)、各区域的平均地表热流值以及 Chapman 等人[29]计算出的不同地表热流值对应的地温曲线. 各构造单元平均地壳结构系根据穿过该单元的各地学断面或地震剖面的长度加权获得. 由图 2 可看出中国大陆地壳结构具有以下主要特征:

(1) 除秦岭造山带外, 各构造单元地壳结构由上地壳、中地壳、下地壳上部和下地壳下部组成. 将下地壳细分为上、下两层是因为它们的 V_p 值所对应的岩石组成明显不同.

(2) 中国中东部和中国东部平均地壳厚度为 37~ 39 km, 与 Rudnick 和 Fountain[3]给出的全

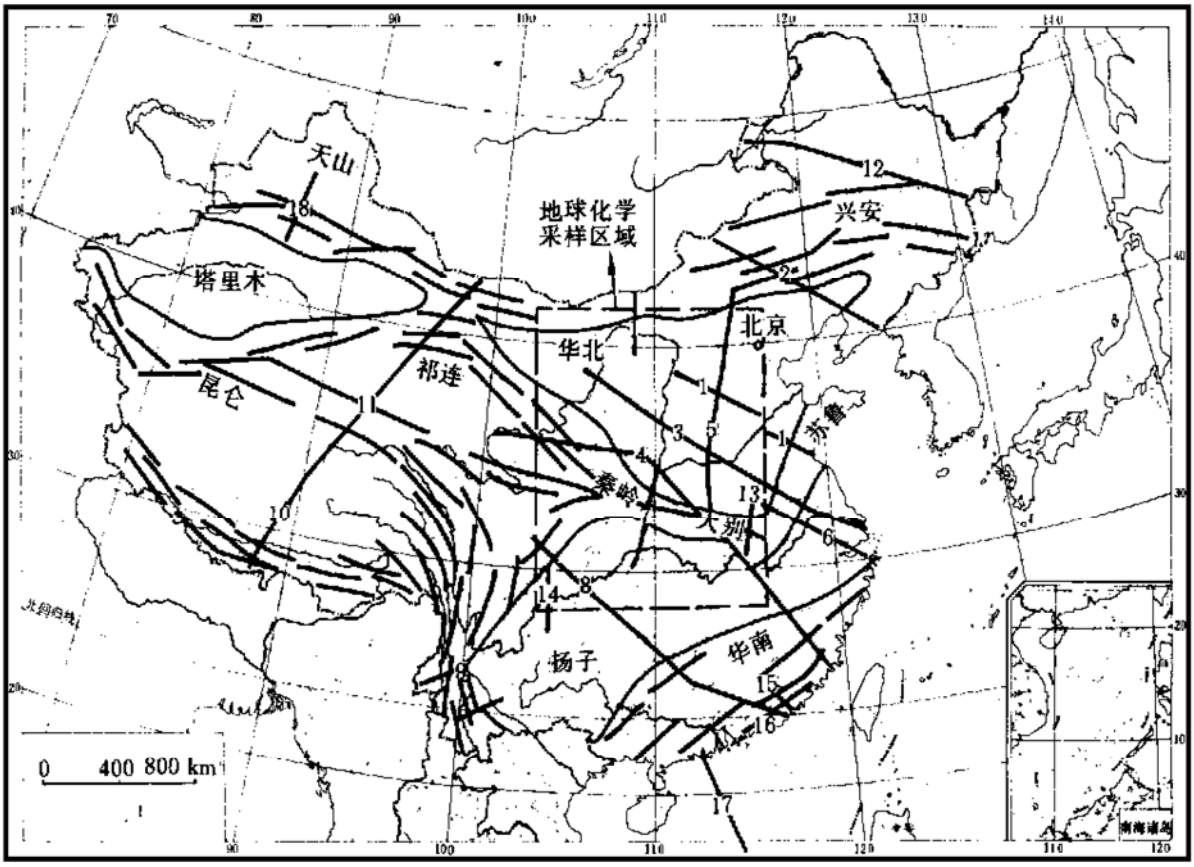


图 1 本研究所依据的地学断面和折射地震测深剖面以及地球化学采样区域分布图

断线区表示造山带区; 剖面 1~ 12 为地学断面, 13~ 18 为折射地震剖面. 构造单元名称参见图 2

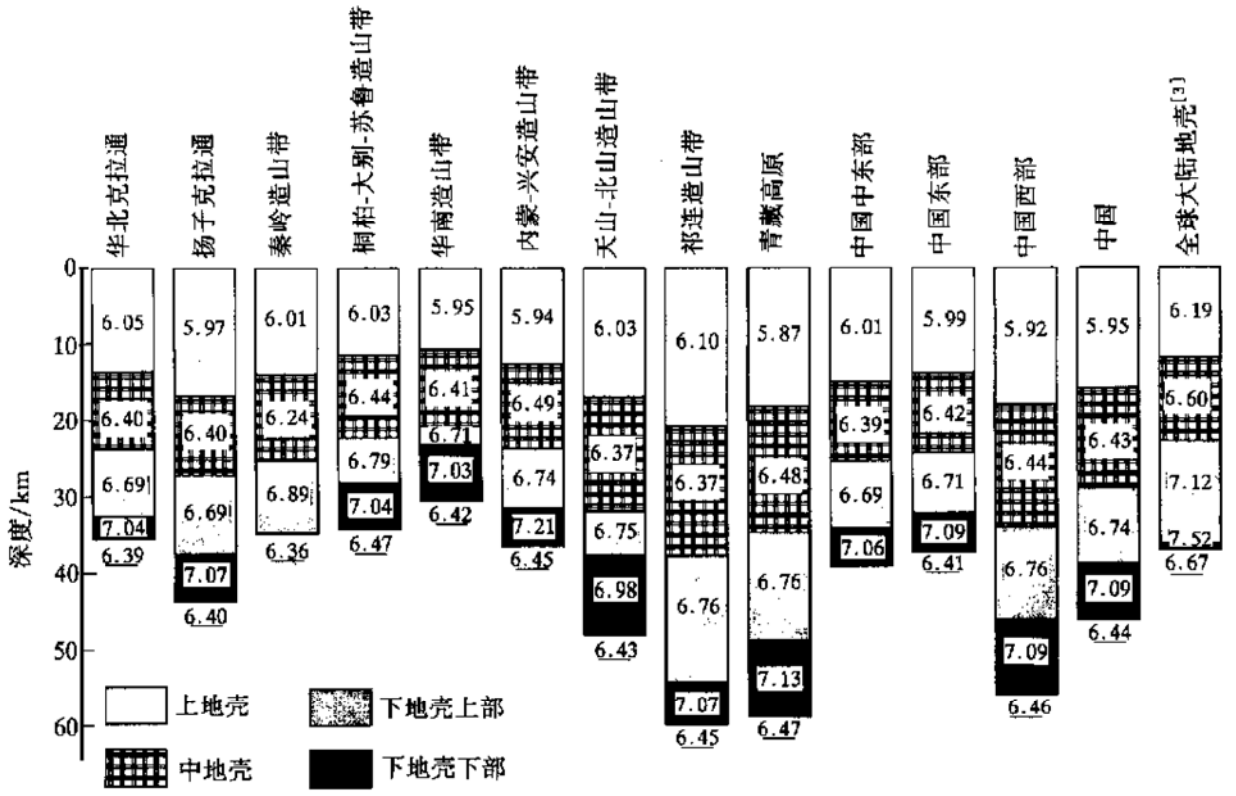


图 2 中国主要构造单元(除塔里木外)平均地壳结构

柱状图底部数值为地壳平均 V_p 速度. 中国中东部包括华北克拉通、扬子克拉通、秦岭造山带和桐柏-大别-苏鲁造山带; 中国东部包括中国东中部、华南造山带和内蒙-兴安造山带; 中国西部包括天山-北山造山带、祁连造山带和青藏高原

球大陆地壳平均厚度 37~ 40 km 一致, 但略小于 Christensen 和 Mooney[30] 给出的 41 km 的全球大陆地壳平均厚度.

(3) 尽管不同构造单元各地壳结构层厚度变化较大, 但各结构层速度相近. 其中, 中地壳 V_p 为 6.3 ~ 6.5 km/s, 下地壳上部为 6.7~ 6.8 km/s, 下地壳下部为 7.0~ 7.2 km/s, 下地壳整体为 6.8~ 6.9 km/s, 地壳整体为 6.4~ 6.5 km/s. 下地壳上部、下部和总体的 V_p 值比 Rudnick 和 Fountain[3] 的相应值低 0.2~ 0.5 km/s. 地壳整体 V_p 亦比 Rudnick 和 Fountain 的大陆地壳平均 V_p 低 0.2~ 0.3 km/s. 与 Christensen 和 Mooney[30] 的全球大陆地壳模型相比, 可得到类似结果(图 3), 即除地壳厚度较薄的桐柏-大别-苏鲁造山带和华南造山带以外, 中国东部其它构造单元在 10~ 40 km 范围内 V_p 均低于全球大陆地壳平均值. Christensen 和 Mooney 给出的全球大陆地壳平均 V_p 观测值为 6.5 km/s, 我们获得的中国东部大陆地壳相应值为 6.3 km/s.

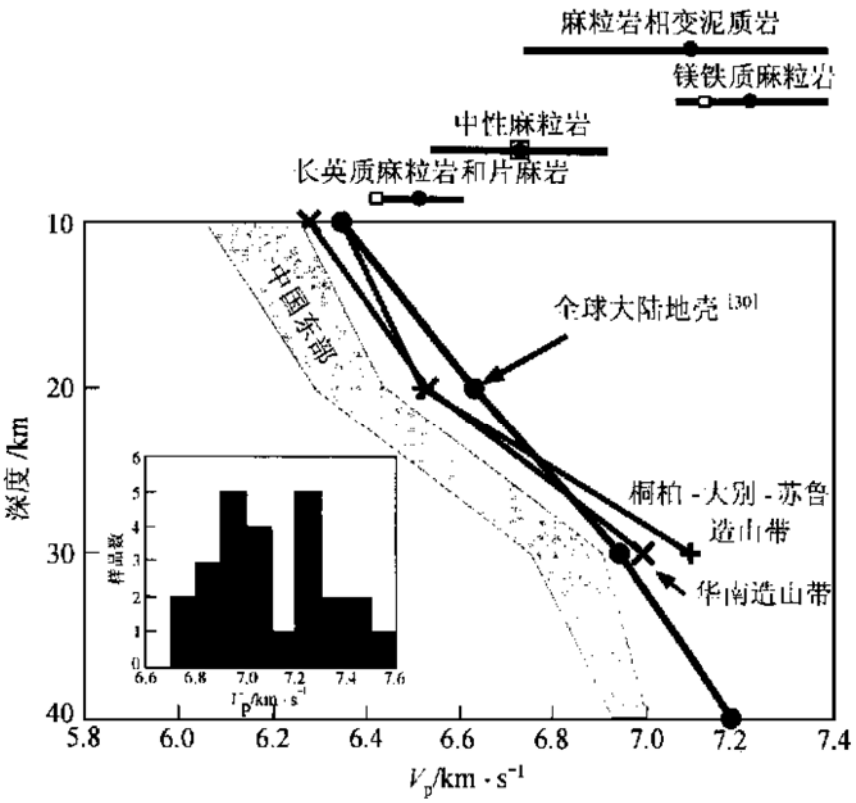


图 3　中国东部各构造单元 V_p 随深度变化与 Christensen 和 Mooney[30] 给出的全球大陆地壳平均速度结构对比

顶部●和直线表示 Rundick 等人[3] 总结的不同类型深部岩石 V_p 波速均值和 1σ 范围, × 表示作者实验测定的中国不同构造单元相应岩石类型的 V_p 平均值, 插图表示了中国 25 件镁铁质麻粒岩实验测定的 V_p 值 (均值= (7.1±0.2) km/s (1σ)) 分布直方图. 图中所有 V_p 速度值均为校正至室温和 600 MPa 下的结果

(4) 由图 3 可见, 中国东部深度为 14~ 24 km 的中地壳 V_p 与角闪岩相长英质(英云闪长-奥长花岗-花岗闪长-花岗质)片麻岩的 V_p 基本一致, 深度为 24~ 32 km 的下地壳上部 V_p 与中性麻粒岩的 V_p 相同, 深度为 32~ 37 km 的下地壳下部 V_p 为 7.1 km/s, 与镁铁质麻粒岩和麻粒岩相变泥质岩的 V_p 相同. 由于全球下地壳和我国下地壳包体中罕见变泥质岩包体, 变泥质岩在下地壳下部仅可能少量存在, 因此下地壳下部应主要由镁铁质麻粒岩组成.

我们对中国东部典型深部岩石的物理性质进行了高温高压实验测定, 并用其成果来制约地球物理测深资料的地质解释. 此外, 亦对区域出露的地壳剖面进行了研究[7~ 10]. 在此基础上, 结合前人和我们对中国东部部分地区(如汉诺坝)麻粒岩包体初步研究成果, 建立了如图 4 所示的中国东部大陆地壳的结构和岩石组成模型.

2　大陆地壳化学组成

2.1　样品采集、组合和分析

在秦岭-大别造山带及相邻华北克拉通和扬子克拉通面积为 950 000 km^2 范围内采集了

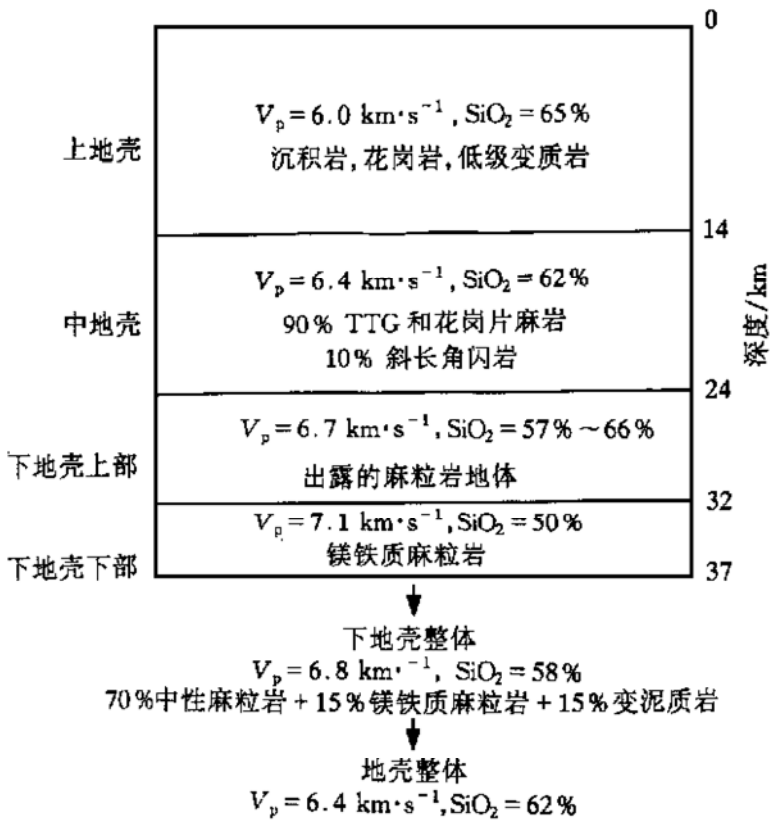


图 4 中国东部大陆地壳的结构与组成模型

11 451件岩石样品. 这些样品代表了研究区不同构造-地层小区太古宙至第三纪各时代地层或岩石单元以及侵入岩体. 进一步按构造-地层小区、时代和岩性将上述单样组合为 905 件组合样品. 采用以仪器中子活化法和 X 荧光法为主体的 13 种不同的方法分析了组合样品中 63 种元素或组份的含量. 对国际标准样品的分析结果表明, 除 H_2O^+, CO_2, S 和有机碳等挥发份以外, 主量元素分析精度优于 10%; Ag, Au, B, Be, Bi, Cl, Ge, Hg, Mo, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Tl 和 W 等难以分析元素的分析精度为 15~ 30%, 其余微量元素和稀土元素的分析精度优于 15%. 除 S 以外所有元素的分析准确度优于 7%. 有关样品分布、分析方法和国际标准样品的分析结果详见文献[6]. 进一步根据上述中国东部岩石组成模型, 结合组合样的分析结果, 获得了中国东部地壳各结构层以及地壳整体 63 种元素或组分的丰度. 关于华北克拉通中部、华北克拉通南缘、南、北秦岭造山带和扬子克拉通等 5 个构造单元地壳各结构层的元素丰度数据及讨论见文献[6].

2.2 上地壳

中国东部上地壳成分与现有的以加拿大地盾研究为基础获得的大陆上地壳元素丰度估值[1,2,4]相比, 总体(如主量元素和 REE) 具有一致性, 但低 Al_2O_3, Na_2O, K_2O, Nb, Rb, Ta, Th, U, Zr, 高 TiO_2, 全 FeO, Co, Cr, Ni, Sc, V 等过渡族金属元素含量, 即演化程度相对较低. 我们认为以上差异主要是由于: (1) 本研究不仅包括了前寒武纪克拉通区(如华北和扬子克拉通), 而且也包括了显生宙的造山带(如秦岭造山带), 而秦岭造山带相对于华北和扬子克拉通正是以高的过渡族金属元素含量为特征, 表明造山带地壳演化程度较克拉通区低[5,6]; (2) 用于加拿大地盾上地壳成分研究的绝大多数样品来自角闪岩相地体(Shaw D M, 私人通讯), 基本未包括上地壳上部未变质-绿片岩相岩石, 而本研究上地壳包括了各构造单元未变质的沉积盖层和绿片岩相岩石. 考虑到地盾区上地壳上部已被剥蚀掉, Condie[31] 在计算上地壳化学组成时, 在前寒武纪地区现有上地壳基础上增加了 10 km 厚的已剥蚀掉的岩石, 由此获得的上地壳 K_2O, Nb, Rb, Th, Zr, Co, Sc 和 V 的丰度与中国东部结果较为吻合(表 1). 以上说明, 我们获得的中国东部上地壳化学组成应比基于前寒武纪地盾区获得的结果更具有全球代表性.

2.3 中地壳

由角闪岩相岩石代表的中地壳具有英云闪长质的总体成分, 其主量元素和微量元素与

表 1　中国东部大陆地壳各结构层元素丰度估值

	上地壳					中地壳		下地壳						地壳				
	EC	T&M	S	W	C	EC	R&F	EC[a]	EC[b]	EC[c]	T&M	W	R&F	EC[a]	EC[b]	T&M	W	R&F
SiO_2	65.46	66.0	64.93	64.93	66.33	61.54	60.6	58.16	58.07	57.63	54.4	58.04	52.3	61.86	61.82	57.3	61.5	59.1
TiO_2	0.65	0.5	0.52	0.52	0.54	0.63	0.7	0.77	1.01	0.92	1.0	0.84	0.8	0.69	0.77	0.9	0.68	0.7
Al_2O_3	13.65	15.2	14.63	14.63	14.87	13.41	15.5	14.85	13.63	15.22	16.1	15.51	16.6	14.01	13.58	15.9	15.1	15.8
Fe_2O_3	2.35		1.36	1.36		2.71			3.87	3.83		8.16[d]			2.98			
FeO	3.02	4.5[d]	2.75	2.75	4.68[d]	2.76	6.4[d]	7.33[d]	5.54	4.76	10.6[d]		8.4[d]	5.93[d]	3.84	9.1[d]	5.56[d]	6.6[d]
MnO	0.10	0.08	0.07	0.07		0.10	0.10	0.13	0.15	0.13	0.2	0.12	0.1	0.11	0.12	0.18	0.10	0.11
MgO	2.52	2.2	2.24	2.24	2.46	3.50	3.4	5.05	4.33	3.86	6.3	5.23	7.1	3.67	3.42	5.3	3.7	4.4
CaO	3.31	4.2	4.12	4.12	3.55	4.99	5.1	6.51	6.02	6.02	8.5	6.80	9.4	4.88	4.71	7.4	5.5	6.4
Na_2O	2.75	3.9	3.46	3.46	3.43	3.31	3.2	2.86	2.91	3.37	2.8	2.86	2.6	2.94	2.96	3.1	3.2	3.2
K_2O	2.58	3.4	3.10	3.10	2.85	2.41	2.01	1.51	1.70	1.87	0.3	1.58	0.6	2.15	2.22	1.1	2.6	1.88
P_2O_5	0.15	0.16	0.15	0.15	0.12	0.18	0.1	0.14	0.20	0.25			0.1	0.16	0.18			0.2
H_2O^+	2.11		0.79	0.79		2.07			1.66	1.36				1.77	1.94		0.18	
CO_2	0.83		1.28	1.19		1.84			0.44	0.27				0.93	0.95			
S	0.03		0.06	0.09		0.02			0.03	0.02		0.048		0.03	0.03		0.07	
有机碳	0.31					0.31			0.28	0.24				0.30	0.30			
总和	99.82	100.14	99.46	99.40	98.83	99.78	97.11	97.33	99.84	99.75	100.20	99.19	98.00	99.43	99.82	100.28	98.19	98.39
Ag	55	50		55		48			51	55	90	80			52	80	70	
As	4.4	1.5		2.0		3.1			1.6	4.3	0.8	1.3			3.1	1.0	1.7	
Au	1.24	1.8	1.81			0.66			1.58	1.35	3.4				1.21	3.0	2.5	
B	28	15	9.2	17		17			7.6	8.0	8.3	5			18	10	11	
Ba	678	550	1 070	668	626	661	402	472	509	661	150	568	259	601	614	250	584	390
Be	1.95	3.0	1.3	3.1		2.29			1.06	0.63	1.0	1.7			1.72	1.5	2.4	
Bi	0.23	0.127	0.03	0.12		0.17			0.38	0.25	0.04	0.04			0.27	0.06	0.085	
Cd	79	98	75	102		61			97	102	98	101			75	98	100	
Cl	142[a]		100	640		182[d]			216			278			179		472	
Co	17	10	12	11.6	18	18	25	30	36	31	35	38	38	22	24	29	24	25
Cr	80	35	35	35	112	69	83	165	123	141	235	228	215	107	92	185	126	119
Cs	3.55	3.7		5.8		1.96	2.4	2.36	2.58	1.05	0.1	0.8	0.3	2.71	2.79	1.0	3.4	2.6
Cu	32	25	14	14.3		32	20	37	50	37	90	37.4	26	34	38	75	25	24
F	561		500	611		524			703	675		429			602		525	
Ga	18	17	14	14		18	17	17	19	20	18	17	13	17	18	18	15	16
Ge	1.34	1.6		1.4		1.13			1.24	1.10	1.6	1.4			1.25	1.6	1.4	
Hf	5.12	5.8	5.8	5.8	4.4	4.79	4.0	3.43	4.22	4.07	2.1	4.0	1.9	4.44	4.71	3.0	4.9	3.7
Hg	12.3		96	56		7.9			6.3	5.1		21			9.0		40	

表 1(续)

	上地壳					中地壳		下地壳						地壳				
	EC	T&M	S	W	C	EC	R&F	EC[a)]	EC[b)]	EC[c)]	T&M	W	R&F	EC[a)]	EC[b)]	T&M	W	R&F
Li	20	20	22	22		16	7	12	13	11.7	11	13	6	16	17	13	18	11
Mo	0.78	1.5		1.4		0.60		0.69	0.54	0.45	0.8	0.6			0.65	1.0	1.1	
Nb	12	25	26	26	10.3	11	8	8	10	10.3	6	11.3	5	10	11	11	19	12
Ni	38	20	19	18.6	60	34	33	73	64	56	135	99	88	49	46	105	56	51
Pb	18	20	17	17	18	15	15.3	10	13	11	4.0	12.5	4.2	14	15	8.0	14.8	12.6
Pd	1.46	0.5				0.76			2.78	1.80	1.0				1.74	1.0	0.4	
Pt	1.50					0.85			2.87	1.87					1.81		0.4	
Rb	82	112	110	110	87	67	62	49	56	46	5.3	41	11	66	69	32	78	58
Sb	0.30	0.2		0.31		0.28			0.09	0.22	0.2	0.30		0.21	0.22	0.20	0.3	
Sc	15	11	7.0	7	13.3	15	22	23	26	24	36	25.3	31	18	19	30	16	22
Se	150	50		83		64			166	140	50	170			133	50	120	
Sn	1.73	5.5		2.5		1.30		1.60	1.34	1.09	1.5	2.1			1.48	2.5	2.3	
Sr	266	350	316	316	269	283	281	343	308	419	230	352	348	298	285	260	333	325
Ta	0.74	2.2	5.7	1.5	0.82	0.55	0.6	0.53	0.58	0.52	0.6	0.84	0.6	0.62	0.63	1.0	1.1	1.1
Th	8.95	10.7	10.3	10.3	9.1	6.84	6.1	4.88	5.23	3.11	1.06	6.6	1.2	6.96	7.08	3.5	8.5	5.6
Tl	0.47	0.75	0.52	0.75		0.27		0.34	0.38	0.25	0.23	0.26			0.39	0.36	0.52	
U	1.55	2.8	2.45	2.5	2.4	1.02	1.6	0.74	0.86	0.63	0.28	0.93	0.2	1.13	1.17	0.91	1.7	1.42
V	98	60	53	53	86	95	118	154	185	160	285	149	196	117	128	230	98	131
W	0.91	2		1.4		0.60			0.51	0.50	0.7	0.6			0.69	1.0	1.0	
Zn	70	71	52	52		69	70	81	102	95	83	79	78	74	81	80	65	73
Zr	188	190	237	237	162	173	125	129	162	158	70	165	68	163	175	100	203	123
La	34.8	30	32.3	32.3	29.0	30.8	17	24.9	28.8	25.7	11	26.8	8	30.3	31.6	16	30	18
Ce	66.4	64	65.6	65.7	59.4	60.3	45	46.0	52.8	52.4	23	53.1	20	57.6	60.0	33	60	42
Nd	30.4	26	25.9	25.9	26.9	26.2	24	21.4	25.0	26.7	12.7	28.1	11	26.1	27.4	16	27	20
Sm	5.09	4.5	4.51	4.7	4.83	4.74	4.4	3.90	4.65	5.03	3.17	6.0	2.8	4.57	4.84	3.5	5.3	3.9
Eu	1.21	0.88	0.93	0.95	1.05	1.20	1.5	1.15	1.39	1.55	1.17	1.6	1.1	1.19	1.27	1.1	1.3	1.2
Tb	0.82	0.64	0.48	0.50	0.69	0.76	0.58	0.65	0.86	0.77	0.59	0.81	0.48	0.74	0.82	0.60	0.65	0.56
Yb	2.26	2.2	1.47	1.5	2.02	2.17	2.3	1.67	2.29	2.05	2.2	2.5	1.5	2.03	2.25	2.2	2.0	2.0
Lu	0.35	0.32	0.23	0.27	0.34	0.32	0.41	0.27	0.38	0.34	0.29	0.43	0.25	0.31	0.35	0.30	0.35	0.33
Y	17.4	22	21	20.7	25	17.0	22	15.5	17.8	16.5	19	27.2	16	16.6	17.5	20	24	20
La_N/Yb_N	10.42	9.21	14.85	14.55	9.70	9.60	4.99	10.08	8.50	8.48	3.38	7.24	3.60	10.09	9.52	4.91	10.14	6.08
Eu/Eu^*	0.73	0.63	0.73	0.71	0.70	0.78	1.12	0.90	0.88	0.97	1.08	0.87	1.18	0.80	0.80	0.95	0.83	0.98
$A/\mu W\cdot m^3$	1.26	1.79	1.64	1.66	1.52	0.96	1.03	0.67	0.74	0.54	0.17	0.85	0.19	0.97	1.00	0.58	1.26	0.93

EC 为中国东部; T&M 为 Taylor 和 McLennan[2]; S 为 Shaw[1]; W 为 Wedepohl[4]; C 为 Condie[31]; R&F 为 Rudnick 和 Fountain[3]. a), b)为假设下地壳下部分别由全球平均镁铁质麻粒岩包体[3]和中国东部太古宙镁铁质麻粒岩组成; c) 下地壳组成按平均地震波速相当于由 70%中性麻粒岩 + 15%镁铁质麻粒岩 +15%麻粒岩相变泥质岩组成,三种岩石成分取自中国东部太古宙相应岩石平均成分[6]; d) 为全铁; A 为产热率. 常量元素含量为%,稀有元素含量为 10^{-6}

Rudnick 和 Fountain[3] 的中地壳元素丰度值基本一致, 但显示出更高的 SiO_2, K_2O, Ba, Li, Zr, LREE 和 La_N/Yb_N 以及具有明显负 Eu 异常特征, 说明中国东部中地壳演化程度更高, 这也与中国东部中地壳 V_p 值低于全球大陆中地壳 V_p 平均值(图 2) 相吻合.

2.4　下地壳

地震测深、高温高压岩石物性实验和地质综合研究表明, 由华北克拉通麻粒岩相地体所代表的出露下地壳剖面可很好地解释该区下地壳上部物理性质, 而下地壳下部通常未出露地表[7]. 全球下地壳剖面研究亦得出类似结果[32]. 因此, 本研究用区域麻粒岩地体来代表中国东部下地壳上部(图 4), 而下地壳下部镁铁质麻粒岩采用两种模型, 第一种模型由中国东部前寒武纪地体平均镁铁质麻粒岩组成(以下称为地体模型), 第二种模型由 Rudnick 和 Fountain[3] 给出的全球基性麻粒岩包体组成(称为包体模型). 由表 1 可见, 两种不同模型获得的下地壳整体化学组成十分接近. 另一方面, 根据中性麻粒岩平均 V_p 为 6.7 km/s, 镁铁质麻粒岩为 7.2 km/s, 变泥质岩为 7.1 km/s[3], 可简单地计算出中国东部下地壳整体平均 V_p= 6.8 km/s 的地震波速对应的下地壳组成为: 70% 中性麻粒岩+ 15% 镁铁质麻粒岩+ 15% 麻粒岩相变泥质岩. 按此岩石组成和我们获得的中国东部前寒武纪这三类岩石平均化学成分[6], 可计算出第三种下地壳组成模型(称为地震模型). 由表 1 可见, 这种下地壳成分模型和以上两种模型所获得的元素丰度值, 除 Al_2O_3, Ba, Cr, Th 外, 其余无明显差异. 由三种不同的下地壳组成模型获得的元素丰度的一致性证明了所得到的化学成分是合理的.

总之, 地质、地球物理和地球化学研究均表明, 中国东部下地壳整体组成是中性的. 这种中性下地壳成分特征与目前普遍认为的镁铁质下地壳(SiO_2< 52%) 模型[2, 3, 30] 明显不同. Wedepohl[4] 根据对长约 3 000 km 的欧洲地学断面(EGT) 的研究, 亦得出上部为长英质、下部为镁铁质的双层下地壳模型. 因此, 欧洲的下地壳组成与中国东部显示出相似性(表 1). 在此需要强调指出的是, 本文重点讨论的是中国东部作为一个整体的地壳组成特征, 各结构层组成的横向区域性变化, 无论对上地壳或下地壳均是明显的. 如下地壳上部与下地壳下部的厚度比值可从 0.3(华南造山带) 变化至 3.0(华北克拉通和祁连造山带), 表明华南造山带下地壳较华北克拉通和祁连造山带基性; 又如, B, Cl, Se, As, Bi, Pd, W, Th, Cs, Ta, T1, Hg, Au 和 Pb 等元素的上地壳丰度在不同构造单元间差异> 50%, 而这些差异主要出现在秦岭造山带[6].

2.5　地壳

相应于上述下地壳组成的地体和包体模型, 按照各地壳结构层的厚度, 分别计算出两种中国东部地壳整体化学组成. 由表 1 可见, 两种中国东部地壳整体组成几乎完全一致. 中国东部大陆地壳成分亦与 Wedepohl[4] 对欧洲 EGT 的研究结果相近, 而明显比 Rudnick 和 Foutnain[3] 以及 Taylor 和 McLennan[2] 给出的大陆地壳成分长英质含量和演化程度高(表 1), 这与前述中国东部地壳 V_p 较全球大陆地壳平均 V_p 低 0.2~ 0.3 km/s 的地球物理观察一致. 但中国东部地壳中产热元素 K, Th 和 U 的含量以及产热率明显低于 Wedepohl 给出的值, 而与 Rudnick 和 Fountain 的结果接近(表 1). 此外, 中国东部大陆地壳还具有以下特征: (1) 具有明显负 Eu/Eu^* (0.80) 异常, 相对亏损 Sr 和过渡元素, 显示出低的 Sr/Nd(10.4), Ti/Nd(167), Cr/Nd (3.36), Ni/Nd(1.68), Co/Nd(0.88), V/Nd(4.67), Sc/Nd (0.69) 比值; (2) La/Nb (3.0) 较高, 与岛弧岩浆岩接近, 说明板内过程所造成的大陆地壳生长量< 10%[33]; (3) 具有以下相容性相近的元素对比值: Zr/Hf= 37, Nb/Ta= 17.5, Ba/Th= 87, K/Pb= 0.12×10^4, Rb/Cs= 25, Ba/

Rb= 8.94, Sn/Sm= 0.31, Se/Cd= 1.64, La/As= 10.3, Ce/Sb= 271, Pb/Bi= 57, Rb/T1= 177, Er/Ag= 52, Cu/Au= 3.2×10^4, Sm/Mo= 7.5, Nd/W= 40, Cl/Li= 10.8, F/Nd= 21.9, La/B= 1.8. 这些比值与原始地幔中的比值相同或接近; (4) 计算出的大陆地壳($^{238}U/^{204}Pb$)值为~ 5, 明显低于现有大陆地壳估值($\mu\approx7$)[3], 而与 Zindler 和 Hart[34] 从化学地球动力学角度估算出的值($\mu=5.7$)相近. 中国东部大陆地壳低的 μ 主要是由于北秦岭古活动大陆边缘具有十分低的 μ 值(3.3~ 3.7), 而华北和扬子克拉通以及南秦岭古被动大陆边缘 μ 值相对较高, 为 4.2~ 6.2. 对世界上年轻岛弧和其中的河流沉积物的 Pb 同位素研究亦表明, 岛弧区的 μ 值较低[35]. 因此全球大陆地壳的平均 μ 值应比现有根据对克拉通地区研究获得的 μ 值低.

致谢 鄢明才以及欧阳建平、胡以铿、谢千里、高长林、李泽九、汪东波分别在组合样分析和野外样品采集方面给予了大力帮助; 金振民, Mengel K, McDonough W F, Meissner R, Mikereit B, Rudnick R L, Hart S, Shaw D M 和 Wedepohl K H 与作者进行了有益讨论并提出了宝贵的修改意见, 使本文得以完善, 在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

1 Shaw D M, Cramer J J, Higgins M D, et al. Composition of the Canadian Precambrian shield and the continental crust of the earth. In: Dawson J B, et al., eds. The Nature of the Lower Continental Crust. Geol Soc Spec Publ, 1986, 24: 275~ 282

2 Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust. Rev Geophys, 1995, 33: 241~ 265

3 Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. Rev Geophys, 1995, 33:

[illegible] 1993, 62: 1959~ 1975

7 Kern H, Gao S, Liu Q S. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China Geoscience Transect. Earth Planet Sci Lett, 1996, 139: 439~ 455

8 Liu Q S, Gao S. Geophysical properties of the lower crustal granulites from Qinling Orogenic Belt, China. Tectonophysics, 1992, 204: 401~ 408

9 Liu Q S, Gao S, Xu Q D. Magnetic structure of the Dengfeng-Lushan crustal cross-section, Henan. Sci in China, Ser B, 1994, 37(8): 991~ 1 000

10 高 山, 金振民, Kern H, 等. 大别超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步实验研究——对造山带地壳深部组成和莫霍面性质的启示. 科学通报, 1997, 42(8): 862~ 865

11 袁学诚(主编). 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996

12 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋(主编). 江苏响水至内蒙古都拉地学断面. 北京: 地质出版社, 1991

13 卓选勋, 夏杭寰(主编). 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面. 北京: 地震出版社, 1992

19 崔作舟, 陈纪平, 吴　苓. 阿尔泰-台湾岩石圈地学断面综合研究: 花石峡-邵阳深部地壳的结构和构造. 北京: 地质出版社, 1996

20 阚荣举, 韩　源(主编). 云南遮放至马龙地学断面. 北京: 地震出版社, 1992

21 Wu G J, Xiao X C, Li T D. Yadong to Golmud Transect, Qinghai-Tibet Plateau, China. Int Lithosphere Prog Publ 189. Washington: Am Geophys Union, 1991

22 崔作舟, 等. 青藏高原速度结构和深部构造. 北京: 地质出版社, 1992

23 吴功建, 等(主编). 全球地学断面: 格尔木至额济纳期地学断面. 北京: 地质出版社, 1997

24 金　旭, 杨宝俊(主编). 中国满州里-绥芬河地学断面地球物理场及深部构造特征研究. 北京: 地震出版社, 1994

25 崔作舟, 卢德源. 攀西地区爆破地震测深和地壳结构. 北京: 地质出版社, 1987

26 藤吉文, 吴　华, 王爱武, 等. 中国东南陆缘地带岩石圈结构和动力学. 中国科学, B 辑, 1994, 24(8): 866~ 875

27 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部的地壳结构. 地球物理学报, 1994, 37: 27~ 35

28 邵学钟, 张家茹, 范会吉, 等. 天山造山带地壳结构与构造 ——乌鲁木齐-库尔勒地震转换波测深剖面. 地球物理学报, 1996, 39: 336~ 345

29 Chapman D, Furlong K. Thermal state of the continental crust. In: Fountain D M, Arculus R, Kay R, eds. Continental Lower Crust. Amsterdam: Elsevier, 1992. 179~ 200

30 Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. J Geophys Res, 1995, 100: 9761~ 9788

31 Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. Chem Geol, 1993, 104: 1~ 37

32 Fountain D M, Percival J, Salisbury M H. Exposed cross sections of the continental crust ——Synopsis. In: Salisburg M H, Fountain D M, eds. Exposed Cross Sections of the Continental Crust. Dortrecht: Kluwer, 1990. 653~ 662

33 Rudnick R L. Making continental crust. Nature, 1995, 378: 571~ 578

34 Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics. Ann Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 493~ 571

35 Asmerom Y, Jacobsen S B. The Pb isotopic evolution of the Earth: inferences from river water suspended loads. Earth Planet Sci Lett, 1993, 115: 245~ 256