

祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属： 来自基性火山岩的地球化学证据

侯青叶¹, 张宏飞¹, 张本仁¹, 赵志丹², 朱云海¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 拉脊山火山岩带位于祁连造山带中部, 通过对该区早古生代基性火山岩系统的地球化学研究, 揭示该区早古生代地幔的性质及其地幔域的构造归属。研究表明, 拉脊山基性火山岩可以分为两类: I类为大陆板内碱性玄武岩, 其稀土元素组成模式为轻稀土富集型, 并具有明显的 Nb、Ta 负异常, 而 Zr、Hf 无明显负异常; II类为与地幔柱活动有关的拉斑玄武岩, 具有洋岛玄武岩(OIB)特征。稀土元素组成模式同样表现为轻稀土富集型, 但其富集程度比 I类基性火山岩的富集程度弱, 无 Nb、Ta、Zr 和 Hf 负异常。基性火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成特征显示, 基性火山岩的地幔源区具有亏损地幔(DM)和第二类富集地幔(EMII)混合的特点, 而第二类富集地幔端元(EMII)占主导地位, 亏损地幔(DM)物质混入的程度较低; 并具有 Dupal 异常的同位素特征。通过与华北南缘、北秦岭和扬子北缘西段地幔的 Pb 同位素组成相比, 表明拉脊山造山带古地幔与北秦岭、南秦岭西段和扬子北缘西段地幔的 Pb 同位素组成相似。进而表明拉脊山造山带古地幔属于扬子型富放射性成因铅地幔, 而非华北型贫放射性成因铅地幔。

关键词: 基性火山岩; 地球化学; 大陆裂谷; 拉脊山; 祁连造山带。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2005)01-0061-10

收稿日期: 2004-11-11

Characteristics and Tectonic Affinity of Lajishan Paleo-Mantle in Qilian Orogenic Belt: A Geochemical Study of Basalts

HOU Qing-ye¹, ZHANG Hong-fei¹, ZHANG Ben-ren¹, ZHAO Zhi-dan², ZHU Yun-hai¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The Early Paleozoic Lajishan volcanic rock belt is located in the middle part of the Qilian orogenic belt. In order to reveal the mantle nature and tectonic affinity of the Lajishan belt, this paper presents a study of the major-trace elements and Pb-Sr-Nd isotopes of the Lajishan basalts. Based on major and trace elemental data, the Lajishan basalts can be divided into two groups: continental alkaline basalts (Group I) and tholeiites basalts (Group II). Group I displays LREE enrichment, distinct Nb and Ta negative anomalies and negligible Zr and Hf anomalies. Group II is characterized by typical OIB basalts with LREE enrichment and no Nb, Ta, Zr and Hf anomalies. The formation of Group II is related to mantle plume. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of basalts indicate that both Group I and Group II were derived from a mixing source between DM and EMII mantle end-members, and have Dupal Pb isotope anomaly. A regional comparison shows that the high radiogenic Pb isotopic composition of the Lajishan basalts is similar to that of the Yangtze block mantle, and is distinctly from that of the North China mantle. This implies that the Lajishan paleo-mantle has an affinity to the Yangtze mantle instead of a part of the south margin of the North China block.

Key words: basalt; geochemistry; continental rift; Lajishan; Qilian orogenic belt.

拉脊山是祁连山造山带中一条近东西向展布的加里东期构造带,它西起日月山,东至民和官亭,全长超过 200 km,宽 10~30 km,两侧被断裂所限(邱家骧等,1997)。杨巍然和邓清禄(2000)根据“开”、“合”的观点,认为拉脊山造山带是在晋宁期陆壳基底之上,由断裂作用形成的一条加里东构造带,并经历了一个完整的“开”、“合”旋回。对拉脊山火山岩及其他有关岩石的地球化学初步研究认为,该区火山岩为一套有限小洋盆的蛇绿岩组合(邓清禄等,1995;邱家骧等,1998;杨巍然等,2000)。而王二七等(2000)通过对拉脊山及其邻区的构造研究认为,拉脊山造山带是一个抬升的构造窗,而不是中祁连结晶地块中早古生代大陆裂谷。因此,已有的研究对拉脊山火山岩所代表的构造性质尚存在着不同的认识,特别是对拉脊山构造带的构造归属还缺乏一定的研究。由于现有对拉脊山基性火山岩的地球化学研究仍显得较为薄弱,因此,本文提供新的拉脊山基性火山岩主量元素、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素资料,据此揭示拉脊山基性火山岩的地球化学特征和岩石成因,进而限定古地幔的组成特征及其归属。

1 区域地质背景及样品情况

拉脊山位于祁连造山带的中祁连构造单元,其南、北两侧分别与前寒武纪结晶基底呈断层接触(邱家骧等,1997;杨巍然等,2000)。拉脊山主体为早古生代(主要为寒武纪)的火山岩,其中,少量分布有早古生代早期的纯橄岩、辉橄岩、辉石岩、辉长辉绿岩和晚期的斜长花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、闪长岩等(图 1)。

基性火山岩样品主要采自 Pm109, 139, 140 和 107 剖面(图 1)。样品 WQ-315、WQ-319、WQ-320 和 WQ-323 为枕状玄武岩,枕大小从 10 cm×20 cm 到 50 cm×80 cm 不等,其余样品均为致密块状玄武岩。玄武岩一般都发生了低绿片岩相变质作用,呈暗绿、灰绿色;岩石具有变余斑状结构,斜长石斑晶一般都绢云母化、绿泥石化、黝帘石化及钠长石化,部分岩石的斜长石斑晶中保留原生基性斜长石的残余。辉石斑晶的蚀变矿物有绿泥石、绿帘石、阳起石、碳酸盐等。基质矿物有绿泥石、绿帘石、阳起石、黄铁矿等。

2 样品分析方法

样品无污染粉碎至 200 目以下在西北大学大陆动力学实验室完成。主量元素测定由中国科学院地质与地球物理所用 XRF 方法完成,精度优于 5%;微量元素由中国科学院地质与地球物理所用 ICP-MS 测定,精度优于 10%。样品的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素测量在中国科学院地质与地球物理所 MAT-262 质谱仪上进行,Sr 和 Nd 同位素的分馏校正分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 。在分析期间,JMC 标准给出的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值为: $0.511937\pm 10(2\sigma)$;BCR-1 标准给出的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值为 0.512594 ± 10 。NBS987 标准测定的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为: 0.710217 ± 11 。样品的 Pb 同位素测量在中国地质科学院 MAT-262 质谱仪上进行,NBS981 的测定值为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.934\pm 1$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.486\pm 1$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.673\pm 3$,铅同位素比值精度优于 0.05%。样品的测试结果见表 1、表 2 和表 3。

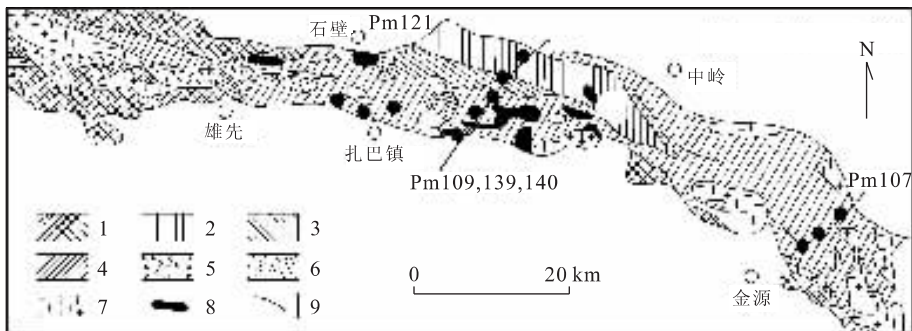


图 1 拉脊山造山带地质简图(邱家骧等,1997)

Fig. 1 Sketch geological map of Lajishan orogenic belt

1. 前寒武系; 2. 下奥陶统; 3. 中奥陶统; 4. 上奥陶统; 5. 下白垩统; 6. 中、上奥陶统; 7. 中酸性侵入岩; 8. 基性、超基性侵入岩; 9. 断层; 图中黑色实心圆圈为示意的采样位置点。Pm109、139、140、107 为采样剖面

表 1 拉脊山 I 类基性火山岩常量元素和微量元素组成

Table 1 Geochemical composition of basalts (Group I) from Lasjishan orogenic belt

样品	WQ-315	WQ-320	WQ-323	32500	35501	32509
岩性	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
SiO ₂	51.66	42.28	45.18	50.51	48.57	47.81
TiO ₂	1.04	2.24	0.87	0.84	1.21	0.68
Al ₂ O ₃	16.92	14.24	17.19	13.34	16.87	16.94
Fe ₂ O ₃	5.75	12.35	5.91	1.87	7.57	2.71
FeO	1.79	2.53	6.46	6.32	2.65	4.02
MnO	0.10	0.17	0.21	0.13	0.05	0.12
MgO	4.85	4.89	6.28	8.66	4.18	4.51
CaO	3.78	8.64	4.69	8.54	5.11	5.98
Na ₂ O	6.13	4.36	3.65	1.70	1.34	3.23
K ₂ O	1.12	1.38	1.90	3.97	4.62	2.34
P ₂ O ₅	0.27	0.46	0.24	0.51	0.43	0.14
LOI	6.65	6.32	7.25	3.27	7.21	11.31
Total	92.51	84.98	87.46	99.66	99.81	99.79
Be	1.03	1.30	0.58	1.71	1.02	2.24
Sc	18.50	18.90	31.00	34.10	37.90	24.00
V	105.00	246.00	336.00	207.00	105.00	177.00
Ni	74.00	203.00	43.00	167.00	70.00	23.00
Rb	13.95	15.57	29.31	227.00	87.20	95.26
Sr	305.00	517.00	355.00	404.00	102.00	284.00
Zr	112.00	200.00	45.60	142.00	137.00	102.00
Nb	13.21	13.08	4.00	10.60	11.00	4.73
Cs	0.71	2.13	1.34	1.44	6.95	3.31
Ba	247.10	310.40	592.30	167.20	536.80	400.40
Hf	3.07	4.47	1.50	3.72	3.29	2.98
Ta	0.92	0.53	0.25	0.67	0.60	0.40
Pb	13.78	3.42	3.41	9.44	11.82	18.77
Th	5.22	2.09	3.51	8.25	12.69	7.63
U	1.09	0.50	0.70	2.10	1.44	2.20
La	23.33	21.70	14.12	24.10	24.50	18.10
Ce	43.09	46.33	31.24	49.60	51.30	37.00
Pr	5.07	5.92	4.19	6.49	7.16	4.77
Nd	19.51	25.17	18.70	24.60	28.30	18.20
Sm	4.19	5.58	5.03	4.19	5.68	3.96
Eu	1.25	2.04	1.34	1.25	1.52	0.80
Gd	3.44	6.02	4.42	4.60	5.18	3.62
Tb	0.54	0.85	0.64	0.49	0.82	0.58
Dy	3.04	4.66	3.33	3.11	5.03	3.43
Ho	0.64	0.87	0.64	0.58	1.12	0.76
Er	1.81	2.31	1.72	1.60	3.13	2.23
Tm	0.26	0.31	0.24	0.24	0.50	0.35
Yb	1.68	1.92	1.51	1.52	3.55	2.46
Lu	0.25	0.26	0.25	0.22	0.52	0.35
Y	16.00	19.80	15.60	16.50	29.80	20.70

注: 常量元素单位为%, 微量元素单位为 10⁻⁶.

3 岩石地球化学特征

根据拉脊山基性火山岩主量元素和微量元素的组成特征, 可将基性火山岩分为两类, 分别以 I 类玄

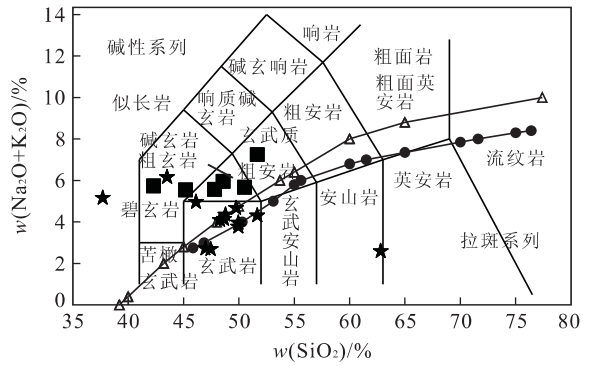


图 2 拉脊山基性火山岩 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ (TAS) 图解 (Le Maitre et al., 1989)

Fig. 2 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ (TAS) diagram of basalts in Lajishan orogenic belt

实心方块代表 I 类基性火山岩; 五角星代表 II 类基性火山岩; 实心圆圈曲线和三角形曲线为碱性玄武岩系列和拉斑玄武岩系列的分界线 (Kuno, 1968; Irvine and Baragar, 1971)

武岩和 II 类玄武岩表示.

3.1 主量元素

I 类玄武岩: 样品为 WQ-315、WQ-320、WQ-323、32500、35501 和 32509. 其常量元素特征为: SiO₂ 的变化范围为 42.28%~51.66% (平均值为 47.67%), TiO₂ 的变化范围为 0.68%~2.24% (平均值为 1.15%), Al₂O₃ 的变化范围为 13.34%~17.19% (平均值为 15.92%), $\sum\text{FeO}$ 的变化范围为 6.46%~13.65% (平均值为 9.39%), MgO 的变化范围为 4.18%~8.66% (平均值为 5.56%), Na₂O+K₂O 的变化范围为 5.55%~7.25% (平均值为 5.96%), 在全碱硅图 (TAS) (图 2) 中, 样品落入了碱性系列中, 表明该类玄武岩为碱性玄武岩.

II 类玄武岩: 样品为 WQ-313、WQ318、WQ319、32485、32486、32488、32491、32504、32505、32506、32507、32508 和 32511. 除 WQ-313 的 SiO₂ 含量偏高 (62.81%) 可能为安山岩外, 其他样品的常量元素组成特征为: SiO₂ 的变化范围为 37.69%~51.65% (平均值为 47.39%), TiO₂ 的变化范围为 0.61%~2.76% (平均值为 1.83%), Al₂O₃ 的变化范围为 12.03%~16.50% (平均值为 14.55%), $\sum\text{FeO}$ 的变化范围为 7.91%~14.20% (平均值为 10.31%), MgO 的变化范围为 3.83%~7.46% (平均值为 6.13%), Na₂O+K₂O 的变化范围为 2.69%~6.16% (平均值为 4.25%), 在全碱硅图 (TAS) (图 2) 中, 样品大多数落入拉斑系列, 表明该

表 2 拉脊山 II 类基性火山岩常量元素、微量元素组成

Table 2 Geochemical composition of basalts (Group II) from Lasjishan orogenic belt

样品 岩性	WQ-313 安山岩	WQ-318 玄武岩	WQ-319 玄武岩	32485 玄武岩	32486 玄武岩	32488 玄武岩	32491 玄武岩	32504 玄武岩	32505 玄武岩	32506 玄武岩	32507 玄武岩	32508 玄武岩	32511 玄武岩
SiO ₂	62.81	37.69	43.51	48.78	49.74	46.12	48.65	46.97	47.44	48.28	51.65	49.94	49.94
TiO ₂	0.62	1.96	2.30	1.40	1.80	2.35	2.76	1.49	1.68	1.84	2.30	1.42	0.61
Al ₂ O ₃	12.74	12.03	14.44	16.50	15.79	14.34	13.09	15.54	15.00	13.55	14.07	15.19	15.04
Fe ₂ O ₃	2.93	13.43	10.10	2.19	2.31	3.68	2.95	3.99	2.64	2.00	2.12	3.18	2.59
FeO	5.59	2.12	2.45	6.25	8.05	5.98	8.32	5.93	8.42	9.30	7.85	7.48	5.58
MnO	0.12	0.20	0.13	0.15	0.19	0.17	0.18	0.13	0.16	0.18	0.14	0.20	0.13
MgO	6.30	3.83	5.16	7.09	6.57	5.74	5.78	5.98	6.45	7.46	6.16	6.81	6.53
CaO	2.30	13.65	7.21	9.43	6.45	11.12	9.82	12.51	10.27	8.38	7.41	8.86	10.16
Na ₂ O	2.54	4.13	4.46	2.92	4.46	2.89	3.47	2.51	2.47	3.72	4.19	3.43	3.53
K ₂ O	0.05	1.03	1.70	1.43	0.21	2.07	0.67	0.21	0.22	0.37	0.12	0.53	0.24
P ₂ O ₅	0.10	0.41	0.47	0.19	0.21	0.46	0.25	0.17	0.18	0.23	0.28	0.16	0.47
LOI	3.25	9.61	8.00	3.48	4.06	4.83	3.81	4.37	4.88	4.49	3.49	2.52	5.01
Total	90.83	84.54	87.38	99.81	99.84	99.75	99.75	99.80	99.81	99.80	99.78	99.72	99.83
Be	0.07	1.16	1.41	0.76	0.74	1.17	0.94	0.51	0.67	0.71	0.83	0.79	2.59
Sc	17.40	21.40	23.80	28.00	38.00	27.40	26.70	30.00	37.20	33.50	27.50	42.20	33.50
V	207.00	259.00	258.00	198.00	257.00	226.00	370.00	205.00	255.00	232.00	231.00	276.00	259.00
Ni	26.00	290.00	115.00	71.00	59.00	55.00	103.00	68.00	51.00	89.00	79.00	48.00	51.00
Rb	0.03	12.78	21.70	57.80	4.51	38.60	12.22	2.62	3.01	3.89	1.88	10.12	7.50
Sr	86.00	345.00	422.00	257.00	235.00	653.00	393.00	457.00	290.00	22.00	417.00	305.00	168.00
Zr	51.20	126.00	182.00	114.00	149.00	190.00	180.00	100.00	122.00	134.00	161.00	110.00	84.50
Nb	1.04	19.55	26.08	6.58	7.70	25.90	21.00	9.72	10.50	12.20	17.30	6.58	6.75
Cs	0.02	2.29	3.17	0.49	0.088	0.89	0.33	0.11	0.29	0.14	0.23	2.25	0.30
Ba	23.60	177.60	329.50	136.80	87.30	647.80	225.10	87.90	87.30	152.50	107.60	149.70	185.70
Hf	2.12	3.24	4.38	2.85	3.65	4.57	5.00	2.64	3.18	3.55	4.15	2.82	2.34
Ta	0.07	1.27	1.54	0.48	0.55	1.84	1.49	0.69	0.69	0.88	1.23	0.48	0.51
Pb	0.70	2.62	2.82	13.80	10.91	4.06	30.67	7.97	9.33	6.03	9.99	15.32	8.61
Th	0.45	1.68	2.08	0.78	0.98	2.46	2.43	0.98	0.94	1.02	1.54	1.35	7.96
U	0.24	0.39	0.43	0.27	0.37	0.66	0.63	0.30	0.28	0.30	0.47	0.35	3.85
La	2.84	19.89	23.58	6.92	8.25	25.20	22.30	8.81	9.94	11.20	17.10	8.36	14.90
Ce	7.67	39.55	47.12	18.20	22.20	53.90	52.50	21.00	23.20	26.10	37.10	19.20	31.00
Pr	1.23	5.27	6.29	2.84	3.45	7.50	7.60	3.06	3.50	3.90	5.35	2.94	4.14
Nd	6.34	21.78	26.13	12.80	15.80	30.90	33.00	13.40	15.70	17.40	22.80	13.30	16.20
Sm	2.11	5.29	6.31	3.40	4.56	6.40	7.05	3.68	4.38	4.68	5.82	4.02	3.33
Eu	0.61	1.59	1.79	1.23	1.59	2.25	2.24	1.15	1.42	1.44	1.83	1.21	0.89
Gd	2.77	4.68	5.42	3.83	4.95	5.81	6.48	3.62	4.41	4.61	5.18	4.10	3.09
Tb	0.51	0.69	0.80	0.68	0.92	0.78	0.93	0.59	0.76	0.78	0.85	0.77	0.44
Dy	3.45	3.60	4.26	4.53	5.85	4.24	5.34	3.56	4.64	4.64	4.71	4.58	2.28
Ho	0.76	0.65	0.80	0.99	1.27	0.74	1.04	0.77	0.99	1.02	0.97	1.11	0.50
Er	2.17	1.69	2.02	2.75	3.39	1.80	2.61	1.91	2.52	2.56	2.48	2.98	1.33
Tm	0.33	0.22	0.28	0.42	0.50	0.24	0.36	0.29	0.37	0.38	0.34	0.43	0.19
Yb	2.16	1.34	1.52	2.65	3.29	1.43	2.15	1.86	2.50	2.38	2.01	2.88	1.32
Lu	0.33	0.19	0.22	0.41	0.51	0.21	0.30	0.28	0.37	0.38	0.30	0.41	0.19
Y	19.10	17.20	20.00	25.80	33.80	19.10	25.20	18.80	25.70	25.20	24.00	27.00	12.90

注: 常量元素单位为%, 微量元素单位为 10⁻⁶.

类玄武岩为拉斑玄武岩.

3.2 微量元素

I 类样品的球粒陨石标准化稀土元素分配模式表现出轻稀土富集型(图 3a), 其 $(La/Yb)_N$ 的变化范围为 4.69~10.73(平均值为 7.32), $(La/Sm)_N$

的变化范围为 1.75~3.59(平均值为 2.80), 仅有 32509 样品表现出明显的负 Eu 异常, 其 δEu 为 0.64, 其他样品无明显的负 Eu 异常, 其 δEu 的变化范围为 0.84~1.07(平均值为 0.92). II 类样品中 WQ-313 的球粒陨石标准化稀土元素分配模式表

表 3 拉脊山基性火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成

Table 3 Sr, Nd, Pb isotope compositions of basalts in Lajishan orogenic belt

样品号	WQ-313	WQ-315	WQ-318	WQ-319	WQ-320	WQ-323	1*	2*
Sm/ 10^{-6}	2.35	4.34	4.83	5.71	6.05	5.59		
Nd/ 10^{-6}	7.10	22.07	43.79	27.49	27.79	22.45		
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.2001	0.1190	0.0667	0.1258	0.1318	0.1507		
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.513021±11	0.512521±12	0.512767±14	0.512263±5	0.512454±14	0.512522±14		
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	0.512352	0.512123	0.512544	0.511842	0.512014	0.512019		
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	+7.469	-2.3	+2.5	-7.3	-3.6	-2.3		
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	+7.259	+2.8	+11.0	-2.7	+0.6	+0.7		
Rb/ 10^{-6}	0.3	14.2	12.2	20.4	16.2	28.4		
Sr/ 10^{-6}	81.7	336.2	313.2	381.3	66.6	304.7		
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.0104	0.1216	0.1122	0.1544	0.7129	0.2676		
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70602±2	0.70629±1	0.70551±1	0.70607±2	0.70724±1	0.70687±2		
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.70595	0.70541	0.70470	0.70495	0.70206	0.70493		
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	19.879±2	18.482±1	18.413±1	18.333±1	18.260±2	19.228±1	18.003	18.106
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.669±1	15.667±1	15.612±1	15.616±1	15.613±2	15.709±1	15.596	15.602
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	39.011±4	38.584±2	38.869±2	39.045±1	38.783±2	39.830±3	38.253	38.317
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	18.056	18.068	17.623	17.534	17.495	18.125		
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	15.564	15.644	15.566	15.570	15.569	15.646		
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	37.908	37.947	37.788	37.798	37.754	38.048		
$\Delta^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	11.6	19.4	16.5	17.8	18.1	19.0	15.3	14.8
$\Delta^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	45.2	47.6	85.6	97.2	97.5	50.8	86.0	80.0

注: $t=510\text{ Ma}$; 带 * 号的数据引自邱家骥等(1997).

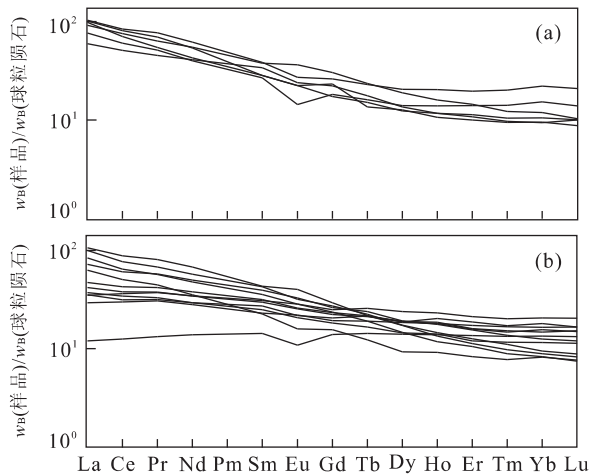


图 3 拉脊山基性火山岩球粒陨石标准化稀土元素组成

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of basalts from Lajishan orogenic belt

球粒陨石 REE 组成参考 McDonough and Sun, 1995

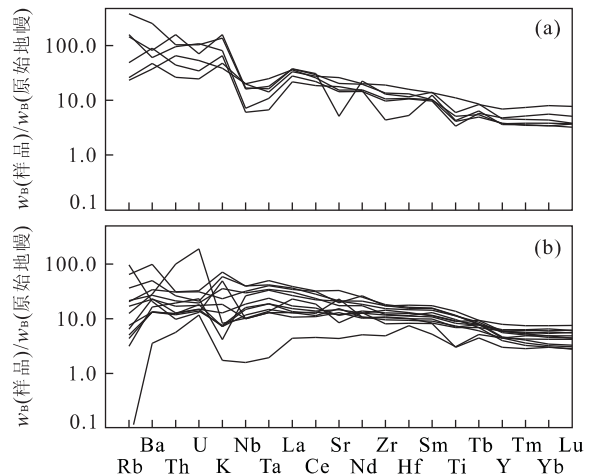


图 4 拉脊山基性火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图解

Fig. 4 Primary mantle-normalized trace element patterns of basalts from Lajishan orogenic belt

原始地幔微量元素组成参考 McDonough and Sun, 1995

现出轻稀土亏损型, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 0.89; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 0.84, 其余样品稀土元素分配模式表现出轻稀土富集型(图 3b), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的变化范围为 1.70~11.98(平均值为 5.64), $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 的变化范围为 1.13~2.80(平均值为 1.82), 样品无明显的负 Eu 异常, δEu 的变化范围为 0.83~1.11(平均值为 0.97). 可以看出, I 类基性火山岩的轻稀土比 II 类

基性火山岩更加富集; 轻重稀土的分异程度更大.

I 类基性火山岩样品在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4a)上, 总体上表现出强不相容元素相对于相容元素富集的趋势, K_2O 呈现正异常, 可能是由于岩石发生绿片岩相变质作用, 使得 K_2O 含量增加的缘故; 高场强元素(HFSE)相对于大离子亲石元素(LILE)而言, 具有明显的 Nb、Ta 负异常,

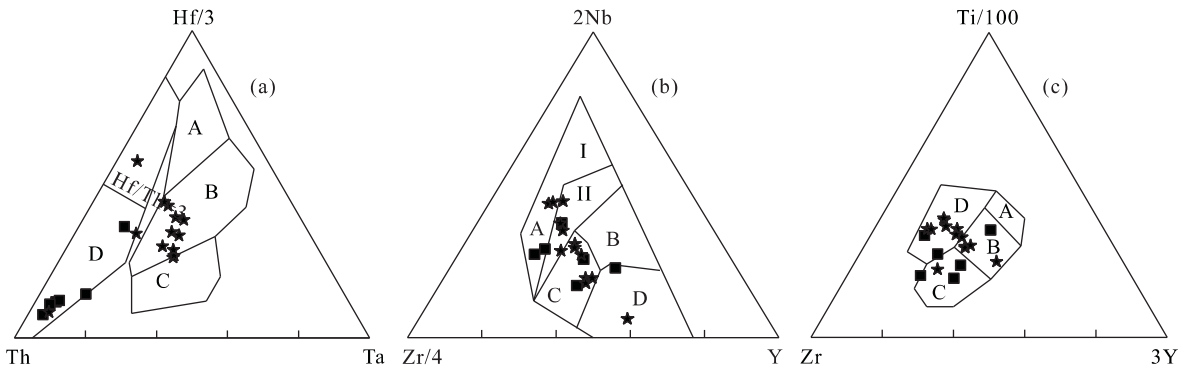


图 5 拉脊山基性火山岩 Th-Hf-Ta (a)、2Nb-Zr/4-Y (b)、Ti/100-Zr-3Y (c)构造环境判别图解

Fig. 5 Th-Hf-Ta (a), 2Nb-Zr/4-Y (b) and Ti/100-Zr-3Y (c), discrimination diagrams of basalts in Lajishan orogenic belt a 图据 Wood (1980); A. N-MORB; B. E-MORB 和板内玄武岩; C. 板内碱性玄武岩; D. 岛弧玄武岩; 实心方块代表 I 类基性火山岩; 五角星代表 II 类基性火山岩; b 图据 Meschede (1986); A I. 板内碱性玄武岩; A II. 板内碱性玄武岩, 板内拉斑玄武岩; B. E-MORB; C. 板内拉斑玄武岩, 岛弧玄武岩; D. N-MORB; c 图据 Pearce and Cann (1973); A. 岛弧拉斑玄武岩; B. MORB; C. 钙碱性玄武岩; D. 板内玄武岩; 实心方块代表 I 类基性火山岩; 五角星代表 II 类基性火山岩

Zr、Hf 除 WQ-320 表现出明显的负异常外, 其他样品均无明显的负异常, TiO_2 正负异常都有所表现, 由此表明该类玄武岩为大陆碱性玄武岩。II 类基性火山岩样品在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)上, 总体上也表现出强不相容元素相对于相容元素富集的趋势, 但是其富集程度明显弱于 I 类基性火山岩, 从而也说明虽然在低绿片岩相变质作用过程中强不相容元素会发生改变, 但其总体趋势仍能反映原岩的特征。高场强元素(HFSE)相对于大离子亲石元素(LILE)而言, 无 Nb、Ta、Zr、Hf 负异常, TiO_2 具有正异常, 反映该类玄武岩为大洋拉斑玄武岩。

在 Th-Hf-Ta 图解(图 5a)中, I 类基性火山岩落入了 D 区 $\text{Hf}/\text{Th} < 3$ 区域内, 表现出大陆板内钙碱性玄武岩的特征; II 类基性火山岩大多数落入了 B 区内, 表现出 E-MORB 和板内玄武岩的特征。在 2Nb-Zr/4-Y 构造环境判别图解(图 5b)中, 两类基性火山岩大多数都落入了 A 和 C 区, 表现大陆板内玄武岩的特征。而 WQ-313 落入了 N-MORB 区域内, 结合其轻稀土亏损的特征, 表明该样品可能是亏损上地幔部分熔融的产物。在 Ti/100-Zr-3Y 构造环境判别图解(图 5c)中, I 类基性火山岩落入了 C 和 D 区域内, 表现出板内钙碱性玄武岩的特征; II 类基性火山岩落入了 D 和 B 区域内, 表现出地幔柱玄武岩的特征。综合两类基性火山岩的稀土元素、微量元素特征及构造环境判别结果, 可知: I 类基性火山岩为大陆板内碱性玄武岩, II 类基性火山岩为与地幔柱活动有关的具有洋岛玄武岩

(OIB)特征的拉斑玄武岩。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素特征

拉脊山基性火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成见表 3。I 类基性火山岩和 II 类基性火山岩的 Sr-Nd-Pb 特征表现相似, 在此一并作讨论。样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的范围较大, 其变化范围为 0.512 263~0.513 021, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高, 其变化范围为: 0.705 51~0.707 24; Pb 同位素组成表现出富放射成因的 Pb 同位素组成, 其中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.003 \sim 19.879$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.596 \sim 15.709$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.253 \sim 39.830$ 。由于拉脊山玄武岩形成于晚寒武纪(邱家骧等, 1997; 杨巍然和邓清禄, 2000), 这里取 $t = 510 \text{ Ma}$, 计算它们的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值。结果表明, 基性火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 变化范围较大, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.7 \sim +11.0$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.702 06 \sim 0.705 41$ 。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 图解中基性火山岩表现出洋中脊玄武岩(MORB)与大陆板内玄武岩混合趋势(图略), 但主要显示出大陆板内玄武岩的特征。

在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解(图 6a)中, 样品落在了亏损地幔(DM)和第 II 类富集地幔(EM II)的混合趋势线上, 大致构成了正相关趋势。在 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解(图 6b)中, 样品同样也落在了亏损地幔(DM)和第 II 类富集地幔(EM II)的混合趋势线上, 大致构成了负相关趋势。从而表明该区玄武岩的源区为亏损地幔(DM)和第 II 类富集地幔(EM II)。

将经时间校正后的 Pb 同位素比值, 按 Hart

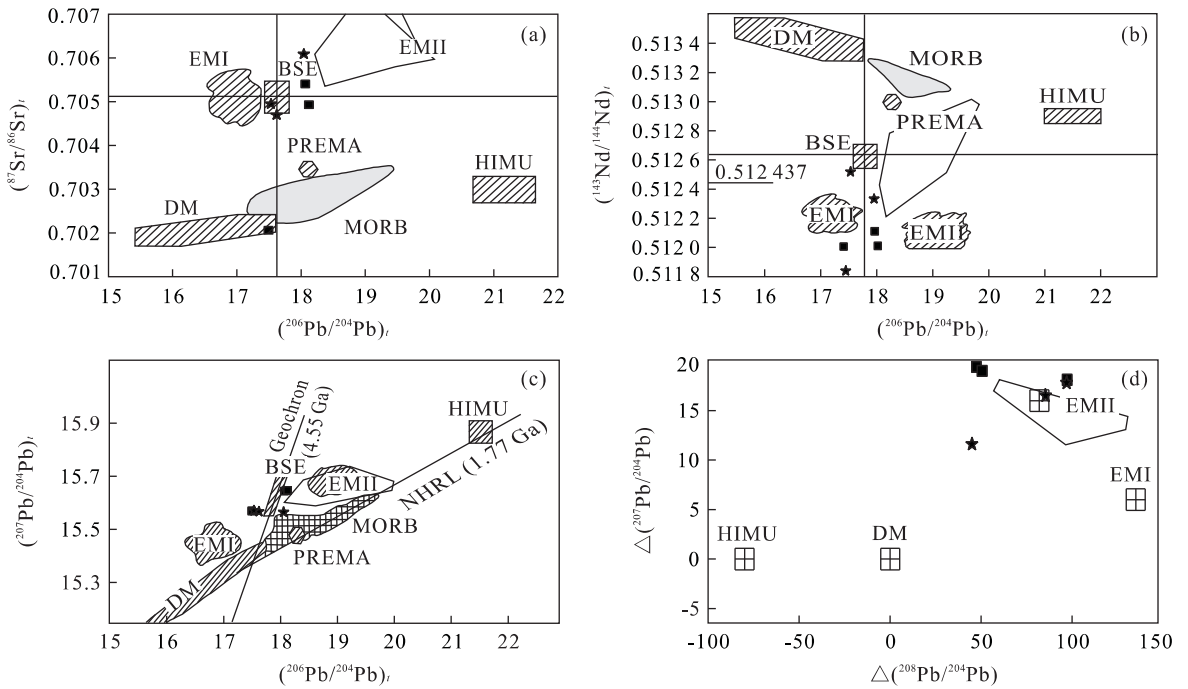


图 6 拉脊山基性火山岩 Sr, Nd, Pb 同位素判别图解(Rollison, 1993)

Fig. 6 Sr, Nd, Pb isotopic diagram of basalts in Lajishan orogenic belt

DM 亏损地幔; EMI 第一类富集地幔; EM II. 第二类富集地幔; HIMU. 高 U/Pb 比值地幔; BSE. 全硅质地幔; PREMA. 流行地幔; 图中黑色虚线表示基性火山岩现代值的落点范围; 实心方块代表 I 类基性火山岩; 五角星代表 II 类基性火山岩

(1984) 计算 Pb 同位素异常的计算公式计算样品 $\Delta(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 、 $\Delta(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$. 计算结果表明, 样品的 $\Delta(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 变化范围为 13.6~17.9 (平均值为 15.4), 样品的 $\Delta(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 变化范围为 57.6~117.7 (平均值为 91.6). 表明样品具有典型的 Dupal 端元的铅同位素 [$\Delta(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) > 60$] 特征. 在 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解中 (图 6c), 样品同样也落在了亏损地幔 (DM) 和第 II 类富集地幔 (EM II) 的混合趋势线上, 并且明显偏向第 II 类富集地幔 (EM II). 在 $\Delta(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - \Delta(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 图解 (图 6d) 中, 样品全部落在了第 II 类富集地幔 (EM II) 附近.

4 古地幔特征及其归属

以上拉脊山基性火山岩系统的地球化学特征, 表明该区存在两种类型的基性火山岩: I 类为大陆板内碱性玄武岩, II 类为与地幔柱活动有关的拉斑玄武岩, 具有 OIB 玄武岩特征. 基性火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成研究表明, 玄武岩的地幔源区具有亏损地幔 (DM) 和第二类富集地幔端元 (EM II) 混合的特点, 但 EM II 地幔端元占主导地位, 而亏损地

幔物质影响较小; 并且岩石具有 Dupal 型同位素异常特征.

朱炳泉等 (1998)、朱炳泉和常向阳 (2001) 根据中国大陆各种类型壳、幔源岩石和矿石的大量铅-铋-钷同位素资料, 以及全球特别是东亚大陆块体广泛的同位素与元素体系对比, 发现中国东部几个重要构造块体的壳、幔在 Pb 同位素组成方面具有明显和规律性的差异; 一个块体内部壳幔的同位素组成之间具有耦合关系, 指出扬子陆块的壳幔一致以明显富放射成因铅而区别于华北陆块的壳和幔. 张理刚 (1995) 还根据中生代花岗岩长石的 Pb 同位素组成变化, 在各个构造铅同位素省内进一步划分亚省, 其中扬子内各亚省的 Pb 同位素组成差异明显. 张本仁等 (2003) 对秦岭造山带及相邻两陆块区开展 Pb 同位素填图成果表明华北陆块南缘、北秦岭、南秦岭、扬子陆块北缘壳幔源岩石的铅同位素组成也存在差异, 并且这种差异至少自古元古代一直保持到中生代. 具体规律是: 华北陆块南缘显示低的 Pb 同位素比值; 扬子陆块北缘总体上显示较富放射性成因 Pb 的同位素组成特征, 其西段较东段上地幔较富放射性成因铅; 南秦岭西段也较东段明显富放射性成因铅; 北秦岭全部岩石一致显示十分

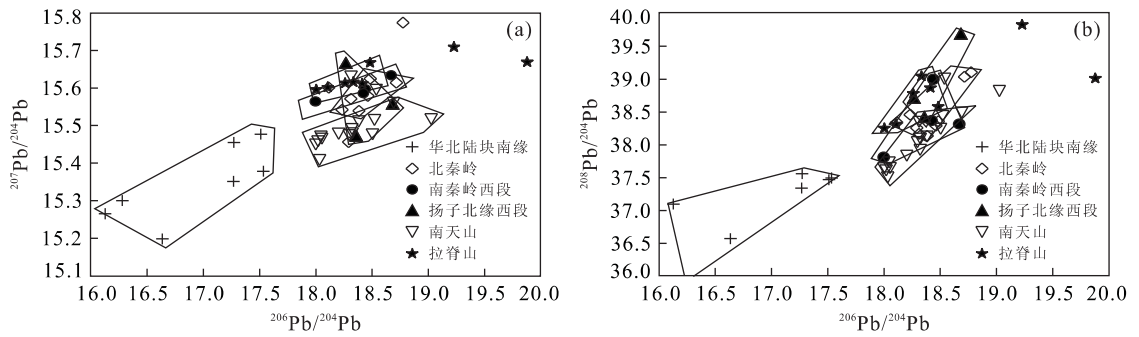


图 7 拉脊山与周缘不同地质单元内玄武岩 Pb 同位素对比

Fig. 7 Comparison of Pb isotopic compositions of basalts between Lajishan and different geological units in adjacent area

资料来源于胡云鹏等(1989)、解广轰等(1989)、李英和任崔锁(1990)、王寿琼(1993)、张旗等(1995)、张本仁等(2003)、夏林圻等(2004)

富集放射性成因铅的特征, Pb 同位素比值接近扬子北缘西段和南秦岭西段的 Pb 同位素比值(张本仁等, 2003). 前人的研究成果为我们判断拉脊山古地幔的构造归属, 即与扬子和华北陆块的关系以及与东秦岭造山带内不同地质单元地幔的关系提供了基础. U—Pb 系统中绝大部分²³⁵U 已在地球历史早期通过放射性衰变而几近消失, 因而²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 现代比值基本可以代表岩石形成时的初始比值, 尤其对于显生宙的岩石更为适用(Hamelin *et al.*, 1984; 邢光福, 1997). 因此, 本文将拉脊山基性火山岩现代的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值与其周缘不同地质单元内玄武岩的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值直接进行对比(图 7), 以确定拉脊山古地幔的归属. 拉脊山基性火山岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 的变化范围为 15.602~15.709; 明显高于华北陆块南缘玄武岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值(15.198~15.490); 同时也明显高于北祁连造山带北侧天山石炭纪基性火山岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值的范围(15.384~15.619)(夏林圻等, 2004). 拉脊山基性火山岩与北秦岭、南秦岭西段和扬子北缘西段玄武岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值相比较, 它们的变化范围大致相近, 但也存在细微的差异. 其²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值略高于扬子陆块北缘西段玄武岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值范围(15.473~15.667); 也略高于南秦岭西段玄武岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值范围(15.564~15.634)而与北秦岭玄武岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值范围 15.456~15.774 非常相近(图 7a). 在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值方面(图 7b), 拉脊山基性火山岩²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值的范围均明显高于华北南缘玄武岩和天山石炭纪基性火山岩 Pb 同位素相应比值, 同时拉脊山基性火山岩与北秦岭玄武岩、扬子陆块北缘西段和南秦岭西段玄武岩 Pb 同位素相应比值的范围也彼此十分

相近(图 7b). 根据北秦岭在壳幔富放射性成因铅、壳幔源岩石地球化学特征以及地壳主体形成于元古宙等方面均与扬子陆块和南秦岭相同, 曾得出了北秦岭在新元古之前属于扬子陆块的结论(张本仁等, 2003). 因此, 我们初步认为拉脊山古地幔也应属于扬子类型地幔, 而非华北型地幔. 然而关于拉脊山块体究竟应与东秦岭造山带内的北秦岭带相对比, 还是应与扬子北缘和南秦岭西段相对比的问题, 仅根据目前的资料尚难以确定, 这是需要今后通过进一步研究解决的科学问题.

5 结论

(1) 拉脊山造山带内基性火山岩可以分为两大类: 一类为大陆板内碱性玄武岩, 另一类为与地幔柱活动有关的具有洋岛玄武岩特征的拉斑玄武岩, 它们在主要元素和微量元素组成部分上存在系统差异. (2) 玄武岩的 Sr、Nd、Pb 同位素特征研究表明: 玄武岩的地幔源区具有亏损地幔(DM)和第二类富集地幔(EM II)混合的特点, 但第二类富集地幔端元占主导地位, 而亏损地幔物质参与程度较低, 具有 Dupal 型异常的同位素组成特征. (3) 通过与华北南缘、天山、北秦岭、南秦岭西段和扬子北缘西段玄武岩的 Pb 同位素组成对比, 初步认为拉脊山古地幔也应属于扬子型富放射性成因铅地幔, 而非华北型贫放射性成因铅地幔.

中国科学院地质与地球物理研究所新新娣研究员、陈福坤研究员、储署银博士、李潮峰实验员曾在实验室工作方面给过很大的帮助和支持. 部分问题曾和宋述光博士、殷鸿福院士做过有益的讨论, 吴汉泉研究员、张利在野外工作中提供了很大的帮助, 在

此一并表示感谢。

References

- Deng, Q. L., Zhou, Y., Yang, W. R., 1995. Lithogeochemical sign of the opening-closing evolution of the volcanic rock basin in the Laji Mountains in Early Palaeozoic era. *Northwest Geoscience*, 16(1): 84—91 (in Chinese with English abstract).
- Hamelin, B., Dupre, B., Allegre, C. J., 1984. The lead isotope systematic of ophiolite complexes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67: 351—366.
- Hart, S. R., 1984. A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753—757.
- Hu, Y. P., Wang, Y. L., Xu, H. M., et al., 1989. Stable isotopic study on the TieLuzi zinc-gold deposit, Shangxian County. *Shaanxi Geology*, 7(1): 56—76 (in Chinese).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8: 523—548.
- Kuno, H., 1968. Differentiation of basalt magmas. In: Hess, H. H., Poldervaart, A., eds., *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*, Vol. 2. Interscience, New York, 623—688.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Oxford.
- Li, Y., Ren, C. S., 1990. Evolution of Pb isotopic compositions of the south margin of North China block. *Journal of Xi'an Geological Academy*, 13(2): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- McDonough, W. F., Sun, S., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120: 223—253.
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 20—218.
- Pearce, J. A., Cann, G. H., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19: 339—349.
- Qiu, J. X., Zeng, G. C., Zhu, Y. H., et al., 1998. Characteristics and latitudinal comparative research on the Early Palaeozoic volcanic rocks of rifted orogenic belt and small ocean basin ophiolites suit from northern Qinling Mountains and southern Qilian Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 393—405 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. X., Zeng, G. C., Zhu, Y. H., et al., 1997. Early-Paleozoic volcanic rocks and metallogeny in Lajishan orogenic belt. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—2 (in Chinese).
- Rollison, H. R., 1993. Using geochemical data: Presentation, interpretation. Longman Scientific & Technical Limited, 186—187.
- Wang, E. Q., Zhang, Q., Burchfiel, C. B., 2000. The Lajishan fault belt in Qinghai Province: A multi-staged unlifting structural window. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 493—500 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Q., 1993. Proterozoic of Wudang area. *Hubei Geology*, 7: 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wood, D. A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 11—30.
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. *Geological Bulletin of Chinese*, 23(9—10): 903—910 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. H., Wang, J. W., Liu, C. Q., 1989. Petrology, isotopic compositions of Hannuoba basalts and Datong volcanic rocks. *Geochemistry of China*, 4: 277—286 (in Chinese with English abstract).
- Xing, G. F., 1997. The concept, genesis and geological significance of Dupal isotopic anomaly. *Volcanic Geology and Mineral Resource*, 18(4): 281—291 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Y., Deng, Q. L., Wu, X. L., 2000. Faulting of Lajishan orogenic belt and its relationship to volcanic rocks and ophiolites. *Geological Science and Technology Information*, 19(6): 5—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. R., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2003. Geochemistry of Qinling orogenic belt. Science Press, Beijing, 37—41 (in Chinese).
- Zhang, L. G., 1995. Geology of East-Asian lithosphere-isotopic geochemistry of upper mantle, basement and granite and geodynamics. Science Press, Beijing, 1—252 (in Chinese).
- Zhang, Q., Zhang, Z. Q., Sun, Y., et al., 1995. Trace element and isotopic geochemistry of metabasalts from Danfeng Group (DFG) in Shangxian-Danfeng area, Shaanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 11(1): 43—54 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. Q., Li, X. H., 1998. Isotopic system theories and ap-

plications in geosciences—Evolution of crust and mantle of China. Science Press, Beijing, 1—330 (in Chinese).

Zhu, B. Q., Chang, X. Y., 2001. Geochemical provinces and their boundaries. *Advance in Earth Sciences*, 16(2): 153—162 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

邓清禄, 周雁, 杨巍然, 1995. 拉脊山早古生代火山岩盆地开合演化岩石地球化学标志. *西北地质科学*, 16(1): 84—91.

胡云鹏, 王亚力, 徐汉民, 等, 1989. 商县铁炉子锌金矿稳定同位素研究. *陕西地质*, 7(1): 56—76.

李英, 任崔锁, 1990. 华北地台南缘铅同位素演化. *西安地质学院学报*, 13(2): 1—12.

邱家骧, 曾广策, 朱云海, 等, 1998. 北秦岭—南祁连早古生代裂谷造山带火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比. *高校地质学报*, 4(4): 393—405.

邱家骧, 曾广策, 朱云海, 等, 1997. 拉脊山早古生代海相火山岩与成矿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1—2.

王二七, 张旗, Burchfiel, C. B., 2000. 青海拉脊山: 一个多阶段抬升的构造窗. *地质科学*, 35(4): 493—500.

王寿琼, 1993. 武当地区的元古宇. *湖北地质*, 7: 1—9.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2004. 天山石炭纪大火成岩省与

地幔柱. *地质通报*, 23(9—10): 903—910.

解广轰, 王俊文, 刘丛强, 1989. 汉诺坝玄武岩及大同火山岩群的岩石学和同位素地球化学. *地球化学*, 4: 277—286.

邢光福, 1997. Dupal 同位素异常的概念、成因及其地质意义. *火山地质与矿产*, 18(4): 281—291.

杨巍然, 邓清禄, 吴秀玲, 2000. 拉脊山造山带断裂作用特征及与火山岩、蛇绿岩套的关系. *地质科技情报*, 19(6): 5—11.

张本仁, 高山, 张宏飞, 等, 2003. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 37—41.

张理刚, 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其地球动力学. 北京: 科学出版社, 1—252.

张旗, 张宗清, 孙勇, 等, 1995. 陕西商县—丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学. *岩石学报*, 11(1): 43—54.

朱炳泉, 李献华, 1998. 地球科学中同位素体系理论及应用——兼论中国大陆壳幔演化. 北京: 科学出版社, 1—330.

朱炳泉, 常向阳, 2001. 地球化学省与地球化学边界. *地球科学进展*, 16(2): 153—162.