

中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义*

任江波^{1 2} 许继峰^{1**} 陈建林¹

REN JiangBo^{1 2}, XU JiFeng^{1**} and CHEN JianLin¹

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 100049

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China

2011-04-01 收稿, 2011-07-07 改回.

Ren JB, Xu JF and Chen JL. 2011. Zircon geochronology and geological implications of ore-bearing porphyries from Zhongdian arc. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2591–2599

Abstract Hypabyssal porphyries associated with porphyry copper deposits are widely distributed in Zhongdian island arc in the northwest of Yunnan Province. The LA-ICPMS zircon U-Pb method is used to date the formational age of the porphyries in western and eastern side of the Zhongdian island arc. Zircons separated from Xuejiping ore-bearing porphyry in the western side of Zhongdian yielded mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ ages of $213.4 \pm 1.5\text{Ma}$. Meanwhile zircons separated from Qiansui quartz dioritic porphyrite in the eastern side of Zhongdian yielded mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ ages of $217.1 \pm 1.5\text{Ma}$. These ages are consistent with those of high-precision zircon geochronology reported by other porphyries in this area, which indicate they are coeval and without obvious different ages between western and eastern side porphyries in the Zhongdian island arc. Together with other published geochronological data, these Indo-porphyries related to mineralization were predominantly formed at 223 ~ 211Ma and spatially exhibited a planar-shaped distribution. All of these zircons display the same REE patterns with extremely high $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ and relatively weak $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ ratios, which hints that the magma formation experienced a condition of high oxygen fugacity. We suggest that these porphyries related copper deposits are probably related to the westward subduction of the Ganzhi-Litang ocean plate during Late Triassic. The melts from subducted slab with relatively high oxygen fugacity and fertile in metal possibly play an important role in promoting mineralization of the porphyry copper deposits.

Key words LA-ICPMS; Oxygen fugacity; Zhongdian island arc; Indosinian

摘要 义敦岛弧南段的中甸岛弧印支期浅成-超浅成斑岩体与成矿密切相关,本文对该地区代表性的成矿斑岩如西侧的雪鸡坪、东侧的欠虽等岩体开展了高精度的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,获得雪鸡坪成矿斑岩的年龄为 $213.4 \pm 1.5\text{Ma}$, 欠虽石英闪长岩年龄为 $217.1 \pm 1.5\text{Ma}$ 。本研究 and 近几年发表的高精度锆石 U-Pb 年代学成果发现前人划分的中甸岛弧地区东、西成矿斑岩带的斑岩体形成时代没有明显的差异,这些斑岩体呈面状分布,其形成时代集中在 223 ~ 211Ma,应该属于同一构造作用的产物。同时,这些成矿斑岩的锆石 REE 配分模式图显示一致的成分趋势,具有强烈的 Ce 正异常和相对较低的 Eu 负异常,指示出岩浆过程具有高的氧逸度。结合它们埃达克质的地球化学研究成果,我们认为中甸岛弧成矿斑岩以及相关的斑岩矿床是在东侧的甘孜-理塘洋晚三叠世俯冲过程中形成的,俯冲板片熔体的参与形成了高氧逸度富金属的岩浆,其对区内成岩和成矿过程具有重要意义。

关键词 LA-ICPMS; 氧逸度; 中甸岛弧; 印支期

中图法分类号 P597.3

* 本文受国家重点基础研究发展规划 973 项目(2009CB421004)和中国科学院创新项目(KZCX2-YW-Q04)联合资助。

第一作者简介:任江波,男,1985年生,硕士研究生,地球化学专业,E-mail: dourjb222@163.com

** 通讯作者:许继峰,男,研究员,主要从事特提斯洋蛇绿岩、青藏高原新生代火山岩和铷-锶同位素研究,E-mail: jifengxu@gig.ac.cn

斑岩型矿床是绝大多数铜、钼以及金资源的重要来源 (Richards, 2003; Sillitoe, 2010), 世界上大型-超大型斑岩型铜-金矿床主要产生于岩浆弧环境 (Sillitoe, 1997; Cooke *et al.*, 2005)。中甸岛弧位于藏东三江义敦岛弧带南部, 普遍认为是印支期甘孜-理塘洋向西俯冲消减的产物 (杨岳清等, 2002; 曾普胜等, 2003)。区内广泛发育着印支期浅成-超浅成酸性岩体, 它们具有巨大的斑岩型找矿潜力, 如普朗、雪鸡坪、春都、烂泥塘、松诺等地区已发现的铜储量达 10×10^6 t (Li *et al.*, 2011)。近年来对这些酸性岩体已开展了大量的年代学和地球化学研究 (曾普胜等, 2003, 2006; 李文昌和曾普胜, 2007; 冷成彪等, 2008; 王守旭等, 2008; 李文昌等, 2009; 庞振山等, 2009)。早期年代学研究结果显示岛弧内成矿斑岩有着不同的形成时代, 并将其划分为东、西斑岩带 (曾普胜等, 2003, 2004; 李文昌等, 2010)。然而我们的研究结果和最近几年高精度的锆石年代学研究似乎并不支持这一观点。考虑到以前的研究主要是借助于 K-Ar 法、Rb-Sr 等时线法等, 其精度已经达不到目前的研究要求。那么东、西斑岩带是否存在时代差异, 岛弧构造-岩浆活动是否可能为同一俯冲作用的结果? 这些基础地质问题需要精细的年代学进行约束。本文对岛弧内东西两侧的雪鸡坪和欠虽 2 个岩体开展高精度的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学研究, 结合前人研究结果, 建立岛弧内印支期斑岩系统的时空坐标, 重塑俯冲造山演化过程。同时, 锆石 Ce_N/Ce_N^* 及 Eu_N/Eu_N^* 是岩浆氧逸度非常好的指示剂 (Ballard *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2006; Peytcheva *et al.*, 2009), 能够很好地反映成矿斑岩岩浆的氧化还原状态。我们对比国内外成矿斑岩锆石 REE 研究, 讨论斑岩铜矿的岩浆氧逸度及其对成矿的贡献。

1 地质背景与样品描述

中甸岛弧位于“三江”义敦岛弧南部, 包括甘孜-理塘洋以西, 格咱断裂以东的地区 (图 1), 是三江构造-岩浆-成矿带的重要组成部分。中甸岛弧具有义敦岛弧的一般特征, 其经历了印支期的洋壳俯冲、燕山期的陆陆碰撞和喜山期的陆内汇聚 3 大造山阶段 (杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2004)。区内 NW 向构造十分发育, 表现为 NW 向断裂及 NW 向褶皱, 对地层和岩浆活动起着重要的控制作用。燕山期岩浆活动在区内热林及休瓦促地区出露并与铜多金属成矿相关 (李建康等, 2007)。然而出露最多保存最好的是印支期岩石和地层 (图 1), 为再现印支期的构造-岩浆活动提供了重要的物质支持。区内出露地层以三叠系为主, 其下、中统为一套碎屑岩夹碳酸岩、硅质岩, 上统为一套巨厚复理石砂板岩夹火山岩、碳酸岩。火山岩主要为晚三叠世以安山岩为主的钙碱性玄武岩和安山岩, 分别分布于曲嘎寺组 (T_3q) 和图姆沟组 (T_3t) 中。与安山岩伴生的印支期中酸性浅成斑岩与成矿密切相关 (杨岳清等, 2002), 往往以复式岩体形式出现, 其岩性主要为石英闪长玢岩, 同时也包含石英二长斑岩并常常出

现在中心相。野外地质以及实验研究表明石英二长斑岩稍晚于石英闪长玢岩, 这两类岩石都与铜金矿化密切相关, 其中工业矿体大多赋存在石英二长斑岩体中 (李文昌等, 2009; 庞振山等, 2009)。

雪鸡坪位于格咱深大断裂东侧, 为中型规模的斑岩型铜矿床, 与矿化相关的岩体主要以石英二长斑岩和石英闪长玢岩为主, 呈岩枝、岩株状产出, 侵入图姆沟组第二段 (冷成彪等, 2008; 尹光候和杨淑胜, 2008)。含矿岩体蚀变带明显, 由中心向外发育强硅化带、绢英岩化带、青磐岩化带 (冷成彪等, 2008)。本文研究样品 XJPB 矿化及蚀变严重, 斑晶难辨, 采于矿区中心矿化岩体, 定名为石英二长斑岩。欠虽为小型的铜多金属矿点, 位于普朗北西方向约 20km, 目前还未见详细的报道。本文研究样品来自欠虽钻孔岩芯中的新鲜岩石, 斑状结构, 块状构造, 斑晶主要为斜长石、角闪石、石英等, 定名为石英闪长玢岩。

2 样品处理及分析方法

将岩石样品碎至 80 目, 然后通过人工重砂分选出锆石, 再在双目显微镜下挑选出晶形好、无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒。然后将锆石在玻璃板上用环氧树脂固定, 抛光至锆石中心, 然后进行反射光和透射光照相, 并用阴极发光扫描锆石的内部结构, 选择最佳分析点。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析在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完成的, 所用的仪器为 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型 ICP-MS 联机。激光剥蚀频率为 10Hz, 剥蚀斑点直径为 $31 \mu\text{m}$, 采用 He 作为剥蚀物质的载体。以国际标样锆石 91500 和人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标分别对锆石样品的年龄和微量元素进行校正, 以 ^{29}Si 作为内标校正实验中的信号漂移。实验流程以及微量元素测试方法可参考文献 (Li *et al.*, 2011; 涂湘林等, 2011), 实验获得数据采用 GLITTER (version 3.23) 进行处理, 最后利用 Isoplot 3.0 完成加权平均年龄和协和图的绘制。

3 锆石微量元素及 U-Pb 定年结果

2 件锆石自形程度都较好, 长宽比为 $1:1.5 \sim 1:3$, 长 $80 \sim 200 \mu\text{m}$ 。欠虽锆石明显比雪鸡坪锆石颗粒大, 可能代表着距离矿化中心较远部位的欠虽石英闪长玢岩具有较稳定的结晶环境, 而处于矿化中心的雪鸡坪石英二长斑岩因岩浆活动结束, 结晶环境发生改变。2 件锆石都具有岩浆锆石类似的韵律环带结构 (图 2)。

3.1 锆石微量元素分析结果

2 件样品的部分锆石 REE 元素特征见表 1。雪鸡坪锆石 ΣREE 为 $644 \times 10^{-6} \sim 1717 \times 10^{-6}$, 欠虽锆石 ΣREE 为 275

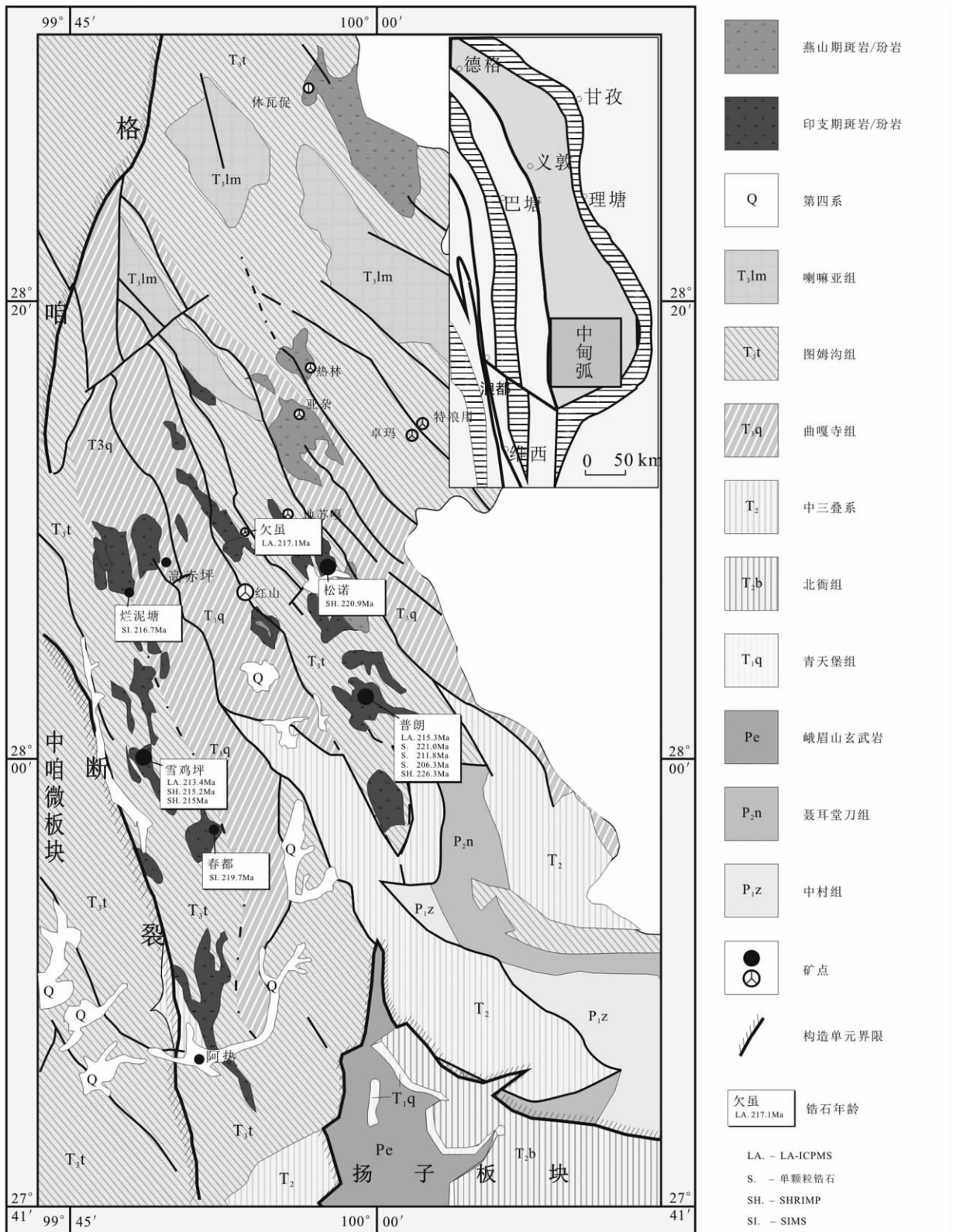


图1 中甸岛弧地质简图(据李建康等,2007修改)

Fig.1 Simplified geological map of Zhongdian island arc(modified after Li *et al.*, 2007)

表1 中甸岛弧雪鸡坪(XJPB)和欠虽(QS)部分锆石的REE元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 1 Selected zircon REE from Xuejiping (XJPB) and Qiansui (QS) ($\times 10^{-6}$)

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
QS-01	0.03	43.3	0.11	1.43	3.21	1.28	16.66	5.82	72.4	28.8	139.1	31.9	328.8	67.4
QS-02	2.72	33.5	0.57	2.92	2.31	0.83	10.64	3.85	45.0	18.0	88.5	20.5	214.6	45.4
QS-03	0.11	31.7	0.26	4.15	6.23	2.51	24.96	7.60	84.3	31.0	141.2	30.7	309.8	63.9
XJPB-01	0.82	49.0	0.42	4.20	6.78	3.32	29.81	9.81	115.2	44.2	215.8	49.6	520.6	112.4
XJPB-02	0.54	67.1	0.77	5.52	5.92	2.68	20.81	7.14	84.8	36.3	186.7	46.4	526.9	124.1
XJPB-03	0.08	45.6	0.19	2.19	3.84	1.95	18.41	5.96	72.0	29.9	146.4	34.0	374.8	82.6

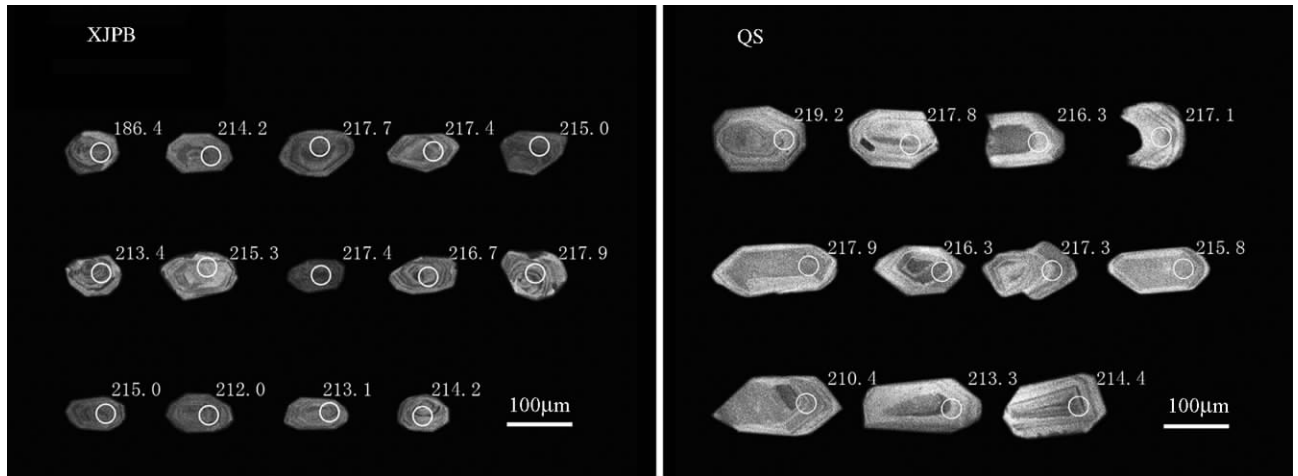


图2 雪鸡坪(XJPB)和欠虽(QS)岩体锆石CL图像

Fig. 2 The cathodoluminescence (CL) images of zircons from Xuejiping and Qiansui porphyries

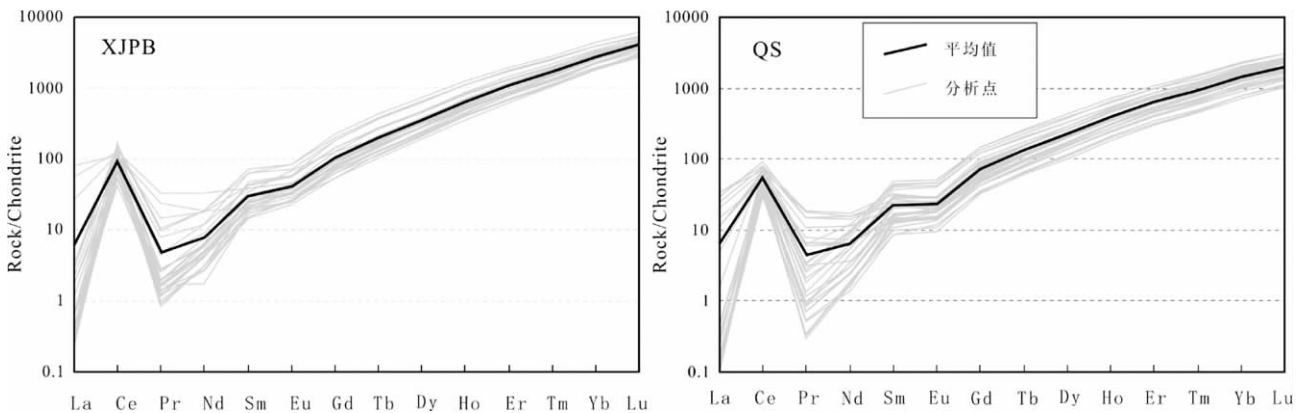


图3 雪鸡坪(XJPB)和欠虽岩体(QS)锆石稀土元素模式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from Xuejiping and Qiansui porphyries (normalized data after Sun and McDonough, 1989)

$\times 10^{-6} \sim 937 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化REE模式图(图3)上,表现为强烈的左倾式,具有较高的Th/U比值($Th/U > 0.64$)指示其为岩浆锆石。部分LREE具有相对较高的含量,与热液锆石REE模式相似(Hoskin and Schaltegger, 2003),可能说明雪鸡坪及欠虽锆石结晶过程中有流体的参与。雪鸡坪和欠虽锆石REE模式图中,Ce具有强烈的正异常(Ce_N/Ce_N^* 平均值分别为63.8和61.3),Eu具有微弱的

负异常(Eu_N/Eu_N^* 值分别为0.61~1.05和0.51~0.69)。

3.2 锆石LA-ICPMS定年结果

2件样品锆石U-Pb定年分析数据详见表2,协和图及加权平均年龄见图4,定年结果分述如下:

XJPB样品采集于雪鸡坪矿区,其锆石晶形相对较小。样品的30个分析点,除01、16、18、19、20和27号分析点年龄

表2 中甸岛弧雪鸡坪(XJPB)和欠虽(QS)锆石LA-ICPMS定年结果

Table 2 LA-ICPMS dating results of zircons from Xuejiping (XJPB) and Qiansui (QS)

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		元素比值	同位素比值				年龄(Ma)					
	Th	U	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XJPB-01	926	1021	1.10	0.37548	0.04464	0.02934	0.00108	1485.3	218.3	323.7	33.0	186.4	6.8
XJPB-02	474	518	1.09	0.23699	0.01832	0.03378	0.00059	237.1	172.3	216.0	15.0	214.2	3.7
XJPB-03	413	508	1.23	0.24145	0.01694	0.03435	0.00056	241.4	157.2	219.6	13.9	217.7	3.5
XJPB-04	423	599	1.42	0.23701	0.01945	0.03392	0.00065	228.1	182.9	216.0	16.0	215.0	4.0
XJPB-05	588	600	1.02	0.2343	0.01852	0.03366	0.00062	219.0	176.9	213.7	15.2	213.4	3.9
XJPB-06	919	891	0.97	0.24585	0.01509	0.03397	0.00054	308.3	137.0	223.2	12.3	215.3	3.4
XJPB-07	557	652	1.17	0.23439	0.01525	0.03419	0.00053	183.7	147.8	213.8	12.5	216.7	3.3
XJPB-08	425	531	1.25	0.26908	0.02194	0.03438	0.00069	482.8	175.3	242.0	17.6	217.9	4.3
XJPB-09	829	830	1.00	0.27363	0.01626	0.03341	0.00054	582.9	127.4	245.6	13.0	211.9	3.4
XJPB-10	534	596	1.12	0.24483	0.02059	0.03299	0.00068	365.1	183.5	222.4	16.8	209.2	4.2
XJPB-11	688	710	1.03	0.24811	0.01675	0.03391	0.00058	332.7	149.1	225.0	13.6	215.0	3.6
XJPB-12	1167	1008	0.86	0.25746	0.01459	0.03344	0.00051	446.7	124.6	232.6	11.8	212.0	3.2
XJPB-13	575	613	1.07	0.24644	0.01879	0.03361	0.00061	337.4	167.2	223.7	15.3	213.1	3.8
XJPB-14	888	889	1.00	0.23593	0.01683	0.03378	0.00059	225.9	160.4	215.1	13.8	214.2	3.7
XJPB-15	960	933	0.97	0.23643	0.01504	0.0342	0.00054	202.3	144.4	215.5	12.4	216.8	3.4
XJPB-16	675	824	1.22	0.24511	0.01589	0.02959	0.00052	606.5	138.1	222.6	13.0	188.0	3.3
XJPB-17	615	677	1.10	0.23498	0.0181	0.0336	0.00062	228.2	171.9	214.3	14.9	213.1	3.8
XJPB-18	975	1102	1.13	0.38978	0.02083	0.02978	0.00054	1526.7	101.8	334.2	15.2	189.2	3.4
XJPB-19	870	918	1.06	0.22894	0.01588	0.03075	0.00054	370.9	152.6	209.3	13.1	195.2	3.4
XJPB-20	1130	1028	0.91	0.24033	0.01632	0.03016	0.00054	521.5	146.3	218.7	13.4	191.6	3.4
XJPB-21	639	752	1.18	0.23763	0.01839	0.03239	0.00062	337.2	169.9	216.5	15.1	205.5	3.9
XJPB-22	407	536	1.31	0.24616	0.02266	0.03436	0.00073	283.0	201.4	223.5	18.5	217.8	4.6
XJPB-23	287	434	1.51	0.24918	0.02837	0.03336	0.00083	377.4	242.2	225.9	23.1	211.5	5.2
XJPB-24	868	895	1.03	0.22567	0.01695	0.03223	0.00059	230.0	168.6	206.6	14.0	204.5	3.7
XJPB-25	763	804	1.05	0.23817	0.01655	0.0329	0.00058	306.1	154.0	216.9	13.6	208.7	3.6
XJPB-26	689	762	1.11	0.24953	0.0165	0.03385	0.00057	347.2	145.9	226.2	13.4	214.6	3.5
XJPB-27	620	789	1.27	0.2704	0.02197	0.03044	0.00067	754.5	167.5	243.0	17.6	193.3	4.2
XJPB-28	1055	1007	0.95	0.24232	0.01779	0.03361	0.00061	296.2	162.3	220.3	14.5	213.1	3.8
XJPB-29	599	726	1.21	0.24044	0.01559	0.03414	0.00055	242.7	146.2	218.8	12.8	216.4	3.5
XJPB-30	626	609	0.97	0.24662	0.01942	0.03367	0.00062	332.5	172.5	223.8	15.8	213.4	3.9
QS-01	431	404	0.94	0.24212	0.01811	0.03459	0.00065	235.8	167.7	220.2	14.8	219.2	4.0
QS-02	220	251	1.14	0.23577	0.01804	0.03437	0.00062	188.8	172.2	214.9	14.8	217.8	3.9
QS-03	362	297	0.82	0.23042	0.01792	0.03412	0.00062	151.8	176.0	210.5	14.8	216.3	3.9
QS-04	197	221	1.12	0.25131	0.02184	0.03425	0.0007	343.1	189.0	227.6	17.7	217.1	4.4
QS-05	272	241	0.89	0.2347	0.01937	0.03439	0.00064	176.4	185.1	214.1	15.9	217.9	4.0
QS-06	263	280	1.07	0.23692	0.02009	0.03364	0.00066	248.0	187.6	215.9	16.5	213.3	4.1
QS-07	365	292	0.80	0.23757	0.01813	0.03413	0.00062	220.8	171.0	216.4	14.9	216.3	3.9
QS-08	180	206	1.15	0.23064	0.02304	0.03317	0.00075	218.0	220.1	210.7	19.0	210.4	4.7
QS-09	134	155	1.16	0.23446	0.02911	0.03428	0.00087	179.4	270.2	213.9	23.9	217.3	5.4
QS-10	215	253	1.18	0.21641	0.02356	0.03381	0.00078	21.9	246.7	198.9	19.7	214.4	4.9
QS-11	388	292	0.75	0.24644	0.02084	0.03529	0.00069	225.5	188.1	223.7	17.0	223.6	4.3
QS-12	276	257	0.93	0.23464	0.01883	0.03438	0.00066	172.3	180.9	214.0	15.5	217.9	4.1
QS-13	312	303	0.97	0.23936	0.01726	0.03419	0.00061	230.8	162.0	217.9	14.1	216.7	3.8
QS-14	306	271	0.88	0.23535	0.01991	0.03516	0.00069	126.1	191.6	214.6	16.4	222.7	4.3
QS-15	373	353	0.95	0.24573	0.0175	0.03344	0.0006	340.8	156.7	223.1	14.3	212.1	3.7
QS-16	278	282	1.01	0.23494	0.01909	0.03512	0.00063	123.5	184.2	214.3	15.7	222.5	3.9
QS-17	183	212	1.16	0.2428	0.0166	0.03376	0.00059	290.6	152.3	220.7	13.6	214.1	3.7
QS-18	152	177	1.17	0.24776	0.03419	0.03331	0.00106	367.1	290.4	224.8	27.8	211.2	6.6
QS-19	213	210	0.99	0.23003	0.0205	0.03519	0.00071	67.0	203.9	210.2	16.9	223.0	4.4
QS-20	629	407	0.65	0.23819	0.01693	0.03319	0.00058	285.0	157.9	216.9	13.9	210.5	3.6
QS-21	309	272	0.88	0.24051	0.02203	0.03397	0.00073	252.2	201.8	218.8	18.0	215.3	4.5
QS-22	276	241	0.87	0.2202	0.01709	0.03515	0.00064	0.1	144.4	202.1	14.2	222.7	4.0
QS-23	232	244	1.05	0.22548	0.03222	0.03427	0.00106	79.1	314.7	206.5	26.7	217.2	6.6
QS-24	211	243	1.15	0.26421	0.03286	0.03476	0.00105	412.3	262.4	238.1	26.4	220.2	6.5
QS-25	203	203	1.00	0.25588	0.02472	0.03379	0.00078	403.2	207.4	231.3	20.0	214.3	4.9
QS-26	208	229	1.10	0.22331	0.02282	0.03312	0.00075	135.9	228.1	204.7	18.9	210.1	4.7
QS-27	403	358	0.89	0.23944	0.02076	0.03437	0.00071	229.0	192.6	218.0	17.0	217.9	4.4
QS-28	331	293	0.88	0.24505	0.01838	0.03512	0.00065	232.5	167.6	222.5	15.0	222.5	4.1
QS-29	256	276	1.08	0.23724	0.01813	0.03437	0.00062	207.0	171.4	216.2	14.9	217.9	3.9
QS-30	597	387	0.65	0.2342	0.01571	0.03444	0.00056	172.3	152.3	213.7	12.9	218.3	3.5

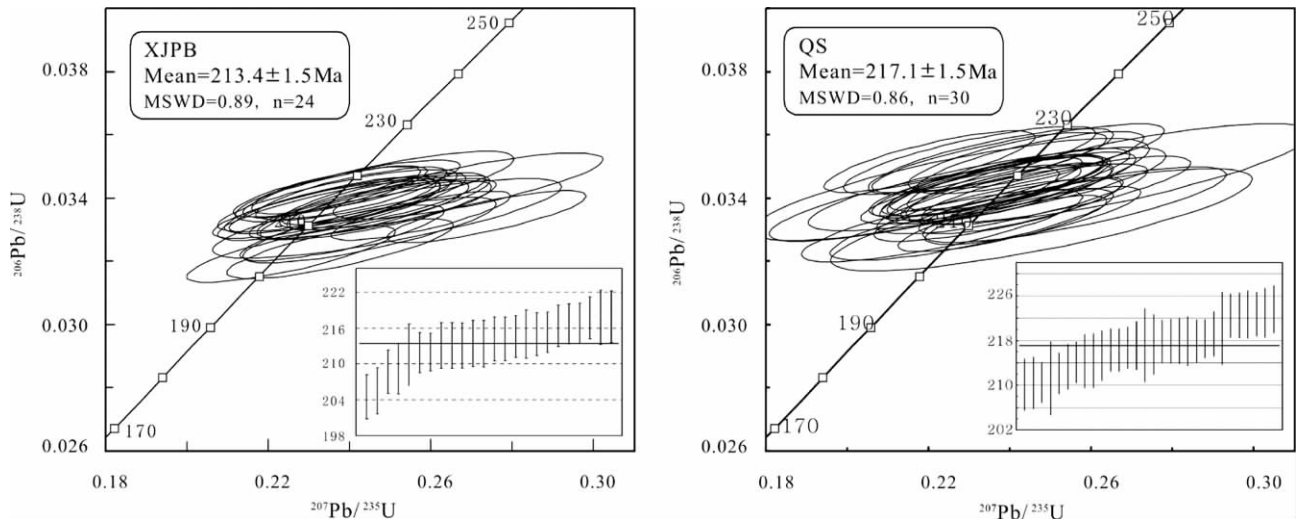


图4 雪鸡坪(XJPB) 欠虽岩体(QS) 锆石年龄协和图

Fig. 4 Concordia diagram of LA-ICPMS zircons U-Pb data for Xuejiping and Qiansui porphyries

相对年轻,且离协和线较远,可能代表了Pb丢失。其余24个分析点Th含量为 $287 \times 10^{-6} \sim 1167 \times 10^{-6}$,U含量为 $434 \times 10^{-6} \sim 1128 \times 10^{-6}$,Th/U为0.91~1.52,它们均落在协和线上或其附近。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $213.4 \pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD=0.89)(图4)代表了该岩体的形成年龄。

QS样品采集于新鲜的欠虽石英闪长玢岩岩体中,样品的30个分析点都为有效分析点,这些点的Th含量为 $134 \times 10^{-6} \sim 629 \times 10^{-6}$,U含量为 $155 \times 10^{-6} \sim 407 \times 10^{-6}$,Th/U为0.65~1.18,它们均落在协和线上或其附近。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $217.1 \pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD=0.69)(图4),代表了该岩体的形成年龄。

4 讨论

4.1 成矿斑岩的形成时代

主要基于时代差异,曾普胜等(2003)将中甸岛弧印支期浅成-超浅成斑岩体分为东、西斑岩带,东斑岩带形成于218~203Ma,其中浪都黑云二长花岗岩岩体黑云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄为216.9Ma,懒中岩体的Rb-Sr等时线年龄为203Ma;西斑岩带形成于242.9~237.5Ma,其中雪鸡坪角闪石 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄为249.3Ma,春都石英闪长玢岩Rb-Sr等时线年龄为237.5Ma。由于后期蚀变可能扰动K-Ar及Rb-Sr体系,很难得到现实精度的同位素定年(唐功建等,2009);锆石具有较稳定的物理和化学性质,因而广泛应用于地质年代学研究。雪鸡坪矿区及附近岩石发生了强烈的蚀变和后期风化作用,对成矿斑岩的定名和形式时代都存在争议,林清茶等(2006)和曹殿华等(2009)利用SHRIMP锆石U-Pb定年获得雪鸡坪岩体的年龄都为215Ma,我们测得雪鸡坪成矿斑岩锆石LA-ICPMS年龄为 $213.4 \pm 1.5\text{Ma}$ (图4),这些锆石年代学结果基本确定了雪鸡坪成矿岩体的形成时代。欠虽地区的岩体目前

表3 中甸岛弧印支期斑岩/玢岩年代学统计表

Table 3 Isotopic age statistics of porphyries in Zhongdian arc

位置	岩体	岩性	方法	年龄(Ma)	数据来源
西斑岩带	雪鸡坪	石英二长斑岩	LA-ICPMS	213.4	本文
	雪鸡坪	石英二长斑岩	SHRIMP	215.2	曹殿华等 2009
	雪鸡坪	石英闪长玢岩	SHRIMP	215	林清茶等 2006
	春都	石英二长斑岩	SIMS	219.7	张兴春等 2009
	烂泥塘	石英二长斑岩	LA-ICPMS	216.7	任江波 2011
东斑岩带	普朗	石英闪长玢岩	单颗粒锆石	221.0	庞振山等 2009
	普朗	石英二长斑岩	LA-ICPMS	215.3	任江波 2011
	普朗	石英二长斑岩	单颗粒锆石	211.8	庞振山等 2009
	普朗	石英二长斑岩	SHRIMP	226.3	王守旭等 2008
	普朗	花岗闪长斑岩	单颗粒锆石	206.3	庞振山等 2009
	欠虽	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	217.1	本文
	松诺	石英二长斑岩	SHRIMP	220.9	冷成彪等 2008

还未有年代学报道,此次我们获得新鲜的石英闪长玢岩的LA-ICPMS年龄为 $217.1 \pm 1.5\text{Ma}$,代表了欠虽矿区岩体的形成年龄。除此之外,我们同一批锆石LA-ICPMS实验测定结果还获得该区普朗、春都、烂泥塘七件样品的锆石年龄,其中普朗石英二长斑岩年龄为 $215.3 \pm 1.4\text{Ma}$,它们的年龄变化范围在217.1~213.1Ma(任江波,2011)。

近几年高精度锆石年代学研究在普朗、欠虽、松诺、雪鸡坪、春都、烂泥塘地区等已经获得了重大突破(表3),其中西斑岩带雪鸡坪成矿斑岩锆石年代学结果为215~213Ma(林清茶等,2006;曹殿华等,2009),烂泥塘石英二长斑岩年龄为216.7Ma(任江波,2011),春都斑岩年龄为219.7Ma(张兴春等,2009);东斑岩带普朗成矿斑岩的锆石年代学结果为226~206Ma(王守旭等,2008;庞振山等,2009),松诺SHRIMP锆石年龄为220.9Ma(冷成彪等,2008)。上述这些高精度锆石年代学结果显示中甸岛弧的印支期形成的东、西

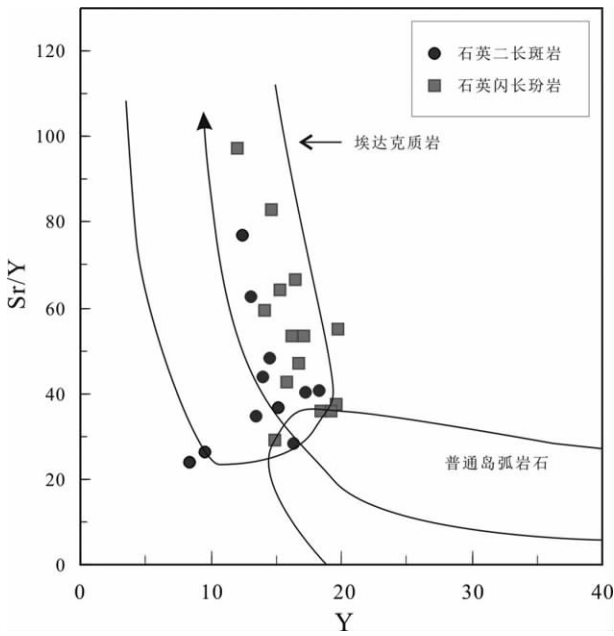


图5 普朗复式岩体 Sr/Y-Y 图(据任江波等, 2011 修改)
Fig. 5 Sr/Y versus Y diagram for pulang porphyry
(modified after Ren *et al.*, 2011)

成矿斑岩带没有明显的时代差异,它们属于同一构造作用的产物。这些岩体呈面状分布,年龄范围集中在 223~211Ma,峰值年龄为 215.5Ma,与整个义敦岛弧俯冲期 215Ma 的岩浆事件相吻合(侯增谦等, 2001)。目前认为甘孜-理塘洋俯冲时期在 237~206Ma(侯增谦等, 2001, 2004),即显示中甸岛弧印支期浅成-超浅成岩体是印支期甘孜-理塘洋向西俯冲时候的产物。

4.2 成矿斑岩的岩浆氧逸度

与铜金矿化有关的中酸性岩浆大多具有较高的氧逸度(Hedenquist and Lowenstern, 1994; Mungall, 2002; Richards,

2003; Liang *et al.*, 2006, 2009) 主要因为高氧化态的岩浆状态下硫化物转变为硫酸盐,提高了硫的饱和度,有利于亲铜元素在岩浆中富集(Jugo *et al.*, 2005; Jugo, 2009)。熔体中 Ce^{4+} 以及 Eu^{3+} 相对 Ce^{3+} 以及 Eu^{2+} 更容易进入锆石晶格中,氧化条件的高低影响锆石结晶过程中 Ce 及 Eu 在 REE 元素中的分配。Ballard *et al.* (2002) 在研究智利斑岩铜矿时发现成矿斑岩锆石具有 $Ce^{4+}/Ce^{3+} > 300$, $Eu_N/Eu_N^* > 0.4$, 高于非成矿斑岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 和 Eu_N/Eu_N^* 比值。我们获得的雪鸡坪及欠里锆石的 REE 呈一致的成分趋势,它们具有强烈的 Ce 正异常和相对较低的 Eu 负异常 ($Eu_N/Eu_N^* > 0.51$)。与保加利亚和冈底斯成矿斑岩具有相似的 REE 模式(Peytcheva *et al.*, 2009; Qu *et al.*, 2009) 指示雪鸡坪以及欠里成矿岩浆具有较高的氧逸度。Liang *et al.* (2009) 在研究玉龙斑岩铜矿时发现,高氧逸度的岩浆形成硫化物矿床伴随着磁铁矿化,岩浆早期石英中的流体包裹体存在石膏子矿物而缺少硫化物,成矿早期矿化脉石英中含石膏子晶及硫化物,而主成矿阶段则主要为硫化物。岩浆过程中的磁铁矿等矿物的结晶分异可能会降低其氧逸度, Sun *et al.* (2004) 在研究巴布亚新几内亚海底火山岩的时候,发现岩浆的结晶分异导致铜、金元素突然降低,主要是因为磁铁矿结晶分异导致氧逸度的降低。中甸岛弧与成矿相关的斑岩为中性岩体,侵位时期的岩浆阶段仍然具有较高的氧逸度,可能代表着一种经历很少分异的初始岩浆,它对斑岩型矿床的形成具有重要意义。

4.3 构造模型

洋壳中的 Cu 的丰度是地幔、陆壳中的 2~3 倍(韩吟文和马振东, 2003; Sun *et al.*, 2010),同时洋壳熔融形成的埃达克质岩浆具有高的氧逸度(Mungall, 2002),因此与斑岩型矿床具有紧密联系(Oyarzun *et al.*, 2001; Mungall, 2002; 王强等, 2008)。而普通岛弧岩浆是来自交代地幔楔的熔融,具有较大的密度,往往会经历 MASH 过程(Richards, 2003),岩浆在此过程中与地壳相互作用以及结晶分异可能导致氧逸度降低对

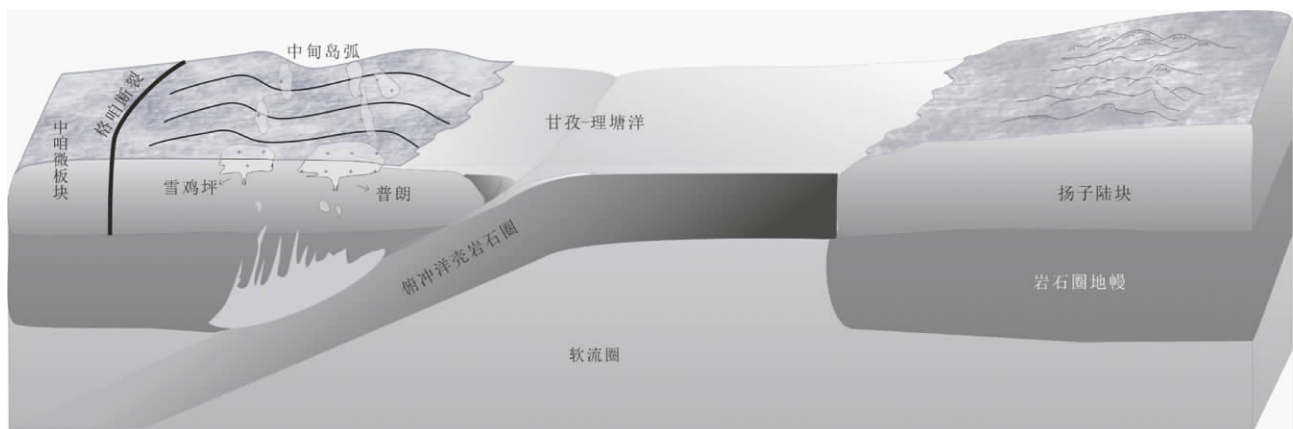


图6 印支期甘孜-理塘洋俯冲构造模型(据余良范等, 2008 修改)
Fig. 6 The model of the Ganzi-Litang plate subduction(modified after Yu *et al.*, 2008)

后期成矿不利。经过大量的研究发现,中甸岛弧普朗及雪鸡坪成矿斑岩具高 Sr 含量、Sr/Y 比值(图 5),以及相对较高的 MgO 含量和 Mg[#]值,显示出与俯冲岛弧环境的埃达克质岩相似的地球化学特征(曾普胜等,2006;冷成彪等,2007;Li *et al.*,2011;任江波等,2011),可能代表洋壳板片熔体在该地区成岩和成矿过程中具有一定的贡献。锆石年代学结果显示这些成矿斑岩是同一构造作用的产物,不存在明显的东、西分带。综合它们的时空分布及其地球化学特征,我们认为这些成矿斑岩以及相关的斑岩矿床是东侧的甘孜-理塘洋晚三叠世向西俯冲过程中形成的,俯冲板片熔融参与形成了高氧逸度富金属的埃达克质岩浆(图 6),对区内岩石成因和成矿过程具有重要意义,关于俯冲板片的热力学机制我们认为是板片撕裂形成的板片窗模式(任江波,2011)。

5 结论

(1) 高精度 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,获得雪鸡坪成矿斑岩的年龄为 213.4 ± 1.5 Ma, 欠铝石英闪长玢岩年龄为 217.1 ± 1.5 Ma。结合其他的锆石年代学结果,我们认为中甸岛弧的印支期岩体东、西成矿斑岩带不存在明显的时代差异,它们很可能是同一构造作用的产物。

(2) 雪鸡坪及欠铝锆石 REE 配分模式具有强烈的 Ce 正异常和微弱的 Eu 负异常,指示出岩浆过程具有较高的氧逸度,结合地球化学研究成果,我们认为甘孜-理塘俯冲板片熔体的参与在成岩和成矿过程中具有重要的意义。

References

Ballard JR, Palin JM and Campbell IH. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347–364

Cao DH, Wang AJ, Huang YF *et al.* 2009. SHRIMP geochronology and Hf isotope composition of zircons from Xuejiping porphyry copper deposit, Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1430–1435 (in Chinese with English abstract)

Cooke DR, Hollings P and Walshe JL. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801–818

Han YW and Ma ZD. 2003. *Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Hedenquist JW and Lowenstern JB. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(18): 519–527

Hoskin P and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon*, 53: 27–62

Hou ZQ, Qu XM, Zhou JR *et al.* 2001. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 484–497 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Yang YQ, Qu XM *et al.* 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109–120 (in Chinese with English abstract)

Jugo PJ, Luth RW and Richards JP. 2005. Experimental data on the

speciation of sulfur as a function of oxygen fugacity in basaltic melts. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 69(2): 497–503

Jugo PJ. 2009. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas. *Geology*, 37(5): 415–418

Leng CB, Zhang XC, Wang SX *et al.* 2007. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3/4): 414–422 (in Chinese with English abstract)

Leng CB, Zhang XC, Wang SX *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Songnuo ore-hosting porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication. *Geotectonica Et Metallogenia*, 32(1): 124–130 (in Chinese with English abstract)

Li H, Zhang H, Ling MX *et al.* 2011. Geochemical and zircon U-Pb study of the Huangmeijian A-type granite: Implications for geological evolution of the Lower Yangtze River belt. *International Geology Review*, 53(5–6): 499–525

Li JK, Li WC, Wang DH *et al.* 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415–2422 (in Chinese with English abstract)

Li WC and Zeng PS. 2007. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China. *Journal of Chendu university of technology (Science & Technology Edition)*, 34(4): 436–446 (in Chinese with English abstract)

Li WC, Yin GH, Lu YX *et al.* 2009. The evolution and ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic evidence of the Pulang complex in Zhongdian. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1421–1429 (in Chinese with English abstract)

Li WC, Yin GH, Lu YX *et al.* 2010. Delineation of Hongshan-Shudu opiolite melange in Geza volcanic-magmatic arc and its significance, southwest “Jinsha-Lancang-Nu rivers”. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1661–1671 (in Chinese with English abstract)

Li WC, Zeng PS, Hou ZQ *et al.* 2011. The Pulang porphyry copper deposit and associated felsic intrusions in Yunnan province, Southwest China. *Economic Geology*, 106(1): 79–92

Liang HY, Campbell IH, Allen C *et al.* 2006. Zircon Ce⁴⁺/Ce³⁺ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 41(2): 152–159

Liang HY, Sun WD, Su WC *et al.* 2009. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration. *Economic Geology*, 104(4): 587–596

Lin QC, Xia B and Zhang YQ. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collisional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 25(1/2): 133–137 (in Chinese with English abstract)

Mungall JE. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30(10): 915–918

Oyarzun R, Marquez A, Lillo J *et al.* 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36(8): 794–798

Pang ZS, Du YS, Wang GW *et al.* 2009. Single-grain zircon U-Pb isotopic ages, geochemistry and its implication of the Pulang complex in Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 159–165 (in Chinese with English abstract)

Peytcheva I, Quadt A, Neubauer F *et al.* 2009. U-Pb dating, Hf-isotope characteristics and trace-REE-patterns of zircons from Medet porphyry copper deposit, Bulgaria: Implications for timing, duration and sources of ore-bearing magmatism. *Mineralogy and Petrology*, 96(1): 19–41

Qu XM, Hou ZQ, Zaw K *et al.* 2009. A large-scale copper ore-forming event accompanying rapid uplift of the southern Tibetan Plateau: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating and LA ICP-MS analysis. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3): 52–64

Ren JB. 2011. The chronology, geochemistry and mineralizing significance of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc.

- Master Degree Thesis. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Ren JB, Xu JF, Chen JL *et al.* 2011. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang area. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 30(4): 581–592 (in Chinese with English abstract)
- Richards JP. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533
- Sillitoe RH. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 373–388
- Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41
- 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(1): 313–345
- Sun WD, Arculus RJ, Kamenetsky VS *et al.* 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 431(7011): 975–978
- Sun WD, Ling MX, Yang XY *et al.* 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview. *Science China (Earth Sciences)*, 53(4): 1–10
- Tang GJ, Wang Q, Zhan ZH *et al.* 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyries in the Baogutu area (western Junggar): Petrogenesis and their implications for tectonics and Cu-Au mineralization. *Earth Science*, 34(1): 56–74 (in Chinese with English abstract)
- Tu XL, Zhang H, Deng WF *et al.* 2011. Application of RESolution in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Tang GJ, Jia XH *et al.* 2008. The metalliferous mineralization associated with adakitic rocks. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 350–364 (in Chinese with English abstract)
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China: The ore-forming time limitation and geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2313–2321 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang DH *et al.* 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17–24 (in Chinese with English abstract)
- Yin GH and Yang SS. 2008. The geology of Xuejiping porphyry Cu deposit in Zhongdian. *Yunnan Geology* 27(1): 27–34 (in Chinese with English abstract)
- Yu LF, Yang XY, Sun WD *et al.* 2008. The adakite and mineralization of the Shaxi porphyry copper-gold deposit, Central Anhui. *Geology in China*, 35(6): 1150–1161 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Mo XX, Yu XH *et al.* 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 22(4): 393–400 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Wang HP, Mo XX *et al.* 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 535–540 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Li WC, Wang HP *et al.* 2006. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 989–1000 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XC, Leng CB, Yang CZ *et al.* 2009. Zircon SIMS U-Pb isotopic age and its significance of ore-bearing porphyry of Chundu porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica (Suppl.)*: 359–360 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 曹殿华, 王安建, 黄玉凤等. 2009. 中甸弧雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. *地质学报*, 83(10): 1430–1435
- 韩吟文, 马振东. 2003. *地球化学*. 北京: 地质出版社
- 侯增谦, 周继荣, 周继荣等. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录. *地质学报*, 75(4): 484–497
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明等. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109–120
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭等. 2007. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征——以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例. *矿物学报*, 27(3/4): 414–422
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭等. 2008. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 32(1): 124–130
- 李建康, 李文昌, 王登红等. 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究. *岩石学报*, 23(10): 2415–2422
- 李文昌, 曾普胜. 2007. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 34(4): 436–446
- 李文昌, 尹光候, 卢映祥等. 2009. 中甸普朗复式斑岩体演化及⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素依据. *地质学报*, 83(10): 1421–1429
- 李文昌, 尹光候, 卢映祥等. 2010. 西南“三江”格咱火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义. *岩石学报*, 26(6): 1661–1671
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 2006. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. *地质通报*, 25(2): 133–137
- 庞振山, 杜杨松, 王功文等. 2009. 云南普朗复式岩体锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 25(1): 159–165
- 任江波. 2011. 中甸岛弧成矿斑岩和矿床的年代学. *地球化学研究*. 硕士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 任江波, 许继峰, 陈建林等. 2011. “三江”地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 581–592
- 唐功建, 王强, 赵振华等. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义. *地球科学*, 34(1): 56–74
- 涂湘林, 张红, 邓文峰等. 2011. RESolution 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. *地球化学*, 40(1): 83–98
- 王强, 唐功建, 贾小辉等. 2008. 埃达克质岩的金属成矿作用. *高校地质学报*, 14(3): 350–364
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪等. 2008. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石离子探针 U-Pb 年龄: 成矿时限及地质意义. *岩石学报*, 24(10): 2313–2321
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪等. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. *地球学报*, 23(1): 17–24
- 尹光候, 杨淑胜. 2008. 中甸雪鸡坪斑岩铜矿地质及找矿远景. *云南地质*, 27(1): 27–34
- 余良范, 杨晓勇, 孙卫东等. 2008. 埃达克岩与皖中沙溪斑岩铜矿的成矿作用. *中国地质*, 35(6): 1150–1161
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠等. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿. *矿床地质*, 22(4): 393–400
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学等. 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景. *地球学报*, 25(5): 535–540
- 曾普胜, 李文昌, 王海平等. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征. *岩石学报*, 22(4): 989–1000
- 张兴春, 冷成彪, 杨朝志等. 2009. 滇西北中甸春都斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄及地质意义. *矿物学报*, (增): 359–360