

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

研究进展

大别造山带地壳的元素丰度

郭福生 辜骏如 林银山

(华东地质学院地球科学系, 江西临川, 344000)

刘海鹰

(西安大略大学地球科学系, 加拿大安大略伦敦)

内容提要 大别造山带具板片叠覆式构造形态。区域地壳具3个结构层, 中地壳存在地震低速层和电性低阻层。地壳总体成分为花岗闪长岩质, 深部地壳成分为中性。地壳稀土总量偏高、轻重稀土分馏程度高, 铁族元素偏低、亲石元素富集。造山带内部横向不均一性明显, 而地壳纵向演化分异程度低于一般大陆地壳。

关键词 地壳结构 元素丰度 地壳演化 大别造山带

秦岭—大别造山带近年来已成为国际大陆构造研究之热点^[1~3]。本文依据现代区域地球化学理论体系和研究思路^[3,4], 通过区域构造特征、地球物理测深资料、实验岩石学资料和岩石化学成分的系统研究, 建立了大别造山带地壳结构和岩石组成模型, 计算了区域地壳及各结构层的元素丰度, 进而探讨区域地壳演化特征。

1 区域地壳结构和岩石组成模型

大别造山带北以信阳—舒城深断裂与华北地块相接, 南以新城—黄陂—广济深断裂与扬子地块为邻, 东部为郯庐断裂所截并向北平移至胶东南部, 西端隔南阳盆地与秦岭造山带遥相对应。以桐柏—桐城深断裂为界, 将造山带划分为两个次级构造单元^[5]。北部为北淮阳华力西—印支褶皱带, 主要由佛子岭片岩系(以下古生界为主)、小溪河片麻岩套(原岩侵入时代为震旦纪)、梅山群变砂页岩(石炭系)和中酸性火山岩及侵入杂岩(时代属晚侏罗世)组成。南部为大别山燕山隆起带, 由大别杂岩(表壳岩系主体为古元古界、片麻岩套原岩侵入时代为震旦纪)、宿松岩群(变质火山—含磷沉积岩系, 时代属震旦纪)、蒲河片麻岩套(加里东期老岩体)和中生代花岗岩体组成。研究表明, 大别地块是扬子地块北缘元古宙古岛弧的一部分。加里东期, 它作为扬子地块北部陆缘的水下隆起, 与华北地块南缘的早古生代古岛弧碰撞拼合, 古洋壳消失, 完成了南北两大陆块的对接。中生代为大规模陆内俯冲时期。大别造山带就是扬子地块、大别地块和华北地块在陆内俯冲作用下, 依次叠覆的结果^[5]。

人工地震^[6,7]和大地电磁测深资料^[8]表明, 大别造山带地壳厚33~34 km, 具3个结构层, 中地壳以存在地震波低速层和电性低阻高导层为特征。上、中、下地壳厚度分别为12 km、12~13 km和9 km。大别山区的下地壳由扬子地块基底岩石组成, 它呈楔形俯冲于大别板片之下, 大别板片的基底又作为俯冲壳楔的前沿构成北淮阳区的中下地壳, 形成造山带现代

地壳板片叠置式构造形态^[9]。

近年来对出露地表的某些典型大陆地壳剖面,如意大利 Ivrea 和 Calabria 带的研究表明,大陆地壳变质分带的共同特点是,由地壳上部的绿片岩相,至地壳中部的角闪岩相,最终达到地壳下部的麻粒岩相^[3,4,10]。这种分带规律与实验岩石学研究结果相一致,同时也得到科拉半岛 SG-3 超深钻的进一步证实^[11]。笔者以这一认识为指导准则,在区域地壳结构模型的基础上,综合考虑各构造单元地表出露岩石的年龄、变质相和岩石形成的温压条件所反映的岩石形成深度等资料,建立了本区地壳各结构层的岩石组成模型(表 1)^[9]。大别山区和北淮阳地区目前的上地壳由该带出露地表的各群岩石组成,其中大别杂岩成岩深度为 25 km 以下的下地壳^[12~14],由于大别山隆升剥蚀^[14~18]以致于在地表大面积出露,成为该带现今上地壳的组成部分。根据岩石形成与演化历史及区域地壳结构模型,将大别造山带基底岩石大别杂岩作为大别山区中地壳和北淮阳地区中下地壳组成,以崆岭群^[3,4]来代表大别山区下地壳成分。

表 1 大别造山带地壳元素丰度计算权系数及样品分布表

Table 1 Right coefficients and sample numbers of various geological bodies of Dabie orogenic belt in estimating crustal composition

地壳结构层	岩石(地层)单位	主要岩石类型	样 品 数				
			常量 元素	稀土 元素	微量 元素		
大别山区地壳 0.75	上地壳 0.36	大别杂岩0.72 (包括原桐柏山群)	表壳岩系0.4	斜长角闪岩 0.2	35	16	3
				变粒岩、片麻岩类 0.4	61	23	11
			片麻岩套0.6	大理岩 0.2	14	3	2
				石英岩、片岩 0.2	41	7	3
		宿松岩群0.03 (包括原红安群)	闪长质-花岗闪长质-花岗质片麻岩		158	47	27
			斜长角闪岩类 0.46		15	5	4
			大理岩 0.20			2	2
			石英岩、片岩0.34		24	5	13
			花岗质片麻岩		20	15	10
			中生代岩体 0.20		198	67	19
	中地壳 0.37	大别杂岩					
	下地壳 0.27	崆岭群(取高山、张本仁等 ^[4] 扬子地块北缘下地壳成分)					
大别造山带地壳 0.25	北淮阳地区地壳 0.36	佛子岭岩群 0.48 (包括原信阳群)	砂质 0.67	85	3	18	
			泥质 0.10	35	5	12	
			碳酸盐 0.05	16	3	2	
			中基性火山岩 0.13	113	10	2	
		小溪河片麻岩套 0.18	中酸性火山岩 0.05	67	15	2	
			花岗质片麻岩	129	3	10	
		梅山群 0.01	砂质 0.6	14	7	4	
			泥质 0.3	16	6	5	
			碳酸盐 0.1	6	3	5	
		中生代火山岩 0.05		88	10	58	
	深部地壳 0.64	大别杂岩	中生代岩体 0.27	花岗岩类 0.9	178	32	17
			正长岩类 0.1	59	10	13	

2 地壳元素丰度计算方法及结果

在地壳结构和岩石组成模型的基础上,根据大别造山带区域地球化学测量结果,按加权平均法计算了地壳各结构层元素丰度。参加计算的微量元素样品数 242 个,样品全部由笔者等采集,按各时代地层(组、群)、主要岩体沿 1~2 个标准剖面系统采集各种岩石类型新鲜样品,

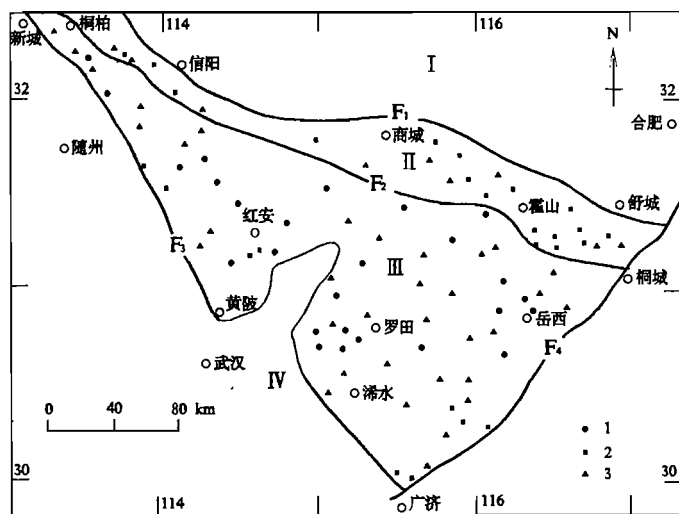


图 1 大别造山带区域地球化学样品分布简图
Fig. 1 Sketch map of regional geochemistry samples distribution in the Dabie orogen

I—华北地块；II—北淮阳华力西—印支褶皱带；III—大别山燕山隆起带；IV—扬子地块；F₁—信阳—舒城断裂；F₂—桐柏—桐城断裂；F₃—新城—黄陂—广济断裂；F₄—郟庐断裂；1—大别杂岩样品；2—后晋宁期变质地层及火山岩；3—中生代岩体

I—North China Block；II—Beihuaiyang Variscan—Indosinian folding zone；III—Dabieshan Yanshan uplifted zone；IV—Yangtze Block；F₁—Xinyang—Shucheng fault；F₂—Tongbo—Tongcheng fault；F₃—Xincheng—Huangpi—Guangji fault；F₄—Tanlu fault (Tancheng—Lujiang fault)；1—position of sampling sections of Dabie Complex；2—position of sampling sections of metamorphic strata and volcanic rocks of post-Jinling (Tsinning) period；3—position of sampling sections of Mesozoic granitoid

外的离群样品进行一次性剔除。

(2) 计算每一岩石(地层)单位的平均成分。对于岩浆岩体(包括老岩体即片麻岩套)和深变质基底(大别杂岩)，按照各主要岩石类型出露面积为权计算元素平均含量。其它成层性较好的岩石地层单位则按剖面中每类岩石的厚度，按加权平均法计算其化学成分。各类岩石权系数列于表 1。

(3) 计算每个构造单元中各地壳结构层的元素丰度。根据地壳岩石组成模型，按每一岩石(地层)单位在各结构层中所占的体积比例进行加权平均计算。

(4) 计算每一构造单元和整个造山带地壳总体成分。根据地壳结构模型，以各结构层厚度为权计算每一单元地壳总体的元素丰度。再按各构造单元的体积比例计算大别造山带全区地壳元素丰度。

根据上述 4 个步骤对区域地球化学数据进行统计处理，得出大别山区上地壳、中地壳、下地壳、地壳总体，北淮阳区上地壳、深部地壳、地壳总体，大别造山带上地壳、地壳总体成分及其

由中国科学院高能物理研究所进行仪器中子活化分析。仪器中子活化分析测量的相对标准偏差为 5%。稀土元素样品 297 个，其中 44 个样品为本课题组按各地质体标准剖面所采的控制样，由地质矿产部武汉综合岩矿测试中心用 ICP 法完成稀土分析，253 个为从文献[13, 19~25]收集而来。常量元素样品数 1372 个，其中 77 个为本课题组采集，由地质矿产部江西省中心实验室和华东地质学院分析系完成化学全分析，1295 个来自文献资料[13, 19~32]。上述样品从位置分布、不同地质体和岩石类型等方面都有较好的代表性(图 1)。区域地壳元素丰度计算步骤如下：

(1) 首先计算每一地层单位或岩石单位中各主要岩石类型(或系列)的平均成分。为了消除各家分析测试误差，同时也为了消除风化、蚀变、变质和矿化作用以及个别样品代表性较差等原因给总体平均值计算带来的偏差，在对各岩类进行平均值计算时，对于某些含量在 $X \pm 3S$ 范围之

离散性,包括13种常量元素、15种稀土元素和22种微量元素(以及由中子活化分析得到的Fe、K、Na和9个稀土分量)的丰度(表2)及其变异系数(表3)。常量元素中碳酸盐组分的变异系数稍高,稀土元素的变异系数普遍较低,微量元素的变异系数偏高,反映了微量元素变化范围较大。

表2 大别造山带区域地壳元素丰度

Table 2 Element abundances of the regional crust in Dabie orogenic belt

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Σ	样品数
1	65.87	0.46	14.20	1.90	2.56	0.11	1.90	3.39	3.66	3.28	0.15	0.48	0.84	98.76	
2	65.31	0.57	13.97	2.04	2.49	0.09	2.07	3.74	3.49	3.74	0.18	0.38	0.81	98.89	1115
3	65.73	0.49	14.14	1.94	2.54	0.11	1.95	3.48	3.61	3.40	0.16	0.46	0.84	98.79	
4	65.80	0.45	14.08	2.84	2.15	0.15	1.71	3.68	3.80	3.35	0.18	0.65	0.69	99.38	566
5	65.16	0.79	13.96	2.67	3.05	0.10	2.49	3.30	2.91	4.77	0.22	0.64	1.17	101.23	806
6	65.64	0.54	14.05	2.80	2.38	0.14	1.91	3.59	3.58	3.71	0.19	0.65	0.81	99.84	1372
7	65.40	0.45	13.97	1.69	2.18	0.08	1.84	3.99	3.81	3.16	0.15	0.24	0.61	97.57	309
8	66.62	0.48	14.67	0.95	3.63	0.11	2.25	2.17	3.25	3.36	0.11	0.58	1.37	99.55	

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ	$\frac{La_N}{Yb_N}$	$\frac{\Sigma Ce}{\Sigma Y}$	$\frac{Eu}{Eu^*}$	样品数
1	41.22	76.66	8.93	31.08	5.61	1.49	4.04	0.58	2.92	0.58	1.58	0.25	1.53	0.24	13.46	190.18	17.8	6.55	0.92	
2	43.24	79.00	9.38	33.14	5.37	1.40	4.76	0.63	3.31	0.66	1.79	0.27	1.59	0.25	14.57	199.36	17.9	6.16	0.84	203
3	41.72	77.25	9.04	31.60	5.55	1.47	4.22	0.59	3.02	0.60	1.63	0.26	1.55	0.24	13.74	192.48	17.8	6.45	0.91	
4	44.41	81.26	9.14	33.26	5.93	2.14	4.27	0.60	3.09	0.61	1.62	0.26	1.56	0.24	14.01	202.40	28.5	6.71	1.25	190
5	51.68	92.46	10.81	37.99	4.87	1.73	5.96	0.75	4.05	0.82	2.23	0.33	1.79	0.29	18.35	234.11	19.1	5.77	0.99	107
6	46.23	84.06	9.56	34.44	5.67	2.04	4.69	0.64	3.33	0.66	1.77	0.28	1.62	0.25	15.10	210.33	18.8	6.42	1.19	297
7	38.49	71.43	8.58	30.41	5.65	1.21	4.08	0.57	2.90	0.57	1.54	0.24	1.47	0.23	12.45	179.82	17.3	6.48	0.74	96
8	40.70	77.70	9.12	29.10	5.13	1.01	3.67	0.56	2.73	0.56	1.58	0.26	1.59	0.24	14.11	188.10	16.9	6.42	0.68	

序号	Mo	Co	Fe	Ni	Cr	Sc	Cs	Ba	Rb	K	Th	U	Sr	Ta	Hf	Zr	Na	W	样品数
1	4.12	11.86		51.17	51.81	8.84		1272			11.41		387					2.15	
2	5.32	11.72	2.72	57.02	46.89	8.91	1.74	1465	95.57	3.83	13.50	3.42	416	0.75	6.20	227	3.12	2.98	194
3	4.42	11.82		52.63	50.58	8.86		1320			11.93		394					2.36	
4	5.22	13.30	2.91	61.83	51.22	8.35	1.11	1387	103.62	3.83	11.81	3.45	438	0.71	5.38	202	3.27	2.65	94
5	4.90	10.27	2.79	53.19	38.67	9.68	3.17	1126	128.33	3.66	17.40	3.61	292	1.15	7.93	246	2.64	2.99	148
6	5.14	12.54	2.88	59.67	48.08	8.68	1.63	1322	109.80	3.79	13.21	3.49	402	0.82	6.02	213	3.11	2.74	242
7	5.56	12.54	2.68	59.17	51.52	8.47	0.93	1655	77.14	3.92	11.31	3.33	486	0.53	5.22	217	3.39	2.98	46
8	0.68	9.00		26.00	53.00	10.00		592			11.00		182					0.34	

序号	Ag	As	Au	Br	Sb	Se	Zn	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	$\frac{La_N}{Yb_N}$	样品数
1	0.29		4.29				49.57											
2	0.35	2.01	5.16	1.09	0.55	2.99	44.32	49.13	90.80	36.74	7.47	1.22	5.56	0.64	2.11	0.32	15.40	194
3	0.30		4.51				48.26											
4	0.37	3.02	5.76	1.04	0.42	2.27	44.05	42.74	79.75	34.66	7.33	1.20	5.49	0.88	1.99	0.31	14.20	94
5	0.32	2.84	4.62	0.87	0.68	4.46	39.00	64.29	112.93	42.37	6.91	1.45	6.05	0.83	2.50	0.36	16.90	148
6	0.36	2.98	5.48	1.00	0.49	2.82	42.79	48.13	88.05	36.59	7.23	1.26	5.63	0.87	2.12	0.32	15.00	242
7	0.36	1.54	5.47	1.22	0.48	2.17	47.32	40.61	78.35	33.58	7.78	1.09	5.28	0.54	1.89	0.30	14.20	46
8	0.07		0.70				60.60											

注:氧化物和K、Na、Fe单位为%,Au为 $\times 10^{-9}$,其它元素为 $\times 10^{-6}$ 。1—大别山区地壳总平均^[4];2—北淮阳地区地壳;3—大别造山带地壳^[4];4—大别山区上地壳;5—北淮阳地区上地壳;6—大别造山带上地壳;7—大别山区中地壳和北淮阳地区中下地壳;8—大别山区下地壳^[4]。

3 区域地壳的元素丰度及分布特征

3.1 与常用陆壳丰度值比较

表4列出了目前国内外常用的大陆地壳成分。其中 Weaver and Tarney^[33]和 Shaw 等^[34]的大陆地壳成分是根据出露的大陆地壳剖面(主要为太古宙地质体)得出的, Taylor and Mclennan^[35]是根据澳大利亚地壳增生模型估计大陆地壳化学成分, 黎彤等^[36]的中国陆壳成分也是根据地壳模型计算的。

表3 大别造山带各壳层元素变异系数

Table 3 Elemental variance coefficients of various structural layers in Dabie orogenic belt

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	样品数
1	0.10	0.79	0.11	0.67	0.87	0.64	1.30	1.03	0.16	0.36	0.98	1.05	0.97	566
2	0.17	0.96	0.19	0.66	0.95	0.70	1.11	1.06	0.36	0.58	0.98	0.92	1.10	309
3	0.19	0.70	0.19	0.70	0.81	0.57	0.96	0.97	0.48	0.61	0.97	1.21	1.49	806

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	样品数
1	0.67	0.66	0.64	0.63	0.59	0.62	0.53	0.50	0.69	0.56	0.59	0.60	0.64	0.62	0.71	190
2	0.82	0.78	0.76	0.71	0.64	0.54	0.46	0.48	0.71	0.52	0.57	0.56	0.65	0.64	0.73	96
3	0.79	0.77	0.71	0.63	0.65	0.53	0.48	0.44	0.41	0.39	0.37	0.39	0.34	0.34	0.38	107

序号	Mo	Co	Fe	Ni	Cr	Sc	Cs	Ba	Rb	K	Th	U	Sr	Ta	Hf	Zr	Na	W	样品数
1	1.67	1.39	0.69	0.96	1.82	1.14	1.16	0.95	0.59	0.51	0.76	0.94	1.04	0.70	0.72	0.64	0.57	0.98	94
2	1.73	1.41	0.66	0.98	1.35	0.89	0.92	1.00	0.48	0.47	0.72	1.00	1.38	0.61	0.64	0.68	0.40	1.04	46
3	2.35	0.87	0.45	0.56	0.87	0.88	1.24	0.71	0.65	0.66	0.82	1.66	0.82	1.67	0.65	0.86	0.55	0.74	148

序号	Ag	As	Au	Br	Sb	Se	Zn	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	样品数		
1	0.70	1.68	1.00	0.48	0.90	0.95	0.79	0.83	0.77	0.79	0.78	0.77	0.70	0.59	0.62	0.65	94		
2	0.42	1.73	2.13	0.41	0.79	0.58	0.64	0.96	0.89	0.98	0.87	0.80	0.70	0.59	0.57	0.66	46		
3	1.02	0.81	4.56	0.80	1.06	0.88	0.92	0.72	0.69	0.58	0.49	0.52	0.45	0.41	0.37	0.40	148		

注: 1—大别山区上地壳; 2—大别山区中地壳; 3—北淮阳上地壳。

本区地壳常量元素与其他学者估算值很接近, 总体上为花岗闪长岩质。只有 Taylor and Mclennan^[35]估算的大陆地壳成分为闪长岩质。秦巴地壳低 SiO₂、Al₂O₃, 高 CaO 是地壳中含有较高的碳酸盐岩所致, 若剔除挥发组分(H₂O 和 CO₂)重新计算后得出 SiO₂ 64.40%, Al₂O₃ 14.20%^[4], 则同本区一样显示出长英质含量略高于其他著者的估算值(这与本区平均地壳波速较低相吻合^[9,37,38])。本区地壳稀土总量显著偏高, 轻稀土元素普遍偏高, 重稀土含量则稍低于其他学者估算值, 负锶异常不明显。从中子活化分析资料得到的北淮阳地壳 9 个稀土元素的分量也表现出同样的规律。在微量元素方面, 铁族元素普遍低于 Shaw 等^[34]和 Taylor and Mclennan^[35]给出的值而与秦巴地壳更接近, 亲石元素和成矿元素 Au、Ag 等则高于其他作者的估算值。

北淮阳上地壳 TiO₂ 偏高, 大别造山带总体上地壳 MnO₂ 偏高, 这与秦巴全区除去碳酸盐和 H₂O 后重新计算的成分一致。全区上地壳稀土总量和轻稀土偏高, 正锶异常, Ni、Cr、Th 和 Au 明显偏高, Zn 明显偏低。

大别造山带下地壳地震波速 V_p 值较低(6.5~7.2), 这一波速相应于麻粒岩相条件下闪长质岩石(V_p=6.6~7.2 km/s)和花岗质岩石(V_p=6.5~6.6 km/s), 而不是基性岩石(V_p>7.0 km/s)^[39]。下地壳、上地幔间截然的波速差异表明镁铁质不可能是下地壳的主体组

成^[3,9]。这可以说明本区现代下地壳总体物质组成应是闪长岩质—花岗闪长岩质。本区深部地壳常量元素计算结果与 Shaw 等^[34]、Weaver and Tarney^[33]估算值大体相似。稀土总量和负锶异常与秦巴地区相当,但轻稀土偏高,重稀土偏低。下地壳亲铁元素 Co、Ni、Cr、Sc 和 Zn 偏低,亲石元素 Sr、Ba、Th、W 和 Ag、Au 偏高。

表4 国内外常用大陆地壳元素丰度表

Table 4 Element abundances of continental crusts often quoted in the world

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Σ
1	61.52	0.66	13.39	2.18	3.26	0.12	3.02	5.42	3.23	2.40	0.16	2.76	1.71	99.83
2	63.2	0.6	16.1		4.9	0.08	2.8	4.7	4.2	2.1	0.19			98.87
3	63.2	0.7	14.8		6.22 ^①	0.09	3.15	4.66	3.29	2.34	0.14		1.41	100.00
4	57.3	0.9	15.8	2.0	3.4	0.1	2.8	4.6	4.0	2.7				99.1
5	59.28	0.65	12.75	2.20	3.06	0.12	3.21	6.95	2.90	2.36	0.16	4.54	1.71	99.89
6	66.0	0.5	15.2		4.5 ^①	0.08	2.2	4.2	3.9	3.4				99.98
7	64.93	0.52	14.63	1.36	2.75	0.07	2.24	4.12	3.46	3.10	0.15	1.28	0.79	99.40
8	63.37	0.66	13.91	2.17	3.43	0.12	2.86	4.16	3.50	2.43	0.16	1.28	1.71	99.76
9	66.7	0.3	16.0		3.2 ^①	0.04	1.4	3.2	4.9	2.1				97.84
10	61.2	0.5	15.6		5.3 ^①	0.08	3.4	5.6	4.4	1.0				97.08
11	61.5	0.8	14.9		8.0 ^①	0.12	4.1	5.2	3.1	1.6	0.13		0.5	99.95

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	$\frac{La_N}{Yb_N}$	$\frac{\Sigma Ce}{\Sigma Y}$	$\frac{Eu}{Eu^*}$
1	29.5	59.6	7.52	26.5	5.20	1.17	4.36	0.70	3.99	0.81	2.35	0.37	2.32	0.35	21.1	166.2	8.4	3.5	0.75
2	28	57		23	4.1	1.09		0.53				0.24	1.53	0.23			12.1		
4	16	33	3.9	16	3.5	1.1	3.3	0.6	3.7	0.78	2.2	0.32	2.2	0.30	20	107	4.8	2.19	1.0
5	28.5	57.0	7.44	25.8	5.11	1.13	4.29	0.70	3.97	0.81	2.34	0.36	2.29	0.35	21.4	161.4	8.2	3.43	0.74
6	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.80	2.3	0.33	2.2	0.32	22	168	9.0	3.73	0.65
7	32.3	65.6		25.9	4.51	0.94	2.79	0.48		0.62			1.47	0.23	21		14.5		0.81
8	30.4	61.8	7.59	27.0	5.27	1.21	4.41	0.70	4.01	0.81	2.35	0.37	2.35	0.35	21.1	170.1	8.5	3.62	0.77
9	36	69		30	4.4	1.09		0.41				0.14	0.76	0.1	9		31.3		
10	22	44		18.5	3.3	1.18		0.43				0.19	1.2	0.18	7		12.1		

序号	Mo	Co	Ni	Cr	Sc	Sr	Ba	U	Th	W	Ag	Au	Zn
1	0.86	13	24	54	30	216	507		7.5	0.61	0.07	0.9	61
3			26	54	90	13	317	764		9.0			71
4	1.0	29	105	185	30	260	250	0.91	3.5	1.0	0.08	3.0	80
5	0.8	13	22	53	13	213	508		7	0.7	0.08	1.0	60
6	1.5	10	20	35	11	350	550	2.8	10.7	2.0	0.05	1.8	71
7			12	19	35	7.0	316	1070		10.3		1.81	60
8	0.9	14	25	55	13	218	507		7.5	0.54	0.07	0.9	62
9				20	32		580	713		8.4			
10			12.2			4.75	569	757		8.0			
11			39	89	144	19	317	458		7.7			89
12	0.8	35	135	235	36	230	150	0.3	1.06	0.7	0.09	3.4	83

序号	Rb	U	Ta	Hf	Zr	As	Br	Sb	Se
13	150	5.6	3.5	5.1	160	1.9	3.3	0.15	0.074

注:①为全铁。氧化物单位为%,Au为 $\times 10^{-9}$,其它元素为 $\times 10^{-6}$ 。1—秦巴地壳^[4];2—英格兰地壳^[33];3—加拿大前寒武纪地壳^[34];4—地壳^[35];5—秦巴地区上地壳^[4];6—现代上地壳^[35];7—加拿大前寒武纪地壳^[34];8—秦巴地区中—下地壳^[4];9—英格兰太古宙中地壳^[33];10—太古宙下地壳^[33];11—加拿大、美国及印度下地壳平均成分^[34];12—下地壳^[35];13—中国陆壳^[36]。

3.2 元素分布与地壳内部分异程度

大别山区与北淮阳区上地壳常量元素方面无实质性差异,仅表现为大别山区 MnO 、 Na_2O 偏高,北淮阳区 TiO_2 、 MgO 、 K_2O 和挥发分偏高。稀土元素和微量元素差异明显,大别山区上地壳稀土元素普遍比北淮阳区低(特别是重稀土元素),但 Sm 、 Eu 略高于北淮阳, Eu 亏损程度减弱。微量元素中 Co 、 Ni 、 Cr 、 Sr 、 Ba 、 U 、 Ag 、 Au 、 Br 较高, Th 、 Cs 、 Rb 、 Ta 、 Hf 、 Zr 、 Sb 、 Se 偏低,差异性明显的元素(丰度比值 <0.85 或 >1.15 者)占统计总数的 77%。可见,大别造山带内具明显的横向不均一性。从 K 、 Na 、 REE 、亲铁元素和 Th/U 值(大别山上地壳 Th/U 为 3.42,北淮阳为 4.82)变化情况来看,北淮阳上地壳演化程度较大别山区高,后者表现为强烈的隆升剥蚀、暴露造山带根部岩石而沉积循环改造作用弱。

大别造山带上地壳与深部地壳长英质含量变化很小,只 TiO_2 、 $\sum\text{FeO}$ 、 MnO 、 K_2O 及挥发分略有增高。稀土元素中 Sm 大体相当,其余略有富集,轻重稀土比很接近,说明随地壳演化,轻重稀土分异增强趋势微弱。 Eu 亏损程度变低,反映了深部物质(幔源成分)加入。微量元素中 Th 、 Cs 、 Rb 、 Ta 、 As 、 Se 趋向富集, Sr 、 Ba 贫化,具明显差异的元素占统计总数的 41%。可见,由地壳演化造成的纵向不均一性很小。这说明大别造山带作为一个整体,地壳内部物质上下分异和调整程度差,即地壳内部结构成熟度低,其纵向演化分异程度低于一般大陆地壳。地壳纵向分异弱的原因,可能与高热流导致的下部地壳较高级度的部分熔融有关,部分熔融程度愈高,形成岩浆的成分同原岩的成分就愈接近。就内部构造单元来看,北淮阳地壳演化分异比大别山区强,反映了大别山广泛的岩浆活动和强烈的抬升作用。

4 结论

(1)大别造山带地壳具 3 个结构层,中地壳以存在地震低速层和电性低阻层为特征。大别山区的下地壳由扬子地块基底岩石组成,它呈楔形俯冲于大别板片之下,大别板片的基底又作为俯冲壳楔的前沿构成北淮阳区的中下地壳,形成造山带现代地壳板片叠置式构造形态。

(2)区域地壳元素丰度计算结果表明,本区地壳总体成分为花岗闪长岩质,深部地壳成分为中性,这与本区地壳波速特征相吻合。地壳稀土总量偏高、轻重稀土分馏程度高,铁族元素偏低、亲石元素富集,这显然与区内广泛分布的花岗质岩体有关,反映了区内晋宁期及燕山期热事件的普遍性。

(3)大别造山带内部具横向不均一性,主要表现在大别山区与北淮阳区上地壳稀土元素和微量元素差异明显,反映了大别山区强烈隆升剥蚀、沉积循环改造作用弱,故而上地壳演化程度较低。另一方面,大别造山带地壳内部物质上下分异和调整程度差,其纵向演化分异程度低于一般大陆地壳。

本文承蒙张本仁教授、汤加富高级工程师和杨瑞瑛研究员多次指教,黄克玲、梁鼎新、吴培琦、乐仁昌、何强、王添顺、唐志良、陈昱曦等同志参加了部分工作,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Mattauer M, Matte Ph, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Zhiqin, Lu Y, Tang Y. Tectonics of the Qinling Belt: buildup and evolution of eastern Asia. *Nature*, 1985, 317: 496~500.
- 2 Shuguang Li, Yilin Xiao, Deliang Liou, Yizhi Chen, Ningjie Ge, Zongqing Zhang, Shensu Sun, Bolin Cong, Ruyuang Zhang, Stanley R H, Songshan Wang. Collision of the North China and Yangtse Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 1993, 109(1/4): 89~111.
- 3 张本仁等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 1~44 页.

- 4 高山,张本仁,骆庭川,李泽九,谢千里,张宏飞,谷晓明,欧阳建平,汪东波,高长林.秦岭造山带及其邻区大陆地壳的结构与成分研究.见:张本仁等著.秦巴区域地球化学文集.武汉:中国地质大学出版社,1990.33~51页.
- 5 梁鼎新,辜骏如,郭福生,林银山.大别造山带的构造演化.华东地质学院学报,1995,18(2):135~142.
- 6 魏斯禹等.中国东部大陆边缘地带的岩石圈结构与动力学.北京:科学出版社,1990.21~22页.
- 7 王良书,施央申,恽玲玲,胡德昭,姜永基.东秦岭及邻区深部构造特征和地质构造的关系.南京大学学报(地球科学版),1988,(1):9~17.
- 8 董树文,孙先如,张勇,黄德志,王刚,戴世坤,于邦存.大别山碰撞造山带基本结构.科学通报,1993,38(6):542~545.
- 9 郭福生,辜骏如.大别造山带地壳结构和岩石组成模型的研究.安徽地质,1997,7(4):12~20.
- 10 Fountain D M, Salisbury M H. Exposed cross-section through the continental crust: implications for crustal structure, petrology and evolution. Earth Planet. Sci. Lett., 1981, 56: 263~277.
- 11 Kremenetsky A A, Ovchinnikov L N. The precambrian continental crust: its structure, composition, and evolution as revealed by deep drilling in the U. S. S. R. Precambrian Research, 1986, 33: 11~43.
- 12 王江海,刘武,张元祥.鄂东北大别杂岩中表壳岩系的多期褶皱.中国区域地质,1992,(2):141~145.
- 13 周存亨,汤加富,高天山,童劲松,鲁如魁.大别山地区片麻岩套的建立与成岩时代讨论.安徽地质,1995,5(3):29~40.
- 14 肖益林,李曙光.大别山石马地区榴辉岩 $P-T-t$ 轨迹及其构造意义.大地构造与成矿学,1993,17(3):239~250.
- 15 England P. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. Geol., 1990, 18: 1173~1177.
- 16 Johnson M C. Experimental calibration of the aluminam-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks. Geol., 1989, 17: 837~841.
- 17 马昌前, Carl Ehlers. 华中大别山高压变质地体的形成和差异岩石隆升—剥露:来自火成岩的证据.地球科学,1995,20(5):515~520.
- 18 陈江峰,董树文,邓衍尧,陈移之.大别造山带钾氩年龄的解释——差异上升的地块.地质论评,1993,39(1):17~21.
- 19 李石,王彤.桐柏山—大别山花岗岩类地球化学.武汉:中国地质大学出版社,1991.49~92页.
- 20 管运财,高天山,吴海权.大别山地区(安徽)中生代花岗岩类岩体特征与形成机制.安徽地质,1995,5(3):19~28.
- 21 刘武,张元祥,王江海,周汉文.鄂北大别山地区灰色片麻岩的初步研究.湖北地质,1989,3(1):64~75.
- 22 索书田,桑隆康,韩郁菁,游振东.大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学.武汉:中国地质大学出版社,1993.92~104页.
- 23 徐贵忠,王艺芬.桐柏—大别山造山带碰撞前期的沟—弧—盆系的地质证据.见:徐贵忠,常承法主编.大陆岩石圈构造与资源.北京:海洋出版社,1992.140~159页.
- 24 王江海,游振东,韩郁菁.大别杂岩内角闪质岩石的稀土元素特征及其成因.地球化学,1993,(2):155~162.
- 25 周泰禧,陈江峰,张巽,李学明.北淮阳花岗岩—正长岩带地球化学特征及其大地构造意义.地质论评,1995,41(2):144~151.
- 26 张鹏.北淮阳东段“小溪河组”的解体与构造环境分析.安徽地质,1992,2(3):11~19.
- 27 安徽省地质矿产局区域地质调查队.安徽省变质地质研究.合肥:安徽科学技术出版社,1987.50~66页.
- 28 安徽省地质矿产局.安徽省区域地质志.北京:地质出版社,1987.262~445页.
- 29 河南省地质矿产局.河南省区域地质志.北京:地质出版社,1989.391~597页.
- 30 湖北省地质矿产局.湖北省区域地质志.北京:地质出版社,1990.342~547页.
- 31 吕培基.北淮阳区不同时代侵入岩的研究.合肥工业大学学报,1987,9(1):35~42.
- 32 徐贵忠,郝杰.大别山北麓佛子岭群的特征及其形成的大地构造环境.地质科学,1988,(2):97~109.
- 33 Weaver B L, Tarney J. Major and trace element composition of the continental lithosphere. In: Pallack H N, Murthy V R. Structure and evolution of the continental lithosphere. Pergamon Press, 1984. 39~68.
- 34 Shaw D M, Cramer J J, Higgins M D, Truscott M G. Composition of the Canadian Precambrian Shield and the continental crust of the earth. In: Dawson J B, Carswell D A, Hall J, Wedepohl K H. The nature of the lower continental crust. Oxford: Blackwell Scientific, 1986. 275~282.
- 35 Taylor S R, McLennan S M. The Continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific, 1985. 312.
- 36 黎彤,倪守斌.地球和地壳的化学元素丰度.北京:地质出版社,1990.29~84页.
- 37 Fountain D M. Implications of deep crustal evolution for seismic reflection interpretation. In: Barazangi M, Brown L. Reflection Seismology: the Continental Crust. Geodynamics Series, 1986, 14: 1~7.
- 38 Hall J. Physical properties of Lewisian rocks—implications for deep crustal structure. In: Park R G, Tarney J. Evolution of the Lewisian and Comparable Precambrian High Grade Terrains. Oxford: Blackwell Scientific, 1987. 185~195.
- 39 Drummond B J. A review of crust and upper mantle structure in the Precambrian area of Australia and implications for Precambrian crustal evolution. Precambrian Res., 1988, 40/41: 101~116.

Element Abundances of the Continental Crust in the Dabie Orogenic Belt

Guo Fusheng, Gu Junru, Lin Yinshan

(East China Geological Institute, Linchuan, Jiangxi, 344000, China)

Liu Haiying

(Department of Earth Sciences, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada)

Abstract

The crust in the Dabie orogenic belt has a tectonic form of imbricated plates. The regional crust can be divided into three structural layers, and in the middle crust, there exist a low-velocity layer and a low-electrical resistivity layer. The crust of the orogenic belt has a granodioritic composition, and the deep crustal composition is mediosilicic. The crust is characterized by high Σ REE, a high degree of LREE and HREE fractionation, depletion in ferromagnesian elements and enrichment in lithophile elements in comparison with the values of Weaver and Tarney (1984), Taylor and McLennan (1985), Shaw et al. (1986), and Gao Shan, Zhang Benren et al. (1990). An obvious lateral compositional difference exists inside the orogenic belt, whereas the vertical chemical differentiation from the lower to the upper crust is poorer than that of other well-studied continental crusts.

Key words: crustal structure; element abundance; crustal evolution; Dabie orogenic belt

作者简介

郭福生,男,1962年生。1983年毕业于中山大学地质学系,1996年获硕士学位。现任华东地质学院副教授,主要从事区域地质与铀成矿方向的教学和研究工作。通讯地址:344000,江西省临川市华东地质学院地球科学系。

新书介绍

李俊建,沈宝丰,李双保,毛德宝 著. 清原—夹皮沟绿岩带地质及金的成矿作用. 天津科学技术出版社,1995. 16开,132页,图版3页,定价:12元。清原—夹皮沟是中国典型的太古宙花岗岩—绿岩带和高级区分布区之一。作者划分出两类绿岩带:①以清原绿岩带为代表,原岩主要由拉斑玄武质、安山质和长英质火山岩组成,古构造环境类似现代岛弧和大陆边缘活动带,产大型块状硫化物铜—锌矿和中小型铁矿、金矿;②以夹皮沟绿岩带为代表,原岩主要由拉斑玄武岩和长英质火山岩组成,双峰式特点明显,为大陆裂谷或弧后盆地产物,产大型金矿和铁矿。系统论述了两类绿岩带的地质、地球化学、变质作用及成矿作用特征,测得斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄为 3017.9 ± 20.1 Ma, T_{DM} 达 $3347 \sim 3735$ Ma, 确定清原群底界年龄为 2844 Ma, 有关的花岗质岩石形成于 2500~2600 Ma。认为金成矿有新太古代—古元古代和中生代两期。联系人:300170,天津市大直沽 8 号路天津地质矿产研究所 李俊建。

邱小平,高励,钱会文,李立宝. 冀西北金矿集中区成矿特征. 北京:冶金工业出版社,1996. 16开,231页,定价:22元。冀西北地区有小营盘、东坪等大型、超大型金矿。本书参考前人成果,进行了变质岩石学、矿床学、矿物化学、物理化学、成因矿物学、地球化学、地质年代学等多学科综合研究,认为该区金的成矿

与太古宙深变质绿岩带有着密切的空间关系和物质成分联系。成矿时代主要为印支期—燕山期,金矿质来源于与深变质绿岩地体有关的深源变质热液。联系人:100037,北京阜外百万庄路 26 号中国地质科学院地质研究所,邱小平。

蒋匡仁 著. 地演论. 广东省地图出版社,1996. 16开,388页,定价:38元。作者通过对地球上冷热变化、矿物岩石演化、成矿作用演化、地质构造演化、生物进化以及太阳系在银河系中运动演化的深入研究,指出它们的演化都具有相同的对数螺旋线规律,即: $\rho = ae^{m\varphi}$ 。 ρ 为半径,其值为地质年代, φ 为角度, a 和 m 为正常数。即地质演化的周期在地质年代上是不等时的,而是以 $\varphi = 2\pi$ 为周期。假设第四纪冰期、二叠纪冰期、震旦纪冰期和太古宙末冰期分别对应于 ρ (亿年) 等于 a 、 $a+2.65$ 、 $a+7$ 、 $a+26$, φ 等于 0 、 1π 、 2π 、 4π , 可求得 $a=4.10$, $m=0.158$ 。