

青海三江北段陆日格含矿斑岩 地球化学特征及其地质意义

郝金华^{1,2}, 陈建平¹, 董庆吉¹, 王 涛³, 罗志忠³

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 地学实验中心, 北京 100083;

3. 青海省地质调查院, 西宁 810012

摘 要: 陆日格为新近于青海南部三江成矿带北段发现的斑岩钼-铜矿床。通过对斑岩主量元素、微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素组成分析和岩石学综合研究, 系统探讨了陆日格斑岩钼-铜矿床的岩石地球化学特征, 以及斑岩的岩石成因、源区和构造背景。结果表明, 陆日格斑岩主要为高钾钙碱性系列; 其(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.705 351~0.706 830, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 19.2032~19.3650, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.6850~15.6583, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 39.2616~39.5228; 斑岩富集 LREE 和大离子亲石元素, 黑云母-二长花岗岩斑岩具弱的负 Eu 异常, 而浅色花岗岩斑岩则具明显的负 Eu 异常。岩浆源区可能是壳幔过渡带, 经历过俯冲板片流体的交代富集作用, 并受到地壳物质的混染。富含挥发分的含矿岩浆受印度-欧亚大陆碰撞作用产生的走滑断裂系统的制约, 上涌就位于断裂控制部位而形成矿床。

关 键 词: 斑岩钼-铜矿; 元素地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素地球化学; 陆日格; 青海南部

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)04-0328-11

Geochemistry of the Ore-bearing Porphyry of Lurige Mo (Cu) Deposit, Qinghai: Implications for Tectonic Setting and Lithogenesis

HAO Jinhua^{1,2}, CHEN Jianping¹, DONG Qingji¹, WANG Tao³, LUO Zhizhong³

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource, Beijing 100083, China;

2. The Geological LAB Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China

Abstract: Lurige molybdenite-copper deposit is a newly discovered deposit in the northern Sanjiang polymetallic ore belt, southern Qinghai, China. This paper presents data of major elements, trace elements, Sr-Nd-Pb isotopes and petrological analyses and studies, the geochemical characteristics of the Lurige porphyries to reveals the origin, source area and tectonic background of formation of the porphyries. The geochemical data indicate that (1) the porphyries belong to the calcalkaline series, (2) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = (0.705 351~0.706 830), ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = (19.2032~19.3650), ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = (15.6850~15.6583), ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = (39.2616~39.5228), (3) LREE and LILE are enriched in the porphyries, (4) the biotite granitic porphyries show weak Eu deficit anomaly and the leucogranitic porphyries have strong Eu deficit anomaly. These findings suggest that the source was probably located in the mantle-crust transition area, which was contaminated by the fluid carried in the subducted slab. The enriched magma was probably directed by the strike-slip fault system formed during the India-Asia collision in the Eocene, and then emplaced in the study area.

Key words: porphyry Mo-Cu deposit; element geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; Lurige; southern Qinghai

我国三江地区为中国乃至世界上具重要地位的新生代多金属成矿带。国内外学者对三江地区中南段斑岩铜-钼-金矿带,特别是玉龙斑岩铜矿带的岩石学、地球化学、年代学等进行了大量的研究,并深入探讨了构造背景、岩浆演化和成矿模式^[1~9]。研究认为,三江铜-多金属成矿带形成于印度-欧亚大陆碰撞造山背景下,受新生代陆内走滑断裂系统的控制。近年来在青海南部三江成矿带北段,发现了以纳日贡玛含矿斑岩体为中心的又一大型斑岩-矽卡岩型铜-钼矿带,并初步研究了纳日贡玛矿床的地质背景、岩石化学和成矿模式^[10~14];陆日格为新近在纳日贡玛附近发现的又一斑岩铜矿床(点),初步勘探显示了一定的成矿潜力。本文分析了陆日格斑岩体的矿物岩石学、元素地球化学、同位素地球化学特征,探讨了成矿背景、岩石成因和演化。

1 区域地质背景

陆日格铜矿床位于青海玉树州杂多县西北,距县城约 185 km,位于纳日贡玛东南约 20 km,矿区面积约 6 km²。大地构造位置上属于欧亚大陆南缘、扬子古陆西缘,处于金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带所夹持的羌塘地体,位于三江成矿带的囊

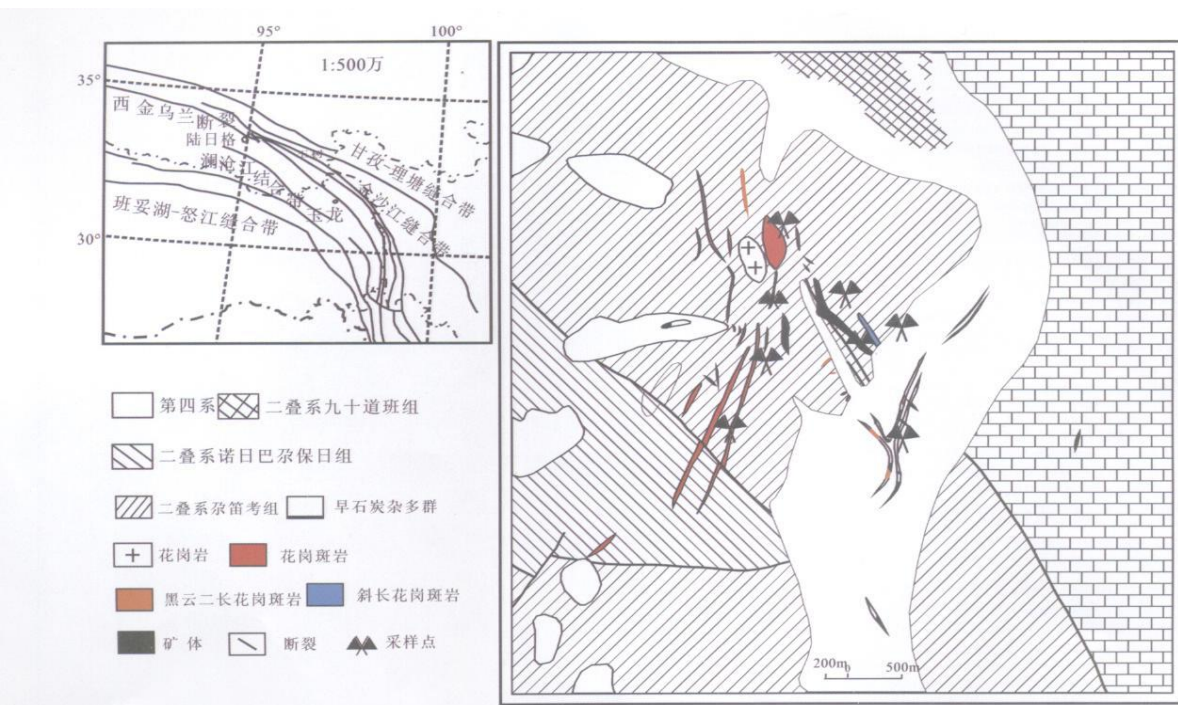
谦-昌都-兰坪-思茅成矿带中的纳日贡玛-妥坝铜-多金属成矿带西北端。该区是吸纳和调节印度-亚洲大陆碰撞应力应变的构造转换带^[8,15],先后经历了晚古生代-中生代古、新特提斯洋盆扩张-俯冲造山作用及新生代大规模陆内变形的地质过程。

区内断裂及节理裂隙相当发育,按展布方向可分为北西西向、北东向、近东西向和近南北向四组断裂,各断裂彼此交错切割;其中北西西向断裂为区内的主干断裂,控制了区内沉积建造、岩浆活动、后期变质改造和矿产分布。区内呈北西西向展布一系列新生代斑岩体(图 1A)。

2 矿区地质及斑岩特征

矿区出露地层主要为二叠系碎屑岩及火山岩(P_{1gd})、三叠系灰岩(T_{3j})和第四系(Q)。区内岩浆活动主要为喜马拉雅期岩浆侵入,岩性主要为黑云母二长花岗斑岩、浅色花岗斑岩及少量斜长花岗斑岩;燕山期火山岩主要为玄武岩、玄武安山岩和火山角砾岩(图 1B)。

矿区内花岗斑岩主要呈北北西-南南东向、北北东-南南西向脉体展布,长 200~1000 m 不等,宽不超过 100 m。主要赋矿斑岩为黑云母二长花岗



据青海地质调查院(2007)修改

Modified from Qinghai Geological Survey Institute, 2007

图 1 陆日格斑岩钼铜矿地质简图

Fig. 1 Geological map of Lurige porphyry molybdenite-copper deposit

斑岩和浅色花岗斑岩。斑岩和围岩蚀变明显,围岩、玄武岩普遍已蚀变为青磐岩化玄武岩、角闪岩化玄武岩、矽卡岩化等蚀变和变质岩石。矿石矿物组成较简单,主要有黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等。矿石以浸染状、细脉状构造为主,自形、半自形结构、包含结构和交代溶蚀结构等。

浅色花岗斑岩呈灰白色或浅灰色,具斑状至等粒结构,块状构造。斑晶主要为石英、斜长石和钾长石,基质为微晶结构,矿物成分有石英、斜长石、钾长石、绢云母及少量的黄铁矿。副矿物有锆石、金红石、钛铁矿、榍石和磷灰石等。

黑云母二长花岗斑岩呈灰色、浅灰色、浅黄色,具典型斑状结构,块状构造,手标本较浅色花岗斑岩蚀变严重。斑晶主要为石英(20%~25%)、斜长石、钾长石和黑云母,含量30%以上。基质具微晶结构,由石英、斜长石、正长石、黑云母和少量黄铁矿组成,含少量磷灰石、榍石等副矿物。金属硫化物黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿以稀疏的浸染状构造分布于斑岩中。

斑岩中斑晶石英为他形粒状,粒度变化比较大,可见较明显的熔蚀现象,颗粒边部常呈港湾状,为基质细粒石英颗粒充填,局部微裂隙发育并被绢云母所充填。钾长石斑晶多为短柱状,粒度变化较大;大者达 10×20 mm,也见有部分小斑晶长石(0.5~20 mm);表面较新鲜,但也可见有灰色细粒土状质点(泥化)。斜长石斑晶的粒度大小不一,自形到他形板状,主要为中长石、更长石和钠长石。斜长石双晶发育,少数斑晶中正环带极为发育;斑晶斜长石常具绢云母化、高岭土化等。黑云母斑晶粒度变化较大,以较自形板状为主,具明显的多色性,解理发育,沿解理缝常因绿泥石交代而析出铁质和金红石颗粒。镜下观察铜矿化主要与黑云母二长花岗斑岩有关。

3 样品测试与分析方法

斑岩样品产自陆日格矿区,挑选蚀变较弱的样品用于进行主量元素、微量元素、稀土元素和 Sr-Nd-Pb 同位素测试。

主量元素与微量元素分析在中国地质大学(北京)地学实验中心完成,主量元素分析测试仪器为 PS-950 等离子体光谱仪。微量元素分析用 Agilent7500a ICP-MS 仪。分析方法见文献[16]。

Pb 同位素分析由中国地质科学院同位素重点实验室用 Nu Plasma HR 多接受器等离子体质谱仪(MC-ICPMS)测定,仪器的质量分馏以 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=2.3875$ 为标准进行校正,实验方法见文献[17];Rb-

Sr、Sm-Nd 同位素测试仪器为 MAT262 固体同位素质谱仪,标样结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Sr 标样 NBS987) $=0.710254 \pm 12$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7129$ Sm-Nd;分析流程参考文献[18]。Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底约为 10^{-10} g 和 10^{-11} g。

4 地球化学数据分析

4.1 主量元素

从全岩化学分析(表1)结果可见,浅色花岗斑岩中 SiO_2 的含量为68.71%~74.14%,平均为71.26%; TFeO 为1.13%~4.68%,平均为2.30%; Al_2O_3 为12.93%~14.57%,平均为13.93%; Na_2O 为1.73%~3.24%,平均为2.53%; K_2O 为3.76%~4.53%,平均为4.09%。

黑云母二长花岗斑岩中 SiO_2 的含量为66.77%~72.66%,平均为69.56%; TFeO 的含量为1.88%~3.05%,平均为2.59%; Al_2O_3 的含量为12.22%~15.37%,平均为14.23%; Na_2O 的含量为0.22%~4.05%,平均为1.96%; K_2O 的含量为3.86%~5.55%,平均为4.44%。

与中国和世界同类岩石的平均值相比,陆日格含矿斑岩具略高的 SiO_2 、富 K_2O 和 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值偏高,以及低 CaO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 的特点^[19,20]。陆日格浅色花岗斑岩里特曼指数(σ)为0.97~1.93,平均为1.55; $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 值为5.49~7.40%,平均为6.62%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为1.28~2.20,平均为1.70。黑云母二长花岗斑岩的 σ 为1.65~2.79,平均为2.42; $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 值为4.36~8.08%,平均为6.40%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为1.00~25.36,平均为8.89。陆日格含矿斑岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解表明,斑岩表现为富碱、高钾,投点落入钾质-超钾质范围; A/CNK 值为(1.00~1.66), A/NK 值为(1.35~3.08),铝饱和程度图解(图略)表明该岩体属于过铝质岩石。从 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图2)可见,斑岩基本上落入高钾钙碱性系列。与德兴斑岩铜矿、智利斑岩铜矿的岩石相比,陆日格含矿斑岩明显富 SiO_2 和 K_2O ;除个别样品外,大多落入玉龙斑岩成矿带与冈底斯成矿带斑岩相交的范围,属于过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列。

哈克图解(表1,图3)表明,随着 SiO_2 含量增加,主要元素 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 FeOT 、 CaO 、 Na_2O 和 P_2O_5 等氧化物的含量呈递减的趋势,这种良好的负相关性表明两种斑岩为同源岩浆结晶分异演化的产物;但 K_2O 随着 SiO_2 含量的增加而变化不大。

表 1 陆日格斑岩常量元素、微量元素和稀土元素测试结果及相关参数

Table 1 Compositions of major, trace and REE elements of the porphyries in the Lurige Region

编号	B2†4	B30	B33	B34	B36	ZK240†220	ZK240†259	ZK80†259	ZK80†266
岩性	浅色花岗岩斑岩					黑云母二长花岗岩斑岩			
SiO ₂	68.89	70.98	68.71	73.57	74.14	66.77	72.66	69.27	69.54
TiO ₂	0.79	0.38	0.38	0.21	0.17	0.58	0.33	0.46	0.51
Al ₂ O ₃	14.57	14.52	14.35	12.93	13.28	15.37	12.22	14.40	14.92
Fe ₂ O ₃	5.05	2.28	2.29	1.51	1.22	2.94	1.98	3.30	2.87
MnO	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.05
MgO	0.98	0.24	0.99	0.82	0.37	1.05	0.66	0.95	0.94
CaO	0.49	1.26	1.71	1.55	1.19	2.34	1.43	1.45	2.18
Na ₂ O	2.06	3.24	2.83	1.73	2.78	0.50	0.22	3.07	4.05
K ₂ O	4.53	4.16	3.95	3.76	4.05	3.86	5.55	4.33	4.04
P ₂ O ₅	0.12	0.14	0.14	0.15	0.15	0.24	0.12	0.19	0.21
LOI	1.76	2.22	4.06	3.65	2.29	7.17	4.26	1.79	0.59
sum	99.27	99.46	99.45	99.93	99.68	100.87	99.48	99.23	99.87
Cs	17.23	9.20	7.75	8.84	7.24	17.05	14.74	6.11	5.79
Rb	300.84	263.99	175.99	238.17	286.95	157.03	235.12	238.09	217.41
Ba	806.20	411.22	631.49	577.14	356.27	375.87	351.48	288.41	360.09
Th	20.32	40.44	26.50	25.78	42.47	23.36	30.06	18.98	36.17
U	3.27	14.75	4.59	7.69	14.12	9.70	9.89	9.04	11.26
Nb	27.34	31.34	29.63	27.39	30.65	31.22	35.99	31.80	31.83
Ta	1.96	4.71	2.84	2.66	3.06	3.17	4.18	3.32	3.42
Pb	476.49	64.11	10.92	11.39	34.74	7.76	9.65	9.08	8.63
Pr	11.07	10.97	9.68	7.27	5.19	7.89	6.25	7.82	8.99
Sr	127.60	81.27	175.97	134.78	83.40	151.19	113.77	200.04	318.15
Zr	343.09	129.72	215.45	207.25	122.38	228.58	153.19	204.22	219.78
Hf	8.49	3.83	5.16	5.06	3.70	5.33	4.45	4.98	5.39
Y	62.09	11.61	17.31	14.76	8.15	14.56	14.14	14.19	14.09
Sc	20.75	6.39	7.89	7.99	6.46	4.42	4.56	3.71	4.87
V	108.78	23.25	50.62	49.75	17.77	30.28	24.80	29.17	33.65
Mn	301.50	483.96	330.48	356.04	381.15	358.15	246.22	158.79	323.59
Cr	54.60	5.55	10.74	9.81	3.99	8.92	10.39	10.50	10.00
Co	8.81	1.38	4.52	4.42	1.14	5.60	2.84	4.53	5.71
Ni	15.62	3.52	7.35	7.76	2.44	4.71	7.40	4.09	2.82
Cu	15.06	27.27	7.89	4.99	8.79	8.50	27.77	52.63	7.62
Zn	53.30	187.50	48.76	67.04	56.27	24.47	27.76	36.81	26.36
Ga	16.71	13.12	13.81	12.15	13.28	19.39	16.74	22.47	20.87
Mo	3.65	2.36	0.81	4.26	3.30	40.43	752.34	4.05	16.97
Ti	4821.16	1258.57	2242.98	2016.34	985.91	3322.88	1950.09	2806.95	3073.82
Lanthanum	44.35	77.62	50.89	43.28	34.33	42.75	30.88	43.10	51.47
Ce	84.99	99.88	87.75	70.88	54.07	77.16	56.92	77.28	89.74
Pr	11.07	10.97	9.68	7.27	5.19	7.89	6.25	7.82	8.99
Nd	39.05	33.14	29.36	20.72	13.99	26.78	21.31	26.53	29.76
Sm	9.15	5.19	4.72	3.19	2.10	4.81	4.02	4.58	4.87
Eu	1.59	0.93	0.88	0.45	0.20	1.01	0.77	0.88	1.08
Gd	9.96	4.15	3.69	2.60	1.66	3.89	3.12	3.59	3.75
Tb	1.74	0.55	0.49	0.37	0.22	0.52	0.43	0.49	0.51
Dy	10.71	2.98	2.57	1.83	1.17	2.95	2.59	2.76	2.77
Ho	2.23	0.58	0.51	0.38	0.26	0.56	0.52	0.54	0.52
Er	6.40	1.71	1.51	1.12	0.81	1.47	1.47	1.45	1.44
Tm	0.91	0.25	0.23	0.20	0.15	0.22	0.24	0.22	0.22
Yb	5.55	1.61	1.45	1.25	1.06	1.38	1.63	1.45	1.36
Lu	0.87	0.25	0.24	0.22	0.20	0.21	0.26	0.24	0.22
ΣREE	228.56	239.84	193.96	153.75	115.41	171.61	130.40	170.92	196.69
δEu	0.51	0.62	0.64	0.48	0.33	0.71	0.66	0.66	0.77

注: 常量元素单位为%, 微量元素和稀土元素单位为× 10⁻⁶

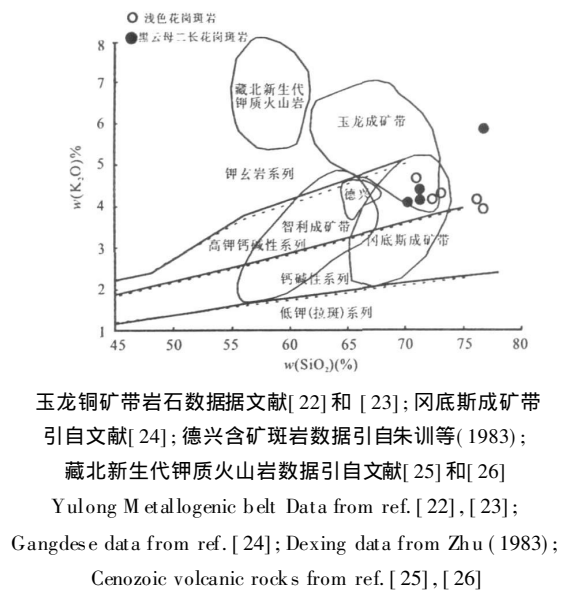
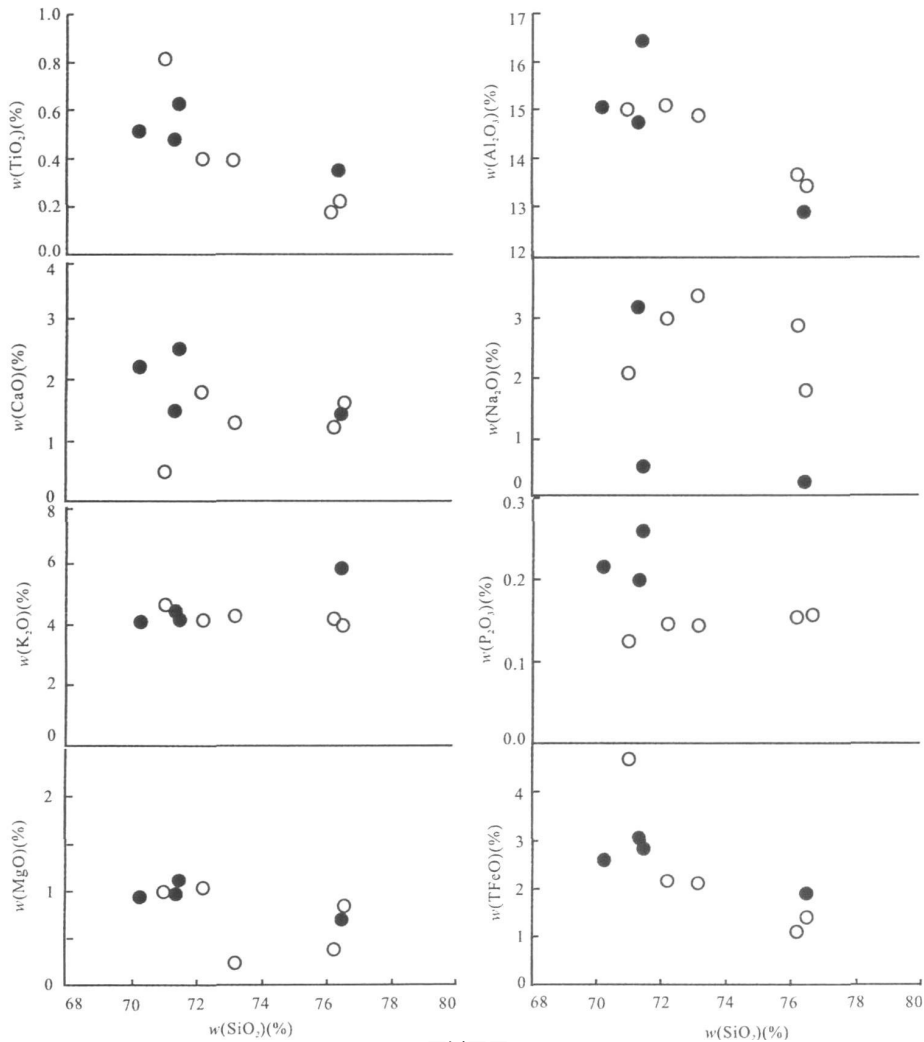


图 2 陆日格斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图解

Fig. 2 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ diagram for Lurige porphyries



图例同图 2

图 3 陆日格斑岩体哈克图解

Fig. 3 Harker diagrams of the porphyries in Lurige deposit

4.2 稀土元素

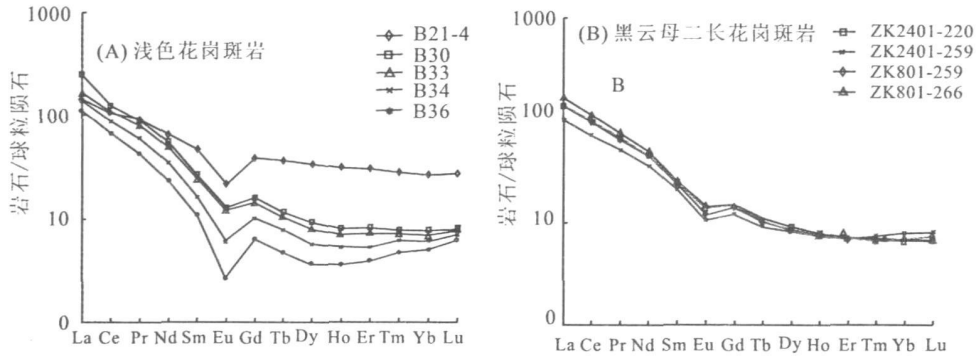
浅色花岗斑岩稀土元素总量为 $(115.41 \sim 239.84) \times 10^{-6}$, 平均为 186.31×10^{-6} ; LREE 为 $(109.87 \sim 227.74) \times 10^{-6}$, 平均为 171.37×10^{-6} ; HREE 为 $(5.54 \sim 38.37) \times 10^{-6}$; 平均为 14.93×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 $(4.96 \sim 19.83)$, 平均值为 15.81; δEu 为 0.32~0.64, 平均为 0.51。

黑云母二长花岗斑岩稀土元素总量为 $(130.40 \sim 196.69) \times 10^{-6}$, 平均为 167.41×10^{-6} ; LREE 为 $(120.15 \sim 185.91) \times 10^{-6}$, 平均为 156.66×10^{-6} ; HREE 为 $(10.26 \sim 11.20) \times 10^{-6}$; 平均为 10.74×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 11.72~17.25, 平均值为 14.55; δEu 为 0.66~0.77, 平均为 0.70。

陆日格斑岩稀土元素标准配分曲线(图 4)显示出较明显的右倾型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 5.38~32.46, 表明富集轻稀土元素, 轻微富集重稀土元素; 其中轻稀

土元素分异明显,而重稀土分异不显著,在配分图上显示左陡而右缓的特征,暗示为同一岩浆演化的产物。黑云母二长花岗斑岩弱的负 Eu 异常,而浅色

花岗斑岩则具明显的负 Eu 异常,表明斑岩经历了一定程度的斜长石分离结晶作用,且源区可能有少量的斜长石残留。



A. 浅色花岗斑岩; B. 黑云母二长花岗斑岩; 球粒陨石据 Sun 和 McDonough(1989)
A. Leucogranitic porphyries; B. Biotite granitic porphyries; Chondrite contents are from Sun and McDonough(1989)

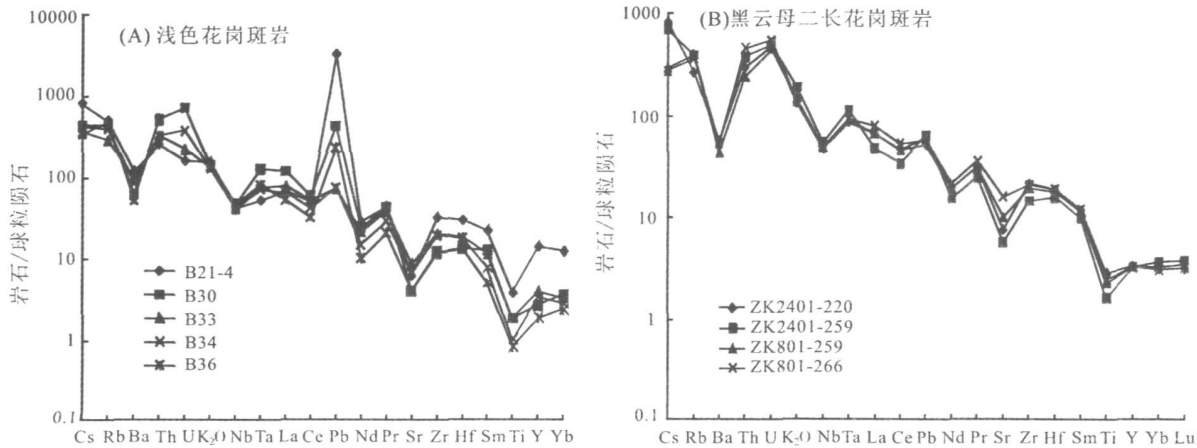
图4 陆日格斑岩REE球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns

4.3 微量元素

陆日格浅色花岗斑岩与黑云母二长花岗斑岩具相似的微量元素配分特征,曲线总体呈右倾型,大离子亲石元素(LILE)相对于高场强(HFSE)和轻稀土元素(LREE)明显富集。曲线的前半部元素总体呈富集状态,Rb、Th、U和K富集明显,说明它们在岩浆分异过程中表现为不相容元素的性质;而曲线后半部相容元素Hf、Sm、Y和Yb等富集度相对较低,这种地球化学特征符合钙碱性系列岩浆演化的普遍规律。

在原始地幔标准化配分图(图5)中,存在显著的Ti、Nb和Sr谷,显示出岩浆与俯冲有关的特点^[27, 28]。斑岩Ti明显的负异常说明斑岩源区存在金红石矿物相的残留;Nb、Ta的亏损与Zr、Hf的富集则说明斑岩残留相中可能有角闪石相存在;K、Rb的富集和Ba的亏损则可能与源区的金云母的熔融缺失有关。浅色花岗斑岩较黑云母二长花岗斑岩有较明显的Pb富集,可能是壳源物质混染或蚀变所致。



A. 浅色花岗斑岩; B. 黑云母二长花岗斑岩; 原始地幔数据据 McDonough(1992)
A. Leucogranitic porphyries; B. Biotite granitic porphyries; Normalized data from McDonough(1992)

图5 陆日格斑岩微量元素标准化图解

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Lurige porphyries

4.4 同位素地球化学

含矿斑岩的⁸⁷Rb/⁸⁶Sr为1.901~8.722,平均

值为4.3312;⁸⁷Sr/⁸⁶Sr为0.707382~0.710307,平均为0.708745;⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的初始计算值为

0.705 351~ 0.706 830, 平均为 0.706 084; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的初始计算值为 0.512 588~ 0.513 220, 平均为 0.512 747; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 除 ZK2401-220 为 12.35 外, 其余为 0.03~ 0.18; 含矿斑岩的亏损地幔年龄 (t_{DM}) 为 0.73~ 0.85 Ga, 与相邻的纳日贡玛含矿斑岩

(0.6~ 0.8 Ga) $^{[14]}$ 相一致, 接近南部玉龙矿带的 0.8~ 1.0 Ga $^{[29]}$ 。陆日格斑岩的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_{\text{i}}$ 值与囊谦火山岩相近, 略高于纳日贡玛, 但低于玉龙; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高于玉龙斑岩和囊谦火山岩(表 2, 图 6)。

表 2 陆日格斑岩 Sr Nd Pb 同位素测试结果及相关参数
Table 2 Sr Nd Pb isotopic compositions for the Lunige porphyries

	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\text{Sm}/\times 10^{-6}$	$\text{Nd}/\times 10^{-6}$	$\text{Sr}/\times 10^{-6}$	$\text{Rb}/\times 10^{-6}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
zk2401-220	19.363±17	15.6645±14	39.3881±39	3.469	17.586	881.1	104.1	0.513251±17
zk2401-259	19.429±9	15.6733±7	39.3774±17	1.741	8.896	416.8	125.6	0.512619±9
zk801-259	19.2032±9	15.6583±8	39.2616±19	3.241	17.961	135.4	153.6	0.512621±6
zk801-266	19.36495±23	15.685±19	39.5228±47	3.317	19.341	202.1	132.8	0.512623±8
	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}/Ma	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{i}}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$	
zk2401-220	0.1193	3.419	0.708773±12	12.35		0.513220	0.706830	
zk2401-259	0.1184	8.722	0.710307±25	0.03	852	0.512588	0.705351	
zk801-259	0.1092	3.283	0.708517±14	0.12	774	0.512592	0.706652	
zk801-266	0.1038	1.901	0.707382±21	0.18	734	0.512596	0.706302	

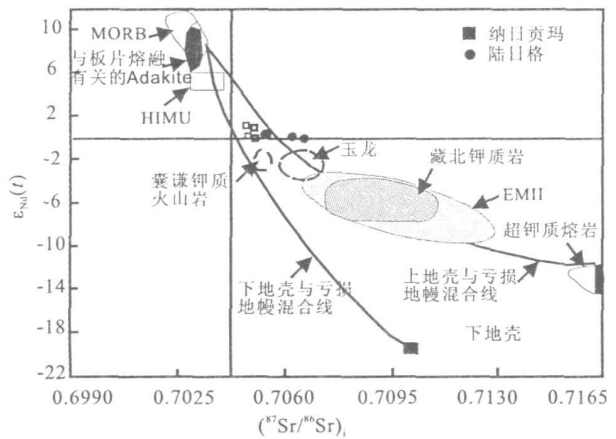


图 6 陆日格斑岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_{\text{i}}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
Fig. 6 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_{\text{i}}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram

陆日格含矿斑岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 19.2032~ 19.3650, 平均为 19.3400; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.6850~ 15.6583, 平均为 15.6702; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 39.2616~ 39.5228, 平均值为 39.3875; 它们位于地球等时线 (4.55 Ga) 下方; 位于北半球参考线 (NHRL) 上方, 并大致与其平行。与纳日贡玛、玉龙矿带及囊谦新生代钾质火山岩相比, 陆日格斑岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值更高, 而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值与之相近。陆日格斑岩 Pb 同位素落入到富集地幔与下部地壳的延长线上, 说明斑岩经受了地壳物质的混染; 与纳日贡玛、玉龙带及囊谦新生代钾质火山岩相比, 更靠近交代富集地幔 (EM II) (图 7)。

5 讨 论

(1) 岩浆源区: 陆日格浅色花岗斑岩中 SiO_2 的

含量为 68.71%~ 74.14%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值为 5.49%~ 7.40%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.28~ 2.20。黑云母二长花岗斑岩中 SiO_2 的含量为 66.77%~ 72.66%; K_2O 含量为 3.86%~ 5.55; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值为 4.36%~ 8.08%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.00~ 2.5.36。陆日格含矿斑岩与邻近的纳日贡玛铝矿床含矿斑岩相似, 斑岩主要为高钾钙碱性系列, 表现为更加富 SiO_2 、较低的 K_2O 及 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值; 且随 SiO_2 含量的增加, K_2O 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 保持相对恒定, 表明钾质碱性系列岩石的高钾是其固有的特点, 反映岩浆源区存在富钾的矿物相。

陆日格斑岩稀土元素标准配分曲线显示出较明显的右倾型, 黑云母二长花岗斑岩具弱的负 Eu 异常, 而浅色花岗斑岩则具有明显的负 Eu 异常, 表明斑岩经历了一定程度的斜长石分离结晶作用, 并且源区可能存在着少量的斜长石残留。斑岩具有相似的微量元素配分特征, 曲线总体呈右倾型, 大离子亲石元素 (LILE) 相对于高场强 (HFSE) 和轻稀土元素 (LREE) 明显富集, Nb、Ta、Ti 等高场强 (HFSE) 相对亏损, 暗示岩浆源区可能经历过俯冲板片流体的交代富集作用 $^{[8, 27, 28, 30]}$, 与玉龙成矿带斑岩及囊谦钾火山岩微量元素相似, 显示出俯冲的特性。与相邻纳日贡玛相比, 陆日格斑岩 Nb-Nb/U 图解 (图 8) 同样表现出低的 Nb/U 值, 表明岩浆源区曾经发生过俯冲板片流体的交代富集作用。

陆日格斑岩 Pb 同位素落入到富集地幔与下部地壳的延长线上, 说明斑岩演化过程中经受了地壳物质的混染; 与纳日贡玛、玉龙带及囊谦新生代钾质

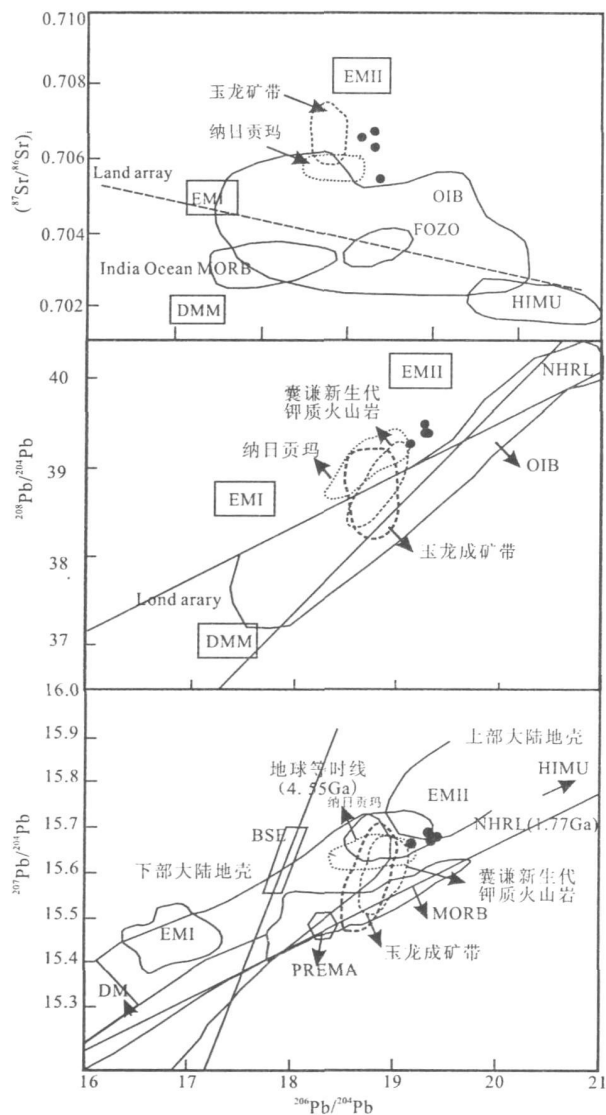


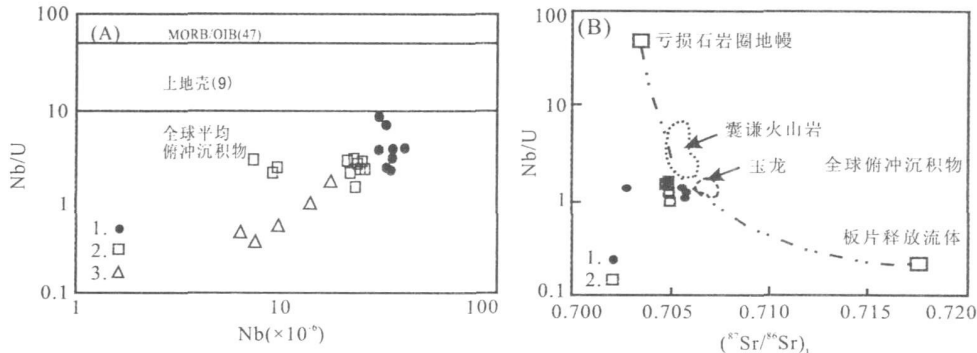
图 7 陆日格斑岩 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解

Fig. 7 Diagram of $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i in Lurige deposit

火山岩相比, 陆日格斑岩更靠近交代富集地幔 (EM II)。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\text{--Nb/U}$ 图解表明陆日格含矿斑岩与纳日贡玛、玉龙带 Nb/U 值相似, 这也与同位素结果一致。

青藏高原北部及东部(包括青海南部、西藏东部与云南西部等地区)于新生代发育一系列钾质碱性的岩浆岩带, 研究较多的为侵入岩、火山岩及煌斑岩, 特别是玉龙成矿带的含矿斑岩、羌塘-囊谦盆地火山岩等^[23, 30~34]。姜耀辉等^[29]在对玉龙带研究后认为斑岩岩浆源区富钾矿物相为金云母而非富钾闪石与钾长石, 这种含金云母的富集地幔受到俯冲板片流体或熔体改造部分熔融将形成钾质碱性岩浆^[29, 30]。迟效国等^[32, 33]研究认为藏北钾质、超钾质系列的原始岩浆为起源于由软流圈流体和俯冲岩石圈地幔释放的流体交代混合的古俯冲地幔楔。邓万明等^[46]通过同位素地球化学的研究, 揭示了囊谦火山岩是经历了比较复杂的交代作用形成的富集地幔源部分熔融的产物, 富集组分主要来自壳源岩石, 而不太可能是软流圈。有人^[8, 14]认为, 被俯冲板片流体交代和软流圈物质注入而成的壳幔过渡带为纳日贡玛-玉龙含矿斑岩理想源区; 而软流圈物质注入量的多少则导致了纳日贡玛、玉龙带、囊谦火山岩岩石 Sr-Nd+Pb 的差异。依据陆日格斑岩地球化学和 Sr-Nd+Pb 同位素特征, 可以认为岩浆源区有富集地幔 EM II 与地壳共同作用的特征, 显示陆日格斑岩来源于壳幔过渡带, 且壳源物质所占比例要高于纳日贡玛和玉龙矿带。

(2) 构造背景与岩石成因: 三江地区于晚古生代-中生代发生多次洋壳的扩张、俯冲和造山作用, 以金沙江缝合带为标志的古特提斯洋板块于晚古生代完成向羌塘地体的俯冲过程, 班公湖-怒江洋盆地



1. 陆日格; 2. 纳日贡玛; 3. 玉龙

1. Lurige; 2. Nari Gongma; 3. Yulong

图 8 陆日格斑岩 Nb Nb/U 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\text{--Nb/U}$ 图解

Fig. 8 Nb-Nb/U and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\text{--Nb/U}$ diagrams

于晚侏罗世—早白垩世末向北俯冲^[35, 36]或双向俯冲^[37]。区域多期次的洋壳板片俯冲产生的流体对壳幔过渡带进行交代。

研究表明,自始新世以来,构造上夹持于金沙江缝合带与班公湖—怒江缝合带的羌塘地体在印度—亚洲大陆的持续会聚和南北挤压背景下,以大陆内部地体间的相对运动为主,以吸纳和调节印度—亚洲大陆碰撞应力应变的构造转换,构造上以陆内俯冲和逆冲—推覆—走滑活动为特征^[8, 15]。在古新世—始新世期间(70~60 Ma)印度板片北东向的斜向碰撞,导致研究区(纳日贡玛—玉龙)内产生右旋走滑断裂系统^[8],此后由于受到扬子板块西向碰撞^[38]或欧亚板块北向碰撞^[39]的影响,控制斑岩熔融及含矿斑岩侵位的始新世右行走滑断裂转变为左行走滑断裂,走滑断裂系统导致应力的释放及走滑拉分盆地的形成,地壳深大尺度的走滑断裂因减压作用引发富挥发分的含矿斑岩上涌,就位于断裂控制部位成矿;因此认识到印度—亚洲大陆碰撞诱发的金沙江—红河走滑拉分系统控制了藏东新生代含矿斑岩的分布^[5~8, 38, 40]。

因此,陆日格斑岩的岩石成因可认为是由于印度—亚洲大陆的强烈碰撞,导致三江北段区域构造以陆内俯冲和逆冲—推覆—走滑活动为主,始新世控制斑岩熔融及含矿斑岩侵位的右行走滑断裂转变为左行走滑断裂,走滑断裂系统导致了应力的释放及走滑拉分盆地的形成,地壳深大尺度的走滑断裂因减压作用引发富挥发分的含矿斑岩上涌,就位于断裂控制部位成矿,此次断裂系统直接控制着陆日格斑岩体的就位。

6 结 论

(1) 陆日格含矿斑岩基本上落入高钾钙碱性系列。与德兴斑岩铜矿及南美智利斑岩铜矿斑岩相比,陆日格含矿斑岩明显富 SiO_2 和 K_2O ;除个别样品外,陆日格含矿斑岩落入玉龙斑岩成矿带和冈底斯成矿带斑岩相交的范围内,属于过铝质的高钾钙碱性—钾玄岩系列;斑岩富集LREE及大离子亲石元素(LILE),黑云母—二长花岗斑岩弱的负Eu异常,而浅色花岗斑岩则具有明显的负Eu异常。

(2) 岩浆源区经历过俯冲板片流体的交代富集作用,可能来源于壳幔过渡带。陆日格斑岩Pb同位素落入到富集地幔与下部地壳的延长线上,说明斑岩经受了地壳物质的混染,与纳日贡玛、玉龙带和囊谦新生代钾质火山岩相比,更靠近交代富集地幔(EM II)。

(3) 始新世控制斑岩源区熔融和含矿斑岩侵位的走滑断裂,诱发了减压作用引起软流圈物质上涌,引起俯冲板片流体交代的壳幔过渡带的岩浆源区发生部分熔融,形成含矿岩浆;富含挥发份的含矿岩浆上涌就位于断裂控制部位控制着陆日格斑岩体,从而形成陆日格斑岩钼铜矿。

致 谢: 本研究的野外工作得到青海省地质调查院王富春高级工程师、张永涛、张文权等工程师的帮助,室内工作得到曾敏博士等人的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] 王登红, 杨建民, 闫升好, 徐珏, 陈毓川, 薛春纪, 骆耀, 应汉龙. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景[J]. 地球学报, 2007, 23(2): 135–140.
Wang Denghong, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xu Jue, Chen Yuchuan, Xue Chunji, Luo Yaonan, Ying Hanlong. Cenozoic ore concentration areas in Sanjiang Region, SW China: Tectonic setting and exploration[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 23(2): 135–140. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭利果, 刘玉平, 徐伟, 张兴春, 秦克章, 李铁胜, 石玉若. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约[J]. 岩石学报, 2006, 21(4): 1009–1016.
Guo Liguang, Liu Yuping, Xu Wei, Zhang Xingchun, Qin Kechang, Li Tiesheng, Shi Yuruo. Constraints to the mineralization age of the Yulong Porphyry copper deposit from SHRIMP U–Pb zircon data in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 21(4): 1009–1016. (in Chinese with English abstract)
- [3] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵星祥, 薛万文, 鲁海峰. 青藏高原碰撞造山带 Pb–Zr–Ag–Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123–144.
Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, Wang Zhaolin, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Liu Yingchao, Tian Shihong, He Longqing, Chen Kaixu, Wang Fuchun, Zhao Chengxiang, Xue Wanwen, Lu Haifeng. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb–Zr–Ag–Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 123–144. (in Chinese with English abstract)
- [4] 唐仁鲤, 罗怀松. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
Tang Renli, Luo Huaisong. The geology of Yulong porphyry copper (molybdenum) ore belt, Xizang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [5] 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振秦, 秦克章, 杨志明. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 337–358.

- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, Mo Xuanxue, Ding Lin, Gao Yongfeng, Dong Fangliu, Li Guangming, Qu Xiaoming, Zhao Zhidan, Jiang Sihong, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Qin Kezhang, Yang Zhiming. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting [J]. Mineralium Deposita, 2006, 25(4): 337–357. (in Chinese with English abstract)
- [6] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(05): 521–543.
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, Mo Xuanxue, Tian Shihong, Sun Xiaoming, Ding Lin, Wang Erqi, Gao Yongfeng, Xie Yuling, Zeng Pusheng, Qin Kezhang, Xu Jifeng, Qu Xiaoming, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Fei Hongcai, Meng Xiangjin, Li Zhenqing. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. Mineralium Deposita, 2006, 25(5): 521–544. (in Chinese with English abstract)
- [7] 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 629–651.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Yang Zhimin, Zheng Mianping, Zheng Youye, Nie Fengjun, Gao Yongfeng, Jiang Sihong, Li Guangming. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting [J]. Mineralium Deposita, 2006, 25(6): 629–652. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hou Zengqian, Ma Hongwen, Khin Zaw, Zhang Yuquan, Wang Mingjie, Wang Zeng and Pan Guitang, Tang Renli. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Produced by large-scale strike-slip faulting at eastern Tibet [J]. Econ. Geol., 2003, 98: 125–145.
- [9] Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2006, 241: 617–633.
- [10] 南征兵, 唐菊兴, 李葆华, 宋顺昌. 青海纳日贡玛斑岩铜矿流体包裹体地球化学特征[J]. 新疆地质, 2005, 23(4): 372–377.
- Nan Zengbing, Tang Juxing, Li Baohua, Song Shunchang. Fluid inclusion geochemical characteristics of the Narigongma porphyry copper deposit, Zaduo county, Qinghai Province [J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(4): 373–377. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周伟, 王玉德, 曹德智, 王毅智, 王永文. 青海纳日贡玛始新世—渐新世含矿斑岩体地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(4): 99–105.
- Zhou Wei, Wang Yude, Cao Dezhi, Wang Yizhi, Wang Yongwen. Geochemistry of the Eocene–Ligocene porphyry in the Narigongma region, Qinghai [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(4): 99–106. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈建平, 唐菊兴, 陈勇, 李葆华, 尚北川. 西南三江北段纳日贡玛铜钼矿床地质特征与成矿模式[J]. 现代地质, 2008, 22(01): 9–16.
- Chen Jianping, Tang Juxing, Chen Yong, Li Baohua, Shang Beichuan. Geological characteristics and metallogenic model of the Narigongma copper molybdenum deposit in the north part of the Sanjiang region, southwest China [J]. Geoscience, 2008, 22(1): 1–9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王召林, 杨志明, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 马彦青, 王贵仁, 屈文俊. 纳日贡玛斑岩钼铜矿床: 玉龙铜矿带的北延—来自辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 503–510.
- Wang Zhaolin, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Tian Shihong, Liu Yingchao, Ma Yanqing, Wang Guiren, Qu Wenjun. Narigongma porphyry molybdenite copper deposit, northern extension of Yulong copper belt: Evidence from the age of Re-Os isotope [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(3): 503–510. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 王淑贤, 王贵仁, 田世洪, 温德银, 王召林, 刘英超. 青海纳日贡玛斑岩钼(铜)矿床: 岩石成因及构造控制[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 489–502.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Wang Shuxian, Wang Guiren, Tian Shihong, Wen Deyin, Wang Zhaolin, Liu Yingchao. Genesis of porphyries and tectonic controls on the Narigongma porphyry Mo-Cu deposit, southern Qinghai [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(3): 489–502. (in Chinese with English abstract)
- [15] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2000, 28: 211–280.
- [16] Han Yigui, Zhang Shihong, Franco PIRAJNO, Zhang Yuarrhou. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong'er share Waifangshan Region, western Henan Province, China, and its tectonic implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 253–265.
- [17] 何学贤, 唐索寒, 朱祥坤. 多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)高精度测定 Nd 同位素方法[J]. 地球学报, 2007, 26: 19–22.
- He Xuexian, Tang Suohan, Zhu Xiangkun. Precise measurement of Nd isotopic ratios by means of multi-collector magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 26: 19–22. (in Chinese with English abstract)
- [18] 黄萱. 山西省花岗岩类的 Nd 和 Sr 同位素组成及构造演化意义[J]. 岩石学报, 1990, 6: 1–11.
- Huang Xuan. The Nd and Sr isotopic compositions and its tectonic evolution meaning of Shanxi Province granitoids [J]. Acta Petrologica Sinica, 1990, 6: 1–11. (in Chinese with English abstract)

- [19] 邱家骥. 应用岩浆岩岩石学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1991.
- Qiu Jiexiang. Application of igneous petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [20] 迟清华, 酈明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Chi Qinghua, Yan Mingcai. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [21] Gillespie M, Styles M. Rock classification, igneous rocks[R]. British Geological Survey, 1999.
- [22] 马鸿文. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990.
- Ma Hongwen. Granitoid and mineralization of the Yulong porphyry copper belt in eastern Tibet[M]. Beijing: China University of Geoscience Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [23] 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 邱华宁, 赵振华, 梁华英, 钟孙霖. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(5): 493–498.
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, Qiu Huaning, Zhao Zhenhua, Liang Huaying, Zhong Sunlin. Isotope characteristics of Shoshonitic rocks in eastern Qinghai Tibet Plateau magmatic rocks: Petrogenesis and tectonic significance[J]. Science in China (series D), 2003, 30(5): 493–499. (in Chinese with English abstract)
- [24] 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 1–11.
- Hou Zengqian, Mo Xuanyue, Gao Yongfeng, Qu Xiaoming, Meng Xiangjin. Adakite, a possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in Northern Chile[J]. Mineralium Deposita, 2003, 22(1): 1–11. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁林, 张进江, 周勇, 邓万明, 许荣华, 钟大贵. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 408–421.
- Ding Lin, Zhang Jinjiang, Zhou Yong, Deng Wanming, Xu Ronghua, Zhong Dalai. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in northern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 408–421. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赖绍聪. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制[J]. 岩石学报, 1999, 15(4): 98–104.
- Lai Shaocong. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks from the northern part of the Qinghai Tibet plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 98–104. (in Chinese with English abstract)
- [27] Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W, Purtscheller F. Post collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr Nd Pb O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. J. Petrology, 1999, 40: 1339–1424.
- [28] Wang J H, Yin A, Harrison T M. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. Earth Planet, 2001, 199: 123–133.
- [29] 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 戴宝章. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 697–706.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Dai Baozhang. Petrogenesis of Cu bearing porphyry associated with continent-continent collisional setting: Evidence from the Yulong porphyry copper ore belt, east Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 697–706. (in Chinese with English abstract)
- [30] 夏斌, 林清茶, 张玉泉. 青藏高原东部新生代钾质碱性系列岩石地球化学特征: 岩石成因及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1189–1196.
- Xia Bin, Lin Qingcha, Zhang Yuquan. Qinghai Tibet Plateau and its genesis and geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(8): 1189–1196. (in Chinese with English abstract)
- [31] 程锦, 夏斌, 张玉泉. 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的地球化学特征: 岩石成因及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 382–391.
- Cheng Jin, Xia Bin, Zhang Yuquan. Geochemical characteristics of the Cenozoic potassic rich volcanic rocks in Nangqen basin: petrogenesis and tectonic implications[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2008, 32(3): 382–391. (in Chinese with English abstract)
- [32] 迟效国, 刘建峰, 赵芝, 董春艳, 黎广荣, 赵院东, 赵秀羽. 青藏高原新生代两类超钾质岩石的成因——实验岩石学和地球化学约束[J]. 地学前缘, 2009, 16(01): 88–98.
- Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, Zhao Zhi, Dong Chunyan, Li Guangrong, Zhao Yuandong, Zhao Xiuyu. Petrogenesis of two kinds of Cenozoic ultrapotassic volcanic rocks in Qinghai Tibet Plateau: Constraints from experimental petrology and geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 88–98. (in Chinese with English abstract)
- [33] 迟效国, 董春艳, 刘建峰, 金巍, 李才, 刘森, 黎广荣. 青藏高原高 $Mg^\#$ 和低 $Mg^\#$ 两类钾质-超钾质火山岩及其源区性质[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 595–602.
- Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, Liu Jianfeng, Jin Wei, Li Cai, Liu Sen, Li Guangrong. High $Mg^\#$ and Low $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rocks and their source nature on the Tibetan plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 595–602. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 304–318.
- Deng Wanming, Sun Hongjuan, Zhang Yuquan. Petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in Nangqen basin[J]. J. Chinese Geology, 2001, 36(3): 304–318. (in Chinese with English abstract)

(4)地质历史中常常出现生物化石混生使研究人员感到困惑,而个体大的与深水微体生物群混生常与构造作用无关;而喷口生物群的出现,很好地解释了这种极端环境的混生现象。

(5)喷口生物群的存亡是敏感环境的指示者;其生命过程中肯定或多或少记录了热液活动某些方面的信息,因此喷口生物对热液活动有良好的示踪性。根据大白蛤类 *Cal Ptogenamagnifica* 壳体 Sr/ Ca 值的变化,探讨海底热液活动的强弱、期次已取得良好的效果^[9]。

现代深海热液喷口生物群的发现不但揭示了地下生物圈存在的直接证据,而且有力地推动了深海生物学、海洋地质学、海底矿产和生物资源的研究,使深海底研究取得的重大突破,对远古时期生物生存环境研究有理论和实践的意义。

致 谢:感谢王家生教授赠送的现代喷口生物群的标本,以及由此产生的一些思考。

参考文献 (References):

[1] 李江海, 初凤友, 冯军. 深海底热液微生物成矿与深部生物圈研究进展[J]. 自然科学进展, 2005, 15(12): 1416~ 1421.
Li Jianghai, Chu Fengyou, Feng Jun. Deep seafloor hydrothermal mineralization and the deep biosphere microorganisms progress[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(12): 1416~ 1421. (in Chinese with English abstract)
[2] Sbruyeres D, Danet A M A, Ohta. Deep sea hydrothermal communities in southwestern Pacific backarc basins(the North

FI Ji and Lau Basins): Composition, microdistribution and food web[J]. Marine Geology, 1994, 116: 227~ 242.
[3] Condie K C. Plate tectonic and crustal evolution[M]. New York: Pergamon Press, 1989: 10~ 200.
[4] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the ocean basins[C]. London: Geological Society Special Publication, 1989: 345.
[5] Weaver B L. The origin of island basalt end member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 104: 381~ 397.
[6] Wilson M. Igneous petrogenesis[M]. London: Oxford University Press, 1989: 245~ 285.
[7] 张海清, 孙晓猛, 陈先兵. 洋岛、海山碳酸盐岩的沉积特征及其古地理意义[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 29~ 33.
Zhang Haiqing, Sun Xiaomeng, Chen Xianbing. Oceanic island seamount carbonate sedimentary feature and its paleogeographic significance[J]. Geological Science and Technology Information, 1997, 16(1): 29~ 33. (in Chinese with English abstract)
[8] 郭宪璞, 王乃文, 丁孝忠. 东昆仑格尔木南部纳赤台群和万保沟群基质系统与外来系统地球化学差异[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1188~ 1195.
Guo Xianpu, Wang Naiwen, Ding Xiaozhong. Geochemical divergence between the matrix system and exotic block system in the Najital and Wanbaogou groups in the East Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(12): 1188~ 1195. (in Chinese with English abstract)
[9] Hart S R, Blusztajn J. Clam sasreeorder sofoceanridgeveolar ismandhydrothermalventfieldaetivity[J]. Science, 1998, 280(53~ 65): 883~ 886.

(上接第 338 页)

[35] Kapp P, Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Ding L, Guo J H. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4): 1029.
[36] Ding L, Kapp P, Yin A. Early Tertiary volcanism in the Qiangtang terrane of central Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. J. Petrology, 2003, 44: 1833~ 1865.
[37] 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 喻学惠, 董国臣, 周肃. 西藏南部印度—亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学 地球化学约束[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(1): 17~ 27.
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Yu Xuehui, Dong Guochen, Zhou Su. On the lithosphere of Indr Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints [J]. Earth Science(J. China University of Geosciences), 2009, 34(1): 17~ 27. (in Chinese with English abstract)

[38] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 340~ 351.
Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, Wang Anjian, Pan Guitang, Qu Xiaoming, Nie Fengjun. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai Tibet Plateau: Tectonic setting, temporal distribution and ore deposit types [J]. Geology in China, 2006, 33(2): 340~ 351. (in Chinese)
[39] Paul Tapponnier, Xu Zhiqin, Fran - oise Roger, Bertrand Meye, Nicolas Arnaud, Gerard Wittlinger, Yang Jingsui. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671~ 1677.
[40] 侯增谦, 王二七. 印度—亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 275~ 292.
Hou Zengqian, Wang Erqi. Metallogenesis of the Indr Asian Collisional orogen: New advances [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 275~ 292. (in Chinese with English abstract)