

西秦岭天水—党川地区花岗岩的元素地球化学特征及成因

辛宇佳, 黄德志, 王显莹, 刘震

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 西秦岭天水—党川地区的马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩的元素地球化学的研究表明, 马家坪二长花岗岩显示强烈的轻、重稀土元素分馏($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=11.62$, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N=46.2$), 极度亏损重稀土元素以及具有极高的 $\text{Sr}(579\times 10^{-6}\sim 1\,200\times 10^{-6})$ 及 $\text{Ba}(2\,350\times 10^{-6}\sim 2\,470\times 10^{-6})$, 极低的 $\text{Y}(7.86\times 10^{-6}\sim 10.2\times 10^{-6})$ 及 $\text{Yb}(0.72\times 10^{-6}\sim 0.98\times 10^{-6})$, 极高的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})(64.10\sim 132.32)$ 和 $w(\text{La})/w(\text{Yb})(56.33\sim 75.19)$ 的特点, 其地球化学特征同 II 型埃达克岩(C 型)相类似, 岩浆源于增厚的下地壳部分熔融, 与晚三叠世陆内运动有关。而牛头河群黑云母变粒岩的地球化学特征则类似于大陆碰撞型花岗岩, 其原岩为造山过程中因地壳部分熔融形成的 S 型花岗岩, 是陆陆碰撞过程中的产物, 与早古生代中秦岭和北秦岭与华北克拉通的碰撞密切相关。

关键词: 西秦岭造山带; 花岗岩; 埃达克质岩; 大陆碰撞型花岗岩

中图分类号: P588.121

文献标志码: A

Geochemical features and petrogenesis of granites from Tianshui—Dangchuan area in West Qinling orogenic belt, China

XIN Yu-jia, HUANG De-zhi, WANG Xian-ying, LIU Zhen

(College of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The study of the geochemical features of monzogranite in Majiaping and biotite leptynite in Niutouhe Group suggested that these two kinds of granites were formed in different tectonic environments. The monzogranite in Majiaping had strongly fractionated REE, high contents in Sr ($579\times 10^{-6}\sim 1\,200\times 10^{-6}$) and Ba ($2\,350\times 10^{-6}\sim 2\,470\times 10^{-6}$), low contents in Y ($7.86\times 10^{-6}\sim 10.2\times 10^{-6}$) and Yb ($0.72\times 10^{-6}\sim 0.98\times 10^{-6}$), high $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ (64.10–132.32) and $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ (56.33–75.19). The geochemical features show that the monzogranite in Majiaping is similar to C-type adakitic rock. It is formed by melting of basaltic lower crust under thickened setting. It is related to intracontinental tectonic movement in Triassic. The geochemical features of biotite leptynite in Niutouhe Group are similar to continental collision granites. Its protolith is S-type granites, which is formed by the melting of the crust in the process of orogenic. It is related to the collision of Middle Qinling and North Qinling terrane and North China Craton.

Key words: West Qinling orogenic belt; granite; adakitic; continental collision granites

秦岭造山带是位于中国大陆中部并夹于华北克拉通及扬子克拉通之间的大陆造山带, 研究表明, 秦岭造山带是加里东期至印支期的碰撞造山带^[1]。秦岭造山带以宝成铁路划分为东、西两段, 东段为东秦岭造山带, 西段为西秦岭造山带。西秦岭位于甘肃与青海交界, 是秦岭造山带的组成部分, 它西连东昆仑造山

带, 北接祁连山造山带, 处于古亚洲构造域、特提斯构造域和滨太平洋构造域交汇的特殊地段, 是中国中央造山带的关键部位, 具有独特的大地构造位置^[2]。西秦岭中、新生代火山作用是秦岭地区自中生代以来经历复杂的俯冲碰撞—陆内叠复造山过程的重要指示, 也承载了西秦岭地区乃至中国大陆东西和南北地质构

造演化的深部动力学机制和背景的大量信息^[3]。

西秦岭至少经历了 4 个重要的地质演化阶段(构造旋回)^[4-5]: 1) 晋宁运动南北大陆对接碰撞和原始中国古陆的形成。其时西秦岭与东秦岭为同一个复合造山带; 2) 中国古陆的裂解及古生代—早三叠纪古特提斯洋的形成。其时西秦岭属古特提斯洋的一部分; 3) 三叠纪末的印支运动, 特提斯海消亡, 南北大陆再次对接碰撞, 西秦岭褶皱造山; 4) 晚中生代—新生代西秦岭的陆内造山作用, 主要以强烈的夷平作用和一系列近南北向的中、新生代断陷盆地的形成为特征。根据高原夷平面的发育情况以及中、新生代断陷盆地的特征, 推测晚中生代—新生代西秦岭的陆内造山作用与印度板块与欧亚大陆的碰撞和青藏高原的强烈隆升有关^[6]。

目前, 对于东秦岭造山带研究较多, 在造山带构

造格局、岩石圈结构特征、高压—超高压变质作用及其地球动力学机制等方面取得了令人瞩目的成果^[7], 而西秦岭地区由于交通及地形的限制, 研究相对较薄弱。前人的研究主要集中于西秦岭地区关子镇蛇绿岩套及具有缝合线意义的勉略带等地区, 对于西秦岭地区的花岗岩的研究则相对较少。因此, 对西秦岭地区花岗岩进行详细系统地研究, 对于确定西秦岭造山带的构造演化以及东、西秦岭造山带的对比具有重要意义。

1 地质背景简述

本次的研究区域在地理位置上位于甘肃省天水市党川县至张家川县之间(见图 1); 在构造位置上处于西

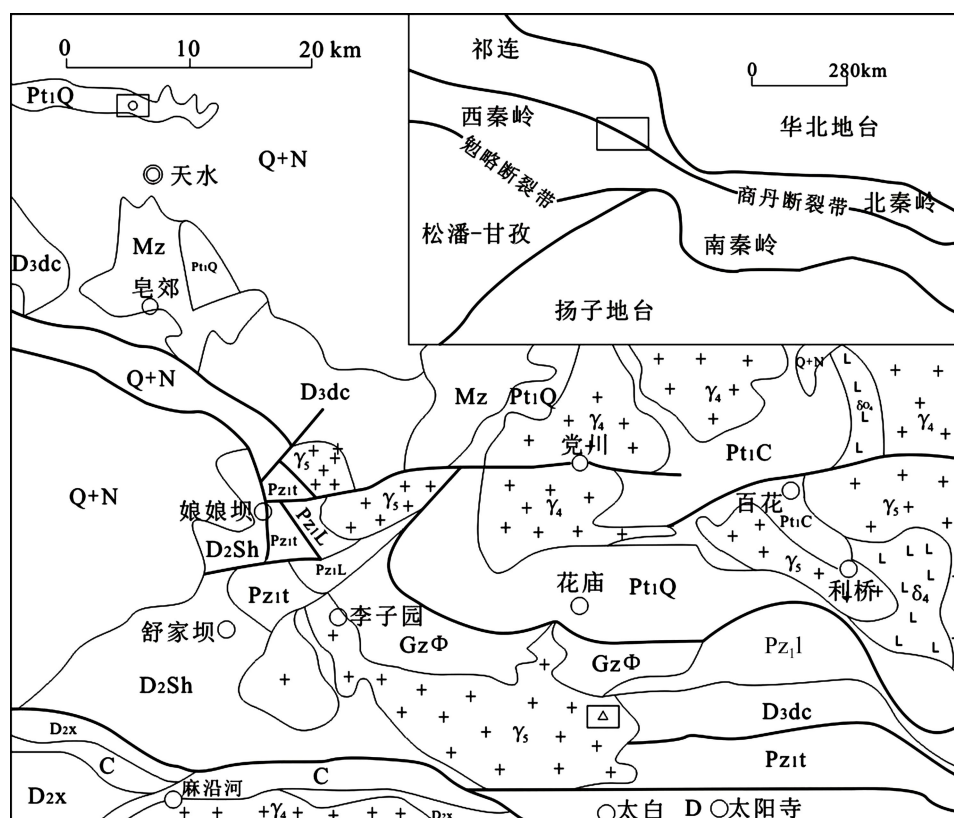


图 1 西秦岭天水—党川地区地质简图^[8]: Q+N—新生代; Mz—中生代; C—石炭系; D_{3dc}—大草滩群; D_{2Sh}—舒家坝群; D_{2x}—西汉水群; D—泥盆系; Pt_{1C}—草滩沟群; Pz_{1t}—太阳寺岩组; Pz_{1l}—李子园群; GzΦ—关子镇蛇绿岩; Pt_{1Q}—秦岭群; γ₅—印支期花岗岩; γ₄—加里东期花岗岩; δ₄—加里东期闪长岩; δO₄—加里东期石英闪长岩; △—马家坪二长花岗岩取样点; ○—牛头河群黑云母变粒岩取样点

Fig. 1 Simplified geological map of Tianshui-Dangchuan Area in West Qinling^[8]: Q+N—Cenozoic; Mz—Mesozoic; C—Carboniferous; D_{3dc}—Dacaotan Gr; D_{2Sh}—Shujiaba Gr; D_{2x}—Xihanshui Gr; D—Devonian; Pt_{1C}—Caotangou Gr; Pz_{1t}—Taiyangsi Fm; Pz_{1l}—Liziyuan Gr; GzΦ—Guanzizhen ophiolite; Pt_{1Q}—Qinling Gr; γ₅—Granites of Indosinian; γ₄—Granites of Caledonian; δ₄—Diorites of Caledonian; δO₄—Quartz diorites of Caledonian; △—Sampling point of Majiaping monzogranite; ○—Sampling point of Niutouhe Group biotite leptynite

秦岭造山带内。该区的北侧以宝鸡—天水断裂为界与祁连造山带的东段相邻, 南侧—西南侧为北西西向的唐藏—天水断裂, 该断裂被认为是东秦岭地区商丹断裂的西延, 在水天以西尖灭, 并与祁连山南缘断裂相接^[8-12]。

研究区出露的前寒武纪基底岩系为古元古代秦岭岩群, 该岩群受到高角闪石相的变质作用, 主要由含石榴石黑云斜长片麻岩组成, 含少量斜长角闪岩、大理岩和变粒岩等^[13]; 显生宙地层主要为早古生代牛头河群、舒家坝群和草滩沟群(二郎坪群)及中生代陆相砂砾岩。

研究区域内的党川地区花岗岩类岩石广泛分布, 它们主要侵位于秦岭岩群和草滩沟群中。党川地区花岗岩先前称之为党川复式岩体^[13], 根据近期的研究, 党川复式岩体“解体”为 7 个岩体, 分别为: 吴砦岩体、秦岭大堡岩体、石门岩体、太碌岩体、党川岩体、火炎山岩体及百花岩体^[14], 其中, 吴砦、大堡、石门为中生代岩体, 而太碌、党川、火炎山百花则为早古生代岩体。

本文作者研究的两组样品分别采自天水以北的牛头河群中的黑云母变粒岩及花庙南部马家坪附近的二长花岗岩(以下简称马家坪二长花岗岩)。牛头河群中的黑云母变粒岩主要由斜长石、石英和黑云母组成, 黑云母富集成带; 马家坪二长花岗岩位于党川岩体南部, 主要由石英、斜长石及钾长石组成, 暗色矿物主

要为黑云母, 粗粒结构, 块状构造。

2 样品采集和分析方法

样品的采集是沿着公路进行的, 共采集样品 12 个。采集的样品大多新鲜无风化, 少部分样品表面有轻微风化。经薄片鉴定后, 送样进行分析测试。岩石主量、稀土、微量元素化学分析均在国土资源部中南矿产资源监督检测中心进行测试, 主量元素采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)法分析, 分析精度优于 1%; 稀土及微量元素用等离子体质谱仪(ICP-MS)分析, 分析精度优于 5%, 分析结果列于表 1 和 2。

3 结果

3.1 主量元素

马家坪二长花岗岩及牛头河群黑云母变粒岩的主量元素数据见表 1。

由表 1 可见, 马家坪二长花岗岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 68.14%~69.92%, SiO_2 含量较高。 $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 4.21%~4.53%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 4.29%~5.57%, $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 8.8%, 富碱, K_2O 与 Na_2O 的含量相差不大, $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})=1.01$, 略显富 Na。马家坪二长花岗

表 1 马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩主量元素数据

Table 1 Major element compositions of Majiaping monzogranite and Niutouhe Group biotite leptynite (mass fraction, %)

Sample	Majiaping monzogranite						Niutouhe Group biotite leptynite					
	H011-2	H011-3	H011-4	H011-5	H011-6	H011-7	H035-1	H035-2	H035-3	H035-4	H035-5	H035-6
SiO ₂	68.14	68.84	69.22	69.92	69.13	69.06	70.1	70.31	69.74	69.3	70.98	71.17
Al ₂ O ₃	15.32	15.08	15.31	15.34	15.36	15.19	13.99	14.3	14.33	14.53	14.21	14.12
Fe ₂ O ₃	1.68	1.57	1.09	1.62	1.32	1.74	0.274	0.691	0.547	0.789	0.56	0.421
FeO	1.01	1.16	1.76	0.878	1.37	1.12	4.67	3.87	4.56	4.56	3.85	3.86
CaO	2.06	1.82	1.60	1.91	2.01	1.59	2.02	2.18	2.04	2.05	2.014	1.76
MgO	0.591	0.524	0.529	0.500	0.639	0.535	1.22	1.07	1.22	1.22	1.05	0.997
K ₂ O	4.21	4.34	4.35	4.46	4.53	4.38	3.20	3.13	3.29	3.35	3.10	3.62
Na ₂ O	4.57	4.46	4.43	4.29	4.30	4.51	3.10	3.14	2.84	2.82	3.04	2.75
TiO ₂	0.337	0.32	0.331	0.294	0.342	0.312	0.536	0.459	0.536	0.539	0.478	0.454
P ₂ O ₅	0.111	0.103	0.113	0.097	0.132	0.097	0.052	0.071	0.086	0.112	0.039	0.069
MnO	0.027	0.025	0.019	0.034	0.041	0.02	0.072	0.067	0.088	0.082	0.066	0.063
Mass loss	1.40	1.21	0.595	0.108	0.216	0.98	0.177	0.18	0.084	0.026	0.08	0.186
Na ₂ O/K ₂ O	1.09	1.03	1.02	0.96	0.95	1.03	0.97	1.00	0.86	0.84	0.98	0.76
A/CNK	0.97	0.98	1.03	1.00	0.98	1.01	1.14	1.14	1.20	1.21	1.18	1.21
σ	3.07	3.00	2.94	2.84	2.98	3.03	1.46	1.44	1.41	1.45	1.35	1.44

表 2 马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩微量及稀土元素成分

Table 2 Trace and rare earth element compositions of Majiaping monzogranite and Niutouhe Group biotite leptynite (10^{-6})

Sample	Majiaping monzogranite						Niutouhe Group biotite leptynite					
	H011-2	H011-3	H011-4	H011-5	H011-6	H011-7	H035-1	H035-2	H035-3	H035-4	H035-5	H035-6
Rb	50.7	62.1	60.2	72.8	73.2	56.9	109	72.6	74.6	87.2	115	104
Sr	600	614	815	1040	1120	579	87.2	74.4	68.2	77.2	92.9	76.2
Ba	2470	2370	2360	2460	2420	2350	334	387	429	400	373	426
Nb	9.65	9.07	9.65	8.88	10.7	9.66	14.2	10.8	10.4	11.9	12	10.7
Ta	0.7	0.68	0.71	0.66	0.79	0.7	1.61	1.18	0.83	0.96	1.27	1.13
Zr	177	166	168	146	175	171	169	143	181	176	166	173
Hf	5.41	5.17	5.14	4.61	5.54	5.31	5.81	4.88	5.93	5.88	5.73	5.94
U	1.94	2.14	2.19	2.37	4.08	2.13	3.34	2.79	2.68	3.36	3	3.43
Th	13.3	16.3	15.8	14.4	32.8	12.8	20.6	17.3	18.8	20.1	17.7	18.7
La	65.8	60.9	55.6	50.4	55.2	55.2	48.2	45.2	49.5	50	38.2	52.9
Ce	109	101	97.6	86.2	99.2	93	88.8	83.7	91.4	92.6	69.6	98.3
Pr	12.1	11.4	11.2	9.83	11.4	10.6	10.4	9.93	10.9	11.2	8.27	11.7
Nd	40.1	37.1	37.3	32.7	38.5	34.7	36.5	34.5	38.2	39	28.4	40.7
Sm	6.03	5.52	5.74	5.12	6.12	5.31	6.97	6.6	7.34	7.61	5.23	7.84
Eu	1.66	1.54	1.5	1.32	1.58	1.42	0.94	1.05	1.12	1.06	0.99	1.02
Gd	4.72	4.37	4.39	3.93	4.65	4.15	5.9	5.68	6.49	6.64	4.62	6.67
Tb	0.51	0.47	0.5	0.43	0.54	0.46	0.87	0.83	1.01	1.04	0.7	0.96
Dy	2.22	1.95	2.07	1.78	2.32	1.9	4.84	4.81	5.61	5.7	4.07	4.93
Ho	0.53	0.33	0.34	0.3	0.37	0.31	0.98	0.9	1.1	1.1	0.85	0.9
Er	0.93	0.86	0.9	0.78	1.01	0.82	2.82	2.59	3.14	3.07	2.46	2.48
Tm	0.14	0.13	0.14	0.12	0.16	0.13	0.5	0.45	0.58	0.56	0.45	0.45
Yb	0.88	0.81	0.85	0.72	0.98	0.8	3.26	2.87	3.92	3.68	2.94	2.98
Lu	0.12	0.11	0.12	0.098	0.13	0.11	0.49	0.43	0.58	0.54	0.44	0.44
Y	9.36	8.48	9.08	7.86	10.2	8.35	24.8	23.3	27.4	28.1	21.8	22.7
Σ REE	253.92	234.97	227.33	201.588	232.36	217.26	236.27	222.84	248.29	251.9	189.02	254.97
Σ LREE/ Σ HREE	12.20	12.42	11.36	11.59	10.41	11.76	4.31	4.32	3.98	4.00	3.93	5.00
δ Eu	0.95	0.96	0.91	0.90	0.97	0.92	0.45	0.52	0.50	0.46	0.62	0.43
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	50.41	50.69	44.10	47.19	37.97	46.52	9.97	10.62	8.51	9.16	8.76	11.97
$w(\text{Sr})/w(\text{Y})$	64.10	72.41	89.76	132.32	109.80	69.34	3.52	3.19	2.49	2.75	4.26	3.36
Mg [#]	37.32	33.31	29.47	35.63	36.65	33.34						

岩的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 15.08%~15.36%， Al_2O_3 含量高，铝指数 $A/\text{CNK}=0.97\sim 1.03$ ，平均 $0.99<1.1$ ，样品在 ANK—ACNK 图解(见图 2)中基本位于偏铝质区域内，表明马家坪二长花岗岩为偏铝质岩石。马家坪二长花岗岩的

里特曼指数 σ 为 2.84~3.07，均小于 3.3，属钙碱性系列。牛头河群黑云母变粒岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 69.3%~71.17%， SiO_2 含量很高，具有秦岭地区新元古代早期花岗岩高 SiO_2 含量高的特点。牛头河群黑云母变粒岩

A/CNK 比值(分子数比值)明显大于 1.1,且在 ANK—ACNK 图解均落入过铝质区域中(图 2),属过铝质岩石。样品的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 大于 1,说明样品相对富集 K。样品的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 比值较小,小于 67,而 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值较大,明显大于 0.3,样品的 $w(\text{MgO})/w(\text{TFeO})$ 为 0.24, $w(\text{MgO})/w(\text{MnO})$ 为 15.57, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 2.29,大于 1.1,类似于“高温型”碰撞带花岗岩类岩石的成分特点,样品的 σ 值(里特曼指数)平均为 1.42,明显小于 3.3,属钙碱性岩系。

主量元素对比可以看出,马家坪二长花岗岩的 Al_2O_3 及 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量明显偏高,Na、K 含量相差不大,而牛头河群的黑云母变粒岩的 SiO_2 含量很高,并明显富钾,二者均为钙碱性岩石,但马家坪二长花岗岩为偏铝质,牛头河群黑云母变粒岩则为过铝质。

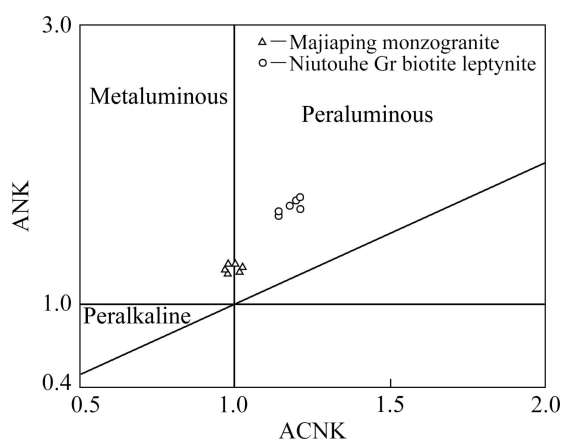


图2 ANK—ACNK 图解

Fig. 2 ANK—ACNK diagram (A— Al_2O_3 , CNK— $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)

3.2 微量及稀土元素

马家坪二长花岗岩及牛头河群黑云母变粒岩的微量及稀土元素数据见表 2。

从马家坪二长花岗岩及牛头河群黑云母变粒岩的微量元素分布图(见图 3 和 4)上可以看出,在微量元素组成上,马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩均富集 La、Th、K 等大离子亲石元素,而贫 P、Ti、Nb、Ta 等高场强元素, Ti、Nb、Ta 的亏损为典型的“TNT 异常”,显示二者可能形成于岛弧环境或可能存在某种构造热事件(拆沉作用或底侵岩浆作用)^[15-16]。两者不同的是马家坪二长花岗岩具有极高含量的 Sr ($579 \times 10^{-6} \sim 1\,120 \times 10^{-6}$) 和 Ba ($2\,350 \times 10^{-6} \sim 2\,470 \times 10^{-6}$),而牛头河群黑云母变粒岩则明显的贫 Sr 和 Ba。马家坪二长花岗岩的 Y ($7.86 \times 10^{-6} \sim 10.2 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.72 \times 10^{-6} \sim 0.98 \times 10^{-6}$) 含量极低, $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ ($64.10 \sim 132.32$)

和 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ ($37.97 \sim 50.69$) 极高,这也明显地区别于牛头河群黑云母变粒岩。

在稀土元素组成上,马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩的稀土元素总量均较高(分别为 227.9×10^{-6} 和 233.9×10^{-6}),从稀土元素球粒陨石标准化分配图(见图 5 和 6)可以看出,二者均为明显的轻稀土元素富集型,所不同的是马家坪二长花岗岩更强烈的亏损重稀土元素,其 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 11.62$ (远大于地球平均值 1.15) 及 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N = 46.2$,远大于牛头河群黑云母变粒岩的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 4.26$ 和 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N = 9.83$,显示更加强烈的轻重稀土元素分馏的特征。马家坪二长花岗岩 $\delta\text{Eu} = 0.93$, 钕异常不明显,而牛头河群黑云母变粒岩 δEu 为 0.5, 钕具负异常。

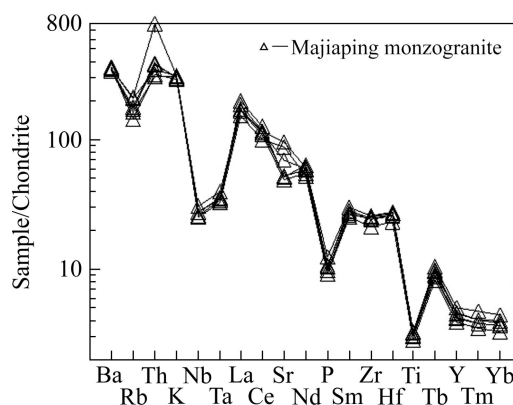


图3 马家坪二长花岗岩球粒陨石标准化后的微量元素分布图^[17]

Fig. 3 Chondrite-normalized trace elements patterns for Majiaping monzogranite (Chondrite data from Thompson, 1982)^[17]

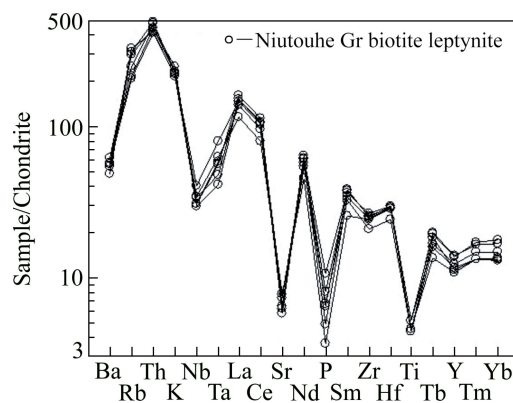


图4 牛头河群黑云母变粒岩球粒陨石标准化微量元素分布图^[17]

Fig. 4 Chondrite-normalized trace elements patterns of Niutouhe Group biotite leptynite (Chondrite data from Thompson, 1982)^[17]

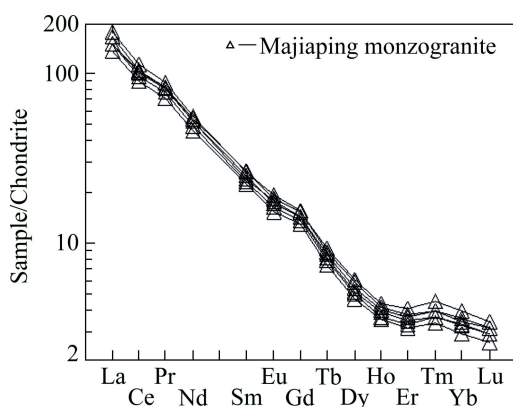


图 5 马家坪二长花岗岩球粒陨石标准化后的稀土分布模式图^[17]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for Majiaping monzogranite (Chondrite data from Taylor et al., 1985)^[17]

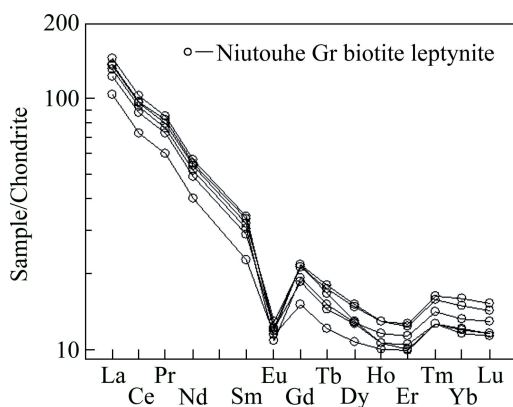


图 6 牛头河群黑云母变粒岩球粒陨石标准化稀土分布模式图^[17]

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for Niutouhe Group biotite leptynite (Chondrite data from TAYLOR et al., 1985)^[17]

4 讨论

天水-党川地区马家坪二长花岗岩和牛头河群黑云母变粒岩主量元素及微量稀土元素的差异, 反映它们可能有着不同的成因或岩浆源区组成。

马家坪二长花岗岩具有强烈的亏损重稀土元素, 极高含量的 Sr ($579 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$) 及 Ba ($2350 \times 10^{-6} \sim 2470 \times 10^{-6}$), 极低含量的 Y ($7.86 \times 10^{-6} \sim 10.2 \times 10^{-6}$) 及 Yb ($0.72 \times 10^{-6} \sim 0.98 \times 10^{-6}$), 极高的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ (64.10~132.32) 和 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ (56.33~75.19), 略富 Na , 富 Al_2O_3 等特征, 这与近年来广泛受关注的埃达克岩的特征 ($w(\text{SiO}_2) \geq 56.0\%$, 富 Na , $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}) \geq 1$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 15.0\%$, 亏损 Y 和重稀土元素, $w(\text{Y}) \leq 18 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) \leq 1.9 \times 10^{-6}$, 高 Sr , 很少 $\leq 400 \times 10^{-6}$,

$w(\text{La})/w(\text{Yb}) \geq 10.0 \sim 20.0$, $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) \geq 40.0$ ^[17-19]) 极其相符。在 $w(\text{La})/w(\text{Yb})_N - w(\text{Yb})_N$ 和 $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) - w(\text{Y})$ 图解 (见图 7 和 8) 上, 马家坪二长花岗岩均落入埃达克岩的范围内, 表明其应具有埃达克岩的地球化学属性, 而其所具有的 Na 、 K 含量相当, 略富 Na ($w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}) = 1.01$) 以及低 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = 34.3 < 50.0$) 的特征, 显示马家坪二长花岗岩明显区别于由俯冲板片的熔融形成的 I 型埃达克岩 (O 型), 基本与 II 型埃达克岩 (C 型) 相类似, 在 $\text{Mg}^\# - w(\text{SiO}_2)$ 图解 (见图 9) 中, 马家坪二长花岗岩均落入地壳来源的 II 型埃达克岩 (C 型) 区域内, 显示其形成与增厚的下地壳的熔融有关^[21-23]。

马家坪二长花岗岩的地球化学特征显示, 其岩浆源区应残留有石榴石且部分熔融的压力很高 (高 Sr , 低 Y 及 HREE), 而没有或很少斜长石 (Eu 异常不明显),

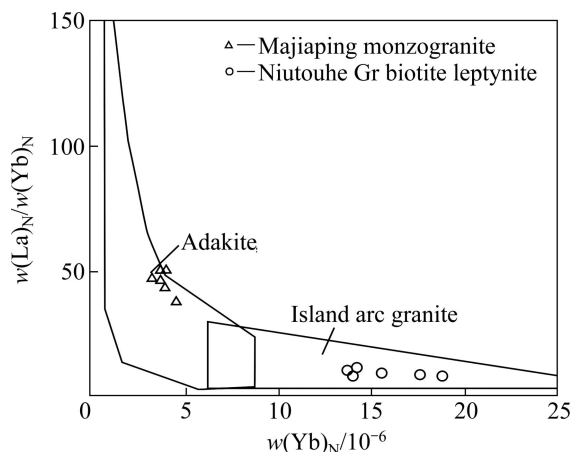


图 7 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - w(\text{Yb})_N$ 构造环境判别图^[24]

Fig. 7 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - w(\text{Yb})_N$ discrimination diagrams for tectonic settings^[24]

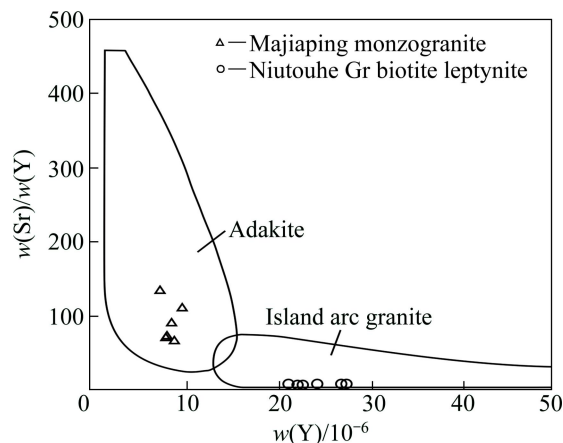


图 8 $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) - w(\text{Y})$ 构造环境判别图^[25]

Fig. 8 $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) - w(\text{Y})$ discrimination diagrams for tectonic settings^[25]

而高 Al 和 Na 且偏铝质的特征显示其源区岩石应为玄武质岩石组成^[26-29], 因而其应为造山作用晚期后碰撞阶段因幔源岩浆的底侵作用导致地壳增厚而使地热梯度增大导致新底侵玄武质岩石部分熔融所形成。

牛头河群黑云母变粒岩在 $(La/Yb)_N$ — $(Yb)_N$ 和 $w(Sr/Y)$ — $w(Y)$ 图解(见图 7 和 8)中, 落入了经典岛弧岩石的范围内, 显示其原岩形成可能与弧环境有关。其主量元素特征显示, 牛头河群黑云母变粒岩原岩可能形成于碰撞环境。牛头河群黑云母变粒岩微量元素的标准化图解的显著特征是元素 Ba、Nb、Sr、P、Ti 显示明显负异常, Nb 的负异常反映该花岗岩更具大陆壳的特征, 推测样品应为具大陆弧背景的造山花岗岩^[30], Sr 和 Ba 的异常可能是岩浆演化早期斜长石的结晶分离的结果。根据 $w(Nb)$ — $w(Y)$ 及 $w(Rb)$ — $w(Yb+Nb)$ 及 R1—R2 图解(见图 10、11 和 12)可发现, 牛头河群的

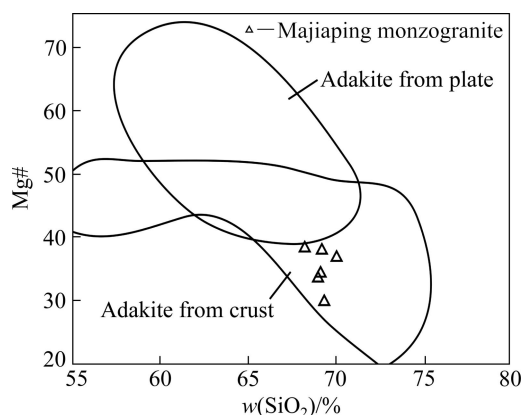


图 9 $Mg^\#$ — $w(SiO_2)$ 构造环境判别图^[31]

Fig. 9 $Mg^\#$ — $w(SiO_2)$ discrimination diagrams for tectonic settings^[31] ($Mg^\# = 100n(Mg)/[n(Mg)+n(Fe)]$)

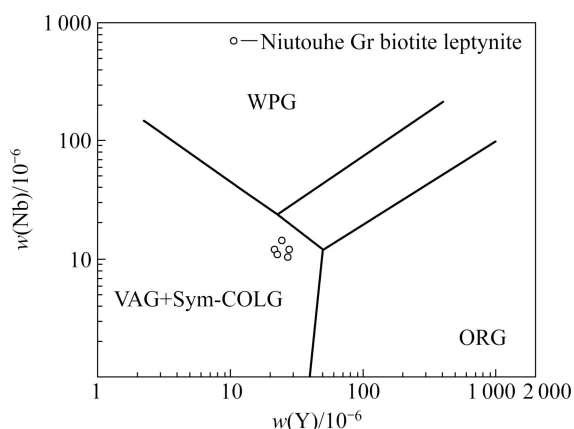


图 10 $w(Nb)$ — $w(Y)$ 构造环境判别图^[32-34]: Syn-CLOG—同碰撞花岗岩; VAG—岛弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

Fig. 10 $w(Nb)$ — $w(Y)$ discrimination diagrams for tectonic settings^[32-34]

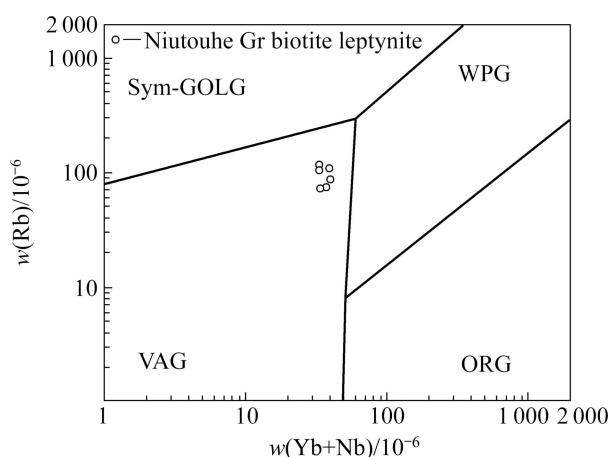


图 11 $w(Rb)$ — $w(Yb+Nb)$ 构造环境判别图^[32-34]: Syn-CLOG—同碰撞花岗岩; VAG—岛弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

Fig. 11 $w(Rb)$ — $w(Yb+Nb)$ discrimination diagrams for tectonic settings^[32-34]

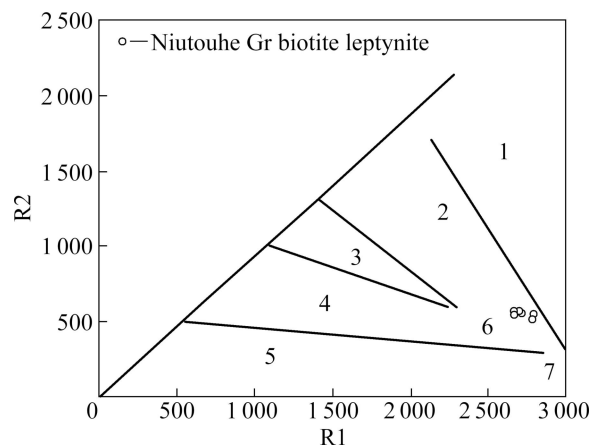


图 12 R1—R2 构造环境判别图^[17]: 1—幔源花岗岩; 2—板块碰撞前消减地区花岗岩; 3—板块碰撞后隆起花岗岩; 4—晚造山期花岗岩; 5—非造山期花岗岩; 6—地壳熔融的花岗岩; 7—造山后期 A 型花岗岩

Fig. 12 R1—R2 discrimination diagrams for tectonic settings^[17]: 1 — Mantle fractionates; 2 — Pre-plate collision; 3 — Post-collision uplift; 4—Late-orogenic; 5—Anorogenic; 6—Syn-collision; 7 — Post-orogenic; $R1 = 4n(Si) - 11[n(Na) + n(K)] - 2[n(Fe) + n(Ti)]$; $R2 = 6n(Ca) + 2n(Mg) + n(Al)$

黑云母变粒岩均落入同碰撞花岗岩(Syn-CLOG)和火山弧花岗岩(VAG)区域内; 而根据 $w(FeO_t)/w(FeO_t + MgO)$ — $w(SiO_2)$ 、 $w(FeO_t)$ — $w(MgO)$ 及 $w(FeO_t + MgO)$ — $w(CaO)$ 图解(见图 13、14 和 15)可见, 牛头河群黑云母变粒岩基本都落入 IAG+CAG+CCG(造山环境)区域内, 而根据其 A/CNK 比值大于 1.1 可知, 牛头河群黑

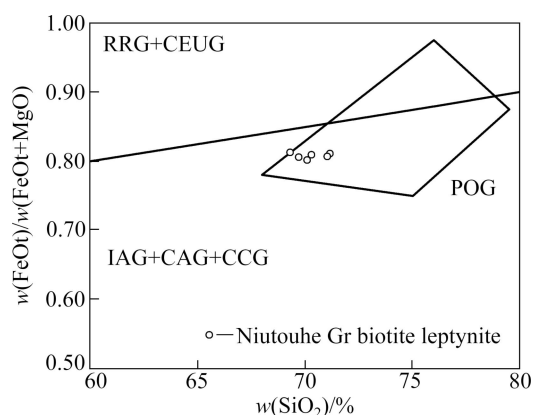


图 13 $w(\text{FeO})/w(\text{FeO}+\text{MgO})-w(\text{SiO}_2)$ 构造环境判别图^[35]: IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; POG—后造山花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩

Fig. 13 $w(\text{FeO})/w(\text{FeO}+\text{MgO})-w(\text{SiO}_2)$ discrimination diagrams for tectonic settings^[35]

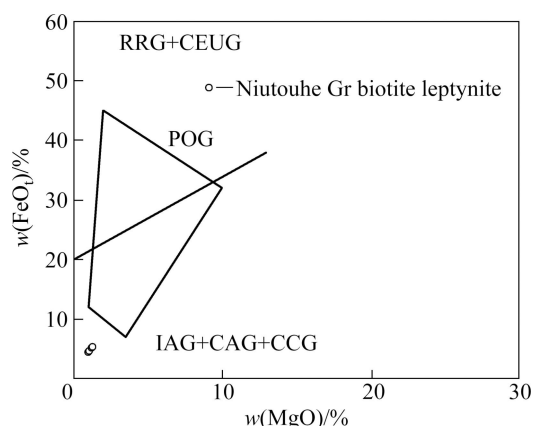


图 14 $w(\text{FeO})-w(\text{MgO})$ 构造环境判别图^[35]

Fig. 14 $w(\text{FeO})-w(\text{MgO})$ discrimination diagrams for tectonic settings^[35]

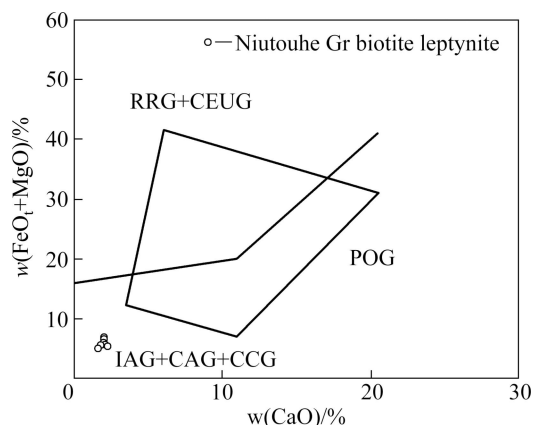


图 15 $w(\text{FeO}+\text{MgO})-w(\text{CaO})$ 构造环境判别图^[35]

Fig. 15 $w(\text{FeO}+\text{MgO})-w(\text{CaO})$ discrimination diagrams for tectonic settings^[35]

云母变粒岩的原岩应属 CCG 类花岗岩, 即大陆碰撞花岗岩^[29]。

结合各图解及主量稀土微量元素特征可知, 牛头河群黑云母变粒岩的原岩为过铝质的钙碱性花岗岩, 形成于大陆碰撞环境, 可能为造山过程中因地壳中碎屑沉积岩类部分熔融而形成的 S 型花岗岩^[36-37], 为造山过程的产物。

由前人资料可知, 牛头河群黑云母变粒岩的时代大致为早古生代^[13]。在早古生代, 由于南华纪裂解作用而从扬子克拉通北缘裂离的中秦岭和北秦岭同向南漂移的华北克拉通相拼贴^[1], 牛头河群黑云母变粒岩则是在中秦岭和北秦岭同华北克拉通碰撞过程中形成的, 是陆陆碰撞过程中造山作用的产物。而马家坪二长花岗岩前人资料中并未详述其形成时代, 但通过同党川地区出露的各种花岗岩体对比可知, 其形成时代应与秦岭大堡岩体相近, 秦岭大堡岩体的 Rb-Sr 等时线年龄为 212 Ma(晚三叠世)^[14]。在早、中三叠世, 扬子克拉通与已于早古生代统一的华北-北秦岭-中秦岭地块相拼合, 晚三叠世, 整个秦岭造山带已进入陆内发展阶段, 产生大规模推覆和滑移^[1], 马家坪二长花岗岩可能就是于此过程中因地壳增厚而使下地壳部分熔融所形成的。

5 结论

1) 马家坪二长花岗岩具有 II 型埃达克岩(C 型)的地球化学特征, 是造山作用晚期后碰撞阶段地壳增厚而使地热梯度增大导致新底侵玄武质岩石部分熔融形成的, 地壳的增厚则与晚三叠世秦岭造山带陆内大规模推覆和滑移有关。

2) 牛头河群黑云母变粒岩属大陆碰撞花岗岩, 可能为造山过程中因地壳中碎屑沉积岩类部分熔融而形成, 其形成与早古生代中秦岭和北秦岭同华北克拉通强烈碰撞相关联, 是陆陆碰撞过程中造山作用的产物。

REFERENCES

- [1] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 郝国杰, 周红英, 郭进京, 牛广华, 相振群. 秦岭中新元古代地质演化及对 RODINIA 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-163.
LU Song-nian, LI Huai-kun, CHEN Zhi-hong, HAO Guo-jie, ZHOU Hong-ying, GUO Jin-jing, NIU Guang-hua, XIANG Zhen-qun. Meso-neoproterozoic geological evolution in the Qinling progeny and its response to the supercontinental events

- of rodinia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-163.
- [2] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-118.
- REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, ZHANG Zheng-kun, CHEN De-yu. The geotectonic evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-118.
- [3] 王 微, 许文良, 王冬艳, 纪伟强, 杨德彬, 裴福萍. 辽东莱园子古近纪玄武岩和深源捕晶: 对新生代岩石圈地幔性质及深部作用过程的制约[J]. 矿物岩石, 2007, 27(1): 63-70.
- WANG Wei, XU Wen-liang, WANG Dong-yan, JI Wei-qiang, YANG De-bin, PEI Fu-ping. Caiyuanzi paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning, China: Constraints on nature and deep process of the cenozoic lithospheric mantle[J]. J Mineral Petrol, 2007, 27(1): 63-70.
- [4] 苏进旺. 西秦岭地质构造的初步分析及构造带的划分[J]. 西北地质, 1981(4): 48-53.
- SU Jin-wang. Geotectonic analysis and differentiate tectonic belt in West Qinling[J]. Northwestern Geology, 1981(4): 48-53.
- [5] 杜子图, 吴淦国. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- DU Zi-tu, WU Gan-guo. Study on tectonic systems and gold metallogenic tectono-dynamics, in the region of West Qinling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [6] 冯益民, 曹宣铎, 张而朋. 西秦岭构造山过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 2002: 263.
- FENG Yi-min, CAO Xuan-duo, ZHANG Er-peng. Structure, process and dynamics of West Qinling orogenic belt[M]. Xi'an: Xi'an Map Publisher, 2002: 263.
- [7] LIU Jia-jun. Geochemistry of the Laerma and Qinling Au-Se deposits in the western Qinling mountain, China[J]. Ore Geology reviews, 2000, 17: 91-111.
- [8] 王 婧, 张宏飞, 徐旺春, 蔡宏明. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(4): 474-486.
- WANG Jing, ZHANG Hong-fei, XU Chun-wang, CAI Hong-ming. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in west Qinling orogenic belt and its tectonic implication[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(4): 474-486.
- [9] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-855.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-cheng, XIAO Qing-hui. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855.
- [10] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质, 2003, 36: 1-10.
- FENG Yi-min, CAO Xuan-duo, ZHANG Er-peng, HU Yun-xu, PAN Xiao-ping, YANG Jun-lu, JIA Qun-zi, LI Wen-ming. Tectonic evolution framework and nature of the west Qinling orogenic belt[J]. Northwestern Geology, 2003, 36: 1-10.
- [11] 温志亮, 徐学义, 赵仁夫, 王 锋, 胡 伟. 西秦岭党川地区泥盆纪花岗岩类地质地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 2008, 54(6): 827-835.
- WEN Zhi-liang, XU Xue-yi, ZHAO Ren-fu, WANG Feng, HU Wei. Geologic and geochemical features of devonian granites in dangchuan area, western Qinling, and its tectonic[J]. Geological Review, 2008, 54(6): 827-835.
- [12] 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 王永磊, 肖 振, 朱德勤. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸盐的微量、稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 483-494.
- YU Xue-hui, ZHAO Zhi-dan, MO Xuan-xue, WANG Yong-lei, XIAO Zhen, ZHU De-qin. Trace elements, REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Cenozoic kamafugite and carbonatite from west Qinling, Gansu Province: Implication of plume-lithosphere interaction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 483-494.
- [13] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-752.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional geology of Gansu province[M]. Beijing: Geol Publ House, 1989: 1-752.
- [14] 李永军, 李锁成, 杨俊泉, 刘 静, 温志亮, 杨忠民. 西秦岭党川地区花岗岩体的“解体”及同位素年龄证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(2): 114-120.
- LI Yong-jun, LI Suo-cheng, YANG Jun-quan, LIU Jing, WEN Zhi-liang, YANG Zhong-min. The “Disintegration” of granite bodies in the Dangchuan area of Western Qinling: Evidence from the isotopic dating ages[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(2): 114-120.
- [15] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 92-103.
- ZHAO Zhen-hua. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 92-103.
- [16] 赵振华, 熊小林, 王 强, 乔玉楼. 铌与钽的某些地球化学问题[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 304-320.
- ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, WANG Qiang, QIAO Yu-lou. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta[J]. Geochimica, 2008, 37(4): 304-320.
- [17] PATINO-DOUCE A E, McCARTY T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction[M]. HACKER B R, LIU J G. When Continents Collide: Geodynamics of Ultrahigh Pressure Rocks. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998: 27-55.
- [18] 王 强, 徐继锋, 赵振华. 一种新的火成岩—埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 201-208.
- WANG Qiang, XU Ji-feng, ZHAO Zhen-hua. The summary and

- comment on research on a new kind of igneous rock—Adakite[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 201–208.
- [19] 王 强, 徐继锋, 赵振华. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au 成矿作用[J]. *地学前缘(中国地质大学, 北京)*, 2003, 10(4): 561–572.
- WHANG Qiang, XU Ji-feng, ZHAO Zhen-hua. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or Adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2003, 10(4): 561–572.
- [20] 王 强, 徐继锋, 赵振华, 王人镜, 邱家骧, 包志伟. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 551–564.
- WANG Qiang, XU Ji-feng, ZHAO Zhen-hua, WANG Ren-jing, QIU Jia-xiang, BAO Zhi-wei. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 551–564.
- [21] ATHERTON M P, PETFORD N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144–146.
- [22] PETFORD N, ATHERTON M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The cordillera blanca Batholith, Peru[J]. *J Petrology*, 1996, 37: 1491–1521.
- [23] MUIR R J, WEAVER S D, BRADSHAW J D. Geochemistry of the cretaceous separation plint batholith. New Zealand: Granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere[J]. *J Geol Soc Lond*, 1995, 152: 689–701.
- [24] MARTIN H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46: 411–429.
- [25] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662–665.
- [26] JOHANNES W, HOLTZ F. Petrogenesis and experiment petrology of granitic rocks[M]. Berlin: Springer, 1996: 1–254.
- [27] WOLF M B, WYLLIE P J. The formation of tonalitic liquids during the vapor-absent partial melting of amphibolite at 10 kbar[J]. *Eos*, 1992, 70: 506–518.
- [28] BEARD J S, LOFGREN G E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32: 365–402.
- [29] SISSON T W, RATAJESKI K, HANKINS W B. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 148: 635–661.
- [30] 李昌年. 火成岩微量元素地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 108–110.
- LI Chang-nian. Trace Element Petrology of Igneous Rocks [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 108–110.
- [31] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宜学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王 涛. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–53.
- XIAO Qing-hui, DENG Jin-fu, MA Da-quan, HONG Da-wei, MO Xuan-xue, LU Xin-xiang, LI Zhi-chang, WANG Xiong-wu, MA Chang-qian, WU Fu-yuan, LUO Zhao-hua, WANG Tao. The ways of investigation on granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1–53.
- [32] PEARCE J A. Trace elements characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]. England: Orogenic Andesites and Related Rocks, 1982: 525–548.
- [33] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J Petrol*, 1984, 25: 956–983.
- [34] PEARCE J A. Source and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 1996, 19: 120–125.
- [35] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- [36] PATINO-DOUCE A E, HARRIS N. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 689–710.
- [37] PATINO-DOUCE A E, MCCARTY T C. Melting of crystal rocks during continental collision and subduction[C]//HACKER B R, LIU J G. When continents collide: geodynamics of ultrahigh pressure rocks. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1998: 27–55.

(编辑 何学锋)