

拉萨地块中北部晚白垩世(约 90Ma) 拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因*

余红霞^{1,2} 陈建林^{1**} 许继峰¹ 王保弟³ 邬建斌^{1,2} 梁华英¹

YU HongXia^{1,2}, CHEN JianLin^{1**}, XU JiFeng¹, WANG BaoDi³, WU JianBin^{1,2} and LIANG HuaYing¹

1. 同位素地球化学国家重点实验室,中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640

2. 中国科学院研究生院,北京 100039

3. 成都地质矿产研究所,成都 610081

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China

2011-04-05 收稿, 2011-05-25 改回.

Yu HX, Chen JL, Xu JF, Wang BD, Wu JB and Liang HY. 2011. Geochemistry and origin of Late Cretaceous (~90Ma) ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):2011–2022

Abstract The ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane, with a forming age of 90 ~ 88Ma, shows some typical geochemical characteristics of an adakite, such as high SiO₂ (>69%), Al₂O₃ (15.89% in average), Sr (354 × 10⁻⁶ in average), but low Y (12.97 × 10⁻⁶ in average), Yb (0.95 × 10⁻⁶ in average) contents, and strongly fractionation between LREE and HREE ((La/Yb)_N = 19.8 in average). Meanwhile, it is of relatively higher Mg[#] (65 in average), Cr (107 × 10⁻⁶ in average) and Ni (13 × 10⁻⁶ in average). These geochemical features, combined with other characteristics of Late Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, indicate that they did not result from melting of young oceanic crust, assimilation and fractional crystallization, or from either underplated or thickened continental crust. Instead, they were possibly derived from partial melting of delaminated lower continental crust. On the other hand, they are also likely to the result of partial melting of crust-mantle material, triggered by slab break-off of south-dipping subduction of Slainajap ocean or Bangong Co-Nujiang ocean.

Key words Late Cretaceous; Balazha; Ore-bearing porphyry; Geochemistry; Lhasa terrane

摘要 拉萨地块中北部形成于 90 ~ 88Ma 的拔拉扎含矿斑岩具有明显的埃达克质岩特征:高 SiO₂ (>69%)、Al₂O₃ (平均为 15.89%)、Sr (平均为 354 × 10⁻⁶)、低 Y (平均为 12.97 × 10⁻⁶)、Yb (平均为 0.95 × 10⁻⁶) 含量,轻重稀土强烈分异((La/Yb)_N 平均为 19.8);同时它们有着高 Mg[#] (平均为 65)、Cr (平均为 107 × 10⁻⁶)、Ni (平均为 13 × 10⁻⁶) 含量。研究区这些具有埃达克质岩特征的含矿斑岩并非源于俯冲洋壳、底侵或加厚下地壳部分熔融的产物,也不是玄武质岩浆结晶分异的产物,而很可能是拆沉下地壳部分熔融的结果。另一方面,南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳的断离也可能诱发板片窗上部的壳幔物质发生部分熔融而形成研究区的含矿斑岩。

关键词 晚白垩世;拔拉扎;含矿斑岩;地球化学;拉萨地块

中图法分类号 P588.14;P597.3

* 本文受中科院知识创新项目(KZCX2-YW-Q04)、973项目(2009CB421004、2011CB403100)、国家自然科学基金项目(40872055、40930316、41073033)和中国地质调查局项目(1212010818098)联合资助。

第一作者简介:余红霞,女,1986年生,硕士研究生,地球化学专业

** 通讯作者:陈建林,男,1971年生,博士,地球化学专业,主要从事青藏高原中-新生代火山岩研究工作,E-mail: lzdxchen@gig.ac.cn

1 引言

以往人们对于拉萨地块中生代火山岩以及斑岩型矿床的研究主要集中于拉萨地块的中南部地区 (Coulon *et al.*, 1986; Pearce and Mei, 1988; 李才等, 2003; 翟庆国等, 2005; 何钟铨等, 2006; 姚鹏等, 2006; 董彦辉等, 2006; Wen *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2009a; 康志强等, 2009a; Ji *et al.*, 2009a, b), 并认为它们是新特提斯洋向北俯冲消减的产物; 近年来, 拉萨地块中北部中生代岩浆活动事件也引起了人们的极大关注 (朱弟成等, 2006; 曲晓明等, 2006; 辛洪波和曲晓明, 2006; 周长勇等, 2008; 康志强等, 2008, 2009b, 2010; 何丽等, 2009; 张晓倩等, 2010; 马国林和岳雅惠, 2010; 刘伟等, 2010; 张亮亮等, 2010; 陈越等, 2010; Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。虽然早期将拉萨地块中北部的白垩纪岩浆岩归因于新特提斯洋壳的北向俯冲 (Coulon *et al.*, 1986; Kapp *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2003; 丁林和来庆洲, 2003; Wen *et al.*, 2008; 马国林和岳雅惠, 2010), 但越来越

多的证据却更支持班公湖-怒江洋壳的南向俯冲 (朱弟成等, 2006, 2008; 曲晓明等, 2006; 康志强等, 2010; Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。最近研究表明, 南向俯冲的班公湖-怒江洋壳, 可能在 110Ma 发生了断离, 随后拉萨地块北部地区转为陆内背景 (Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。由于相关岩浆活动记录的缺乏, 目前对拉萨地块北部地区 110Ma 以来的岩浆演化历史尚不清楚。本文试图通过对出露于拉萨地块北部约 90Ma 的拔拉扎含铜矿斑岩 (王保弟等, 2011) 的年代学和地球化学的研究, 探讨其岩石成因以及构造背景, 同时与前人对拉萨地块中北部晚白垩世火山岩的研究成果作对比, 从而对拉萨地块中北部晚白垩世的构造演化加以约束, 以期与之相关的找矿工作提供理论指导。

2 区域地质概况

青藏高原是地球上抬升最高的构造单元, 它由一系列东西向延伸的地块组成, 即由北向南它们依次为松潘-甘孜、羌塘和拉萨地块 (图 1), 它们之间被班公湖-怒江缝合带和金沙

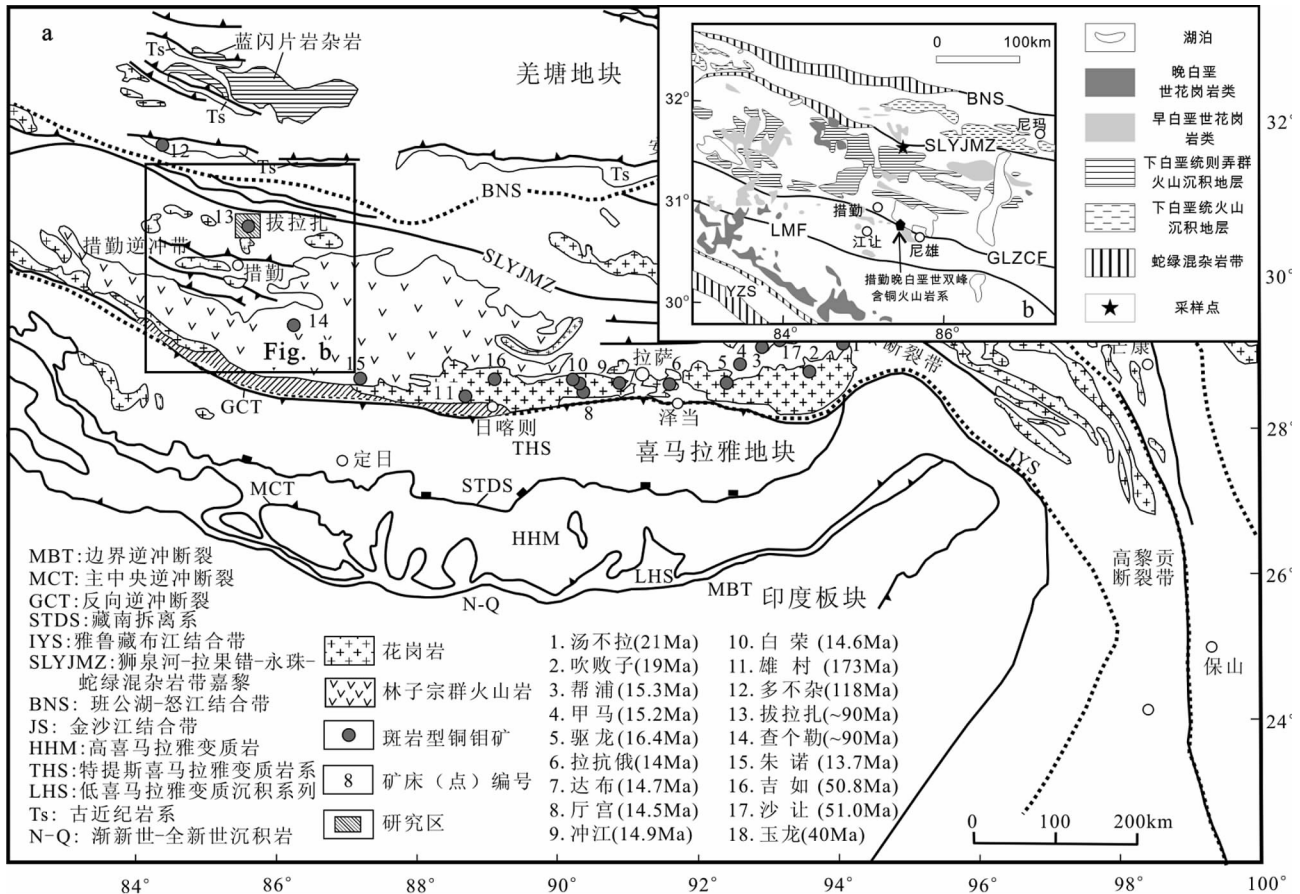


图 1 青藏高原典型斑岩型矿床分布图 (a, 据 Hou and Cook, 2009; 王保弟等, 2011) 和研究区地质简图 (b, 据朱弟成等, 2009)

BNS-班公湖-怒江缝合带; SLYJMZ-狮泉河-拉果错-永珠-嘉黎蛇绿混杂带; GLZCF-噶尔-隆格尔-扎日南木错-措麦断裂带; LMF-沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂

Fig. 1 Distribution of typical porphyry deposit in Tibet (a, after Hou and Cook, 2009; Wang *et al.*, 2011) and geological map of the studied area (b, after Zhu *et al.*, 2009)

表1 拉萨地块中北部拔拉杂含矿斑岩锆石 U-Pb 定年分析结果表

Table 1 U-Pb zircon dating results of ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane

测点号	Th U		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(×10 ⁻⁶)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ
ZC17-01	732	2503	0.29	0.05224	0.00445	0.09937	0.00830	0.01338	0.00026	296.1	183.0	96.2	7.7	85.7	1.6
ZC17-02	1614	2175	0.74	0.05185	0.00467	0.09620	0.00850	0.01305	0.00025	278.9	193.3	93.3	7.9	83.6	1.6
ZC17-03	699	1655	0.42	0.05428	0.00556	0.10414	0.01046	0.01349	0.00030	382.4	215.3	100.6	9.6	86.4	1.9
ZC17-04	916	1699	0.54	0.04929	0.00475	0.09875	0.00935	0.01408	0.00028	161.8	210.9	95.6	8.6	90.2	1.8
ZC17-05	1017	2092	0.49	0.04872	0.00568	0.10020	0.01147	0.01446	0.00034	134.3	253.3	97.0	10.6	92.5	2.2
ZC17-06	1456	2189	0.66	0.04895	0.00439	0.09727	0.00856	0.01397	0.00028	145.4	197.9	94.2	7.9	89.4	1.8
ZC17-07	571	760	0.75	0.04527	0.01051	0.09317	0.02137	0.01447	0.00054	0.1	443.1	90.5	19.9	92.6	3.4
ZC17-08	522	1240	0.42	0.04628	0.00540	0.09527	0.01094	0.01447	0.00033	12.0	259.2	92.4	10.1	92.6	2.1
ZC17-09	593	762	0.78	0.04643	0.00749	0.09314	0.01484	0.01410	0.00039	19.9	347.7	90.4	13.8	90.2	2.5
ZC17-10	1115	2216	0.50	0.04724	0.00476	0.09383	0.00927	0.01396	0.00030	61.0	224.3	91.1	8.6	89.3	1.9
ZC17-11	2146	3768	0.57	0.05175	0.00301	0.09728	0.00553	0.01320	0.00020	274.3	128.1	94.3	5.1	84.6	1.3
ZC17-12	901	1924	0.47	0.04702	0.00433	0.09337	0.00844	0.01395	0.00028	49.9	206.8	90.6	7.8	89.3	1.8
ZC17-13	1030	1834	0.56	0.05055	0.00547	0.09667	0.01025	0.01343	0.00031	220.2	232.3	93.7	9.5	86.0	2.0
ZC17-14	1855	3975	0.47	0.04769	0.00357	0.09472	0.00695	0.01395	0.00024	82.9	169.4	91.9	6.5	89.3	1.5
ZC17-15	415	596	0.70	0.04617	0.00816	0.09290	0.01624	0.01413	0.00039	6.4	378.0	90.2	15.1	90.4	2.5

江缝合带所分隔。

本文研究的含矿斑岩位于拉萨地块北部的尼玛县中仓乡南50km处的拔拉杂斑岩矿床,其北侧紧邻狮泉河-拉果错-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带(简称为Slainajap带,潘桂棠等,2006;朱弟成等,2008;康志强等,2008),再往北为班公湖-怒江结合带(图1)。拔拉杂斑岩矿床产于斑岩体之内以及斑岩体与下拉组灰岩接触带中的矽卡岩中。斑岩体出露面积均小于0.1km²,多呈岩脉、岩枝状产出,侵入到中上侏罗统接奴群(J_{2-3jn})、下白垩统曲松波群(K_{1q})和下白垩统郎山组(K_{1l})地层中,主要有花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、斜长花岗斑岩、黑云二长花岗斑岩、花岗闪长岩、花岗闪长玢岩、石英闪长玢岩等。含矿斑岩体主要为花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、石英二长斑岩等。研究区的含矿斑岩主要为浅灰白色,呈斑状结构,块状构造;斑晶主要有石英,钾长石和酸性斜长石,副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石等;斑晶大小约2~5mm,石英斑晶(5%~10%)为无色,他形粒状;斜长石、钾长石,板条状,晶面浑浊。基质具显微细晶结构和嵌晶结构,块状构造,成分主要为石英、长石、黑云母等。

3 分析方法

本次研究对拔拉杂含矿斑岩中的二长花岗斑岩样品作了年代学研究(ZC17, GPS坐标,31°44'36"N,85°31'16"E)。选取的锆石利用中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的激光剥蚀等离子质谱(LA-ICPMS)进行U-Pb测年。测试所用激光剥蚀系统为193nmArF-excimer激光器的GeoLas 2005,激光束直径为30um,以He作为剥蚀物质载气,年龄采用国际标样91500进行外标校正,

元素含量采用NISTSRM610,以²⁹Si作为内标校正仪器引起的信号漂移,详细分析过程参照(Gao *et al.*, 2001)。锆石原位微区测试点的同位素比值和U-Pb年龄采用GLITTER(version 3.23),加权年龄和协和图采用Isoplot 3.0完成。

样品的主量元素和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成,在处理前选取新鲜样品,去除风化面,手工碎至1~5mm(与杏仁体粒径相当),轮流用5% HNO₃和5% HCl在超声波清洗仪中清洗,以除去杏仁体及碳酸盐化的影响,烘干后手工选除石英质杏仁体,随后用不锈钢钵粉碎至200目用于化学分析。主量元素采用碱熔玻璃片XRF法分析,微量元素采用高温高压消解,用PE Elan 6000型ICP-MS分析。主量元素的分析精度好于5%,微量元素的分析精度优于10%。相关分析方法和程序参见Chen *et al.* (2010)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石分析测试结果列在表1中。锆石阴极发光图像显示(图2a),大部分晶形多呈柱状,具有明显的振荡环带结构。锆石分析测试的结果显示Th/U均很高(0.29~0.78),这些比值远大于变质锆石的Th/U比值(<0.1),而属典型的岩浆成因锆石(Williams *et al.*, 1996),其中ZC17的15个分析点加权平均年龄为88.0±1.6Ma(MSWD=2.5)(图2b)。王保弟等(2011)利用锆石U-Pb和Re-Os等方法的研究结果显示,拔拉杂含矿斑岩和成矿时代约为90Ma。由此可以认为拔拉杂含矿斑岩在成矿和成岩形成时代为90~88Ma。

表2 青藏高原拉萨地块中北部拔拉杂含矿斑岩主量 (wt%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 元素分析数据表

Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analyzing results for ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane

样品号	09ZC-09	09ZC-10	09ZC-11	09ZC-15	09ZC-16	09ZC-21	09ZC-22	09ZC-23
SiO ₂	69.88	71.20	70.61	66.12	68.58	67.76	69.17	
TiO ₂	0.43	0.37	0.35	0.58	0.43	0.47	0.43	
Al ₂ O ₃	16.00	15.01	15.30	15.80	16.22	16.07	15.92	
Fe ₂ O ₃	0.63	1.33	1.73	3.75	2.58	2.75	1.22	
MnO	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	
MgO	1.28	1.35	1.29	2.81	1.68	1.91	1.73	
CaO	3.01	3.69	2.51	4.44	3.49	3.96	4.04	
Na ₂ O	4.48	3.33	2.59	3.46	4.91	3.88	3.72	
K ₂ O	3.58	2.54	4.09	1.87	1.26	2.29	2.89	
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.16	0.22	0.20	0.18	0.22	
LOI	0.55	1.09	1.42	0.97	0.72	0.79	0.72	
Total	100.09	100.09	100.08	100.07	100.08	100.08	100.08	
Mg [#]	80.16	66.98	60.01	59.99	56.56	58.16	73.98	
Sc	4.57	3.61	3.99	7.27	9.35	4.88	4.98	5.32
Cr	101	163	161	55.6	142	95.6	108	30.8
Co	1.11	2.45	3.85	29.6	16.6	3.97	6.22	36.1
Ni	7.46	15.4	8.56	28.2	31.7	10.1	26.0	19.1
Cu	71.2	91.2	347	41.7	49.9	14.5	9.15	5.40
Zn	12.0	31.1	15.5	21.7	12.2	5.56	52.6	4.75
Ga	18.1	17.7	19.0	17.0	17.4	19.1	18.2	18.7
Rb	131	112	185	136	118	71.0	104	115
Sr	357	308	278	355	423	317	405	391
Y	13.1	12.5	10.9	13.5	17.7	10.4	12.0	13.8
Zr	140	125	137	135	141	159	143	157
Nb	8.20	8.41	6.88	6.06	7.08	3.71	6.96	8.39
Cs	13.2	15.4	27.4	55.6	53.9	35.5	24.4	13.3
Ba	318	321	497	238	144	121	333	339
La	26.7	24.8	32.8	22.4	21.8	23.4	24.3	23.8
Ce	52.4	48.2	62.2	44.5	45.7	43.1	47.1	52.7
Pr	6.28	5.58	7.32	5.29	5.62	5.08	5.58	6.60
Nd	22.7	19.7	25.6	19.2	20.6	18.1	19.7	24.8
Sm	4.27	3.66	4.51	3.38	3.84	3.18	3.34	4.47
Eu	1.06	0.82	0.89	0.89	1.08	0.77	0.90	1.06
Gd	3.20	3.09	3.31	2.96	3.34	2.61	2.74	3.57
Tb	0.43	0.42	0.40	0.41	0.51	0.35	0.38	0.48
Dy	2.09	2.05	1.93	2.14	2.68	1.71	1.97	2.33
Ho	0.37	0.37	0.33	0.40	0.54	0.31	0.35	0.42
Er	0.96	0.97	0.85	1.06	1.40	0.79	0.93	1.08
Tm	0.14	0.14	0.12	0.16	0.21	0.12	0.14	0.15
Yb	0.94	0.87	0.78	1.01	1.35	0.74	0.87	0.99
Lu	0.14	0.13	0.12	0.16	0.20	0.11	0.14	0.15
Hf	3.86	3.65	4.18	3.56	3.68	4.11	3.76	4.29
Ta	0.91	1.24	0.97	0.60	0.55	0.36	0.63	0.94
Pb	21.7	10.7	18.6	5.37	4.64	4.20	14.8	9.51
Th	9.95	14.9	17.049	8.42	7.77	10.6	10.7	12.3
U	2.35	4.65	3.58	1.95	1.54	2.27	1.74	2.23

4.2 主量元素

研究区含矿斑岩的主量和微量分析测试结果列在表2中。在 SiO₂-(K₂O + Na₂O) 图 (TAS 分类图) (图3) 中, 研究区含矿斑岩岩石组合以酸性的石英闪长岩和花岗岩为主; 在 SiO₂-K₂O 图 (图4) 中研究区火山岩主要落在中钾和高钾

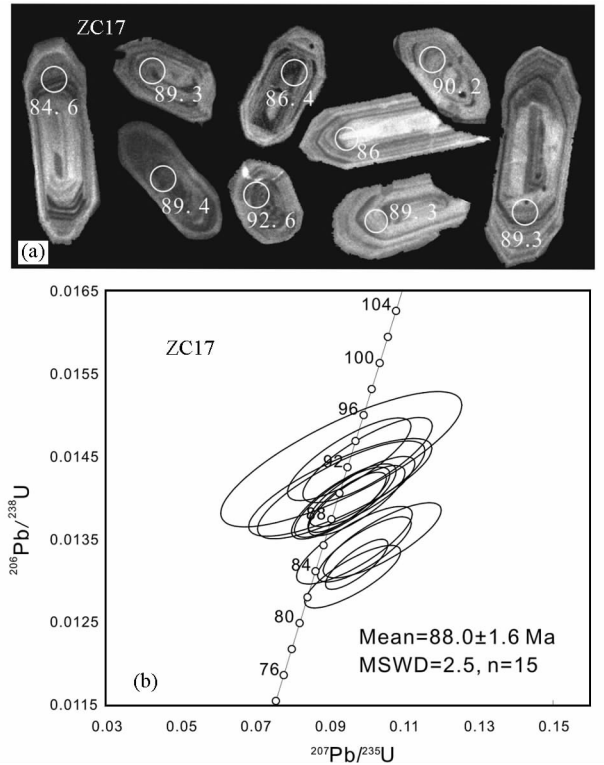


图2 拉萨地块中北部拔拉扎含矿斑岩锆石阴极发光照片 (a) 和锆石 U-Pb 年龄谐和图 (b)
Fig.2 The CL images of zircon (a) and LA-ICPMS U-Pb concordant curve (b) of ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane

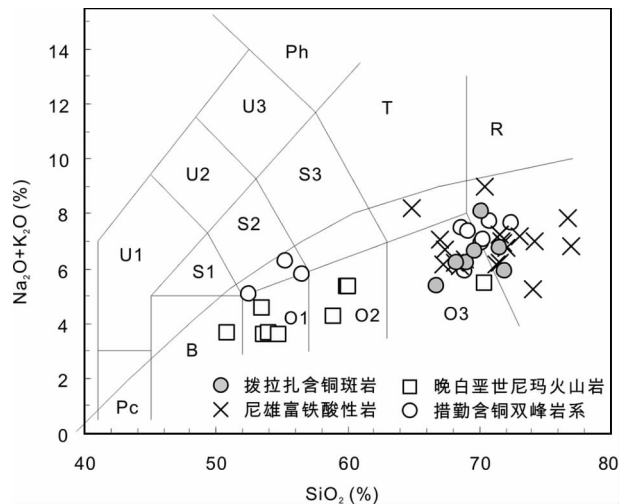


图3 青藏高原拉萨地块中北部白垩纪岩浆岩 TAS 图 (据 Le Bas *et al.*, 1986)
数据来源: 晚白垩世尼玛火山岩, 马国林和岳雅惠 (2010); 措勤含铜双峰岩系, 曲晓明等 (2006); 尼雄富铁酸性岩, 张晓倩等 (2010); 拔拉扎含矿斑岩, 本文. PC-苦橄玄武岩; B-玄武岩; U1-碧玄岩和碱玄岩; U2-响岩质碱玄武岩; U3-碱玄质响岩; O1-玄武安山岩; O2-安山岩; O3-英安岩; S1-粗面玄武岩; S2-玄武粗安岩; S3-粗安岩; T-粗面岩; R-流纹岩. 图4、图5、图7-图9的数据来源和图例同图3
Fig.3 TAS diagram for Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, Tibet (original diagram after Le Bas *et al.*, 1986)

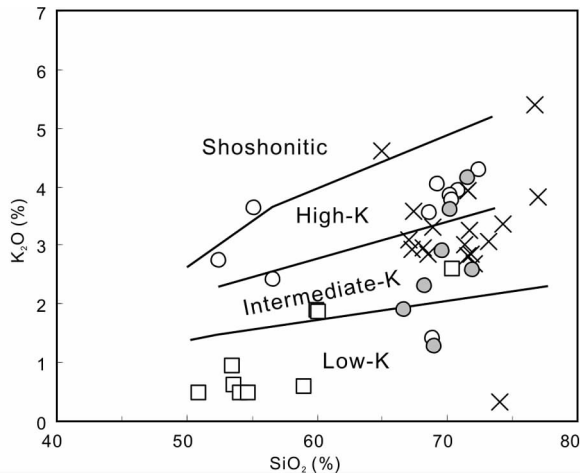


图4 青藏高原拉萨地块中北部白垩世岩浆岩 SiO_2 vs. K_2O

Fig. 4 SiO_2 vs. K_2O diagram for Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, Tibet

钙碱性岩区域之中,而且它们与晚白垩世措勤含铜双峰式岩系(约90~87Ma,图1b)(曲晓明等,2006;辛洪波等,2007)的酸性端元有着相似的分布范围。在 SiO_2 与主量的相关图中(图5),随着 SiO_2 含量的增加, TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 的含量降低,而 Na_2O 的含量却没有明显的变化趋势。同时,研究区主量元素含量与同时期拉萨地块中西部措勤含铜双峰式岩系的酸性端元(曲晓明等,2006;辛洪波等,2007)也有着相似分布特征和变化趋势。

4.3 微量元素

研究区酸性岩浆岩的球粒陨石标准化稀土(REE)分配曲线(图6a)表现为轻稀土富集型, Eu表现出从无异常到轻微负异常。轻、重稀土分异比较明显($12 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 30$, 平均值为19.8)。研究区含矿斑岩与同期的措勤含铜火山岩以及尼玛火山岩相比有明显低的重稀土(HREE)含量,指示其源区为石榴子石稳定区。在微量元素蛛网图上(图6b),研究区斑岩总体上具有富集强不相容性元素Rb、Th、U,而亏损Nb、Ta、Ti的特点,并且具Sr无明显异常,这与其无明显的Eu负异常是一致的。研究区火山岩与同时期措勤含铜火山岩和尼玛火山岩相比有较低的Nb、Ta、Ti含量。

5 讨论

5.1 岩石成因

5.1.1 埃达克质岩地球化学特征

研究区含矿斑岩具有类似于埃达克岩的地球化学特征,如高的 SiO_2 ($>69\%$)、Sr含量($277 \times 10^{-6} \sim 422 \times 10^{-6}$)、高Sr/Y比值(>23)(图7a),低HREE和Y($10.4 \times 10^{-6} \sim 17.7 \times 10^{-6}$,平均值为 13×10^{-6}),轻重稀土分异明显($12 <$

$(\text{La}/\text{Yb})_N < 30$,平均值为19.8)(图7b),无明显的Sr、Eu负异常(图6a, b)。同时研究区含矿斑岩具有相对高MgO($1.23\% < \text{MgO} < 2.83\%$), $\text{Mg}^\#$ (>57), Cr($30 \times 10^{-6} \sim 163 \times 10^{-6}$,平均值为 107×10^{-6})和Ni($7 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$,平均值为 13×10^{-6})含量(图8)。因此我们将研究区含矿斑岩称之为高镁的埃达克质岩。

5.1.2 岩石成因

自从Defant and Drummond(1990)提出埃达克岩是俯冲大洋壳在石榴子石的稳定区域内部分熔融的产物之后,随后的研究显示埃达克质岩同样可以通过部分熔融底侵或者加厚的下地壳(Atherton and Petford, 1993)、幔源玄武质岩浆的结晶分异(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006; Richards and Kerrich, 2007)和拆沉的下地壳的部分熔融(Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004)而形成。

虽然目前人们对班公湖-怒江缝合带形成的具体时代有所争议(Yin and Harrison, 2000; 朱弟成等, 2006; 陈玉禄等, 2006),但一般认为班公湖-怒江缝合带的闭合时间为晚侏罗世-早白垩世晚期(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。同时最近的研究表明,拉萨地块北部尼玛地区在125~118Ma出现的海相向非海相转变的记录(Kapp *et al.*, 2007),大约在110Ma就已经为陆内环境(Zhu *et al.*, 2009b, 2011)、晚白垩世拉萨地块北部地壳的强烈缩短(Kapp *et al.*, 2003, 2005; Volkmer *et al.*, 2007)以及大面积分布的晚白垩世竟柱山组磨拉石的出现(潘桂棠等, 2006),它们暗示在早白垩世晚期以来拉萨地块北缘已经进入了陆陆碰撞的阶段。因此位于拉萨地块中北部的形成于90~88Ma的研究区高镁的埃达克质岩,不可能是大洋板片部分熔融的产物。另外研究区埃达克质岩也可能不是玄武质岩浆结晶分异的产物,因为:(1)在研究区没有发现同时期的超镁铁质岩或者玄武质岩;(2)缺乏明显的Sr、Eu负异常;(3)La-La/Yb图(图9)可知,研究区含矿斑岩的岩浆主要是通过部分熔融形成。

由此看来,研究区的含矿斑岩最有可能的源区就是加厚或拆沉的下地壳的部分熔融。研究区含矿斑岩高的 SiO_2 ($>69\%$)和Th/U比值(3.2~6.2),较低的Sr/Y(<40)以及富钾的特征表明源于加厚的下地壳(Moyen, 2009);实验研究结果显示(Rapp and Watson, 1995),加厚下地壳或底侵的玄武岩发生部分熔融形成的熔体一般 $\text{Mg}^\# < 40$,而研究区埃达克质岩高的 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# > 57$), Cr($30 \times 10^{-6} \sim 163 \times 10^{-6}$,平均值为 107×10^{-6})和Ni($7 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$,平均值为 13×10^{-6})含量,表明有着一定幔源物质的参与。另外, Murphy *et al.* (1997)、丁林和来庆洲(2003)认为青藏高原南部地壳的加厚不仅仅是印度板块与欧亚大陆板块碰撞之后才开始,而在早白垩世因新特提斯洋的北向俯冲和班公湖-怒江洋逐渐闭合拉萨地块与羌塘地块相互碰撞而导致地壳发生缩短和加厚并快速抬升(Kapp *et al.*, 2003, 2005; Volkmer *et al.*, 2007);而位于其南部的措勤地区形成于90~88Ma日阿铜矿

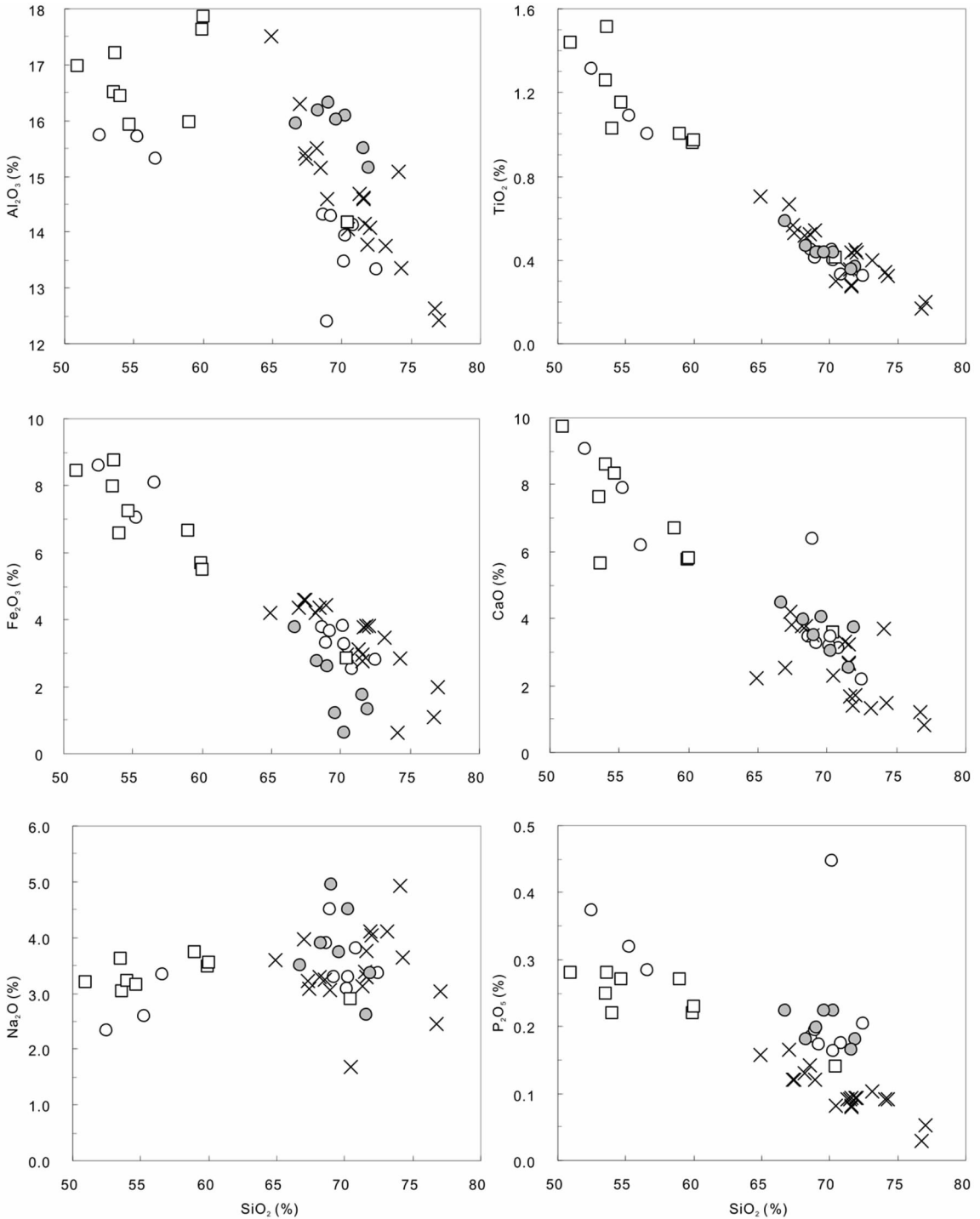


图5 青藏高原拉萨地块中北部白垩纪岩浆岩 Harter 图

Fig. 5 Harter diagram for Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, Tibet

双峰式火山岩的出现指示晚白垩世初期拉萨地块中北部为碰撞后伸展环境(曲晓明等, 2006; 辛洪波等, 2007)。因此我们认为研究区高镁的埃达克质岩很可能是拆沉的下地壳发生部分熔融的产物。另外一方面, 考虑到研究区北侧紧邻 Slainajap 带以及其北部的班公湖-怒江缝合带它们各自所代表的洋, 即 Slainajap 洋和班公湖-怒江洋均在晚侏罗世-早白

垩世闭合(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2009b, 2011; 康志强等, 2008)以及随后的拉萨地块和羌塘地块相互碰撞, 南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳很可能在拉萨地块中北部的底部于晚白垩世发生断离而引起软流圈物质上升, 使得板片窗上部的壳幔物质发生部分熔融从而形成研究区的含矿斑岩的物质源区。

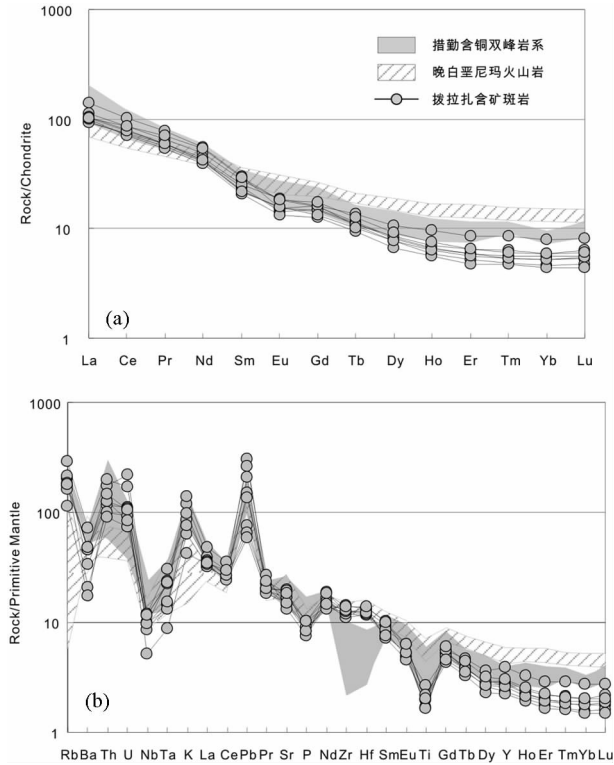


图6 球粒陨石标准化配分 REE 图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

数据来源同图3

Fig.6 Chondrite-normalized REE (a) and multi-element patterns normalized to primitive mantle (b) (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

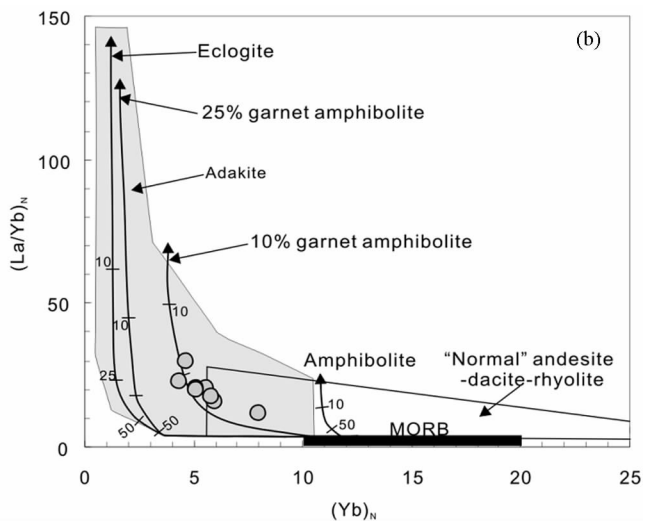
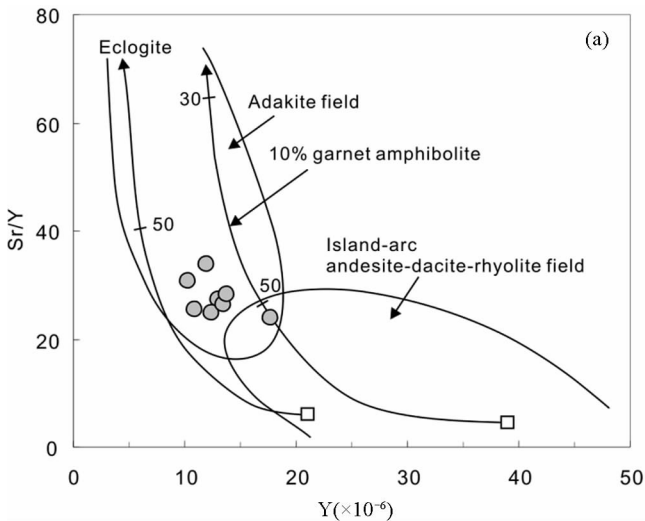


图7 青藏高原拉萨地块中北部拔拉扎晚白垩世含矿斑岩 Sr/Y vs. Y 图(a, 据 Drummond and Defant, 1990; Martin, 1986) 和 $(La/Yb)_N$ vs. $(Yb)_N$ 图(b, 据 Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996)

Fig.7 Diagrams of Sr/Y vs. Y (a, after Drummond and Defant, 1990; Martin, 1986) and $(La/Yb)_N$ vs. $(Yb)_N$ (b, after Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996) for Late Cretaceous ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane, Tibet

5.2 区域构造演化

在约 110Ma 左右拉萨地块中北部地区大规模岩浆的爆发指示早白垩世该区域深部构造有着重大变化,因此成为近年来一直研究和讨论的热点。目前对拉萨地块中北部早白垩世岩浆作用大爆发的动力学机制的解释主要存在二种截然不同的观点:一是它们是新特提斯洋壳向北低角度或平板俯冲的结果 (Coulon *et al.*, 1986; Copeland *et al.*, 1995; Kapp *et al.*, 2005, 2007; Zhang *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2006; Wen *et al.*, 2008);二是拉萨地块中北部白垩纪岩浆作用与班公湖-怒江洋壳岩石圈的南向俯冲有关(潘桂棠等, 1997, 2004; 邱瑞照等, 2004; 莫宣学等, 2005; 朱弟成等, 2006, 2008; Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。

早期 Coulon *et al.* (1986) 认为白垩纪特提斯洋壳岩石圈以非常低的角度(或平板俯冲)沿着拉萨地块南缘向北俯冲一直达到现在的班公湖-怒江缝合带附近,该观点主要是基于白垩纪南缘没有火山岩的存在。然而最近的研究显示在早白垩世,整个拉萨地块从南向北均有岩浆发育(朱弟成等, 2006, 2008; Wen *et al.*, 2008; 康志强等, 2008, 2009a, b, 2010; Ji *et al.*, 2009a, 纪伟强等, 2009; Zhu *et al.*, 2009a, b, 2011);另外,如果拉萨地块北部的早白垩世火山岩是因北向俯冲的特提斯洋壳岩石圈俯冲前缘所致,那么在其俯冲过程中由南向北应该发育有一系列地球化学特征相似的火山岩,然而目前拉萨地块中生代岩浆岩(主要为早白垩世岩浆岩)Hf 同位素研究结果显示并非如此(Zhu *et al.*, 2009b, 2011)。因此拉萨地块中北部大规模的具有岛弧特征的早白垩世火山岩很可能是与 Slainajap 洋或班公湖-怒江

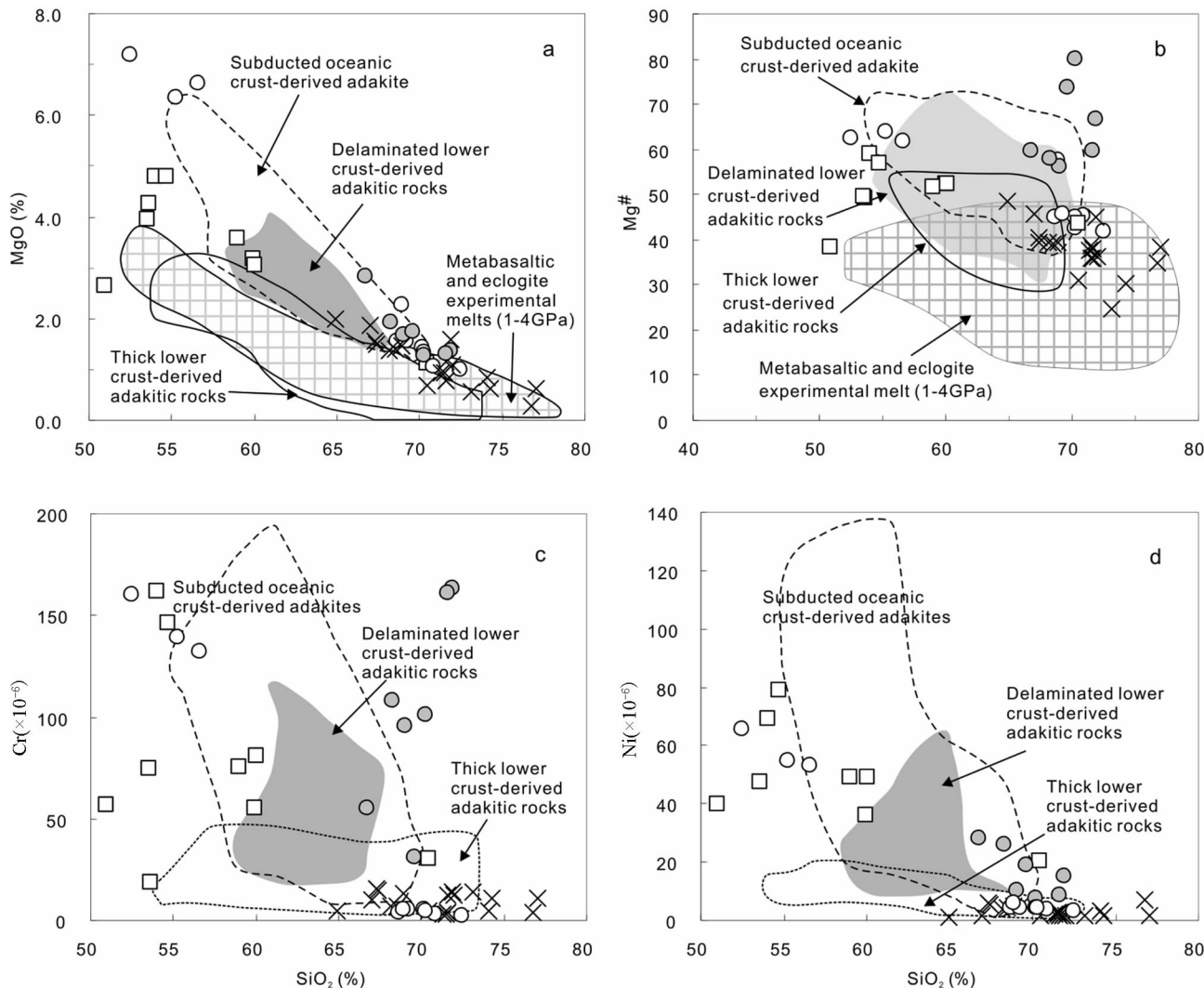


图8 青藏高原拉萨地块中北部白垩纪岩浆岩 SiO₂ vs. MgO (a, 据 Huang *et al.*, 2009)、SiO₂ vs. Mg[#] (b, 据 Wang *et al.*, 2006)、SiO₂ vs. Cr (c, 据 Huang *et al.*, 2009) 和 SiO₂ vs. Ni (d, 据 Huang *et al.*, 2009)

Fig. 8 Diagrams of SiO₂ vs. MgO (a, after Huang *et al.*, 2009), SiO₂ vs. Mg[#] (b, after Wang *et al.*, 2006), SiO₂ vs. Cr (c, after Huang *et al.*, 2009), SiO₂ vs. Ni (d, after Huang *et al.*, 2009) for Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, Tibet

洋南向俯冲相联系的产物。

白垩纪时期,拉萨地块中北部受到南部新特提斯洋的北向俯冲和北部 Slainajap 洋或班公湖-怒江洋的南向俯冲以及随后的拉萨地块和羌塘地块碰撞和挤压,上述动力学机制导致其地壳缩短加厚和抬升 (Murphy *et al.*, 1997; 丁林和来庆洲, 2003; Kapp *et al.*, 2003, 2005; Volkmer *et al.*, 2007), 从而在拉萨地块中北部 110Ma 左右岩浆作用高峰期约 20Ma 之后,拉萨地块中北部因发生区域性伸展作用 (曲晓明等, 2006; 辛洪波等, 2007), 进而使加厚的镁铁质下地壳发生拆沉, 拆沉的镁铁质物质发生部分熔融并在上升过程中与地幔发生反应从而形成研究区的含矿斑岩的岩浆。另外一种可能机制是,南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳在晚白垩世时期很可能因洋壳岩石圈与大陆岩石圈的密度

差异而发生板片断离,导致板片窗上部的壳幔物质发生部分熔融,从而形成研究区的含矿斑岩以及其南部的双峰式火山岩的母岩浆。

5.3 成矿物质来源

近年来,具有与埃达克岩类似地球化学特征的岩石与铜-金等金属矿化密切共生而备受关注。一些研究者甚至认为,这类岩石可以作为找矿标志,用于铜-金的勘探 (Defant and Kepezhinskas, 2001; 张旗等, 2004)。现有的研究认为,在岛弧和大陆板内伸展环境中,来自俯冲玄武质洋壳或洋壳沉积物或拆沉的大陆地壳产生的熔体与地幔的相互作用,一方面可能导致熔体被地幔橄榄岩混染,另一方面可能因高 Fe₂O₃ 含量的熔体对地幔的交代作用导致地幔氧逸度升高,

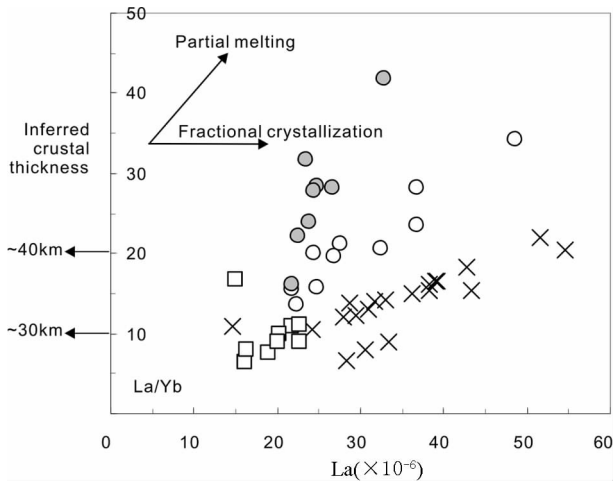


图9 青藏高原拉萨地块中北部白垩纪岩浆岩 La/Yb vs. La 图(据 Chung *et al.*, 2009)

Fig.9 Diagram of La/Yb vs. La for Cretaceous lavas in mid-northern Lhasa terrane, Tibet (after Chung *et al.*, 2009)

地幔金属硫化物被氧化分解,有利于铜、金等的矿化(王强等, 2008)。另外,铜在洋壳中的含量一般在 $60 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ (Sun *et al.*, 2003), 远比地幔 (30×10^{-6}) (McDonough and Sun, 1995) 和陆壳的平均丰度 (27×10^{-6}) (Rudnick and Gao, 2003) 高, 因此, 洋壳部分熔融形成的岩浆应该具有系统偏高的铜含量, 有利于成矿 (Sun *et al.*, 2011)。

拉萨地块中北部不仅发育晚白垩世含矿斑岩(王保弟等, 2011), 而且也发育有同时期的双峰式含铜火山岩(曲晓明等, 2006; 辛洪波等, 2007)。同措勤地区含铜双峰岩系的酸性端元二长花岗斑岩相比, 研究区含铜斑岩有着相似的主量和微量元素分布特征, 但后者同时有着比前者高的 MgO、Mg[#]、Cr、Ni 含量(图 8), 暗示二者有着不同的物质源区或形成机制。曲晓明等(2006)、辛洪波等(2007)认为晚白垩世措勤地区含铜的二长斑岩源于底侵的镁铁质物质诱发下地壳发生部分熔融的产物。在白垩纪时期, 在新特提斯洋北向俯冲和 Slainajap 洋或班公湖-怒江洋南向俯冲过程中, 在拉萨地块发育有大量的早白垩世与俯冲相联系火山岩 (Zhu *et al.*, 2009b, 2011), 特别拉萨地块中北部在约 110Ma 岩浆的大爆发; 同时上述动力学机制也可能导致大量的与俯冲洋壳相联系的镁铁质物质底侵到拉萨地块底部。因此拉萨地块中西部晚白垩世含铜斑岩中的 Cu 等矿物质来源很可能与早白垩世 Slainajap 洋或班公湖-怒江洋的南向俯冲而诱发的与大洋俯冲相联系的镁铁质物质底侵有关。随着 Slainajap 洋和班公湖-怒江洋的闭合、拉萨地块与羌塘地块的碰撞以及新特提斯洋持续北向俯冲, 拉萨地块中北部地壳不断的缩短和加厚 (Murphy *et al.*, 1997; 丁林和来庆洲, 2003; Kapp *et al.*, 2003, 2005; Volkmer *et al.*, 2007)。可能在晚白垩世初

期中拉萨地块中北部发生局域性的伸展作用(曲晓明等, 2006; 辛洪波等, 2007), 导致研究区加厚下地壳发生拆离并发生部分熔融, 这些拆沉的下地壳很可能因与早白垩世洋壳俯冲相联系而富含 Cu 等矿物, 这些富氧且富含 Cu 等矿物的熔体在上升过程与地幔发生反应并沿着局域性伸展形成的构造薄弱带上升形成含矿斑岩的母岩浆。同样, 南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳在晚白垩世的断离, 也可能引起板片窗上部与早白垩世南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳相联系的地壳深部镁铁质物质发生部分熔融, 从而形成研究区含矿斑岩的母岩浆; 同时在研究区南部的措勤日阿地区形成与伸展构造环境相联系的双峰含铜岩系。

6 结论

- (1) 拉萨地块中北部拔拉扎斑岩型矿床形成于 90 ~ 88Ma;
- (2) 拉萨地块中北部晚白垩世拔拉扎含矿斑岩具有明显的埃达克岩特征, 如高 SiO₂、Sr, 低 Y、Yb 含量; 同时它们具有高 Mg[#] 和高 Cr、Ni 含量。
- (3) 拉萨地块中北部拔拉扎含矿斑岩可能是拆沉下地壳发生部分熔融的产物, 或在该时期与南向俯冲的 Slainajap 洋壳或班公湖-怒江洋壳发生断离并诱发壳幔物质发生部分熔融有关。

References

- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362 (6416): 144 - 146
- Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33 - 51
- Chen JL, Xu JF, Wang BD *et al.* 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at Konglongxiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source? *Chemical Geology*, 273: 286 - 299
- Chen Y, Zhu DC, Zhao ZD *et al.* 2010. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Bamco andesites from the northern Gangdese, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2193 - 2206 (in Chinese with English abstract)
- Chen YL, Zhang KZ, Yang ZM and Lou T. 2006. Discovery of a complete ophiolite section in the Jueweng area, Nagqu County, in central segment of the Bangong Co-Nujiang junction zone, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 694 - 699 (in Chinese with English abstract)
- Chu MF, Chung SL, Song B *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34: 745 - 748
- Chung SL, Chu MF, Ji JQ *et al.* 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from post-collisional adakites. *Tectonophysics*, 477: 36 - 48
- Copeland P, Harrison TM, Pan YS *et al.* 1995. Thermal evolution of the

- Gangdese batholith, southern Tibet: A history of episodic unroofing. *Tectonics*, 14: 223–236
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C *et al.* 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and Southern Tibet; $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 281–302
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Defant MJ and Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82: 62–69
- Ding L and Lai QZ. 2003. New geological evidence of crust thickening in the Gangdese block prior to the Indo-collision. *Chinese Science Bulletin*, 48(8): 836–842 (in Chinese)
- Ding L, Kapp P, Zhong D and Deng W. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44: 1833–1865
- Dong YH, Xu JF, Zeng QG *et al.* 2006. Is there a Neo-Tethys' subduction record earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 661–668 (in Chinese with English abstract)
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95: 21503–21521
- Gao S, Liu XM, Yuan HL *et al.* 2001. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 26(2): 181–196
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- He L, Ma RZ and Song CY. 2009. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Late Cretaceous intrusive rocks in Cuogin, Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 28(5): 31–39 (in Chinese with English abstract)
- He ZH, Yang DM and Wang TW. 2006. The determination of Early Cretaceous post-collision granitoids in Sangba area of Gangdese tectonic belt and its tectonic significance. *Acta Petrol. Mineral.*, 25(3): 185–193 (in Chinese with English abstract)
- Hou Z and Cook NJ. 2009. Metallogensis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*. 36(1–3): 2–24
- Huang XL, Xu YG, Lan JB *et al.* 2009. Neoproterozoic adakitic rocks from Mopanshan in the western Yangtze Craton: Partial melts of a thickened lower crust. *Lithos*, 112: 367–381
- Ji WQ, Wu FY, Chung SL *et al.* 2009a. Zircon U-Pb chronology and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of Gangdese batholiths, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262: 229–245
- Ji WQ, Wu FY, Liu CZ and Chung SL. 2009b. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 52: 1240–1261
- Kang ZQ, Xu JF, Dong YH *et al.* 2008. Cretaceous volcanic rocks of Zenong Group in north-middle Lhasa block: Products of southward subducting of the Slainajap ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303–314 (in Chinese with English abstract)
- Kang ZQ, Xu JF, Chen JL *et al.* 2009a. Geochemistry and origin of Cretaceous adakites in Mamuxia Formation, Sangri Group, South Tibet. *Geochimica*, 38(4): 334–344 (in Chinese with English abstract)
- Kang ZQ, Xu JF, Wang BD *et al.* 2009b. Geochemistry of Cretaceous volcanic rocks of Duoni Formation in northern Lhasa blocks: Discussion of tectonic setting. *Earth Science*, 34(1): 89–104 (in Chinese with English abstract)
- Kang ZQ, Xu JF, Wang BD and Chen JL. 2010. Qushenla Formation volcanic rocks in north Lhasa block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethy's southward subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3106–3116 (in Chinese with English abstract)
- Kapp P, Murphy MA, Yin A *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1–24
- Kapp P, Yin A, Harrison TM *et al.* 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 117: 865–878
- Kapp P, DeCelles PG, Gehrels GE *et al.* 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. *GSA Bulletin*, 119: 917–932
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745–750
- Li C, Wang TW, Li HM and Zeng QG. 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdise area; Evidence for the existence of Paleo-Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 22(5): 364–366 (in Chinese with English abstract)
- Liu W, Li FQ, Yuan SH *et al.* 2010. Volcanic rock provenance of Zenong Group in Coqen area of Tibet: Geochemistry and Sr-Nd isotopic constraint. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(4): 367–376 (in Chinese with English abstract)
- Ma GL and Yue YH. 2010. Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa block: Constraints on the tectonic evolution of the Gangdese arc. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 525–538 (in Chinese with English abstract)
- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab-melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581–593
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753–756
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD *et al.* 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281–290 (in Chinese with English abstract)
- Moyen JF. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the "adakitic signature". *Lithos*, 112: 556–574
- Murphy MA, Yin A, Harrison TM *et al.* 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? *Geology*, 25: 719–722
- Pan GT, Chen ZL, Li XZ *et al.* 1997. Geological and Tectonic Evolution in the Eastern Tethys. Beijing: Geological Publishing House, 1–218 (in Chinese)
- Pan GT, Wang LQ and Zhu DC. 2004. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 12–19 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Mo XX, Hou ZQ *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA and Mei H. 1988. Volcanic rocks of the Tibet Geotraverse Lhasa to Golmud. *Phi. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A327: 203–213
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491–1521
- Qiu RZ, Zhou S, Deng JF *et al.* 2004. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet: With a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt. *Geology in China*, 31(3): 262–268 (in Chinese with English abstract)
- Qu XM, Xin HB, Xu WY *et al.* 2006. Discovery and significance copper-bearing bimodal rock series in Coqin area of Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 707–716 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891–931
- Richards J and Kerrich R. 2007. Adakite-like rocks: Their diverse

- origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102:537–576
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Heinrich DH and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon, 1–64
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42:313–345
- Sun W, Bennett VC, Eggins SM *et al.* 2003. Rhenium systematics in submarine MORB and back-arc basin glasses: Laser ablation ICP-MS results. *Chemical Geology*, 196: 259–281
- Sun WD, Ling MX, Ding X *et al.* 2011. On the association between adakites and Cu-Au ore deposits. *International Geology Review*, 53 (5–6):691–703
- Volkmer JE, Kapp P, Guynn JH and Lai Q. 2007. Cretaceous-Tertiary structural evolution of the north central Lhasa Terrane, Tibet. *Tectonics*, 26; TC6007 doi:6010.1029/2005TC001832
- Wang BD, Xu JF, Chen JL *et al.* 2011. Determination of ~90Ma porphyry copper deposit in the Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, in review
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF *et al.* 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89:424–446
- Wang Q, Tang GJ, Jia XH *et al.* 2008. Metalliferous Mineralization associated with adakitic rocks. *Geological Journal of China Universities*, 14(3):350–364 (in Chinese with English abstract)
- Wen DR, Liu DY, Chung SL *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet. *Chemical Geology*, 252: 191–201
- Williams IS, Buick A and Cartwright I. 1996. An extended episode of Early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynold Region, central Australia. *J. Metamorph. Geol.*, 14: 29–47
- Xin HB and Qu XM. 2006. Geological characteristics and ore-forming epoch of Ri'a copper deposit related to bimodal rock series in Coqen County, western Tibet. *Mineral Deposits*. 25 (4):477–482 (in Chinese with English abstract)
- Xin HB, Qu XM, Ren LK and Zhang LY. 2007. The material source and genesis of copper-bearing bimodal rocks series in Coqen County, Western Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 81 (7): 939–935 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China; Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30:1111–1114
- Yao P, Li JG, Wang QH *et al.* 2006. Discovery and geological significance of the adakite in Gangdese island arc belt, Xizang (Tibet). *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):612–620 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211–280
- Zhai QG, Li C, Li HM and Wang TW. 2005. U-Pb zircon age of leucogranite in the central Gangdese, Tibet, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24(4):349–353 (in Chinese with English abstract)
- Zhang KJ, Xia BD, Wang GM *et al.* 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 116:1202–1222
- Zhang LL, Zhu DC, Zhao ZD *et al.* 2010. Petrogenesis of magmatism in the Baerda region of northern Gangdese, Tibet: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1871–1888 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin KZ, Wang Y *et al.* 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):195–204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XQ, Zhu DC, Zhao ZD *et al.* 2010. Petrogenesis of the Nixiong pluton in Coqen, Tibet and its potential significance for the Nixiong Fe-rich mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1793–1804 (in Chinese with English abstract)
- Zhou CY, Zhu DC, Zhao ZD *et al.* 2008. Petrogenesis of Daxiong pluton in western Gangdese, Tibet; Zircon U-Pb dating and Hf isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2):348–358 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Mo XX *et al.* 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 534–546 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Wang LQ *et al.* 2008. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdese belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535–1550 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Zhao ZD, Pan GT *et al.* 2009a. Early cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 298–309
- Zhu DC, Mo XX, Niu Y *et al.* 2009b. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268: 298–312
- Zhu DC, Mo XX, Zhao ZD *et al.* 2009. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective. *Earth Science Frontiers*, 16(2):1–29 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL *et al.* 2011. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301:241–255

附中文参考文献

- 陈玉禄, 张宽忠, 杨志民等. 2006. 青藏高原班公湖-怒江结合带中段那曲县觉翁地区发现完整的蛇绿岩剖面. *地质通报*, 25(6): 694–699
- 陈越, 朱弟成, 赵志丹等. 2010. 西藏北冈底斯巴木错安山岩的年代学, 地球化学及岩石成因. *岩石学报*, 26(7):2193–2206
- 丁林, 来庆洲. 2003. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约. *科学通报*, 48(8): 836–842
- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高等. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? *岩石学报*, 22(3):661–668
- 何丽, 马润则, 宋春彦. 2009. 西藏措勤晚白垩世侵入岩地球化学特征及其构造环境. *地质科技情报*. 28(5):31–39
- 和钟铎, 杨德明, 王天武. 2006. 冈底斯带桑巴区早白垩世后碰撞花岗岩类的确定及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 25(3):185–193
- 纪伟强, 吴福元, 钟孙霖, 刘传周. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因. *中国科学(D辑)*, 39(7):849–871
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 王保弟. 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物? *岩石学报*, 24(2): 303–314
- 康志强, 许继峰, 陈建林等. 2009a. 藏南白垩纪桑日群麻木下组埃达克岩的地球化学特征及其成因. *地球化学*, 38:334–344
- 康志强, 许继峰, 王保弟等. 2009b. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学与形成构造环境. *地球科学*, 34(1):89–104
- 康志强, 许继峰, 王保弟, 陈建林. 2010. 拉萨地块北部去申拉组火山岩: 班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲的产物? *岩石学报*, 26(10):3106–3116

- 李才, 王天武, 李惠民, 曾庆高. 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩——古冈底斯造山的存在证据. 地质通报, 22: 364-366
- 刘伟, 李奋其, 袁四化等. 2010. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区——地球化学及 Sr-Nd 同位素制约. 岩石矿物学杂志, 29(4): 367-376
- 马国林, 岳雅惠. 2010. 西藏拉萨地块北部白垩纪火山岩及其对冈底斯岛弧构造演化的制约. 岩石矿物学杂志, 29(5): 525-538
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹等. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281-290
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振等. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1-218
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. 地质通报, 23(1): 12-19
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521-533
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福等. 2004. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代. 中国地质, 31(3): 262-268
- 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺等. 2006. 藏西措勤含铜双峰岩系的发现及其意义. 岩石学报, 22(3): 707-716
- 王保弟, 许继峰, 陈建林等. 2011. 青藏高原~90 百万年斑岩型矿床的厘定. 科学通报(审稿中)
- 王强, 唐功建, 贾晓辉等. 2008. 埃达克质岩的金属成矿作用. 高校地质学报, 14(3): 350-364
- 辛洪波, 曲晓明. 2006. 藏西措勤县日阿与斑(玢)岩有关的铜矿床的矿床地质特征与成矿时代. 矿床地质, 25(4): 477-482
- 辛洪波, 曲晓明, 任立奎, 张兰英. 2007. 西藏措勤含铜岩系的物质来源与成因. 地质学报, 81(7): 939-935
- 姚鹏, 李金高, 王全海等. 2006. 西藏冈底斯南缘火山-岩浆弧带中桑日群 adakite 的发现及其意义. 岩石学报, 22(3): 612-620
- 翟庆国, 李才, 李惠民, 王天武. 2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质通报, 24(4): 349-353
- 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹等. 2010. 西藏北冈底斯巴尔达地区岩浆作用的成因: 地球化学, 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 岩石学报, 26(6): 1871-1888
- 张旗, 秦克章, 王元龙等. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu, Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(2): 195-204
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹等. 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义. 岩石学报, 26(6): 1793-1804
- 周长勇, 朱弟成, 赵志丹等. 2008. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束. 岩石学报, 24(2): 348-358
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学等. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束. 岩石学报, 22(3): 534-546
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全等. 2008. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论. 地质通报, 27(9): 1535-1550
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹等. 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用于特提斯演化: 新观点. 地学前缘, 16(2): 1-29