

文章编号: 0258-7106 (2006) 04-0388-13

冈底斯斑岩铜矿与南部青藏高原隆升之关系

——来自含矿斑岩中多阶段锆石的证据*

曲晓明¹, 侯增谦², 莫宣学³, 董国臣³, 徐文艺¹, 辛洪波¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 文章通过阴极发光研究结合 SHRIMP U-Pb 法精确定年, 发现青藏高原南部冈底斯斑岩铜矿带含矿斑岩中的锆石由残留、变质、岩浆 3 种类型组成, 其年龄分别为 (51.1 ± 4.8) Ma, (21.1 ± 2.6) Ma 和 (14.47 ± 0.5) Ma。LA-ICP-MS 分析表明残留锆石的特点是 Y(1121×10^{-6})、HREE(641×10^{-6}) 和 MREE(182×10^{-6}) 含量高, U(207×10^{-6})、Th(171×10^{-6}) 和 Hf(0.96%) 含量低。与残留锆石和岩浆锆石相比, 变质锆石 Th/U 比值明显降低(0.54)。在 3 种类型的锆石中都具有明显的负 Eu 异常和正 Ce 异常, 但岩浆锆石以 Ce 异常变化大为特征。冈底斯铜矿带含矿斑岩中识别出的这 3 个锆石阶段与冈底斯碰撞造山带演化中的 3 个重要构造事件相对应。作为印度与亚洲大陆碰撞拼贴的主缝合带, 这种一致性允许我们提出这样一个构造模式: 50~60 Ma 之前印度与亚洲大陆碰撞期间发生地幔镁铁质岩浆底侵, 形成了含矿斑岩的源区; 约 21 Ma 前, 由于软流圈物质上涌, 同时造成了底侵镁铁质岩石部分熔融形成含矿岩浆和地壳快速隆升; 约 15 Ma 前, 伴随着高原南部地壳隆升后的伸展塌陷, 含矿岩浆侵入, 形成了冈底斯斑岩铜矿带。

关键词 地质学; 锆石; 斑岩铜矿; 地壳隆升; 冈底斯造山带; 青藏高原

中图分类号: P618.41; P597

文献标识码: A

Relationship between Gangdese porphyry copper deposits and uplifting of southern Tibet plateau: Evidence from multistage zircon of ore bearing porphyries

QU XiaoMing¹, HOU ZengQian², MO XuanXue³, DONG GuoChen³, XU WenYi¹ and XIN HongBo¹

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Cathodoluminescence imaging combined with SHRIMP U-Pb dating demonstrates that zircons from ore-bearing porphyries of the Gangdese porphyry copper belt on the southern Tibetan plateau are composed of inherited, metamorphic and magmatic zircons with ages of (51.1 ± 4.8) Ma, (21.1 ± 2.6) Ma and (14.47 ± 0.5) Ma, respectively. LA-ICP-MS analysis shows that the inherited zircons are characterized by high concentrations of Y (1121×10^{-6}), HREE (641×10^{-6}) and MREE (182×10^{-6}), and low abundances of U (207×10^{-6}),

本文由国家自然科学基金(编号: 40573027)和“973”项目《印度与亚洲大陆主碰撞带成矿作用》(编号: 2002CB412605)共同资助

第一作者简介: 曲晓明, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 地球化学专业, 主要从事造山带贵金属和有色金属成矿学研究。E-mail: xiaomingqu@163.com。

收稿日期: 2006-03-16; 改回日期 2006-04-06。张绮玲编辑。

Th (171×10^{-6}) and Hf (0.96%) . Compared with the inherited and magmatic zircons , the metamorphic zircons have markedly lower Th/ U ratios (0.54 on average) . Although the three types of zircons all have obvious negative Eu anomalies and positive Ce anomalies , the magmatic zircons show much larger variation in Ce anomaly . What is of significance is that these zircon types correspond to three important tectonic events in the evolution of the Gangdese collisional orogen , and this makes the authors advance the following tectonic model . During the India- Asia collision (50 ~ 60 Ma) , mantle-derived mafic magmas were underplated , leading to the formation of the source of ore-bearing porphyries . Some 21 Ma ago asthenospheric upwelling resulted in partial melting of the underplated mafic rocks under the conditions of metamorphic garnet-amphibolite facies and rapid uplifting of the southern plateau . Concomitantly with the extensional crustal collapse after the uplift at about 15 Ma , the ore-bearing magmas were emplaced , forming porphyry copper deposits .

Key words: geology, zircon, porphyry copper deposit, crustal uplifting, Gangdese orogenic belt, Qinghai-Tibet plateau

近年来,西藏地勘局的矿产勘查活动及相关研究证实了沿冈底斯岩浆弧发育一条潜力巨大的斑岩铜矿带(曲晓明等,2001; Qu et al., 2006)。沿着该铜矿带迄今已发现大型铜矿床3处(驱龙、甲马、厅宫),中型铜矿床4处(冲江、南木、拉抗俄、帮普)及一系列矿点和矿化点(图1)。研究表明,该矿带的成矿作用与晚第三世的一套埃达克质花岗斑岩有关(曲晓明等,2003)。由冲江和南木2个矿区的辉钼矿得出的 Re-Os 成矿年龄为 (13.99 ± 0.16) Ma 和 (14.67 ± 0.22) Ma(侯增谦等,2003),表明该斑岩铜矿带的大规模成矿作用发生在冈底斯碰撞造山带演化晚期的碰撞后伸展阶段。笔者在对冈底斯斑岩铜矿带中的含矿斑岩进行锆石 U-Pb SHRIMP 定年时发现锆石存在残留、变质及岩浆3种类型,分别对应

3个时代。雅鲁藏布江缝合带作为印度与亚洲大陆碰撞的主缝合带,对它的形成演化已做了大量的研究工作。Beck 等(1995)和 Le Fort(1996)研究指出印度与亚洲大陆的碰撞时间发生在 55 ~ 50 Ma 之间。Leech 等(2005)认为印度与亚洲大陆的初始碰撞时间发生在 55 Ma,大约在 51 Ma 前后洋盆完全闭合。Harrison 等(1992)和 Chen 等(1999)研究发现冈底斯花岗岩基大约在 21 Ma 前有一次快速冷却和剥蚀事件,并把它看作是冈底斯造山带开始快速隆升的时间。根据 NS 向脉岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定结果,Williams 等(2001)把青藏高原南部的 E-W 向伸展时间确定在 18.3 ~ 13.3 Ma 之间。Coleman 等(1995)也从热液绢云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄得出了青藏高原南部 E-W 向伸展的时间不晚于 14 Ma 的结

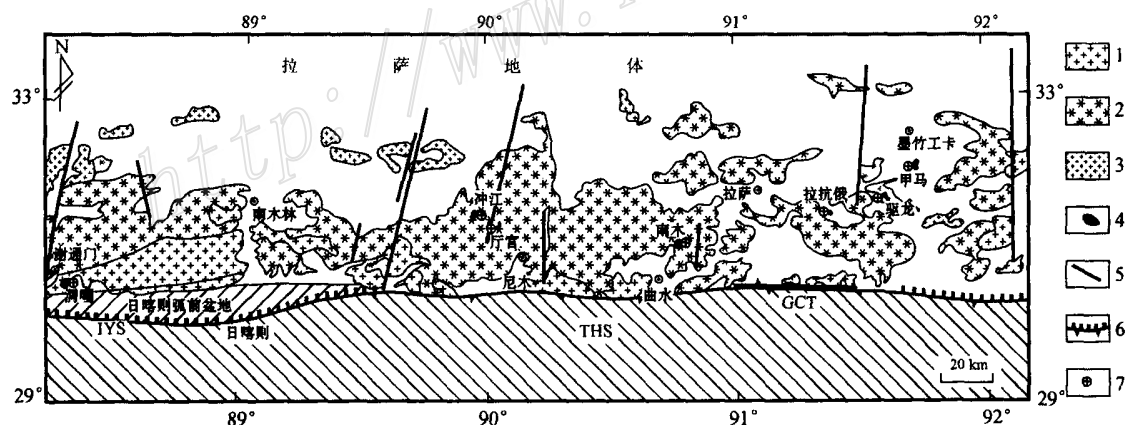


图1 冈底斯碰撞造山带岩浆岩与斑岩铜矿床分布图(据中国地质调查局1:50万数字化地质图修改)

GCT—大反向逆冲断裂; THS—被动大陆边缘沉积; IYS—印度河—雅鲁藏布江缝合带;

1—中-晚燕山期花岗岩; 2—早喜马拉雅期花岗岩; 3—中新世小体积花岗岩; 4—含矿斑岩; 5—断层; 6—逆冲断裂; 7—铜矿床

Fig. 1 Distribution of magmatic rocks and porphyry Cu deposits in the Gangdese collisional orogenic belt (modified after the 1:500000 Digitalized Geological Map by Geological Survey of China)

GCT—Great reverse overthrust; THS—Passive epicontinental sediments; IYS—Indian River-Yarlung Zangbo River suture; 1—Middle-Late Yanshanian granite; 2—Early Himalayan granite; 3—Miocene small granite; 4—Ore-bearing porphyry; 5—Fault; 6—Overthrust; 7—Copper deposit

论。这样一来,冈底斯铜矿带含矿斑岩中 3 个时代的锆石与造山带演化中的 3 个重要构造事件(陆-陆碰撞、地壳开始快速隆升及地壳隆升后伸展塌陷)之间存在时间上的一致性。这种一致性表明有着巨大资源潜力的冈底斯斑岩铜矿带的大规模铜成矿过程与南部青藏高原的隆升过程是息息相关的。

1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

冈底斯铜矿带含矿斑岩样品取自冲江、南木和拉抗俄 3 个矿区(图 1)。在双铅镜下挑选锆石(纯度 >95%),然后将其粘结在环氧树脂玻璃靶上,抛光至锆石颗粒中心暴露出来。SHRIMP 测试程序见

Compston 等(1992)。测试条件为电流 15 nA,电压 10 kV, O_2^- 束直径 25 ~ 30 μm 。标准校正误差 CJ-09 和 DZL-06 号样品为 0.83%, NMY-04 号样品为 1.53%。样品的阴极发光研究是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室进行的;SHRIMP U-Pb 测定在中国地质科学院离子探针室完成。Pb/U 比值用标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma)校正, U、Th、Pb 含量则用标准锆石 SL-13(年龄为 527 Ma, U 含量 238×10^{-6})校正。普通 Pb 含量用测得的 ^{208}Pb 校正,假定 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 之间谐和一致。数据用 Ludwig SQUID 1.0 和 ISOPLOT 程序处理。测试结果列于表 1, U-Pb 一致曲线图见图 2。

冈底斯铜矿带含矿斑岩的锆石多数呈柱状,少

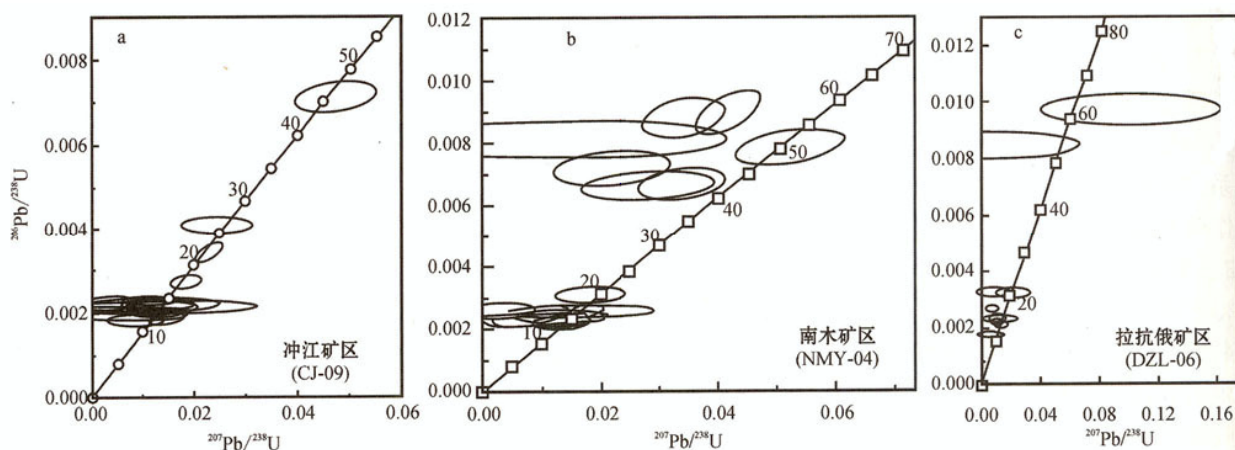


图 2 冈底斯铜矿带含矿斑岩中锆石的 U-Pb 一致曲线图
a—冲江矿区; b—南木矿区; c—拉抗俄矿区

Fig. 2 U-Pb concordia diagrams of zircons from ore-bearing porphyries of the Gangdese copper belt

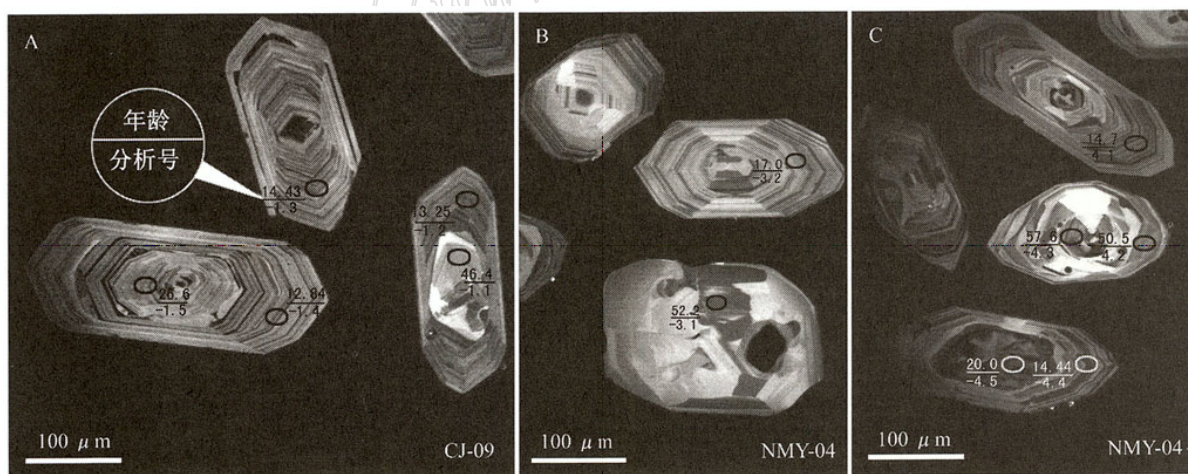


图 3 冈底斯铜矿带含矿斑岩中锆石的阴极发光结构影像
A—冲江矿区; B、C—南木矿区

Fig. 3 CL images of zircons from the ore-bearing porphyries

表 1 冈底斯铜矿带含矿斑岩中锆石的 U-Th-Pb SHRIMP 分析结果

Table 1 U-Th-Pb SHRIMP analyses of zircon from ore bearing porphyries of the Gangdese copper belt

分析编号	$^{206}\text{Pb}/\%$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$t(^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U})/\text{Ma}$	类型*	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm/\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm/\%$	校正误差
CJ09-6.1	9.21	682	574	0.87	1.19	11.92 ± 0.88	III	0.148				0.333
CJ09-5.1	18.69	491	332	0.7	1.15	14.3 ± 1.1	III	0.0045	76	0.00223	5.2	0.069
CJ09-5.2	12.18	749	61	0.91	1.32	11.57 ± 0.89	III	0.0088	42	0.00180	5.2	0.125
CJ09-4.1	12.87	584	495	0.88	1.12	12.58 ± 0.97	III	0.0088	78	0.00196	5.2	0.066
CJ09-4.2	6.96	1092	929	0.88	2.21	14.11 ± 0.93	III	0.0155	41	0.00219	5	0.123
CJ09-4.3	14.65	586	548	0.97	1.28	14.0 ± 1.2	III	0.0098	75	0.00218	5.2	0.069
CJ09-4.4	11.35	787	851	1.12	1.61	13.57 ± 0.99	III	0.0136	36	0.00211	5	0.138
CJ09-3.1	2.68	1478	684	0.48	4.51	22.3 ± 1.2	II	0.0232	7.3	0.00346	5	0.681
CJ09-3.2	19.24	451	447	1.02	0.954	12.8 ± 1.3	III	0.0045	200	0.0020	5.3	0.026
CJ09-3.3	19.01	438	327	0.77	0.99	13.7 ± 1.3	III	0.015	83	0.00214	5.3	0.064
CJ09-2.1	2.08	822	931	1.17	1.6	14.59 ± 0.56	III			0.00227	2.9	
CJ09-2.2	8.32	738	359	0.5	2.1	19.53 ± 0.76	II			0.00303	2.9	
CJ09-2.3	5.01	1014	428	0.44	2.52	17.69 ± 0.71	II	0.0185	11	0.00275	3.4	0.311
CJ09-1.1	5.59	296	174	0.61	1.95	46.4 ± 1.6	I	0.0478	11	0.00722	2.8	0.261
CJ09-1.2	9.28	954	622	0.67	1.86	13.25 ± 0.80	III			0.00206	4.3	
CJ09-1.3	9.6	1092	811	0.77	2.37	14.73 ± 0.55	III	0.0112	32	0.02287	2.7	0.085
CJ09-1.4	8.77	706	685	1	1.33	12.84 ± 0.61	III	0.0123	24	0.00199	3.3	0.138
CJ09-1.5	4.09	961	864	0.93	3.56	26.60 ± 0.86	II	0.0246	19	0.00413	2.6	0.136
NMY04-1.1	2.34	806	824	1.06	1.63	14.83 ± 0.92	III	0.0157	9	0.0023	5	0.552
NMY04-2.1	8.9	135	166	1.27	0.911	46.1 ± 3.6	I	0.0234	29	0.00719	5.3	0.185
NMY04-2.2	4.68	527	54	0.1	1.21	16.45 ± 0.90	III	0.0174	11	0.00256	5.1	0.447
NMY04-3.1	7.01	299	318	1.1	2.24	52.2 ± 3.5	I	0.016	110	0.00814	4.9	0.046
NMY04-3.2	17.31	270	244	0.93	0.738	17.0 ± 1.5	III	0.0039	100	0.00264	5.4	0.053
NMY04-3.3	5.05	547	466	0.88	3.31	42.9 ± 2.8	I	0.0345	14	0.00669	5.2	0.336
NMY04-3.4	5.9	528	343	0.67	3.19	42.5 ± 2.5	I	0.0287	27	0.00663	4.8	0.181
NMY04-4.1	8.61	766	785	1.06	1.64	14.7 ± 1.0	III	0.0101	51	0.00229	5	0.098
NMY04-4.2	3.44	435	136	0.32	3.05	50.5 ± 2.7	I	0.0527	12	0.00787	4.8	0.408
NMY04-4.3	2.76	525	448	0.88	4.17	57.6 ± 3.5	I	0.0422	8.5	0.00899	5	0.592
NMY04-4.4	11.8	821	609	0.77	1.79	14.44 ± 0.99	III	0.0129	21	0.00225	5	0.244
NMY04-4.5	5.46	930	426	0.47	2.62	20.0 ± 1.2	II	0.0185	22	0.00311	4.9	0.227
NMY04-5.1	14.95	368	250	0.7	0.849	14.7 ± 1.1	III	0.01	61	0.00229	5.4	0.090
NMY04-5.2	13.14	429	37	0.09	1.09	16.6 ± 1.1	III	0.0173	48	0.00259	5.3	0.110
NMY04-6.1	29.09	151	195	1.33	0.487	17.1 ± 2.5	III	0.006	360	0.00268	5.8	0.016
NMY04-7.1	6.79	785	537	0.71	1.68	14.93 ± 0.92	III	0.0116	14	0.00232	5	0.361
NMY04-7.2	5.38	1016	873	0.89	2.01	14.06 ± 0.87	III	0.0138	20	0.00219	4.9	0.248
NMY04-7.3	25.62	187	262	1.45	0.498	14.9 ± 1.9	III	-0.01	50	0.00232	5.6	-0.111
NMY04-7.4	6.31	294	263	0.92	2.38	56.5 ± 3.6	I	0.0353	13	0.00882	4.9	0.374
NMY04-9.1	6.97	895	871	1	2	15.6 ± 1.0	III	0.0131	42	0.00242	4.9	0.116
NMY04-9.2	4.31	508	343	0.7	1.18	16.6 ± 1.0	III	0.011	21	0.00258	5.1	0.246
NMY04-11.1	8.22	752	647	0.89	1.68	15.4 ± 1.0	III	0.0158	21	0.00239	5	0.234
NMY04-11.2	18.87	284	246	0.89	0.749	16.0 ± 1.5	III	0.0012	760	0.0025	5.4	0.007
DZL06-4.1	12.76	1005	581	0.6	2.27	14.79 ± 0.94	III	0.011	31	0.0023	4.6	0.148
DZL06-4.2	9.76	1494	1277	0.88	3.3	14.94 ± 0.64	III	0.0108	14	0.00232	2.7	0.195
DZL06-5.1	16.57	1020	1342	1.36	1.93	11.82 ± 0.72	III			0.00184	2.9	
DZL06-5.2	32.46	111	44	0.41	1.2	54.5 ± 4.8	I	0.012	290	0.0085	3.6	0.013
DZL06-5.3	15.9	142	118	0.86	1.42	62.5 ± 4.5	I	0.103	39	0.00975	3.6	0.092
DZL06-3.1	7.6	2579	10127	4.06	6.41	17.2 ± 1.6	III	0.0076	35	0.00267	2.4	0.069
DZL06-3.2	16.77	764	949	1.28	1.84	15.03 ± 0.84	III	0.0124	61	0.00233	2.8	0.046
DZL06-3.3	12.65	1202	666	0.57	2.76	15.05 ± 0.60	III	0.013	40	0.00234	2.7	0.067
DZL06-2.1	8.01	1653	2592	1.62	3.49	14.55 ± 0.62	III	0.183	19	0.00226	2.5	0.131
DZL06-2.2	17.63	620	636	1.06	2.09	20.8 ± 1.3	II	0.0211	37	0.00323	3.3	0.087
DZL06-1.1	24.65	372	222	0.62	1.39	21.0 ± 1.3	II	0.01	85	0.00327	3.2	0.037
DZL06-1.2	7.74	2178	932	0.44	4.25	13.48 ± 0.44	III	0.0137	21	0.00209	2.6	0.124
DZL06-1.3	18.48	803	427	0.55	1.5	11.39 ± 0.63	III	0.0061	100	0.00177	3.1	0.031

Pb* 为放射成因铅;类型*: I—残留锆石; II—变质锆石; III—岩浆锆石。

表 2 冈底斯铜矿带含矿斑岩中多阶段锆石的 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS analysis of multi-generation zircon from ore-bearing porphyries of the Gangdese copper belt																																		
DLZ06-1.1		DLZ06-1.2		DLZ06-1.3		DLZ06-2.2		DLZ06-3.3		DLZ06-3.2		DLZ06-3.1		DLZ06-5.2		DLZ06-5.3		DLZ06-4.1		DLZ06-4.2		CJ09-1.1		CJ09-1.2		CJ09-2.3		CJ09-2.2		CJ09-1.3		CJ09-1.4		
t/Ma		21	13.48	11.39	20.8	15.05	15.03	17.2	54.5	62.5	14.79	14.94	46.4	13.25	17.69	19.53	14.73	12.84																
类型		变质	岩浆	岩浆	变质	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	变质	变质	变质	岩浆	岩浆	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩	岩
Si	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.16	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2
P	56.08	121.9	72.94	111.26	52.68	249.27	360.52	745.45	235.59	77.9	49.22	1700.44	249.1	128.44	478.02	121.9	168.53																	
Ti	2.89	3.36	3.8	4.15	1.435	3.8	2.83	10.79	14.45	2.72	4.25	2.09	2.36	2.44	2.84	1.573																		
Mn	0.313	0.149	<0.060	<0.046	0.091	1.049	1.913	4.17	<0.069	<0.042	0.246	6.4	0.523	0.082	2.287	0.238																		
Cu	0.123	0.25	1.98	<0.064	0.247	1.98	0.091	<0.091	0.589	0.631	4.47	0.49	0.511	<0.064	0.522	<0.065																		
Ga	0.311	0.586	0.0281	0.44	0.336	0.665	0.499	0.217	0.0386	0.37	0.372	0.497	0.396	0.2146	0.28	0.309																		
Rb	0.087	0.1244	0.04	0.21	0.0663	0.1684	0.621	0.292	0.22	0.172	0.604	0.0866	0.0761	0.304	0.314	0.1003																		
Sr	0.1613	0.438	0.1893	0.1524	0.305	1.386	1.863	2.29	0.213	0.1633	0.382	4.07	1.062	0.47	2.19	0.36	0.71																	
Y	493.81	820.04	420.11	682.16	460.86	717.59	658.81	1184.19	1010.89	546.94	804.72	694.23	481.55	289.88	320.71	403.66	339.77																	
Nb	0.616	2.364	0.642	0.757	0.972	1.712	1.591	0.825	0.903	0.944	1.951	1.189	0.976	1.073	0.81	1.58	0.909																	
Ba	0.0568	0.0151	0.434	<0.0081	0.0477	2.51	2.76	0.21	0.181	<0.0080	0.866	<0.0067	<0.0066	0.0265	0.1305	0.0605	0.0098																	
La	0.1272	0.305	0.0684	0.0568	0.0318	1.359	0.814	2.72	0.021	0.0353	0.0762	10.57	1.298	0.309	1.8	0.47	0.894																	
Ce	22.34	36.67	13.78	27.19	22.05	47.45	35.2	14.48	12.32	19.98	43.93	29.22	27.06	15.13	19.85	32.93	26.33																	
Pr	0.0659	0.1197	0.0266	0.235	0.0435	0.453	0.237	0.79	0.1101	0.0332	0.0264	2.2	0.2368	0.1041	0.51	0.1425	0.1853																	
Nd	0.981	1.57	0.522	4.03	0.524	3.16	2.38	6.17	1.216	0.404	1.709	9.91	1.386	0.806	2.721	1.38	1.296																	
Sm	1.881	3.96	0.982	6.57	1.142	4.64	3.99	5.64	3.62	1.93	2.91	3.54	1.887	1.227	1.526	2.078	1.543																	
Eu	0.942	1.535	0.485	2.86	0.508	2.38	1.373	1.295	0.493	0.733	1.135	1.361	0.811	0.501	0.554	0.661	0.762																	
Gd	9.86	18	5.96	23.36	6.48	19.12	15.26	23.72	20.27	8.43	17.5	13.17	9.04	6.15	6	8.78	8.33																	
Tb	3.18	6.14	1.995	6.66	2.27	5.3	4.94	8.18	7.6	2.55	5.1	4.52	3.06	1.904	1.941	2.86	2.57																	
Dy	36.74	70.17	27.04	65.03	30.1	59.1	58.77	101.87	88.14	36.84	61.18	55.52	34.86	21.83	22.73	32.7	28.65																	
Ho	14.38	25.59	11.39	22.93	12.38	21.26	21.66	39.73	34.46	15.68	23.36	22.38	13.98	8.34	9.09	12.28	10.48																	
Er	70.25	119.29	60.51	97.69	69.35	93.39	100.93	181.51	147.28	80.48	112.32	106.21	70.14	40.81	45.94	57	48.81																	
Tm	18.62	30.25	18.26	22.42	19.67	22.71	24.51	42.91	35.72	23.04	30.02	25.5	17.82	10.42	12.02	14.31	11.75																	
Yb	228.01	360.42	231.01	237.1	248.46	261.04	263.99	437.8	364.04	318.45	340.12	273.31	209.09	125.58	142.19	161.79	134.56																	
Lu	43.67	67.62	47.71	39.32	53.75	42.84	44.98	68.94	59.55	59.46	61.08	50.99	43.8	26.99	29.65	32.54	27.51																	
Hf	1113.75	12726.33	11243.57	8778.53	11416.62	11407.35	9829.82	8370.69	8824.57	12942.03	12196.07	10775	12388.89	14069.76	13006.97	12995.06	1326.95																	
Ta	0.0848	0.396	0.1061	0.1574	0.216	0.374	0.25	0.391	0.333	0.302	0.433	0.388	0.2225	0.282	0.1751	0.331	0.231																	
Th	290.87	865.35	173.95	218.05	335.71	776.4	663.21	72.27	62.11	326.06	579.14	164.83	397.79	328.51	256.03	866.39	517.45																	
U	447.59	1576.35	428.09	261.78	692.85	622.75	397.98	91.11	78.89	1045.23	1076.73	372.92	633.86	907.79	500.35	912.71	564.83																	
ΣREE	451.05	741.64	419.74	555.45	466.76	584.2	579.03	935.76	774.84	568.05	700.47	608.4	434.47	260.1	296.52	359.92	303.67																	
HREE	360.55	577.58	357.49	396.53	391.23	419.98	434.41	731.16	606.59	481.43	543.54	456.01	340.85	203.8	229.8	265.64	222.63																	
Th/U*	0.65	0.55	0.41	0.83	0.48	1.25	1.67	0.79	0.79	0.31	0.54	0.44	0.63	0.36	0.51	0.95	0.92																	
Ce/Ce*	56.59	45.13	75.98	30.58	114.63	14.19	18.69	2.30	30.11	123.91	230.09	1.36	10.77	19.81	4.82	29.74	14.56																	
Eu/Eu*	0.51	0.46	0.47	0.63	0.52	0.66	0.47	0.29	0.14	0.47	0.37	0.54	0.49	0.45	0.49	0.38	0.52																	

*: 单位为 1。

续表 2-1
Table 2-1 continued

t/Ma	QJ09-1.5	QJ09-2.1	QJ09-3.3	QJ09-3.2	QJ09-3.1	QJ09-4.4	QJ09-4.3	QJ09-4.1	QJ09-5.2	NM04-1.1	NM04-2.1	NM04-2.2	NM04-3.1	NM04-3.2	NM04-4.1	NM04-4.2	NM04-4.3
类型	变质	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆
Si	153225.17	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2
P	84.16	886.56	1505.39	214.21	113.99	306.08	113.53	885.29	488.05	136.02	201.7	113.04	280.97	685.32	159.93	179.23	2399.51
Ti	2.97	3.86	3.31	4.47	3.48	1.38	4.3	0.63	1.76	4.76	8.37	3.43	24.64	1.829	2.06	2.71	9
Mn	0.158	5.25	8.36	0.886	0.066	0.505	0.312	3.35	1.711	<0.048	<0.045	0.951	<0.041	4.09	0.323	0.663	20.13
Cu	0.123	1.571	0.408	1.23	0.272	<0.084	0.446	0.996	<0.063	0.326	0.52	0.472	0.723	0.255	0.219	0.225	0.896
Ga	0.456	0.811	0.993	0.607	0.646	0.311	0.356	0.461	0.433	0.464	0.584	0.2623	0.1828	0.492	0.51	0.1219	1.033
Rb	0.0859	0.1229	0.1159	0.153	0.266	0.197	0.2091	0.144	0.1209	0.0624	0.261	0.651	0.1933	0.0993	0.0967	0.1156	0.2228
Sr	0.1794	4.41	9.01	0.458	0.523	1.275	0.1428	4.95	2.705	0.0857	0.2231	0.444	0.1663	3.89	0.378	0.321	5.7
Y	417.96	422.58	480.33	703.93	728.14	471.79	543.04	733.79	656.99	471.79	1392.66	361.04	1301.65	292.46	505.49	331.99	892.11
Nb	1.303	1.476	0.775	1.095	2.314	0.88	1.18	0.989	1.101	1.963	1.278	0.883	0.786	0.727	1.387	0.855	1.698
Ba	0.0212	0.0707	0.0278	0.45	<0.0067	0.026	0.0292	<0.0070	0.0811	<0.0072	0.126	0.31	0.0212	0.048	0.0342	0.1334	0.0845
La	0.1584	10.05	18.19	0.374	0.314	2.473	0.0487	7.11	3.01	<0.00134	0.125	0.1299	0.0946	5.99	0.442	0.351	14.01
Ce	29.67	52.63	51.87	35.59	32.02	26.57	25.61	44.08	37.08	29.38	34.96	12.36	11.43	33.28	36.49	9.83	49.1
Pr	0.0833	1.907	3.55	0.243	0.1132	0.486	0.0967	1.291	0.423	0.0534	0.532	0.1126	0.334	1.353	0.1144	0.1274	4.85
Nd	1.219	8.94	16.07	2.198	1.553	3.82	1.139	6.72	2.79	1.022	9.52	1.346	5.12	5.63	1.108	0.75	26.17
Sm	2.001	3.68	5.15	5.82	2.7	3.61	2.81	5.1	2.76	1.943	12.97	1.54	8.77	1.915	2.23	0.773	8.93
Eu	0.718	1.005	1.311	1.113	1.128	0.66	0.873	1.393	0.966	0.69	5.35	0.647	0.804	0.57	0.825	0.238	0.858
Gd	9.29	11.78	13.05	19.42	17.3	11.02	12.8	18.49	13.06	9.91	46.44	6.92	34.14	6.18	10.19	4.06	18.61
Tb	2.92	3.39	3.67	5.42	5.44	3.49	4.05	5.42	4.18	3.42	13.46	2.49	10.98	2.088	3.33	1.662	6.09
Dy	32.45	36.9	40.77	62.51	59.09	36.97	45.78	60.23	51.32	40.91	141.32	30.13	121.87	24.15	39.3	23.75	73.55
Ho	12.41	13.09	14.96	21.64	22.77	14.5	17.59	23.13	20.64	15.63	46.75	11.71	41.36	9.38	15.48	10.43	28.84
Er	58.78	59.98	68.49	98.08	99.39	66.08	77.91	103.65	94.44	69.28	190.58	56.29	168.44	43.06	74.15	55	134.65
Tm	14.28	14.19	16.72	22.39	23.39	15.44	19.06	25.29	23.61	16.98	43.23	14.57	36.31	11.48	19.38	15.36	33.15
Yb	158.96	153.71	184.15	243.21	254.91	168.98	207.12	305.11	275.78	187.91	443.87	168.01	345.98	132.27	232.24	190.58	355.89
Lu	32.09	29.13	35.95	44.07	47.99	32.65	38.16	56.16	53.39	30.49	67.92	30.42	49.59	23.55	42.49	36.09	58.68
Hf	12466.16	12232.62	12191.47	11994.89	13135.08	10992.75	11885.24	13196.03	12340.36	9766.86	7354.19	9527.4	9573.26	11144.65	10879.56	11854.56	10517.46
Ta	0.366	0.423	0.226	0.351	0.46	0.314	0.364	0.292	0.343	0.606	0.335	0.318	0.335	0.232	0.342	0.551	0.764
Th	528.76	900.54	432.54	380.58	515.62	365.18	416.97	429.21	528.37	135.56	180.82	77.69	278.94	206.94	632.56	146.64	272.88
U	748.64	689.85	388.21	344.21	1203.37	341.87	409.55	501.5	581.78	153.56	107.69	575.57	246.16	221.17	694.97	525.68	344.02
ΣREE	355.03	400.38	473.9	562.08	568.11	386.75	453.05	663.17	583.45	407.62	1057.03	336.68	835.22	300.9	477.77	349	813.38
HREE	264.11	257.01	305.31	407.75	425.68	283.15	342.25	490.21	447.22	304.66	745.6	269.29	600.32	210.31	368.26	297.03	582.37
Th/U*	0.71	1.31	1.11	1.11	0.43	1.07	1.02	0.86	0.91	0.88	1.68	0.13	1.13	0.94	0.91	0.28	0.79
Ce/Ce*	59.85	2.67	1.44	26.75	39.93	5.41	64.18	3.21	6.88	157.03	17.41	22.08	8.96	2.66	37.51	9.92	1.27
Eu/Eu*	0.42	0.42	0.046	0.29	0.38	0.29	0.37	0.39	0.41	0.39	0.59	0.64	0.12	0.046	0.44	0.33	0.20

续表 2-2
Table 2-2 continued

t/Ma	20	14.7	16.6	17.1	14.93	14.06	14.9	56.5	15.6	15.6	16.6	15.4	16	60.7	60.7	60.7	60.7	60.7
类型	变质	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆	岩浆
Si	153225.19	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2	153225.2
P	48.01	57.77	48.73	111.85	8.33	140.34	110.11	3295.56	103.79	175.35	63.98	935.87	1075.54	970.8	6095.29	3793.32	481.93	
Ti	41.25	2.9	6.55	5.27	2.11	2.65	17.78	5.89	2.21	2.58	2.29	10.51	9.43	201.05	13.49	10.94	35.12	
Mn	61	<0.048	3.15	0.457	0.059	1.216	3.84	21.98	<0.037	1.021	<0.053	7.78	12.18	5.04	349.81	42.91	8.43	
Cu	14.3	0.073	0.36	0.409	0.191	3.45	0.194	8.95	0.435	0.225	0.436	1.268	1.201	0.811	0.057	0.318	0.552	
Ga	2.841	0.364	0.368	0.2547	0.542	0.562	0.395	1.321	0.422	0.425	0.524	0.831	0.443	0.27	1.654	1.178	0.595	
Rb	6.23	0.481	1.765	0.1311	0.2002	0.1614	0.1936	0.287	0.1379	0.358	0.2178	0.29	0.275	1.227	0.651	0.331	1.497	
Sr	14.89	0.911	2.441	0.136	0.323	3.29	0.1367	12.46	0.354	0.877	0.2369	6.55	4.37	0.974	20.14	19.12	4.26	
Y	367.3	592.43	354.57	620.59	708.45	619.9	739.9	1374.44	695.93	660.94	441.92	566.9	1245.56	2541.31	2181.17	1536.01	1621.83	
Nb	0.93	1.557	1.512	0.528	2.181	1.785	0.726	1.022	2.053	1.026	1.283	1.084	1.701	3.21	2.77	1.714	3.37	
Ba	18.95	1.06	6.09	0.0257	0.204	5.51	0.0189	0.227	0.0758	0.566	0.59	0.33	0.0777	2.73	0.793	0.259	9.39	
La	1.513	0.1077	0.2108	0.0579	0.2158	0.329	0.0316	21.48	0.2126	0.752	0.0485	10.17	4.71	0.168	24.74	22.01	1.65	
Ce	11.92	23.7	14.5	15.07	31.28	39.96	24.53	68.01	38.51	26.76	28.67	50.8	28.28	2.01	90.07	65.63	22.08	
Pr	0.1091	0.0549	0.066	0.376	0.1009	0.1001	0.1331	7.61	0.1037	0.255	0.0537	3.11	1.449	0.1502	8.3	6.76	1.52	
Nd	1.235	0.8	0.711	5.19	1.409	1.004	2.93	40.82	1.085	2.63	0.838	16.11	8.61	2.21	44.57	33.71	12.34	
Sm	1.738	2.117	0.952	7.05	2.78	2.57	5.94	13.11	2.054	3.42	2.014	7.29	4.97	5.58	17.32	11.06	14.87	
Eu	0.886	0.748	0.478	2.9	1.348	0.926	1.755	1.179	0.836	1.235	0.704	1.391	1.47	0.202	3.78	2.58	4.63	
Gd	8	10.71	5.33	21.61	14.85	12.04	21.89	32.7	10.79	14.83	9.23	18.19	20.58	33.68	46.73	30.85	48.79	
Tb	2.4	3.55	1.948	5.93	4.75	4.18	6.54	10.25	3.95	4.68	2.96	5.21	7.68	14.78	15.69	10.31	15.41	
Dy	26.59	44.23	24.75	60.49	56.65	48.46	70.74	118.06	49.03	53.68	35.13	54.47	97.68	204.6	183.88	123.92	158.56	
Ho	10.21	17.53	11.02	20.42	22.19	19.07	24.35	44.2	20.41	19.91	13.59	18.93	38.38	81.02	69.02	47.06	51.63	
Er	50.22	85.29	54.93	86.38	105.8	91.51	106.46	192.3	101.9	93.93	64.35	81.3	179.22	376.55	299.4	216.99	217.17	
Tm	13.54	21.84	15.22	20.48	26.35	23.94	25.33	44.87	27.7	24.14	16.9	19.14	44.45	89.11	71.36	52.03	50.74	
Yb	166.79	258.24	185.97	219.92	288.82	283.79	277.16	461.87	329.47	284.37	195.69	204.61	483.98	910.63	748.01	564.7	539.28	
Lu	32.76	47.75	35.19	36.32	57.23	52.13	46.22	70.43	60.58	51.67	36.45	31.9	79.04	138.45	117.63	94.67	87.35	
Hf	11149.88	11346.29	11491.03	8240.66	12265.31	11589.42	10834.03	11804.93	11026.41	11093.51	11615.77	10681.04	8985.46	13193.23	9355.69	8678.9	9459.73	
Ta	0.1707	0.333	0.62	0.174	0.425	0.483	0.251	0.442	0.482	0.276	0.307	0.477	0.607	2.59	0.718	0.543	0.831	
Th	301.3	356.04	278.7	173.49	546.37	698.16	339.92	165.52	614.43	294.97	482.89	380.13	168.68	147.31	490.08	182.63	129.41	
U	962.61	548.36	542.92	123.38	719.35	825.56	290.42	212.47	755.04	335.9	483.01	224.4	199	885.3	325.14	191.83	259.57	
ΣREE	327.91	516.67	351.28	502.19	613.77	580.01	614.01	1126.89	646.63	582.08	406.63	522.62	1000.5	1859.14	1740.5	1279.7	1226.02	
HREE	263.31	413.12	291.31	363.1	478.2	451.37	455.17	769.47	519.65	454.11	313.39	336.95	786.69	1514.74	1236.4	928.39	894.54	
Th/U	0.31	0.65	0.51	1.41	0.76	0.85	1.17	0.78	0.81	0.88	1	1.69	0.85	0.17	1.51	0.95	0.5	
Ce/Ce*	5.07	71.68	28.81	10.92	49.56	51.52	48.82	1.25	60.57	14.35	115.0	2.11	2.53	2.72	1.48	1.26	2.98	
Eu/Eu*	0.60	0.39	0.51	0.66	0.51	0.42	0.41	0.17	0.44	0.45	0.42	0.35	0.38	0.03	0.38	0.40	0.48	

数呈他形圆粒状。锆石晶体一般无色,有时呈淡褐色。颗粒大小一般在 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间,最大为 $400 \mu\text{m}$ 。锆石类型依据 SHRIMP 年龄结果和阴极发光结构类型确定。在 3 个矿区的样品中 3 种类型的锆石都可见到。与岩浆锆石相比,残留锆石和变质锆石较少见。在 3 个矿区的样品中共见到残留锆石 10 颗,它们一般位于岩浆锆石的核部,两者构成核-幔结构(图 3A)。有时一颗残留锆石被另一颗稍年轻的残留锆石包裹(图 3C)。这些残留锆石多数呈浑圆粒状或板状,结构比较复杂,缺少振荡环带,可见补片状或扇形分区(图 3)。残留锆石年龄范围较宽,从 41.5 Ma 到 62.5 Ma ,加权平均年龄为 51.1 Ma ,误差为 $\pm 4.8 \text{ Ma}$,具有 $> 95\%$ 置信度(表 1,图 4)。在 3 个样品中共见到 7 颗变质锆石,呈柱状或不规则状,通常被宽窄不一的岩浆锆石包裹(图 3),可见模糊的振荡环带(图 3C)。它们的加权平均年龄为 21.1 Ma ,变化范围从 17.69 Ma 到 26.0 Ma ,误差为 $\pm 2.6 \text{ Ma}$,具有 $> 95\%$ 的置信度,在图 4 中于 21 Ma 处形成峰。岩浆锆石最显著的特征是完好的自形程度和清晰的振荡分带。它们环绕残留或变质锆石构成幔或边(图 3B 3C)。37 个岩浆锆石给出的加权平均年龄为 14.47 Ma ,范围为 $11.29 \sim 17.20 \text{ Ma}$,误差为 $\pm 0.5 \text{ Ma}$,置信度 $> 95\%$,在图 4 中它们在 15 Ma 处形成一个很强的峰。

2 LA-IC-PMS 分析

锆石微量元素和稀土元素的激光磨蚀等离子质

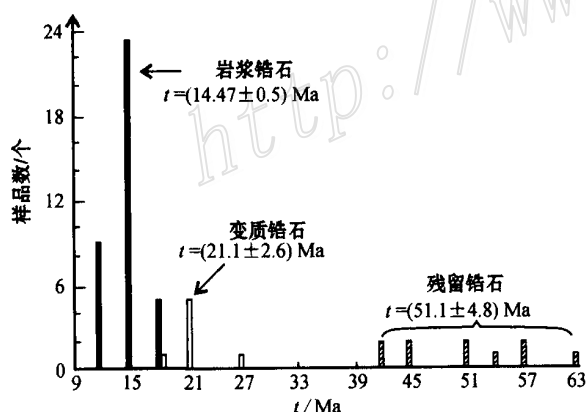


图 4 冈底斯铜矿带含矿斑岩中 3 种类型锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄直方图

Fig. 4 Histogram of SHRIMP U-Pb ages of three types of zircons from ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt

谱(LA-ICP-MS)分析是在 SHRIMP 定年的同一点上测定的,所用仪器是 Elan 6100 DRC 型四级 ICP-MS 质谱仪,激光磨蚀系统是德国 Microlas 公司生产的 Geolas 200 M 型仪器。仪器条件:激光频率 10 Hz ,波长 193 nm ,光束直径 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 。用氦气作载气,离子镜电压 $3.5 \sim 10 \text{ V}$,气体流量 $11 \sim 15 \text{ L/min}$ 。检出限(LOD)随被分析元素质量数(M)的增加而降低。对于 $M \leq 66 \text{ Zn}$ 的元素 LOD 在 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ 之间;对 $71 \text{ Ga} \leq M \leq 137 \text{ Ba}$ 的元素,LOD 一般在 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$ 之间;M 在 139 La 和 238 U 之间的元素, Nd、Sm、Dy、Yb、Hf、Pb 的 LOD 在 $0.011 \times 10^{-6} \sim 0.032 \times 10^{-6}$ 之间,其他元素在 $0.002 \times 10^{-6} \sim 0.009 \times 10^{-6}$ 之间。LA-ICP-MS 分析是在西北大学大陆动力学实验室完成的。测试过程中每测 10 个成分点做一次标样校正。

3 种锆石微量元素和稀土元素的分析结果列于表 2,一些指示性元素和参数的变化范围和平均值列于表 3,球粒陨石标准化 REE 配分曲线示于图 5。从图中可以看出,3 种类型的锆石具有相似的向左陡倾的稀土配分型式。少数锆石具有较高的 LREE 含量,其稀土配分曲线与东南澳大利亚具有 W 矿化的 Boggy Plain Zoned 岩体中热液锆石的配分曲线一致(Hoskin et al., 2003),表明冈底斯铜矿带含矿斑岩生成过程中也有流体参与。不同类型锆石之间 HREE 和微量元素含量存在系统差异,Y、HREE 和 MREE 在残留锆石中含量最高,分别为 1121.45×10^{-6} 、 641.65×10^{-6} 和 182.3×10^{-6} ;在变质和岩浆锆石中含量明显降低,分别为 471.43×10^{-6} 、 306.25×10^{-6} 、 70.55×10^{-6} 和 55.886×10^{-6} 、 381.75×10^{-6} 、 82.97×10^{-6} (图 6a)。相反,微量元素 U、Th、Hf 的含量在残留锆石中最低,分别为 207.6×10^{-6} 、 171.05×10^{-6} 和 0.96% ;在变质和岩浆锆石中明显增高,分别为 718.88×10^{-6} 、 378.45×10^{-6} 、 1.20% 和 574.69×10^{-6} 、 459.53×10^{-6} 、 1.15% (图 6b、6c)。唯一例外的是 Th/U 比值,它在变质锆石中最低(平均 0.54),在残留锆石和岩浆锆石中显著增高(分别为 0.91 和 0.89)(图 7)。3 种锆石都具有明显的负 Eu 异常和正 Ce 异常。与变质锆石(平均 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.50$,变化范围 $0.38 \sim 0.63$)和岩浆锆石(Eu/Eu^* 平均 0.50,变化范围从 $0.29 \sim 0.60$)相比,残留锆石负 Eu 异常更强烈(Eu/Eu^* 平均 0.30,范围 $0.29 \sim 0.60$)。同时,与残留锆石(Ce/Ce^* 平均 9.07,范围 $1.25 \sim 30.11$)和变质锆石(Ce/Ce^* 平均

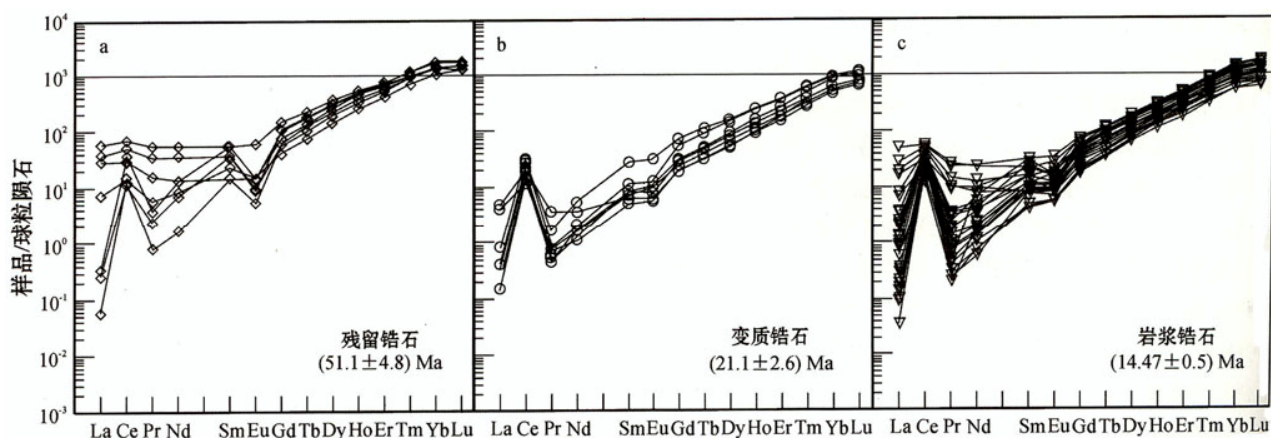


图 5 冈底斯铜矿带含矿斑岩中不同类型锆石球粒陨石标准化稀土元素分配曲线

a—残留锆石; b—变质锆石; c—岩浆锆石

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of three stages of zircons

a—Residual zircon; b—Metamorphic zircon; c—Magmatic zircon

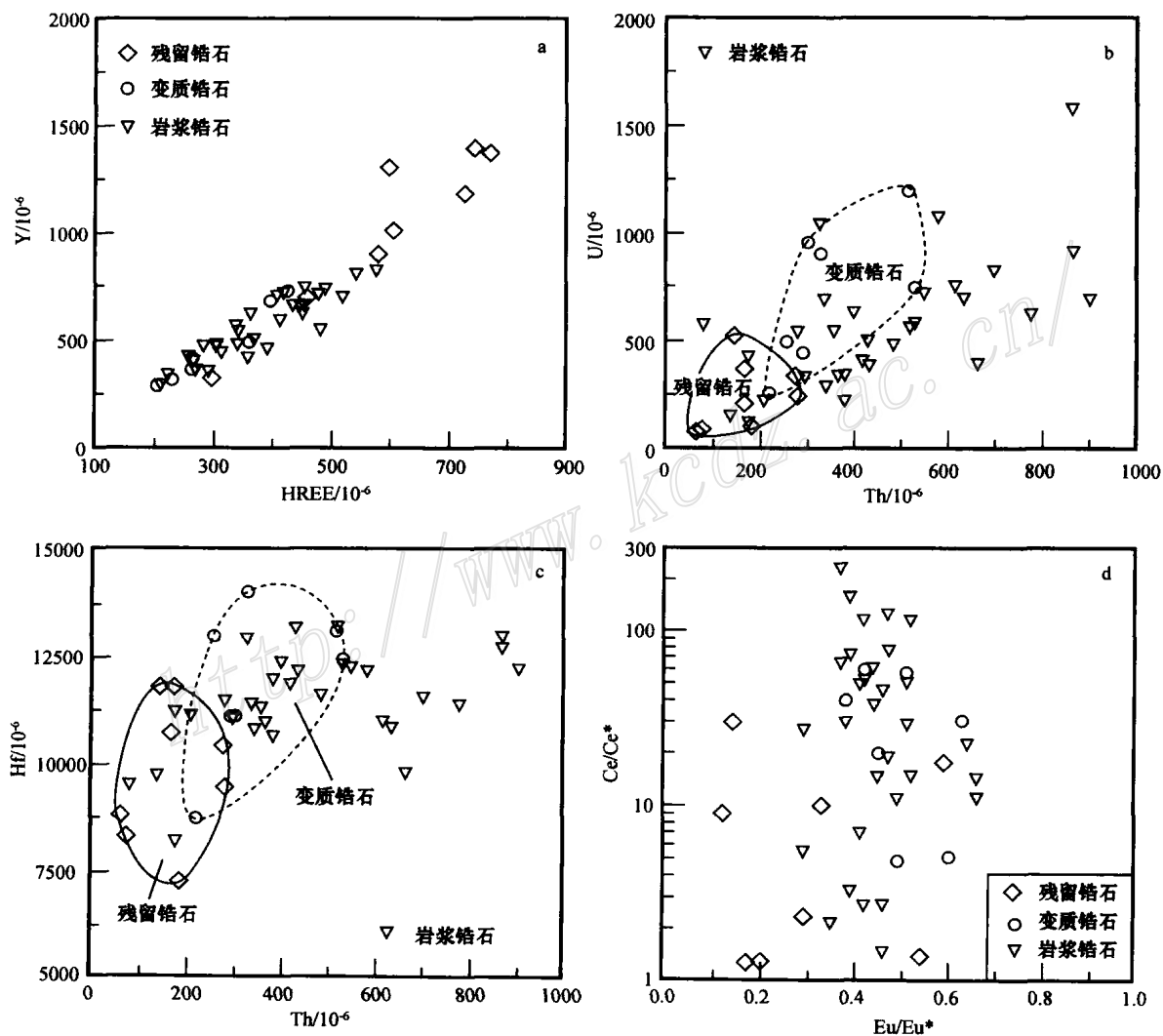


图 6 冈底斯铜矿带含矿斑岩中不同类型锆石的 Y-HREE (a), U-Th (b), Hf-Th (c), and Ce/Ce* - Eu/Eu* (d) 图

Fig. 6 Y-HREE (a), U-Th (b), Hf-Th (c), and Ce/Ce* - Eu/Eu* (d) diagrams of different zircons from ore-bearing porphyries of the Gangdese copper belt

表 3 冈底斯铜矿带含矿斑岩中不同类型锆石的一些指示性元素和参数的变化范围

Table 3 Variation ranges and average values of some indicative elements and parameters of zircons from ore-bearing porphyries of the Gangdese copper belt

	I 残留锆石 (分析点数 8) (51.1 ± 4.8) Ma	II 变质锆石 (分析点数 7) (21.1 ± 2.6) Ma	III 岩浆锆石 (分析点数 31) (14.47 ± 0.5) Ma
Y/ 10^{-6}	694.23 ~ 1392.66 (1121.5)	289.88 ~ 728.14 (471.4)	292.46 ~ 820.04 (558.9)
Hf/ %	0.73 ~ 1.181 (0.96)	0.88 ~ 1.41 (1.2)	0.82 ~ 1.32 (1.2)
Th/ 10^{-6}	62.11 ~ 278.94 (171.1)	218.05 ~ 528.76 (348.5)	77.69 ~ 900.54 (4459.5)
U/ 10^{-6}	78.89 ~ 372.92 (207.6)	261.78 ~ 1203.37 (718.9)	123.38 ~ 1576.35 (574.7)
MREE/ 10^{-6}	100.49 ~ 266.29 (182.3)	39.95 ~ 127.41 (70.6)	44.28 ~ 131.22 (83.0)
HREE/ 10^{-6}	456.01 ~ 769.47 (641.7)	203.8 ~ 425.68 (306.3)	210.31 ~ 577.58 (381.8)
Th/ U	0.44 ~ 1.68 (0.91)	0.31 ~ 0.83 (0.54)	0.31 ~ 1.67 (0.89)
Ce/ Ce*	1.25 ~ 30.11 (9.07)	4.82 ~ 59.85 (30.95)	1.44 ~ 230.09 (47.12)
Eu/ Eu*	0.12 ~ 0.59 (0.30)	0.38 ~ 0.63 (0.50)	0.29 ~ 0.66 (0.50)

注：MREE 包括 Sm, Eu, Gd, Tb, Dy 和 Ho; HREE 包括 Er, Tm, Yb 和 Lu; $Ce/Ce^* = 2 \times Ce_N / (La_N + Pr_N)$; $Eu/Eu^* = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$; 括弧中数字代表平均值。

30.95, 范围 4.82 ~ 59.85) 相比, 岩浆锆石以 Ce 异常变化大为特点 (Ce/ Ce* 平均 47.12, 范围 1.44 ~ 230.09) (图 6c)。

3 讨论

3.1 岩浆源区

关于埃达克岩的岩浆源区人们基本取得共识, 它们或者是来源于俯冲的洋壳板片或者来源于增厚或拆沉的下地壳 (Defant et al., 2002; Xu et al., 2002)。岩浆岩中的残留锆石一般被认为是由岩浆源区继承来的。冈底斯铜矿带含矿斑岩中的继承锆石具有与印度与亚洲大陆碰撞时间 (50 ~ 60 Ma, Yin et al., 1994) 一致的 SHRIMP U-Pb 年龄 [41.5 ~ 62.5 Ma, 平均为 (51.1 ± 4.8) Ma], 排除了它们来自俯冲的雅鲁藏布江洋壳部分熔融的可能性。它们的向左陡倾的 HREE 配分型式、高的 Y 含量和 Th/U 比值、强烈的负 Eu 异常及弱的正 Ce 异常都显示出岩浆锆石的成分特征 (Hoskin et al., 2000; 2003), 并且与地幔锆石不符而与地壳形成的锆石一致 (Hoskin et al., 2003)。另一方面, 含矿斑岩本身具有埃达克岩特性, HREE 强烈亏损, 也指示着岩浆源区应该位于地壳底部, 因为一般都把埃达克岩的 HREE 亏损归因于石榴子石在岩浆源区的残留 (Defant et al., 1990; Peacock et al., 1994)。Binde mann 等 (2005) 根据高压变质矿物稳定条件的研究也指出青藏高原的大陆下增厚地壳有条件产生埃达克岩。对于岩浆源区的岩石类型, Belousova 等 (2002)

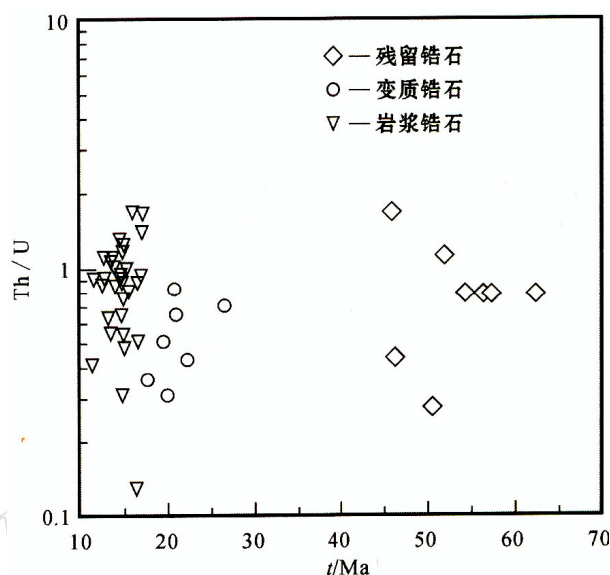


图 7 冈底斯铜矿带含矿斑岩中不同类型锆石的 Th/U-年龄图

Fig. 7 Th/U-age diagram of different zircons from ore-bearing porphyries of the Gangdese copper belt

的 Y-U 判别图提供了进一步的信息。在 Y-U 图 (图 8) 中这些继承锆石与来自同时代的 (60.7 Ma) 林子宗火山岩底部典中组玄武岩-安山岩的锆石具有一致的特征, 都落在镁铁质岩区 (图 8a), 表明它们的源岩是一套镁铁质岩石。此外, 两种锆石也具有十分接近的微量元素和稀土元素组成 (图 8b)。这些事实都表明它们具有一个共同的源区。莫宣学 (私人通讯) 近来的研究表明林子宗火山岩底部的典中组玄武岩-安山岩可能代表了 50 ~ 60 Ma 以前印度与亚洲大陆碰撞期间的一次大规模地幔镁铁质岩浆底侵事

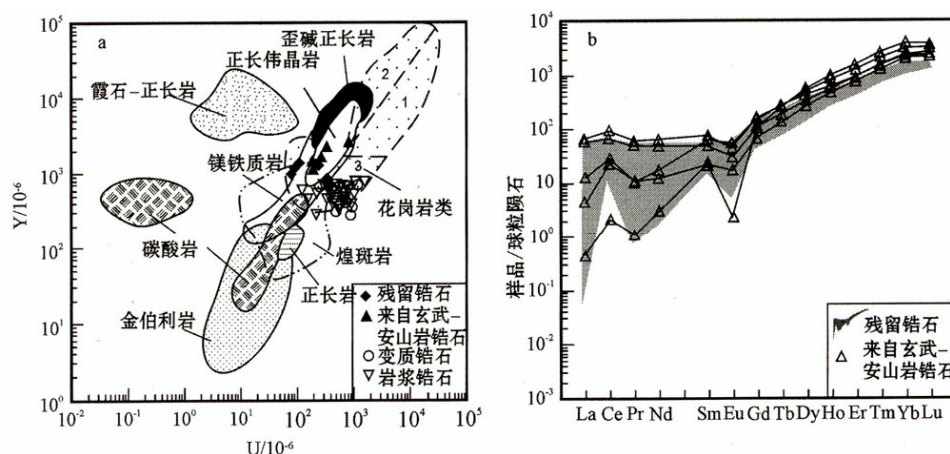


图 8 冈底斯铜矿带含矿斑岩中不同类型锆石的 Y-U 图(a)和残留锆石的球粒陨石标准化稀土元素分配曲线(b)

Fig. 8 Y-U diagram (a) of three stages of zircons and chondrite-normalized REE patterns (b) of residual zircons, compared with zircons from basalt-andesite of Dianzhong Formation

件。现在的典中组玄武-安山岩只代表了这些底侵岩浆喷出地表的部分,它们的大部分则储存于地壳底部,后来在再次熔融时变成了含矿斑岩的源区。

3.2 含矿岩浆的生成与软流圈上涌

冈底斯铜矿带含矿斑岩中第二类型锆石〔Ⅱ类,加权平均年龄(21.1 ± 2.6) Ma〕的 MREE 和 HREE 丰度以及 U、Th、Hf、Y 含量均与第三类型〔Ⅲ类,加权平均年龄(14.47 ± 0.5) Ma〕岩浆锆石十分接近,而与第一种类型(Ⅰ)继承锆石明显不同(表 3)。在图 8a 中第二种类型(Ⅱ)和第三种类型(Ⅲ)锆石一块落在花岗闪长岩区,表明这 2 种锆石的生长是受同一岩浆系统控制,含矿的埃达克质岩浆就是在第二阶段锆石(21.1 ± 2.6 Ma)形成时生成的。这 2 种锆石之间的唯一差别是 Th/U 比值,第二类型锆石 Th/U 比值平均为 0.54,明显低于第三类型岩浆锆石的 Th/U 比值(平均为 0.98)(表 3;图 7)。许多研究(Hoskin et al., 2003; Bingen et al., 2004)已表明从深熔熔体中结晶出来的变质锆石在成分上与岩浆锆石并没有太大的差别,它们都具有高的离子半径与 Zr^{4+} 接近的微量元素含量和向左陡倾的 REE 配分型式。岩浆锆石与深熔变质锆石之间唯一明显的系统差别在于后者 Th/U 比值显著降低, Rubatto (2002) 认为该比值低于 0.07。然而, Bingen 等(2004)研究指出在麻粒岩相条件下形成的变质锆石 Th/U 比值增高,在 0.40 ~ 0.74 之间。它们都把变质锆石中 Th/U 比值的降低归因于深熔熔体中 Th 相对 U 更加亏损。冈底斯铜矿带中变质锆石(Ⅱ)的地球化学特征大体上接近麻粒岩相变质条件下生成

的深熔锆石(Rubatto, 2002; Hoskin et al., 2003),其差别在于冈底斯铜矿带的变质锆石 MREE 含量降低较大, HREE 小幅降低。尽管这些变质锆石并没有与源区石榴子石平衡所特有的 HREE 平缓的配分模式,考虑到含矿斑岩本身的化学特征,笔者仍然认为岩浆源区部分熔融期间有一些石榴子石存在。只是它们对锆石成分的影响不如角闪石明显。Bindemann 等(2005)研究还指出在岛弧带深部地壳中富含角闪石和石榴子石的镁铁质岩石能够通过再熔融形成埃达克岩。因此,笔者推测产生冈底斯铜矿带含矿岩浆的镁铁质源区的部分熔融很可能发生在石榴子石-角闪岩相条件下。

对冈底斯花岗岩带(年龄在 94 ~ 42 Ma 之间)热演化历史的研究(Harrison et al., 1992; Copeland et al., 1995)揭示了造山带大约在 21 Ma 前有一次快速冷却和剥蚀事件,并被解释为标志着南部青藏高原快速隆升的开始。产生冈底斯铜矿带埃达克质含矿岩浆的深熔作用[(21.1 ± 2.6) Ma]与高原南部开始隆升(21 Ma 左右, Harrison et al., 1992)之间的这种耦合关系反映了冈底斯碰撞造山带形成演化中的一些地球动力学内在联系。England 等(1989)认为南部青藏高原的快速隆升起源于热的软流圈物质上涌,而软流圈上涌又是地幔岩石圈中增厚热边界层拆沉的结果。考虑到本研究中变质锆石所反映的信息,2 个重要地质事件之间的这种时空一致性促使笔者得出这样的结论:青藏高原南部晚第三纪时期的软流圈不仅为高原的快速隆升提供了动力,而且也

提供了热源。

3.3 含矿岩浆侵位与地壳伸展塌陷

第三种锆石(III)加权平均年龄为 (14.47 ± 0.5) Ma, 具有很好的晶形和清晰的振荡分带, 显然代表了含矿岩浆最后的结晶时间。在青藏高原南部, 特别是冈底斯造山带, NS 走向的正断层和脉岩被认为是地壳达到最大高度后伸展塌陷的标志(Coleman et al., 1995; Williams et al., 2001)。借助于 NS 向正断层中热液云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果, Coleman 等(1995)提出高原南部 EW 向伸展的最小年代是 14 Ma。Williams 等(2001)根据 NS 向脉岩的年龄测定, 指出高原南部 EW 向区域伸展作用发生在 18.3 ~ 13.3 Ma 之间。这些事实表明青藏高原南部从 21 Ma 前软流圈上涌开始经过约 6 Ma 的快速隆升, 于 15 Ma 前后达到了它的最大高度, 此后进入伸展塌陷阶段。冈底斯铜矿带的含矿岩浆于 15 Ma 左右侵位不是偶然的, 而是反映了一种地球动力学互动关系, 因为这样一种伸展体制对含矿岩浆上侵和成矿元素分异沉淀是最有利的。

4 结 论

(1) 青藏高原南部冈底斯铜矿带的含矿斑岩包含残留、变质、岩浆 3 种类型锆石。它们的 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄分别为 (51.1 ± 4.8) Ma、 (21.1 ± 2.6) Ma 和 (14.47 ± 0.5) Ma, 并分别与冈底斯碰撞造山带演化中的 3 个重要构造事件(陆-陆碰撞、地壳开始快速隆升及隆升后伸展塌陷)相对应。这种时间一致性反映了冈底斯造山带大规模铜矿成矿过程与高原南部由于印度—亚洲大陆碰撞而引起的地壳快速隆升过程之间存在一种内在的地球动力学关系。

(2) 继承锆石的 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 (51.1 ± 4.8) Ma, 范围在 41.5 ~ 62.5 Ma 之间, 与印度—亚洲大陆的碰撞时间一致, 排除了含矿斑岩来自俯冲的雅鲁藏布江洋壳部分熔融的可能性。它们的化学成分指示由镁铁质岩浆结晶而成, 并具有与林子宗火山岩底部典中组玄武-安山岩锆石一致的微量元素特征, 表明它们两者具有共同的源区。有可能在印度与亚洲大陆碰撞期间在高原南部发生过一次大规模的地幔镁铁质岩浆底侵事件, 这些底侵镁铁质岩石后来又成了含矿斑岩的岩浆源区。

(3) 以缺少振荡分带和 Th/U 比值低为特征的

变质锆石是在底侵镁铁质岩石部分熔融期间从分熔熔体中结晶形成的。青藏高原南部约在 21 Ma 前, 生成含矿岩浆的源区, 深熔过程与地壳快速隆升过程同时发生, 原因是软流圈物质上涌即提供了热源也提供了动力。

(4) 约 15 Ma 前, 冈底斯铜矿带的含矿岩浆在地壳伸展塌陷的构造体制下侵位, 它反映了地壳伸展塌陷与含矿岩浆侵位之间的一种地球动力学互动关系。

References

- Beck R A, Burbank D W and Sercombe W J. 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia[J]. *Nature*, 373: 55 ~ 58.
- Belousova E A, Griffin W L, Oreilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602 ~ 622.
- Bindemann L N, M. Eiler J M, Yagodinski G M, Tatsumi Y, Stern C R, Grove T L, Portnyagin M, Hoernle K and Danyushevsky L V. 2005. Oxygen isotope evidence for slab melting in modern and ancient subduction zones[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 235: 480 ~ 496.
- Bingen B, Austrheim H, Whitehouse M J and Davis W J. 2004. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arc, Caledonides of W Norway [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147: 671 ~ 683.
- Chen W J, Li Q, Hao J, Zhou X H, Wan J L and Sun M. 1999. Postcrystallization thermal evolution history of Gangdes batholithic zone and its tectonic implication[J]. *Science in China (Series D)*, 42 (1): 37 ~ 44 (in Chinese).
- Coleman M and Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. *Nature*, 374: 49 ~ 52.
- Compston W, Williams I S and Kirschvink J L. 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time scale[J]. *J. Geol. Soc.*, 149: 171 ~ 184.
- Copeland P, Harrison T M, Yun P, Kidd W S F, Roelens M and Zhang Y Q. 1995. Thermal evolution of the Gangdes batholith, Southern Tibet: A history of episodic unroofing[J]. *Tectonics*, 14(2): 223 ~ 236.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662 ~ 665.
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskis P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 129 ~ 142.
- England P and Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau[J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 17561 ~ 17579.

- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F and Yin A. 1992. Raising Tibet[J]. Science, 288: 1663 ~ 1670.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. J. Metamorphic Geol., 18: 423 ~ 439.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry (zircon), 53: 28.
- Hou Z Q and Qu X M, Wang S X, Gao Y F, Du A D and Huang W. 2003. Molybdenite Re-Os age of Xizang Gangdese porphyry copper belt: Ore-forming duration and geodynamic environment[J]. Science in China(Series D), 33(7): 609 ~ 618(in Chinese).
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y, Mo X X and Zhao Z D. 2004b. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in South Tibet[J]. Earth Planet Sci. Lett., 220: 139 ~ 155.
- Le Fort P. 1996. Metamorphism and magmatism during the Himalayan collision[A]. In: Coward M P R ed. Collision tectonics[C]. Geol. Soc. Spec. Publ., 19: 159 ~ 172.
- Leech M L, Singh S, Jain A K, Klempner S L and Manickavasagam R M. 2005. The onset of India-Asia continental collision: Early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya[J]. Earth and Planet Sci. Lett., 234: 83 ~ 97.
- Peacock S M, Rushmer T and Thompson A L. 1994. Partial melting of subducted oceanic crust[J]. Earth Planet Sci. Lett., 121: 227 ~ 244.
- Qu X M, Hou Z Q, Wang S X and Huang W. 2001. Is the Gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt[J]? Mineral Deposits, 20(4): 355 ~ 366 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q, Li Z Q. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the ore-bearing porphyries of the Gangdese porphyry copper belt and their geological significances[J]. Acta Geologica Sinica, 72(2): 245 ~ 252 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q, Li Y G. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. Lithos, 74: 131 ~ 148.
- Qu X M, Hou Z Q, Khin Z and Li Y G. 2006. Characteristics and Geneses of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Evidence from Preliminary Geological and Geochronological Results[J]. Ore Geol. Rev., (in press).
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 184: 123 ~ 138.
- Williams H, Turner S, Kelly S and Harris N. 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism[J]. Geology, 29(4): 339 ~ 342.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust[J]? Geology, 12: 1111 ~ 1114.
- Yin A, Harrison T M, Ryerson F J, Chen W J, Kidd W S F and Copeland P. 1994. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research, 99(B9): 18175 ~ 18207.

附中文参考文献

- 陈文奇,李齐,郝杰,周新华,万京林,孙敏. 1999. 冈底斯岩带结晶后的热演化史及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 29(1): 37 ~ 44.
- 侯增谦,曲晓明,王淑贤,高永峰,杜安道,黄卫. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学(D辑), 33(7): 609 ~ 618.
- 曲晓明,侯增谦,王淑贤,黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿带: 西藏的第二条“玉龙”铜矿带[J]? 矿床地质, 29(4): 355 ~ 366.
- 曲晓明,侯增谦,李振清. 2003. 冈底斯铜矿带含矿斑岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 77(2): 245 ~ 252.