

西秦岭白马山“C”型埃达克岩成因： 地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素制约^{*}

王建中^{1,2}, 钱壮志², 徐刚², 姜超²

(1 中国人民武装警察部队黄金第五支队, 西安 710100)

(2 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要:白马山小岩体位于西秦岭白马山金矿区内,与矿床具有密切的空间关系。通过研究白马山岩体主量、微量及稀土元素地球化学特征及 Sr-Nd-Pd 同位素组成特征,探讨其岩石成因。白马山石英闪长岩属高钾钙碱性系列岩石,具有与“C”型埃达克岩相似的地球化学特征。Sr-Nd-Pb 同位素组成特征显示,该小岩体富放射性成因 Pb,初始(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值为 0.70637,εNd(t) = -6.75,具有较高的 T_{DM} 值(1.53Ga),说明岩浆主要来自于大陆下地壳,且与耀岭河群的基性火山岩相似,这些“C”型埃达克质岩浆可能源于加厚基性下地壳的部分熔融,其残留相为(角闪)榴辉岩。

关键词:地球化学;Sr、Nd、Pb 同位素组成;“C”型埃达克岩;岩石成因;西秦岭

中图分类号:P597

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2016)03-174-08

自从 1990 年 Defant 和 Drummond^[1] 在《自然》杂志上提出埃达克岩的概念以来,中国涌现出大量关于埃达克岩的论文,这为花岗岩的研究带来挑战和机遇^[2]。Thiéblemont 等^[3] 对全球 43 个金、银、铜、钼低温热液和斑岩矿床进行统计,发现其中的 38 个矿床与埃达克岩有关,表明埃达克岩与铜金矿化关系密切。

近些年来,白马山岩体的勘探工作尚未取得突破,岩体与成矿的关系尚不清楚。本文从埃达克岩角度出发,研究白马山小岩体的地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素组成特征,进一步厘定其为“C”型埃达克岩,讨论其岩石成因和含矿性,为该地区金矿床的勘探提供新思路。

1 区域地质及岩体特征

秦岭造山带中生代岩浆活动强烈,形成大量的印支—燕山期花岗岩类^[4-6]。南秦岭构造带勉略缝合带北侧的花岗岩带主体侵位时间为 220~206Ma^[7],西秦岭的岷县、礼县,夏河和南部玛曲、东

部摩天岭地区的花岗岩具有埃达克岩的特征^[8]。西秦岭南部转庙子地区出露少量具有铜金矿化的小岩体(转庙子、金厂、白马山岩体等),其中金厂岩体发育的暗色微粒包体、石英闪长岩与金厂矽卡岩型铜金矿化关系密切^[9-10]。白马山小岩体位于西秦岭白马山金矿区内,区内褶皱、断裂构造发育,褶皱以洮河复向斜为主体,断裂以东北向压性逆断裂为主,伴生近 EW 向和 NE 向次级断裂。岩浆岩零星出露,岩体附近发育大量呈岩墙状产出的石英闪长岩脉岩(图 1),另有少量煌斑岩、安山玢岩等呈岩株、岩脉状沿区域构造展布,共同构成后造山脉岩组合。地层主要出露下三叠统隆务群三渡水组(T_{1s})和西坡组(T_{1x}),西坡组为岩体和矿床的主要围岩^[11]。白马山金矿属类卡林型金矿床,矿体受次级断裂和地层双重制约,常呈脉状、似层状、板状和透镜状,目前达中型规模^[12]。

白马山岩体以石英闪长岩为主,呈浅灰—灰白—肉红色,细—中粒结构,主要矿物为斜长石(55%)、石英(15%)、微斜长石(15%),少量黑云母

* 收稿日期:2015-08-12 改回日期:2015-09-14 责任编辑:谭桂丽

基金项目:国家自然科学基金“新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿作用与深部地质过程”(项目编号:41372101)。

第一作者简介:王建中,1978 年生,男,博士,主要从事矿产勘查及矿床学研究工作。

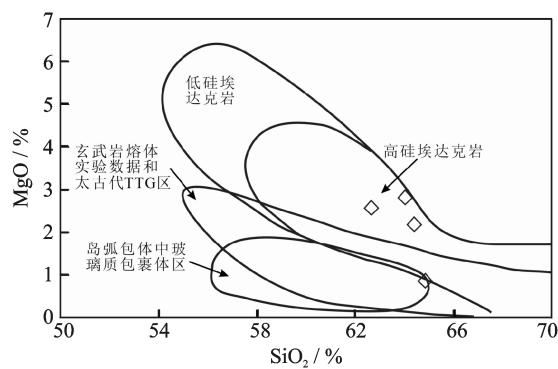


图 2 白马山岩体 SiO₂-MgO 图解(底图据文献[2])
Fig.2 SiO₂ vs. MgO diagram of the Baimashan rock mass

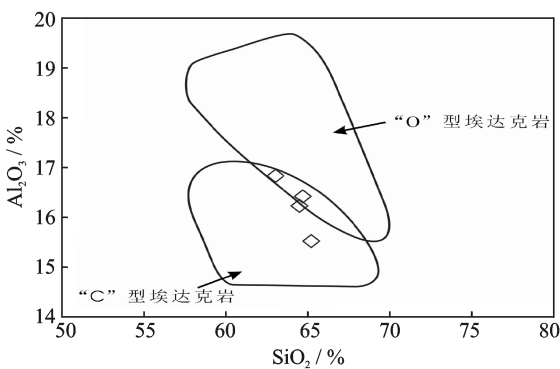


图 3 白马山岩体 SiO₂-Al₂O₃ 图解(底图据文献[2])
Fig.3 SiO₂ vs. Al₂O₃ diagram of the Baimashan rock mass

3.2 稀土元素

白马山岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 4)显示,石英闪长岩富集轻稀土元素(LREE),亏损重稀土元素(HREE),属轻稀土富集型^[11],与(La/Sm)_N分布范围介于3.05~5.24之间一致。石英闪长岩稀土元素分析结果(表 2)显示,ΣCe为(87.99~120.36)×10⁻⁶,ΣY为(13.18~18.81)×10⁻⁶,具有“石榴子石痕迹”^[11];Yb亏损,

Yb为(0.62~0.83)×10⁻⁶,Gd/Yb=3.19~3.50。轻、重稀土元素分馏明显,ΣCe/ΣY为5.23~7.56,(La/Yb)_N为13.70~31.31;轻稀土元素比重稀土元素分馏明显,(La/Sm)_N为3.05~5.24,(Gd/Yb)_N为2.64~2.90。在Sr-Yb图解(图 5)中,4件样品均落在高Sr低Yb的埃达克岩区(I区),且样品沿Sr/Yb=800呈线性分布,具有弱的钠质系列变化趋势。

表 2 白马山石英闪长岩稀土元素分析结果(10⁻⁶)

Table 2 Rare earth element analysis results of granodiorites in the Baimashan area (10⁻⁶)

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
BM1	34.04	55.00	4.88	21.67	4.20	0.58	2.51	0.35	2.23	0.36	1.02	0.14
BM2	23.68	48.35	4.87	19.42	3.79	0.73	2.61	0.34	2.21	0.34	0.95	0.13
BM3	25.22	48.74	4.55	17.17	3.36	0.63	2.17	0.27	1.46	0.27	0.75	0.11
BM4	15.85	47.71	4.46	16.02	3.36	0.59	2.65	0.32	2.25	0.35	0.97	0.14
I	0.237	0.612	0.095	0.467	0.153	0.058	0.2055	0.0374	0.254	0.0566	0.1655	0.0255
样品	Yb	Lu	ΣREE	ΣCe	ΣY	ΣCe/ΣY	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(La/Lu) _N	(Gd/Yb) _N
BM1	0.78	0.14	139.17	120.36	18.81	6.40	0.92	0.51	31.31	5.24	25.25	2.66
BM2	0.75	0.13	117.82	100.83	16.99	5.94	1.05	0.67	22.64	4.04	20.03	2.88
BM3	0.62	0.11	112.84	99.67	13.18	7.56	1.03	0.66	29.17	4.84	25.37	2.90
BM4	0.83	0.14	104.83	87.99	16.83	5.23	1.37	0.59	13.70	3.05	12.34	2.64

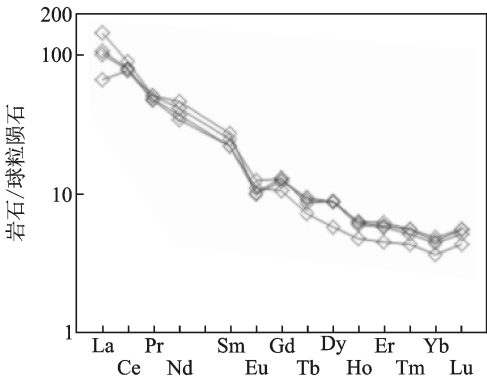


图 4 白马山岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图
(球粒陨石数据引自文献[3])
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns for the Baimashan rock mass

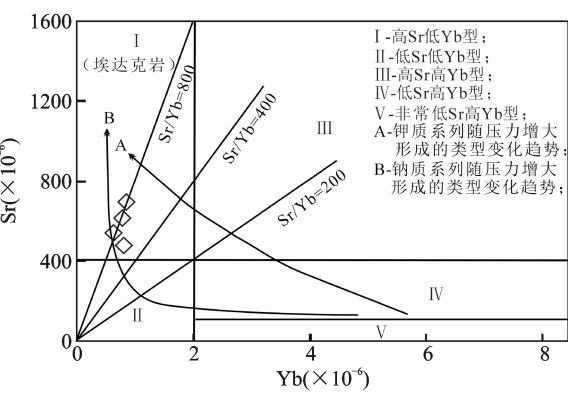


图 5 白马山岩体 Sr-Yb 图解(底图据文献[2])
Fig.5 Sr vs. Yb diagram of the Baimashan rock mass

3.3 微量元素

白马山石英闪长岩微量元素分析结果(表 3)显示,白马山岩体中过渡元素(V、Cr、Co、Ni)较富集,具有高 Sr 低 Y,高 Sr/Y 的特点,Sr 为 $(470.62 \sim 688.87) \times 10^{-6}$, δSr 为 $0.47 \sim 0.94$ (平均 0.69); $Y < 18 \times 10^{-6}$; Sr/Y 为 $41.21 \sim 73.83$, Y/Yb 为 $11.24 \sim 14.64$,平均值为 12.73 。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6)中,白马山岩体富集大离子亲石元素(LILEs),亏损高场强元素(HFSEs),具有强烈的 Nb、Ta、P 负异常^[11]。

综上,白马山石英闪长岩属于高钾钙碱性系列岩石,富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,具有“石榴

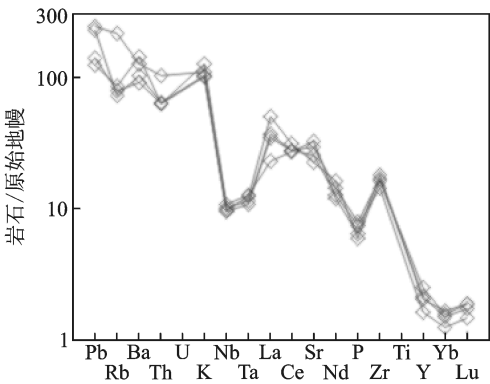


图 6 白马山岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准化数据引自文献[13])

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams for the Baimashan rock mass

表 3 白马山石英闪长岩微量元素分析结果(10^{-6})

Table 3 Trace element analysis results of quartz diorites in the Baimashan area (10^{-6})

样品	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y
BM1	28.86	1.97	8.70	98.88	118.35	9.11	21.62	53.17	371.87	19.26	134.16	470.62	11.42
BM2	25.68	2.09	5.81	125.58	41.14	10.29	17.94	15.15	171.08	19.57	45.60	609.76	9.66
BM3	21.18	1.88	3.98	114.14	37.93	9.58	17.47	17.63	126.43	17.56	48.90	538.64	7.53
BM4	46.93	2.30	6.81	111.62	118.06	9.30	29.45	106.87	95.76	19.32	53.44	688.87	9.33
样品	Zr	Nb	Cd	In	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U	Sr/Y
BM1	181.95	6.92	0.90	0.03	4.63	868.21	3.13	0.51	44.69	0.22	8.59	2.34	41.21
BM2	189.70	7.19	0.56	0.03	2.40	710.92	3.13	0.47	41.56	0.05	5.44	1.75	63.10
BM3	160.85	6.77	0.39	0.02	2.39	620.92	2.73	0.44	25.24	0.13	5.23	1.52	71.57
BM4	199.93	7.72	0.33	0.03	2.85	976.16	3.40	0.52	22.63	1.37	5.28	1.76	73.83

子石痕迹”;球粒陨石标准化配分曲线属轻稀土富集型。岩体具有高 Sr 低 Y, Sr/Y 高的特点;富集大离子亲石元素(LILEs),亏损高场强元素(HFSEs),具有强烈的 Nb、Ta、P 负异常。白马山岩体地球化学特征表明,白马山石英闪长岩在主量、微量和稀土元素特征与“C”型埃达克岩相似^[11]。

4 Sr-Nd-Pb 同位素组成

白马山岩体初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.70637 , $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -6.75 (表 4), 具有较高的 T_{DM} 值(1.53Ga)。白马山岩体的 Nd 同位素组成明显不同于鱼洞子群,而基本与南秦岭耀岭河群相似。在 $t=200\text{Ma}$ 时,耀岭河群基性火山岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 约为 0.7058 , $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化于 $-2.50 \sim -4.00$ 之间, T_{DM} 变化于 $1.26 \sim 1.43\text{Ga}$ 之间^[15], 这与南秦岭白马山岩体石英闪长岩 Sr、Nd 同位素示踪的源区组成相接近^[14]。暗示其岩浆源区可能主要来自于南秦岭的大陆下地

壳,以类似南秦岭耀岭河群的基性火山岩为主,仅有少量的南秦岭较古老的地壳物质参与^[16]。

白马山岩体以略富放射成因 Pb 同位素组成为特征(表 5),其全岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.191 \sim 18.339$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.614 \sim 15.621$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.317 \sim 38.386$, 与碧口块体同时代的阳坝($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.039 \sim 18.203$)、南一里($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.501 \sim 15.582$)和木皮($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.215 \sim 38.567$)岩体^[17]的全岩 Pb 同位素组成相似,碧口块体的阳坝、南一里和木皮岩体已被证明为埃达克岩^[8]。白马山岩体全岩含有微量的 U 和 Th, U 为 $(1.75 \sim 2.34) \times 10^{-6}$, Th 为 $(5.44 \sim 8.59) \times 10^{-6}$, 总体显示白马山岩体以富放射成因 Pb 同位素组成为特征^[14]。相比较而言,白马山岩体全岩铅同位素组成与耀岭河群基性火山岩建造较接近,耀岭河群主要由细碧岩和细碧玢岩组成^[18], 其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.634$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.472$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.23$ ^[17]。

表 4 南秦岭花岗岩类全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the granitoids in Southern Qinling

岩体	样号	岩石类型	年龄 /Ma	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	εNd(t)	T _{DM} /Ga	数据来源
白马山	BM-1	石英闪长岩	200	0.70612	0.512189	−6.75	1.53	文献[14]
胭脂坝	Yzb-8	二长花岗岩	200	0.71051	0.512308	−4.05	1.33	文献[15]
东河台子	Dh-2	石英闪长岩	200	0.70878	0.512258	−5.41	1.45	
五 龙	W-5	斜长花岗岩	200	0.71227	0.512290	−4.61	1.38	
华 阳	Hy-8	二长花岗岩	200	0.70773	0.512257	−6.07	1.50	
西 坝	Xb-8	石英闪长岩	200	0.70858	0.512168	−6.88	1.57	
留 坝	Lb-8	石英闪长岩	200	0.71014	0.512148	−7.54	1.62	
鱼洞子群	93207	黑云斜长片麻岩	200	0.73032	0.511304	−24.17	3.11	文献[16]
鱼洞子群	93237	变粒岩	200	0.70502	0.511222	−25.73	2.77	
鱼洞子群	93114	斜长角闪岩	200	0.71491	0.511719	−16.37	3.19	
耀岭河群	YLH42-2~	细碧岩	200	0.70622~	0.512343~	−2.50~	1.26~	
	44-8			0.72344	0.512436	−4.00	1.43	

表 5 南秦岭花岗岩类 Pb 同位素组成

Table 5 Pb isotopic compositions of the granoids in Southern Qinling

岩体	样号	岩石类型	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	数据来源
白马山	BM-1	石英闪长岩	38.386	15.621	18.339	18.2219	15.6149	38.2495	文献[14]
	BM-2		38.317	15.614	18.191	18.0971	15.6089	38.2245	
胭脂坝	Yzb-8	二长花岗岩	37.709	15.485	17.781	17.7810	15.4850	37.7090	文献[15]
东河台子	Dh-2	石英闪长岩	37.787	15.507	18.040	18.0400	15.5070	37.7870	
五龙	W-5	斜长花岗岩	37.557	15.441	17.834	17.8340	15.4410	37.5570	
华阳	Hy-8	二长花岗岩	37.800	15.507	17.914	17.9140	15.5070	37.8000	
西坝	Xb-8	石英闪长岩	37.856	15.477	17.942	17.9420	15.4770	37.8560	
留坝	Lb-8	石英闪长岩	37.665	15.456	17.968	17.9680	15.4560	37.6650	
耀岭河群		变基性火山岩	38.230	15.472	17.634				文献[16]

5 岩石成因及地质意义

5.1 岩石成因

从上文可知,白马山石英闪长岩地球化学特征更接近“C”型埃达克岩^[11],Sr-Nd-Pb 同位素组成显示,岩浆源区可能为陆陆碰撞造成的加厚基性下地壳部分熔融的产物,以耀岭河群基性火山岩为主^[14],残留相为角闪榴辉岩。“O”型埃达克岩是在岛弧构造背景下,年轻(≤25Ma)俯冲板片部分熔融形成的地球化学多样性的钙碱性安山岩/英安岩^[1,18]。俯冲大洋岩石圈在俯冲早期被快速加热,热的板块和流体的作用^[18-19],易使俯冲洋壳熔融形成埃达克岩浆^[1]。模拟实验表明与地幔正常的脱水熔融作用相比,形成于俯冲板片熔融作用的埃达克岩浆一般发生在更浅部位。只有在俯冲作用初期阶段,洋壳板片在火山弧下接近 75~85 km 深度(相当于角闪岩相向榴辉岩相过渡地带)时发生部分熔

融才能形成埃达克岩浆,而当深度达 120~150 km (相当于榴辉岩相带)时则形成正常的岛弧火山岩浆(图 7)。埃达克岩可形成在不同的构造环境^[20],与铜、金成矿关系密切,有利的构造背景主要为岛弧、大陆板内伸展和大陆活动碰撞造山带环境^[21]。目前在活动陆缘的地壳加厚区、板块碰撞导致的地壳加厚区、高原底部均有发现。所以,地壳加厚是形成“C”型埃达克岩的必要条件^[2]。

关于“C”型埃达克岩的成因,部分学者认为,玄武质岩浆底侵下地壳熔融形成埃达克岩。还有部分学者认为,加厚下地壳底部的中-基性岩部分熔融形成“C”型埃达克岩^[2]。白马山小岩体强烈亏损重稀土元素(HREE)和高场强元素(HFSEs),具有强烈的 Nb、Ta 负异常^[11],指示其源区残留相中有石榴石,陡的 REE 配分模式和高的 La/Yb 也说明发生部分熔融时残留相为榴辉岩相^[18],因为石榴子石作为残留相保留了大部分 HREE,与其 Gd/Yb>1 的特点完全一致。RappRP 等^[22]认为埃达克岩岩浆

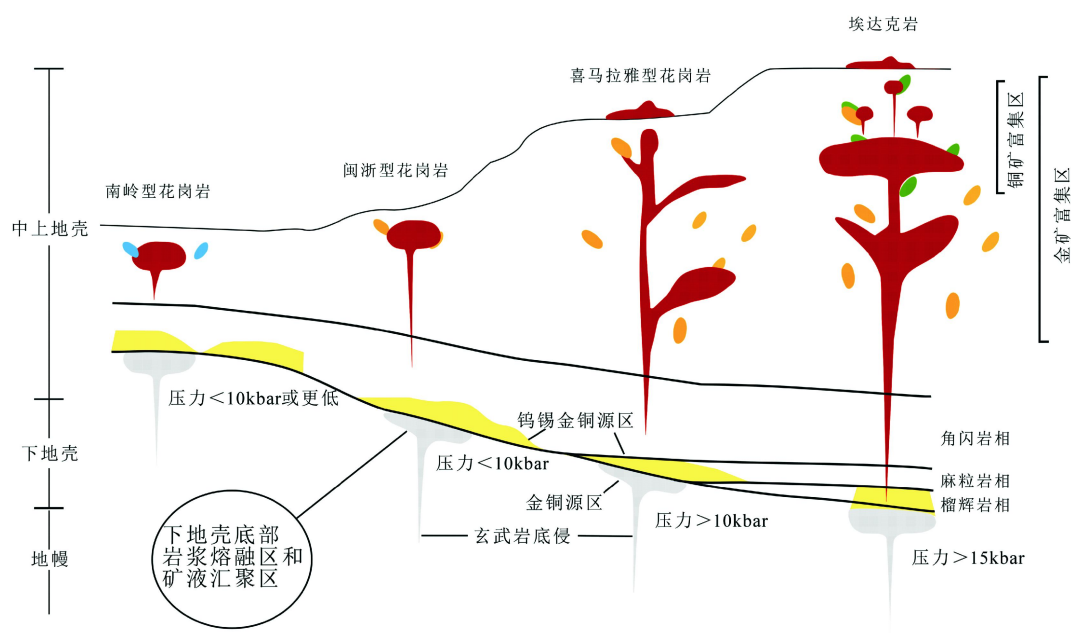


图 7 花岗岩形成深度示意图^[2]

Fig.7 Sketch map showing the forming depth of granite

的源区残留相为榴辉岩,强调石榴子石在控制熔体 HREE 和 Nb、Ta 等高场强元素的重要性。白马山小岩体的 Y/Yb 为 11.24~14.64(表 2),平均值为 12.73,表明岩体的源区残留相中除了石榴石还可能有角闪石存在。在图 8 上,投影点靠近石榴石角闪岩或(角闪)榴辉岩部分熔融曲线,暗示其熔体来自上述两者,而非更深处的 75~85 km 的地幔榴辉岩,进一步说明其熔体可能来自石榴石角闪岩或角闪榴辉岩。综上所述,白马山石英闪长岩源区的残留相中既有石榴石又有角闪石,即(角闪)榴辉岩相。因此,白马山小岩体形成于加厚的基性下地壳底部的部分熔融,其生成深度大致在 40~50 km(静岩压力梯度为 0.27 GPa/km)。这种由加厚地壳部分熔融形成的埃达克岩常发生在造山作用的后碰撞阶段,其构造体制处于碰撞期后的拉张环境,在此构造应力下,热的软流圈地幔物质上涌,在地幔热的烘烤作用下,使下地壳部分熔融形成埃达克岩。

张国伟等^[23]认为,西秦岭为一近 EW 向延伸的印支期造山带,勉略缝合带发育的时代为中—晚泥盆世,345~200Ma 勉略洋向北发生 B 型俯冲与碰撞造山,晚三叠世转入板内构造演化阶段。冯益民等^[24]认为,从中晚泥盆世开始到中二叠世,西秦岭地区已不是板块构造体制下的洋陆格局,为板内伸展阶段,中三叠世之后处于 A 型俯冲和陆内造山阶段。埃达克岩形成不仅需要地壳加厚(> 50 km)^[2],且需要异常高的热源。在主造山期,西秦岭

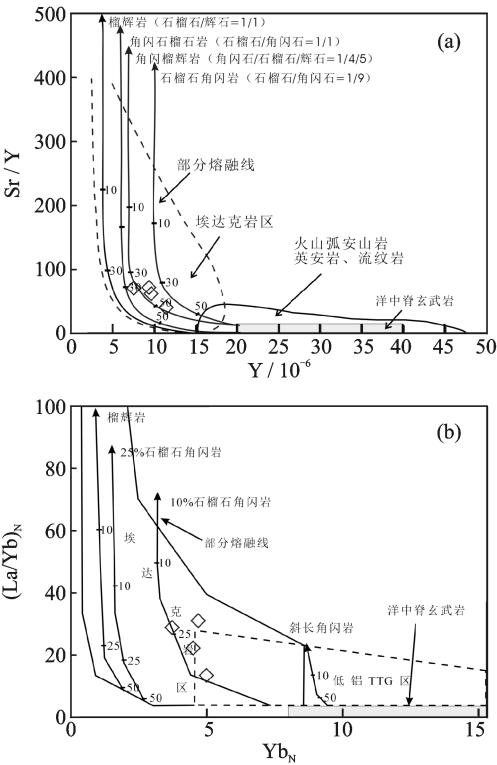


图 8 白马山岩体 Sr/Y-Y(a)及 (La/Yb)_N-Yb_N 图解(底图据文献^[2,5])

Fig.8 Diagrams of Sr/Y vs. Y (a) and (La/Yb)_N vs. Yb_N of the Baimashan rock body

白马山地区三叠纪也曾发生过地壳垂向增生加积过程^[8,12],加厚的下地壳发生相变而密度增大。主造

山期后,白马山地区的构造体制处于碰撞期后的拉张环境,热的软流圈地幔物质上涌,基性下地壳因构造伸展而发生减压部分熔融形成埃达克岩浆,上侵形成白马山石英闪长岩岩体^[11]。在埃达克岩浆形成过程中,伴随着低密度的中酸性物质移出下地壳,(角闪)榴辉岩相残留在源区,并释放大量的水。

5.2 地质意义

Thiéblemont 等统计了全球 43 个金、银、铜、钼低温热液和斑岩矿床,发现其中 38 个与埃达克岩有关,说明埃达克岩与浅成低温热液金银矿及斑岩型铜金矿床有密切关系^[3]。德兴斑岩铜矿与环太平洋斑岩成矿带中多数大型和世界级的斑岩铜矿一样与埃达克岩有关^[25],但并非所有的埃达克岩均形成铜金矿化^[26]。实验研究表明,形成埃达克岩需要高温(850~1150℃)及高压(1~4GPa),同时在埃达克岩岩浆形成过程中,由于角闪岩相转化为榴辉岩相释放出大量的水,较高的温度和压力,特别是富含热液的流体,有利于金属元素的萃取和迁移,并在适当的条件下富集成矿。金铜为亲硫元素,以硫化物的形式赋存在源区岩石中,可能只有在高氧逸度和高压下才能被流体萃取出来,因其不相容性,以氯的络合物形式进入岩浆熔体,有利于铜金成矿。朱弟成等^[27]对西藏含矿和不含矿两类埃达克岩进行判别,发现不含矿埃达克岩更富集 Sr, HFSEs 亏损更加强烈, Zr、Hf 相对富集,而含矿埃达克岩更加富集 LILEs。白马山石英闪长岩的 $Sr/Y = 41.21 \sim 73.83$, 在 $Sr/Y-Y$ 图解(图 9)中,白马山石英闪长岩样品大多数落入含矿埃达克岩区,有利于铜金矿化。白马山小岩体附近出露大量的脉岩,岩性为石英闪长玢岩,呈岩墙状产出,产状比较陡,厚 < 2m,通常在 10~50cm 之间,岩墙大致平行展布,边部见少量黄铁矿和赤铁矿^[14]。局部岩墙(脉)侵入至白马山小岩体中,与小岩体共同构成后造山脉岩组合,岩浆侵位伴生大规模流体活动,暗示小岩体为流体活动的中心,可能为金的成矿提供热能和部分物质。因此,早—中三叠世时期,白马山岩体与俯冲洋壳的关系不明显,加厚的大陆下地壳在壳/幔转换带发生变质作用,基性下地壳在挤压—伸展转换的构造背景下,部分熔融形成“C”型埃达克岩,白马山石英闪长岩与白马山金矿床的关系还需要成矿流体性质、稳定同位素和年代学等多方面的证据。因为白马山金矿床受区域断裂系统控制,同生断裂、次级断裂是主要的控矿构造,矿体受次级断裂和地层的双重制约,常呈脉状、似层状、板状和透镜状等^[12],在未来的勘探找矿工作中,应紧紧围绕白马山小岩体,以东北向次级断

裂系统为重点开展工作。

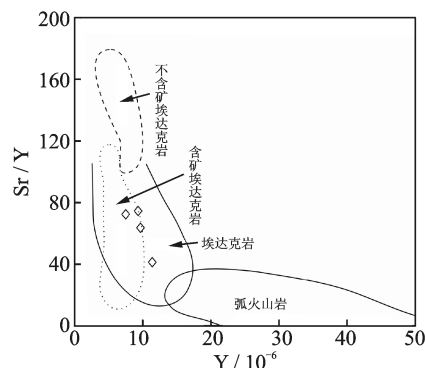


图 9 白马山小岩体 $Sr/Y-Y$ 图解(底图据文献[27])

Fig. 9 Sr/Y vs. Y diagram of the Baimashan rock mass

6 结论

白马山岩体的地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素组成特征表明,该岩体为“C”型埃达克岩,岩浆源区主要为加厚的大陆下地壳,与耀岭河群的基性火山岩相似,残留相为(角闪)榴辉岩。建议围绕白马山岩体,以东北向次级断裂系统为重点开展下一步勘探找矿工作。

参考文献

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347(18): 662-665.
- [2] 张旗,王焰,熊小林,等.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇[M].北京:中国大地出版社,2008.
- [3] Thiéblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite[J]. Comptes Rendus De l'Académie Des Sciences. Serie. Sciences De La Terre Et Des Planetes, 1997, 325(2): 103-109.
- [4] 张宏飞,肖龙,张利,等.扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成:限制岩石成因及其动力学背景[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007, 37(4): 460-470.
- [5] 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社 2001
- [6] 秦江锋,赖绍聪.秦岭造山带晚三叠世花岗岩成因与深部动力学[M].北京:科学出版社 2011.
- [7] 孙卫东,李曙光, Yadong Chen,等.南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].地球化学,2000, 29(3): 209-216.
- [8] 金维浚,张旗,何登发,等.西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J].岩石学报,2005, 21(3): 959-966.
- [9] 刘志鹏,李建威.西秦岭金厂石英闪长岩的岩浆混合成

- 因:岩相学和锆石 U-Pb 年代学证据及其构造意义[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1077-1090.
- [10] 张智兴, 辛存林. 甘肃金厂砂卡岩型铜金矿地质特征及成因探讨[J]. 甘肃冶金, 2004, 2(2): 23-25.
- [11] 王建中, 钱壮志, 姜超, 等. 南秦岭白马山金矿区石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(5): 30-38.
- [12] 柳世强, 王建中, 党满宏, 等. 甘肃白马山金矿床成因初探[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(4): 32-38.
- [13] Sun S-S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]. London: Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [14] 张永华, 王建中, 钱壮志, 等. 南秦岭白马山岩体 Sr、Nd、Pb 同位素组成及源区示踪[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(5): 20-27.
- [15] 张宏飞, 欧阳建平, 凌文黎, 等. 南秦岭宁陕地区花岗岩类 Pb、Sr、Nd 同位素组成及其深部地质信息[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(1): 23-26, 28-33.
- [16] 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 等. 东秦岭商丹构造带陆壳俯冲碰撞——花岗岩质浆源区同位素示踪证据[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(3): 231-236.
- [17] 邵世才, 张本仁, 李泽九. 秦岭造山带东江口花岗岩体群的地球化学研究及其构造环境[J]. 矿产与地质, 1991, 25(6): 424-429.
- [18] 牛耀龄. 全球构造与地球动力学—岩石学与地球化学方法应用实例[M]. 北京: 科学出版社 2013.
- [19] 王强, 唐功建, 贾小辉, 等. 埃达克质岩的金属成矿作用[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 350-364.
- [20] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 257-268.
- [21] Defant M J, 许继峰, Kepezshinskas P, 等. 埃达克岩关于其成因的一些不同观点[J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 129-142.
- [22] Rapp R P, Shimizu Nobumichi, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. Nature, 2003, 425(6958): 605-609.
- [23] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 23-32.
- [24] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质, 2003, 36, (1): 1-10.
- [25] 翁望飞, 丁勇. 德兴含铜埃达克质斑岩的地球化学特征成因及地质意义[J]. 资源调查与环境, 2015, 36, (2): 104-115.
- [26] 王凡, 赵磊, 王金荣, 等. 甘肃中南部与埃达克质岩有关的斑岩型 Cu、Au 矿成矿规律与找矿方向[J]. 黄金科学技术, 2012, 20(1): 23-26.
- [27] 朱弟成, 段丽萍, 廖忠礼, 等. 两类埃达克岩 (Adakite) 的判别[J]. 矿物岩石, 2002, 22(3): 5-9.

Petrogenesis of the Baimashan C-type adakite in Western Qinling : Constraints from their geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions

WANG Jian-zhong^{1,2}, QIAN Zhuang-zhi², XU Gang², JIANG Chao²
 (1. No. 5 Gold Geological Party of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710100, China)
 (2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education; Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Baimashan small rock body, related to gold deposit in space, is located in the Baimashan gold mining field, western Qinling metallogenic belt. This study conducted geochemical characteristics analysis of main elements, trace elements and rare earth elements, and Sr-Nd-Pd isotopic composition so as to understand its petrogenesis. The results indicate that these rocks belong to high K calc-alkalic series and have geochemical compositions similar to the C-type adakite. Sr-Nd-Pb isotopic compositions show that the rock body is characterized by enrichment of radiogenic Pb, with initial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of 0.706, negative $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ of -6.75, and T_{DM} of 1.53Ga, implying that the magmas should derive from lower continental crust and geochemically similar to the mafic rocks of the Yaolinghe Group. It can be concluded that the rock might result from partial melting of thickened mafic lower crust, with residual phase being amphibole eclogite.

Key words: geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopic compositions; C-type adakite; petrogenesis; Western Qinling