

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.023

冈底斯斑岩铜矿带东段早中新世剥蚀作用及对渐新世—中新世斑岩矿床时空分布的影响

周敖日格勒¹, 王英², 唐菊兴^{1,*}, 王晓南³, 张冠⁴, 田斌⁵, 林文海⁵

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 四川省能源投资
集团有限责任公司, 四川 成都 610081; 4. 西藏大学, 西藏 拉萨 850000;
5. 西藏中凯矿业股份有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要:冈底斯渐新世—中新世斑岩铜矿带是特提斯成矿域重要组成部分, 已经发现了多处超大型—大型斑岩—矽卡岩型铜—钼—金矿床。然而, 渐新世以来铜矿带所处的青藏高原经历了强烈抬升与剥蚀作用, 在此背景下带内矿床是如何保存下来的尚未清楚, 带内剥蚀作用的发育特征及对渐新世—中新世斑岩矿床的分布影响如何, 控制机制有待解决。笔者通过泽当以北 40km 处冈底斯弧内部垂直剖面锆石和磷灰石(U-Th)/He 定年, 发现成矿带内部发育了早中新世(17.3~15.1 Ma)快速剥蚀作用, 期间平均剥蚀速率 >1.82 km/Ma, 剥蚀量为 4.0 km, 而后剥蚀速率降低至 0.14~0.19 km/Ma, 15.1 Ma 至今剥蚀量~2.5 km。结合前人数据, 笔者发现成矿带内早中新世强快速剥蚀区呈东—西向带状分布, 且受谢通门—沃卡剪切带向南逆冲作用控制, 其南、北两侧也发育同期剥蚀作用, 强度明显低于剪切带活动区域, 说明高原内部中新世以来的隆升与剥蚀作用具有差异性。冈底斯带渐、中新世斑岩矿床分别分布在早中新世强剥蚀区南、北两侧弱剥蚀区内, 指示差异剥蚀作用是成矿带内已发现的渐新世—中新世矿床时空分布的重要影响因素。

关键词:冈底斯; 斑岩; 谢通门—沃卡剪切带; (U-Th)/He; 剥蚀

中图分类号: P578.2⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2022)03-0286-11

Early Miocene Exhumation History in the Eastern Gangdese Porphyry Copper Belt and Its Influence on the Spatiotemporal Distribution of Oligocene-Miocene Porphyry Deposits

ZHOU Aorigele¹, WANG Ying², TANG Juxing^{1,*}, WANG Xiaonan³,
ZHANG Guan⁴, TIAN Bin⁵, LIN Wenhai⁵

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 3. Sichuan Province Energy Investment Group Co. Ltd.,

收稿日期: 2021-12-13; **修回日期:** 2022-04-25; **网络发表日期:** 2022-08-15; **责任编辑:** 李辉

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目“藏北高 Sr/Y 淡色花岗岩 W-Nb-Ta 成矿作用与找矿快速定位”(2021YFC2900100); 国家自然科学基金青年基金项目“西藏甲玛斑岩—矽卡岩型矿床隆升剥露历史研究”(41902095); 国家重点研发计划项目“甲玛—驱龙铜多金属资源基地深部勘查与增储示范”(2018YFC0604101); 西藏中凯矿业公司横向项目“西藏龙玛铅铝(铁)矿区成矿条件与找矿方向综合研究”(HE2114)联合资助。

作者简介: 周敖日格勒(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 矿产普查与勘探专业。E-mail: zhouaorigele@163.com。

* **通讯作者:** 唐菊兴(1964-), 男, 博士, 研究员, 矿产普查与勘探专业。E-mail: tangjuxing@126.com。

Chengdu 610081, Sichuan, China; 4. Tibet University, Lhasa, 850000, Xizang, China; 5. Zhongkai Mineral Industry Co Ltd Tibet, Lhasa 850000, Xizang, China)

Abstract: Gangdese Oligocene-Miocene porphyry copper belt is the important component of Tethys metallogenic domain, where numerous giant and large porphyry-skarn Cu - Mo - Au deposits have been discovered. However, the Tibetan Plateau that hosts this copper belt has suffered intense and rapid uplifting and erosion since Oligocene. How these Oligocene-Miocene deposits preserved in that environment suffering rapid uplifting and erosion remains as mystery and how the temporal and spatial distribution of erosion dominate the Oligocene-Miocene deposits in the belt remains unsettled. Basing on the zircon and apatite (U - Th)/He dating on the vertical section inner Gangdese arc 40km north of Zedong area, the author discovered an early Miocene (17.3 ~ 15.1 Ma) intense and rapid erosion event in the Gangdese porphyry Cu belt, during which the average erosion rate was >1.82 km/Ma, the erosion amount was 4 km. And then the erosion rate decreased to $0.14 \sim 0.19$ km/Ma with the erosion amount from 15.1 Ma to present of ~ 2.5 km. Integrating the previous thermo-chronological data, the author reveals that the early Miocene intense erosion zone in the Gangdese porphyry Cu belt was E - W trending and controlled by the southward thrusting of Xietongmen-Oiga shear zone. Even though the contemporaneous erosional event was also developed on the southern and northern sides, the intensities were significantly lower than the shear zone area, indicating that the uplifting and erosion in the plateau has varied temporally and spatially since Miocene. Besides, the Oligocene and Miocene porphyry deposits are distributed in the weak erosion zones on the southern and northern sides of the early Miocene E - W trending intense erosional belt respectively, indicating that the differential erosion is one of the restrictive factors for the temporal and spatial distribution of Oligocene-Miocene deposits in the belt.

Keywords: Gangdese; porphyry; Xietongmen-Oiga shear zone; (U - Th)/He; erosion

斑岩型矿床是全球铜-金-钼资源的主要来源,主要形成于环太平洋、古亚洲洋和特提斯成矿域等汇聚板块边缘环境(Cooke et al., 2005; Sillitoe, 2010),指示斑岩型矿床时空分布与成矿背景密切相关。然而,挤压成矿背景使斑岩矿床易于遭受剥蚀(Cooke D. R., 2017),早期形成的矿床难以被保存下来,以至于全球斑岩型矿床时代以新生代为主(Kesler et al., 2006)。这也表明除成矿背景外,剥蚀作用是控制全球斑岩型矿床时空分布的另一个重要地质因素(Kesler et al., 2006; Yanites et al., 2015)。厘定剥蚀作用与斑岩型矿床时空分布的关系对于区域找矿预测具有重要意义。

冈底斯渐新世—中新世斑岩铜成矿带是特提斯成矿域的重要组成部分,包括2个超大型矿床(驱龙和甲玛),5个大型矿床(朱诺、厅宫、邦铺、岗讲和南木)及为数众多的中、小型矿床。根据成矿时代和类型不同,成矿带分为南和北2个亚带:南带以斑岩-矽卡岩型铜-钨-钼成矿为主,成矿时代为 ~ 30 Ma;

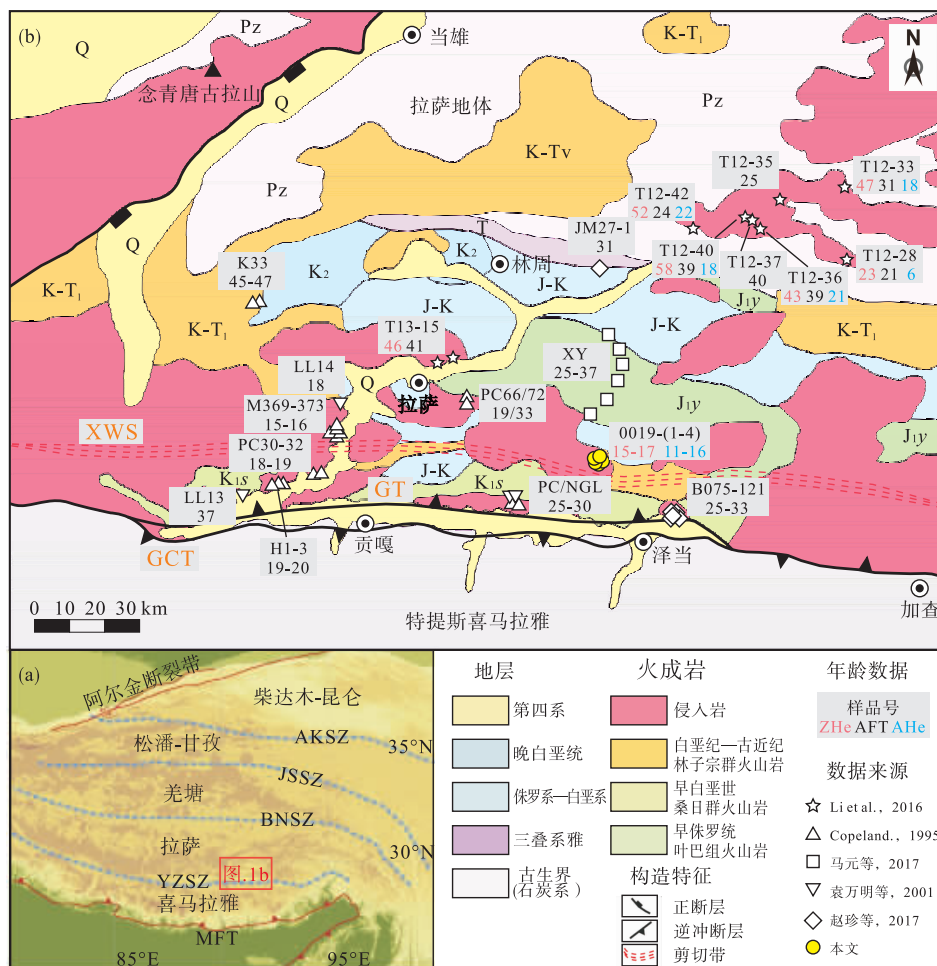
北带以斑岩-矽卡岩型铜-钨和铜±钼±铅±锌为主,成矿时代为 $21 \sim 13$ Ma(Yang et al., 2016)。根据成矿岩体元素和同位素地球化学特征, Yang et al. (2016)认为铜矿带南早北晚的成矿时代特征是印度板块向北俯冲的结果,俯冲早期成矿岩浆体量小且印度古老地壳组分较多导致南带以富钨小型成矿作用为主;而晚期岩浆规模大且拉萨新生下地壳岩浆组分变大,使得北带以大型-超大型铜-钨成矿为主,充分阐明了成矿条件与矿床时空分布的关系。然而,冈底斯铜矿带所处的青藏高原渐新世以来经历了强烈抬升与剥蚀作用,带内矿床在此背景下是如何保存下来的尚未研究清楚。剥蚀作用对冈底斯渐新世—中新世斑岩矿床的时空分布具有怎么样的影响有待解决。

1 区域地质背景

冈底斯渐新世—中新世斑岩铜矿带处于特提

斯成矿域中段(吕鹏瑞等,2020),在构造上属于冈底斯岩浆弧。冈底斯岩浆弧是南拉萨地体主要组成部分,是新特提斯洋板片向北俯冲、印度-亚洲大陆碰撞和碰撞后伸展过程的产物(Ji et al.,2009)。冈底斯岩浆弧内厘定了至少4期岩浆作用,包括晚三叠世—晚侏罗世(205~152 Ma)、晚白垩世(120~80 Ma)、古新一—始新世(65~41 Ma)和渐新一—中新世(33~13 Ma)(Chung et al.,2005;Chu et al.,2006;Wen et al.,2008;Ji et al.,2009)。其中,中生代岩浆岩为新特提斯洋向北俯冲阶段产物,包括英云闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩、闪长岩及辉长岩等侵入岩,以及同时代叶巴组(玄武岩、长英质熔岩)和桑日群(安山岩、英安岩及灰岩、砂岩和粉砂岩夹层)火山岩(Chu et al.,2006;Ji et al.,2009)。古新一—始新

世岩浆作用在冈底斯岩浆弧最为发育,被认为形成于印度—亚洲大陆碰撞期间(Mo et al.,2008)或者由俯冲洋壳断离所触发(Ji et al.,2009),岩性包括辉长岩、二长闪长岩、二长岩、闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩等侵入岩(Ji et al.,2009)及同期林子宗群火山岩(含有少量冲积和湖泊地层)(董国臣等,2005;Mo et al.,2008)。渐新一—中新世二长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、花岗岩及相应的斑岩类呈岩脉群或小岩枝穿切或侵入到早期岩石中,这期岩浆作用可能是岩石圈地幔对流拆沉的结果(Williams et al.,2001;Chung et al.,2005)。冈底斯岩浆弧内地层主要由古生代—中生代碎屑岩、碳酸盐岩以及少量新生代碎屑岩组成。其中,新生代地层包括冈仁波齐砾岩和柳区砾岩,呈不连续带状分布于冈底斯岩浆弧南缘(图1)。



AKSZ. 阿尼玛卿—昆仑缝合带;JSSZ. 金沙江缝合带;BNSZ. 班公—怒江缝合带;YZSZ. 雅鲁藏布江缝合带;MFT. 主前缘逆冲断裂带;XWS. 谢通门—沃卡剪切带;GCT. 大反转逆冲断裂带;GT. 冈底斯断裂带

图1 (a)青藏高原构造纲要图、(b)西藏冈底斯弧东段地质图(改自 Li et al.,2016)

Fig. 1 (a)Structural outline of the Tibetan plateau and(b) geological map of the eastern Gangdese arc, Tibet

印度-亚洲大陆碰撞后,冈底斯岩浆弧内发育了大规模的构造活动,包括冈底斯逆冲断裂带(GT)、大反转逆冲断裂带(GCT)、谢通门-沃卡剪切带(XWS)等东西向构造带(Li et al., 2015b)。冈底斯逆冲断裂是沿冈底斯岩浆弧南缘展布的北倾断裂带,在日喀则和泽当地区出露较好,活动时代为30~23 Ma(Yin et al., 1994, 1999);大反冲逆冲断裂带是一条沿雅鲁藏布江河谷分布的南倾冲断带,向西延伸到冈仁波齐、向东至泽当以东,局部反冲到冈底斯逆冲断裂带之上,其活动时代为19~10 Ma(Yin et al., 1999)。谢通门-沃卡剪切带(XWS)是冈底斯岩浆弧内部另一条区域性构造,活动时代、性质和产状尚存较大争议(王根厚等, 1995; 孟元库等, 2016a, 2016b)。此外,带内还发育了一系列南北向裂谷和高角度正断层,从西到东包括达加错裂谷(18.3 Ma)、当若雍错裂谷(13~12 Ma)、申扎裂谷(~14 Ma)、羊八井-谷露裂谷(8~7 Ma)和错纳裂谷(<12 Ma)(Li et al., 2015b)(图1)。

2 样品采集与分析测试

本次在泽当县以北40 km处冈底斯岩浆弧内部高海拔地区,针对始新世花岗闪长岩(48 Ma)(Zhou et al., 2020)开展了垂直剖面上低温热年代学采样,样品高程介于4 655~5 446 m,垂直落差~800 m(图1)。样品首先经过清洗和晒干,并经过机械破碎、磁选和重液等流程使锆石和磷灰石富集,再通过双目正交偏光显微镜手工挑选自形程度高、无包裹体且宽度大于80 μm 的单颗粒用于(U-Th)/He定年。

锆石和磷灰石(U-Th)/He定年在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。挑选出的锆石和磷灰石单颗粒分别用<1 mm的铈筒和铂筒包裹后,放入Aphachron氦测量仪高真空样品盘中。利用二极管激光器在~1 200°C和~1 000°C条件下对锆石和磷灰石颗粒分别加热15 min和5 min以提取晶格中的氦气。为了完全释放样品中的氦气,一般会对同一个颗粒进行2次加热甚至多次加热,直到最后一次加热释放出的He气量占总释放量的1%以下或者接近本底值。释放出的He气在纯化过程中会加入一定量的 ^3He 气体,再用QMG 220四极杆质谱仪测量 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值,并运用同位素

稀释剂法公式计算样品 ^4He 的含量。

脱气后的锆石单颗粒加入一定量稀释剂溶液($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}=838\pm7$, $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}=10.45\pm0.05$),用HF和 HNO_3 高温消解48 h,将酸蒸干后,再用HCl高温消解24 h,再次蒸酸,待酸溶液缩至~100 μL 时加入3%的 HNO_3 至1.2 mL。脱气后的磷灰石单颗粒也需加入一定量的稀释剂溶液,超声后,用 HNO_3 溶解4 h,之后加3%的 HNO_3 至1.2 mL。最后用Agilent ICP-MS7900电感耦合等离子体质谱仪测量样品溶液中U和Th含量。

根据锆石和磷灰石中U、Th和He含量,用HelioPlot version 2.0软件计算实测年龄,然后进行 α 粒子射出效应校正(Farley et al., 1996),具体实验流程见王英等(2017, 2019)。每个样品分析3~5个颗粒。

3 测试结果

4件样品共获得了18个锆石(U-Th)/He(ZHe)年龄和18个磷灰石(U-Th)/He(AHe)年龄,分别在18.3~14.0 Ma(表1)和17.5~10.0 Ma(表2)。ZHe平均年龄分别为(17.3 \pm 1.1) Ma、(15.5 \pm 1.1) Ma、(16.2 \pm 1.3) Ma和(15.1 \pm 0.3) Ma,误差范围均<10%,且各样品ZHe年龄与eU含量和矿物有效半径均无明显相关性(图2a、图2b); AHe平均年龄分别为(16.1 \pm 1.1) Ma、(12.9 \pm 1.4) Ma、(12.1 \pm 1.5) Ma和(11.0 \pm 0.6) Ma,误差范围均<15%,各样品年龄大体上与eU含量和矿物有效半径也没有明显的相关性(图2c、图2d),说明获得的数据质量较好(图2、图3)。

4 讨论

4.1 冈底斯渐新世—中新世斑岩铜矿床带中新世快速剥蚀历史

锆石和磷灰石(U-Th)/He同位素体系封闭温度分别为180 \pm 20°C和60 \pm 20°C,即含有锆石和磷灰石的岩体剥蚀至地壳180 \pm 20°C和60 \pm 20°C等温面以浅后,其对应的(U-Th)/He同位素体系分别开始计时。假设研究区古地温梯度为30°C/km,地表年平均温度为10°C(Zhou et al., 2019),ZHe和AHe体系开始计时的深度分别为5.7 \pm 0.7 km

表 1 西藏拉萨—泽当地区古新世—始新世岩体锆石(U-Th)/He 年龄表
 Tab. 1 Zircon (U-Th)/He ages of the Paleocene-Eocene plutons in the Lhasa-Zedong district, Tibet

样品号	^{238}U		^{232}Th		eU (10^{-6})		^4He		有效半径		实测年龄		校正年龄		
	mol	1σ	mol	1σ	(10^{-6})	mol	1σ	μm	μm	Ma	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ
0019-1-3	1.01×10^{-11}	1.48×10^{-13}	6.09×10^{-12}	1.03×10^{-13}	229.4	2.07×10^{-13}	2.07×10^{-15}	67.8	13.90	13.90	0.23	16.41	0.27	16.41	0.27
0019-1-5	1.47×10^{-11}	2.16×10^{-13}	8.80×10^{-12}	1.23×10^{-13}	437.1	3.14×10^{-13}	3.13×10^{-15}	62.3	14.51	14.51	0.24	17.80	0.29	17.80	0.29
0019-1-6	4.34×10^{-12}	5.83×10^{-14}	3.14×10^{-12}	4.84×10^{-14}	280.7	7.90×10^{-14}	7.94×10^{-16}	47.0	12.06	12.06	0.19	15.91	0.25	15.91	0.25
0019-1-7	6.35×10^{-12}	9.30×10^{-14}	4.52×10^{-12}	6.69×10^{-14}	372.6	1.34×10^{-13}	1.35×10^{-15}	52.7	14.05	14.05	0.23	17.94	0.29	17.94	0.29
0019-1-8	5.86×10^{-12}	8.94×10^{-14}	4.86×10^{-12}	7.58×10^{-14}	383.0	1.27×10^{-13}	1.18×10^{-15}	49.6	14.10	14.10	0.23	18.34	0.30	18.34	0.30
平均年龄															
0019-2-1	3.85×10^{-12}	7.63×10^{-14}	2.86×10^{-12}	3.85×10^{-14}	282.4	7.37×10^{-14}	7.17×10^{-16}	49.5	12.71	12.71	0.25	16.53	0.33	16.53	0.33
0019-2-2	1.26×10^{-11}	2.87×10^{-13}	8.64×10^{-12}	1.40×10^{-13}	382.1	2.46×10^{-13}	2.37×10^{-15}	66.1	13.17	13.17	0.29	15.96	0.35	15.96	0.35
0019-2-3	1.00×10^{-11}	1.90×10^{-13}	7.42×10^{-12}	9.37×10^{-14}	433.5	1.88×10^{-13}	1.83×10^{-15}	59.0	12.46	12.46	0.24	15.52	0.30	15.52	0.30
0019-2-4	6.16×10^{-12}	1.20×10^{-13}	3.73×10^{-12}	5.41×10^{-14}	423.7	9.58×10^{-14}	9.66×10^{-16}	46.7	10.64	10.64	0.21	14.06	0.28	14.06	0.28
平均年龄															
0019-3-1	1.09×10^{-11}	1.92×10^{-13}	6.43×10^{-12}	8.96×10^{-14}	753.1	1.93×10^{-13}	1.91×10^{-15}	46.7	12.03	12.03	0.22	15.91	0.29	15.91	0.29
0019-3-3	9.08×10^{-12}	1.60×10^{-13}	4.16×10^{-12}	6.87×10^{-14}	464.0	1.49×10^{-13}	1.45×10^{-15}	53.1	11.46	11.46	0.22	14.62	0.28	14.62	0.28
0019-3-4	7.44×10^{-12}	1.28×10^{-13}	5.29×10^{-12}	7.45×10^{-14}	618.4	1.47×10^{-13}	1.45×10^{-15}	43.8	13.16	13.16	0.24	17.76	0.32	17.76	0.32
0019-3-5	2.10×10^{-11}	3.41×10^{-13}	1.04×10^{-11}	1.41×10^{-13}	326.6	3.96×10^{-13}	3.98×10^{-15}	74.7	13.07	13.07	0.23	15.47	0.27	15.47	0.27
0019-3-6	9.23×10^{-12}	1.63×10^{-13}	6.61×10^{-12}	1.07×10^{-13}	438.5	1.91×10^{-13}	1.91×10^{-15}	54.9	13.76	13.76	0.25	17.40	0.32	17.40	0.32
平均年龄															
0019-4-1	8.96×10^{-12}	1.68×10^{-13}	5.59×10^{-12}	8.63×10^{-14}	344.6	1.61×10^{-13}	1.59×10^{-15}	60.1	12.26	12.26	0.24	15.17	0.30	15.17	0.30
0019-4-2	1.16×10^{-11}	2.32×10^{-13}	8.25×10^{-12}	8.91×10^{-14}	515.6	2.05×10^{-13}	1.97×10^{-15}	54.1	11.84	11.84	0.23	15.04	0.29	15.04	0.29
0019-4-3	7.93×10^{-12}	1.62×10^{-13}	5.02×10^{-12}	8.31×10^{-14}	336.6	1.44×10^{-13}	1.36×10^{-15}	57.4	12.39	12.39	0.25	15.51	0.31	15.51	0.31
0019-4-5	1.18×10^{-11}	2.39×10^{-13}	3.71×10^{-12}	5.80×10^{-14}	697.6	1.85×10^{-13}	1.75×10^{-15}	48.8	11.37	11.37	0.24	14.79	0.31	14.79	0.31
平均年龄															
												15.1	0.3	15.1	0.3

表2 西藏拉萨—泽当地区古新世—始新世岩体磷灰石(U-Th)/He年龄表

Tab. 2 Apatite (U-Th)/He ages of the Paleocene-Eocene plutons in the Lhasa-Zedong district, Tibet

样品号	^{238}U		^{232}Th		eU (10^{-6})		^4He		有效半径		实测年龄		校正年龄		
	mol	1 σ	mol	1 σ	(10^{-6})	mol	1 σ	μm	μm	Ma	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ
0019-1-1	4.06×10^{-13}	6.87×10^{-15}	1.06×10^{-12}	1.94×10^{-14}	59.8	1.06×10^{-14}	1.12×10^{-16}	47.5	12.70	0.21	0.73	17.52	0.29		
0019-1-2	1.48×10^{-12}	2.93×10^{-14}	2.91×10^{-12}	5.44×10^{-14}	45.5	3.59×10^{-14}	3.50×10^{-16}	79.9	13.00	0.23	0.82	15.91	0.28		
0019-1-3	1.07×10^{-12}	1.79×10^{-14}	1.71×10^{-12}	3.60×10^{-14}	70.6	2.33×10^{-14}	2.05×10^{-16}	62.0	12.38	0.20	0.80	15.49	0.25		
0019-1-4	4.84×10^{-13}	8.73×10^{-15}	1.20×10^{-12}	2.28×10^{-14}	74.4	1.21×10^{-14}	1.24×10^{-16}	48.3	12.41	0.21	0.74	16.84	0.28		
0019-1-5	6.98×10^{-13}	1.06×10^{-14}	1.39×10^{-12}	2.43×10^{-14}	74.5	1.42×10^{-14}	1.45×10^{-16}	54.8	10.83	0.17	0.74	14.67	0.23		
平均年龄														16.1	1.1
0019-2-1	6.25×10^{-13}	9.88×10^{-15}	9.32×10^{-13}	1.74×10^{-14}	82.2	1.18×10^{-14}	1.23×10^{-16}	52.0	10.86	0.18	0.73	14.92	0.25		
0019-2-2	5.65×10^{-13}	9.27×10^{-15}	1.16×10^{-12}	1.43×10^{-14}	77.0	9.03×10^{-15}	9.45×10^{-17}	44.3	8.40	0.13	0.69	12.24	0.19		
0019-2-3	3.95×10^{-13}	5.90×10^{-15}	8.50×10^{-13}	1.30×10^{-14}	53.9	7.30×10^{-15}	7.64×10^{-17}	45.7	9.56	0.15	0.69	13.78	0.22		
0019-2-4	2.44×10^{-13}	4.63×10^{-15}	5.29×10^{-13}	7.11×10^{-15}	47.3	3.91×10^{-15}	4.28×10^{-17}	42.9	8.28	0.14	0.70	11.79	0.20		
0019-2-5	3.59×10^{-13}	7.47×10^{-15}	6.79×10^{-13}	1.54×10^{-14}	83.8	5.39×10^{-15}	6.08×10^{-17}	40.6	8.09	0.16	0.69	11.69	0.23		
平均年龄														12.9	1.4
0019-3-1	3.81×10^{-13}	7.68×10^{-15}	8.76×10^{-13}	1.94×10^{-14}	80.4	5.46×10^{-15}	5.82×10^{-17}	44.1	7.30	0.14	0.68	10.77	0.21		
0019-3-2	4.01×10^{-13}	5.94×10^{-15}	8.96×10^{-13}	1.94×10^{-14}	32.0	6.46×10^{-15}	6.61×10^{-17}	58.2	8.28	0.13	0.78	10.64	0.17		
0019-3-3	4.41×10^{-13}	7.15×10^{-15}	6.81×10^{-13}	1.77×10^{-14}	59.7	6.65×10^{-15}	6.94×10^{-17}	51.2	8.66	0.15	0.72	11.96	0.21		
0019-3-4	4.24×10^{-13}	6.36×10^{-15}	1.06×10^{-12}	1.91×10^{-14}	62.0	7.92×10^{-15}	8.17×10^{-17}	50.5	9.24	0.14	0.72	12.91	0.20		
0019-3-5	9.05×10^{-13}	1.46×10^{-14}	2.01×10^{-12}	3.97×10^{-14}	83.8	1.90×10^{-14}	1.96×10^{-16}	60.8	10.81	0.18	0.76	14.19	0.24		
平均年龄														12.1	1.5
0019-4-1	3.59×10^{-13}	5.49×10^{-15}	6.19×10^{-13}	9.17×10^{-15}	103.3	4.82×10^{-15}	5.17×10^{-17}	38.9	7.45	0.12	0.64	11.62	0.19		
0019-4-3	4.37×10^{-13}	7.03×10^{-15}	5.77×10^{-13}	7.13×10^{-15}	71.3	5.28×10^{-15}	5.70×10^{-17}	44.4	7.18	0.12	0.69	10.48	0.18		
0019-4-4	4.77×10^{-13}	8.47×10^{-15}	8.27×10^{-13}	1.20×10^{-14}	83.0	6.03×10^{-15}	6.34×10^{-17}	42.0	7.00	0.12	0.67	10.40	0.18		
0019-4-5	3.10×10^{-13}	7.13×10^{-15}	6.18×10^{-13}	8.44×10^{-15}	89.2	4.13×10^{-15}	4.39×10^{-17}	37.2	7.08	0.14	0.63	11.33	0.22		
平均年龄														11.0	0.6

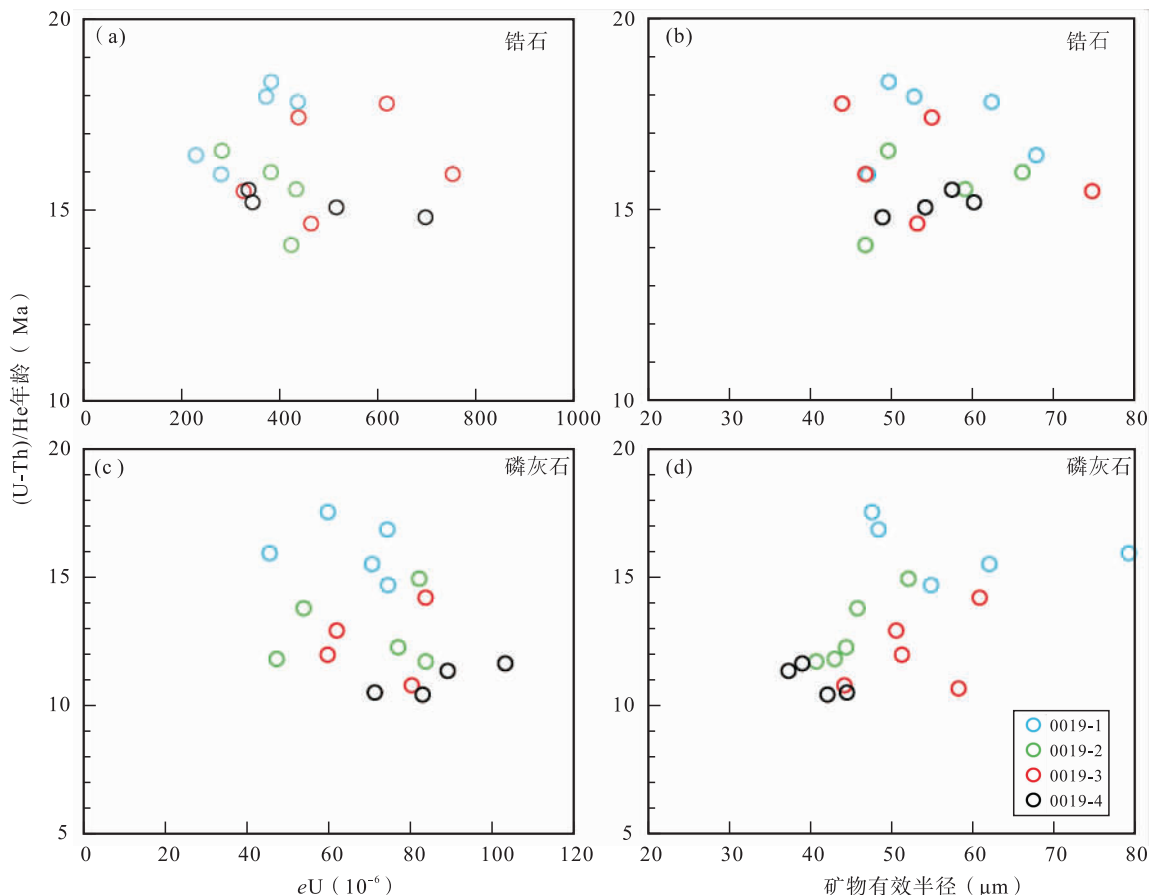


图2 (a、c) 锆石、磷灰石颗粒(U-Th)/He年龄-eU含量图解和(b、d)锆石、磷灰石(U-Th)/He-矿物有效半径(R_s)图解($eU=U+0.235Th$)

Fig.2 (a, c) Plots of zircon and apatite (U-Th)/He ages vs. eU concentration and (b, d) zircon and apatite (U-Th)/He ages vs. equivalent spherical radius (R_s) for apatite and zircon grains($eU=U+0.235Th$)

和 1.7 ± 0.7 km。本次研究中来自海拔最高处的 0019-1 样品具有相对一致的 ZHe 和 AHe 年龄, 分别为 (17.3 ± 1.1) Ma 和 (16.1 ± 1.1) Ma, 而其成岩年龄为 48 Ma (Zhou et al., 2020), 指示该样品自始新世成岩后一直处于较大的深度, 并在 17.3~16.1 Ma 通过剥蚀作用快速穿过了 ZHe 和 AHe 同位素体系封闭温度对应的深度 (5.7~1.7 km); 说明在此期间其最小剥露量为 4.0 km, 平均剥蚀速率为 >3.33 km/Ma。然而, 垂直剖面上其他样品 ZHe 平均年龄略微年轻, 为 16.2~15.1 Ma, 指示快速剥蚀作用发生的时间区间可能更宽, 4.0 km 的剥蚀作用发生在 17.3~15.1 Ma, 即平均剥蚀速率低至 1.82 km/Ma (图 3)。总之, 研究区在早中新世 (17.3~15.1 Ma) 发生了快速剥蚀作用, 平均剥蚀速率 >1.82 km/Ma。

然而, 本文 AHe 年龄指示研究区 15.1 Ma 后

剥蚀速率减弱。垂直剖面上, 海拔相对高的样品比海拔低的样品先穿过 AHe 体系封闭温度对应的深度 (1.7 ± 0.7 km), 并先计时, 因此垂直剖面上高、低海拔样品落差代表两者 AHe 年龄期间发生的剥蚀量。海拔最高处样品 0019-1 的 AHe 年龄为 (16.1 ± 1.1) Ma, 而最低处样品 0019-4 的 AHe 年龄为 (11.0 ± 0.6) Ma, 指示岩体在 16.1~11.0 Ma 发生了 ~ 800 m 的剥蚀作用, 平均剥蚀速率为 0.16 km/Ma。此外, 在古深度-年龄图解上 (图 3), 4 件样品 AHe 年龄的连接线可以投影到 (0, 0) 处, 指示 11.0 Ma 以来, 岩体仍然遭受较缓慢剥蚀作用, 根据 AHe 年龄最大值和最小值的连线可以确定, 岩体自 ~ 15 Ma 以来剥蚀速率为 0.14~0.19 km/Ma, 总剥蚀量 ~ 2.5 km。

总的来说, 岩体自 17.3 Ma 以来经历了 2 期剥蚀作用: 第一期为 17.3~15.1 Ma 的快速剥蚀作

用,平均剥蚀速率为 $> 1.82 \text{ km/Ma}$,剥蚀量为 $> 4.0 \text{ km}$;第二期为 15.1 Ma 至现今,岩体剥蚀速率降低至 $0.14\sim 0.19 \text{ km/Ma}$,剥蚀量为 $\sim 2.5 \text{ km}$,指示研究区发生了早中新世强剥蚀作用,并在 $\sim 15 \text{ Ma}$ 后进入弱剥蚀阶段。岩体自 17.3 Ma 以来的总剥蚀量大于 6.5 km 。

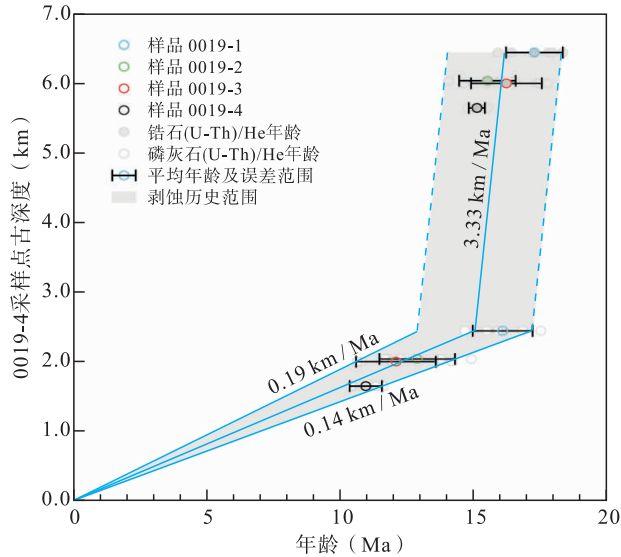


图3 泽当以北 40 km 处冈底斯内部垂直剖面上锆石、磷灰石(U-Th)/He年龄反映的0019-4采样处古深度-年龄关系图

Fig. 3 The paleodepth vs. age relation diagram of 0019-4 sample site reflected by zircon and apatite (U-Th)/He ages on the vertical section in the Gangdese arc 40 km north of Zedong

4.2 冈底斯斑岩铜矿带南北向差异剥蚀作用

前人在冈底斯渐新世—中新世斑岩铜矿带东段开展了较多的低温热年代学研究(Copeland et al., 1995; 袁万明等, 2001a, 2001b; Li et al., 2015a, 2016; 马元等, 2017; 赵珍等, 2017; Ge et al., 2018),获得的数据在空间上具有向东变老的特征。其中,磷灰石裂变径迹(AFT)测年结果最多,为开展区域对比提供了最佳信息。数据分析结果显示,成矿带东段AFT年龄在拉萨河谷曲水段为 $15\sim 20 \text{ Ma}$,而拉萨河谷曲水段以东的整个拉萨—泽当地区AFT年龄均为 $25\sim 35 \text{ Ma}$,尤其拉萨—墨竹工卡一线以北AFT年龄更是达到 40 Ma (图1)。

Copeland等(1995)通过拉萨河谷垂直剖面上黑云母、钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和AFT测年,获得曲水

地区在 $20\sim 15 \text{ Ma}$ 发生了快速剥蚀作用, 20 Ma 以来总剥蚀量 $> 11 \text{ km}$ (取地温梯度为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$)。拉萨河谷曲水段以东中生代—始新世花岗岩类基岩锆石、磷灰石裂变径迹(ZFT和AFT)数据和角闪石全铝压力计数据也反映同时期的快速剥蚀作用(Li et al., 2015a; Zhao et al., 2016; 马元等, 2017),但是剥蚀强度明显小于曲水地区。Li等(2015a)在错那裂谷附近实施AFT测年,认为 $20\sim 15 \text{ Ma}$ 该地区剥蚀量 $\sim 3 \text{ km}$;马元等(2017)在甲玛—驱龙矿集区南部开展AFT定年,获得 20 Ma 以来的剥蚀量 $< 4 \text{ km}$;Zhao等(2016)通过成矿岩体角闪石全铝压力计方法获得驱龙矿区 20 Ma 以来最大剥蚀量为 3.5 km 。研究区内普遍较老的AFT年龄指示拉萨河谷曲水段以东拉萨—泽当地区 20 Ma 以来的剥蚀应小于 4 km 。ZHe年龄也支持区内上述差异剥蚀的特征,即拉萨河谷上游地区ZHe年龄一般 $> 40 \text{ Ma}$ (Li et al., 2016),而曲水地区则在 $15\sim 20 \text{ Ma}$ 之间(Ge et al., 2018),指示曲水地区中新世以来剥蚀量明显大于拉萨—泽当地区。上述数据可以得出成矿带东段拉萨—泽当地区具有东—西向差异性剥蚀作用的误导性认识。

然而,前人相关研究主要分布在雅鲁藏布江和拉萨河谷低海拔地区($3\ 500\sim 4\ 000 \text{ m}$),鲜有数据来自冈底斯弧内部和高海拔地区($4\ 000\sim 5\ 600 \text{ m}$)。本次研究通过在泽当以北 $\sim 40 \text{ km}$ 处的冈底斯斑岩铜矿带内部垂直剖面上开展的锆石和磷灰石(U-Th)/He测年,发现研究区在早中新世($17.3\sim 15.1 \text{ Ma}$)发生了快速剥蚀作用,平均剥蚀速率 $> 1.82 \text{ km/Ma}$;并且在 $\sim 15 \text{ Ma}$ 后剥蚀速率降低至 $< 0.20 \text{ km/Ma}$; 17.3 Ma 以来总剥蚀量达 6.5 km ,明显不同于前人在雅鲁藏布江河谷贡嘎—泽当段和拉萨河谷上游的数据。即使本次未能约束更早的剥蚀历史,假设本文研究区内早中新世快速剥蚀作用自 20 Ma 就发育,研究区内中新世以来剥蚀作用的时代和强度与曲水地区同时期剥蚀作用可以类比,带内早中新世快速剥蚀作用可能是东西向延伸。结合Copeland等(1995)和马元等(2017)研究中反映早中新世强剥蚀作用的样品位置(图1)可以推测,该东西向延伸的强剥蚀区宽度较大。总体而言,笔者研究认为成矿带东段拉萨—泽当地区存在北南向差异性剥蚀作用,亦即在整体较弱的剥蚀背景(3 km)上发育了曲水以东近东西向的强剥蚀区,其宽度可

能达 10~20 km。

冈底斯斑岩铜矿带渐新世斑岩-矽卡岩铜-钨-钼和中新世斑岩-矽卡岩铜-钼-金矿亚带空间上分别对应拉萨—泽当地区强剥蚀带南、北两侧弱剥蚀区域;然而,强剥蚀带内无渐新世—中新世成矿作用,指示差异剥蚀作用是冈底斯斑岩铜矿带现有保存下来的矿床时空分布的重要影响因素。弱剥蚀区内渐新世—中新世矿床保存完好,而强剥蚀带内渐新世—中新世矿床可能已经被剥蚀殆尽。

4.3 冈底斯斑岩铜矿带内差异剥蚀作用的控制机制及对渐—中新世矿床时空分布的制约

前人对冈底斯斑岩铜矿带早中新世快速剥蚀作用的控制机制尚存一定争议。部分学者认为研究区早中新世(20~15 Ma)的快速剥蚀作用主要受河流侵蚀作用(Li et al., 2016; Ge et al., 2018)和气候(Tremblay et al., 2015)控制;另一部分学者认为构造活动控制研究区早中新世快速剥蚀作用(Copeland et al., 1995; Dai et al., 2013)。

Copeland 等(1995)认为拉萨河谷曲水段 20~15 Ma 快速冷却(剥蚀)事件归功于冈底斯逆冲断裂带活动; Yin et al. (1994)和 Harrison et al. (2000)通过野外填图和热年代学研究约束了该断裂带活动时限为 30~23 Ma,明显早于早中新世剥蚀事件; Ge et al. (2018)在 Copeland et al. (1995)研究区附近通过 ZHe、AHe、AFT 测年和热历史模拟也约束了拉萨河谷曲水段早中新世快速剥蚀作用,且认为古雅鲁藏布江水系侵蚀作用控制该期快速剥蚀作用。此外, Tremblay 等(2015)认为冈底斯早中新世快速剥蚀作用的结束归功于喜马拉雅地区抬升作用。南部高原的抬升阻断了南侧水汽进入青藏高原内部,使得冈底斯地区气候变得干旱,导致剥蚀强度减弱。然而,据本文分析,成矿带内早中新世快速剥蚀作用呈东西向带状分布,与雅鲁藏布江或拉萨河流域空间展布特征不匹配。Li 等(2016)通过 ZHe、AHe、AFT 测年和热历史模拟,获得拉萨河谷上游 20 Ma 以来的剥蚀量~2 km,明显小于拉萨河谷曲水段早中新世剥蚀强度。因此,河流侵蚀作用和气候演化对研究区早中新世剥蚀作用的影响是次要的。笔者通过冈底斯内部始新世花岗岩类垂直剖面 ZHe 和 AHe 测年,约束了研究区发育早中新世(20~15 Ma)快速剥蚀事件,采样位置处于谢通门—沃卡剪切带北侧,因此剪切带向南逆冲作用可能通过

上盘剥蚀作用控制了该期快速剥蚀事件。此外,尽管前人研究未关注早中新世快速剥蚀事件与谢通门—沃卡剪切活动的关系,但 Copeland 等(1995)和马云等(2017)约束早中新世快速剥蚀事件的样品位置均处于剪切带北侧附近。因此,笔者认为谢通门—沃卡剪切带向南逆冲作用制约成矿带东段拉萨—泽当地区早中新世快速剥蚀作用和带内渐—中新世矿床时空分布。

5 结论

(1)冈底斯斑岩铜矿带拉萨—泽当地区始新世岩基(花岗岩类)发育早中新世以来的锆石和磷灰石(U-Th)/He 年龄,分别处于 17.3~15.1 Ma 和 16.1~11.0 Ma,指示研究区发育了早中新世快速剥蚀作用,17.3~15.1 Ma 之间平均剥蚀速率 >1.82 km/Ma,并在~15.1 Ma 后降低至 0.14~0.19 km/Ma。

(2)冈底斯斑岩铜矿带早中新世快速剥蚀作用呈东—西向带状展布,该期快速剥蚀作用可能受带内谢通门—沃卡剪切带向南逆冲作用制约。

(3)冈底斯带早中新世以来南北向差异剥蚀作用是造成带内现存渐新世—中新世斑岩铜矿床时空分布的重要影响因素。

参考文献(References):

- 董国臣,莫宣学,赵志丹,等. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议[J]. 地质通报,2005,24(6):549-557.
- DONG Guochen, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, et al. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Lhunzhub basin, northern Lhasa, Tibet, China. Geological Bulletin of China [J], 2005, 24(6): 549-557.
- 吕鹏瑞,姚文光,张辉善,等. 特提斯成矿域中新世斑岩铜矿岩石成因、源区、构造演化及其成矿作用过程[J]. 地质学报, 2020, 94(08): 2291-2310.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Petrogenesis, source, tectonic evolution and mineralization process of the Miocene porphyry Cu deposits in the Tethyan metallogenic domain[J]. Acta Geologica Sinica. 2020, 94(08): 2291-2310.
- 马云,许志琴,李广伟,等. 藏南冈底斯白垩纪弧后盆地的地

- 壳变形及初始高原的形成[J]. 岩石学报, 2017, 33(12):3861-3872.
- MA Yuan, XU Zhiqin, LI Guangwei, et al. Crustal deformation of the Gangdese Cretaceous back-arc basin and formation of Proto-plateau, South Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(12):3861-3872.
- 孟元库, 徐志琴, 马士委, 等. 藏南冈底斯地体谢通门—曲水韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学约束[J]. 地质论评, 2016a, 62(4):795-806.
- MENG Yuanku, XU Zhiqin, MA Shiwei, et al. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronological Constraints on the Xaitongmoin-Quxu Ductile Shear Zone in the Gangdese Batholith, Southern Xizang(Tibet) [J]. *Geological Review*, 2016a, 62(4):795-806.
- 孟元库, 许志琴, 马士委, 等. 藏南冈底斯岩浆带中段曲水韧性剪切带的变形特征及其年代学约束[J]. 地球科学, 2016b, 41(7):1081-1098.
- MENG Yuanku, XU Zhiqin, MA Shiwei, et al. Deformational characteristics and geochronological constraints of Quxu ductile shear zone in Middle Gangdese magmatic belt, South Tibet [J]. *Earth Science*, 2016b, 41(7):1081-1098.
- 王根厚, 曾庆高, 普布次仁. 西藏谢通门—乌郁斜滑韧性剪切带研究[J]. 西藏地质, 1995, (1):93-98.
- WANG Genhou, ZENG Qinggao, PUBU Ciren. A study of Xietongmen-Wuyu Oblique-Sliding Ductile Shear Zone in Tibet[J]. *Tibet Geology*, 1995, (1):93-98.
- 王英, 郑德文, 李又娟, 等. 国际标样 Fish Canyon Tuff 锆石的(U-Th)/He年龄测定[J]. 地震地质, 2019, 41(5):1302-1315.
- WANG Ying, ZHENG Dewen, LI Youjuan, et al. (U-Th)/He Dating of International standard Fish Canyon Tuff Zircon[J]. *Seismology and Egology*, 2019, 41(5):1302-1315.
- 王英, 郑德文, 武颖, 等. 磷灰石单颗粒(U-Th)/He测年实验流程的建立及验证[J]. 地震地质, 2017, 39(06):1143-1157.
- WANG Ying, ZHENG Dewen, WU Ying, et al. Measurement procedure of single-grain apatite (U-Th)/He dating and its validation by Durango apatite standard [J]. *Seismology and Egology*, 2017, 39(06):1143-1157.
- 袁万明, 侯增谦, 李胜荣, 等. 西藏甲马多金属矿区热历史的裂变径迹证据[J]. 中国科学: D辑, 2001a, 31(B12):117-121.
- YUAN Wanming, HOU Zengqian, LI Shengrong, et al. Fission track evidence for thermal history of the Jiama polymetallic mining area, Tibet[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2001, 31(B12):117-121.
- 袁万明, 王世成, 李胜荣, 等. 西藏冈底斯带构造活动的裂变径迹证据[J]. 科学通报(中文版), 2001b, 46(20):1739-1742.
- YUAN Wanming, WANG Shicheng, LI Shengrong, et al. Fission track evidence of tectonic activity in the Gangdise belt, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001b, 46(20):1739-1742.
- 赵珍, 陆露, 吴珍汉, 等. 西藏冈底斯新生代以来的抬升过程——磷灰石裂变径迹热史模拟的证据[J]. 地质通报, 2017, 36(9):1553-1561.
- ZHAO Zhen, LU Lu, WU Zhenhan, et al. Cenozoic uplift process in Gangdise, Tibet: Evidence from thermal history modeling of apatite fission track [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(9):1553-1561.
- Chu Meifei, Chung Sunlin, Song Biao, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 2006, 34(9):745-748.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3-4):173-196.
- Cooke D R. Porphyry Cu-Au-Mo deposits, FUTORES II Conference-Future Understanding of Tectonics, Ores, Resources, Environment and Sustainability, James Cook University, Townsville, QLD, 2017: 25.
- Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. *Economic geology*, 2005, 100(5):801-818.
- Copeland P, Harrison T M, Pan Y, et al. Thermal evolution of the Gangdese batholith, southern Tibet: a history of episodic unroofing[J]. *Tectonics*, 1995, 14(2):223-236.
- Dai Jingen, Wang Chengshan, Hourigan Jeremy, et al. Exhumation History of the Gangdese Batholith, Southern Tibetan Plateau: Evidence from Apatite and Zircon (U-Th)/He Thermochronology [J]. *Journal of Geology*, 2013, 121(2):155-172.
- Farley K A, Wolf R A, Silver L T. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21):4223-4229.
- Ge Yukui, Li Yalin, Wang Xiaonan, et al. Oligocene-Miocene burial and exhumation of the southernmost Gangdese mountains from sedimentary and thermochronological evidence[J]. *Tectonophysics*, 2018, 723:68-80.

- Harrison T M, Yin A, Grove M, et al. The Zedong Window: A record of superposed Tertiary convergence in southeastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2000, 105(B8): 19211-19230.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Liu Chuazhou, et al. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, 52(9): 1240-1261.
- Kesler Stephen E, Wilkinson Bruce H. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2006, 101(5): 919-922.
- Li Guangwei, Tian Yuntao, Kohn Barry P, et al. Cenozoic low temperature cooling history of the Northern Tethyan Himalaya in Zedang, SE Tibet and its implications [J]. *Tectonophysics*, 2015a, 643: 80-93.
- Li Guangwei, Kohn Barry, Sandiford Mike, et al. Synorogenic morphotectonic evolution of the Gangdese batholith, South Tibet: Insights from low-temperature thermochronology [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(1): 101-112.
- Li Y L, Wang C S, Dai J G, et al. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015b, 143: 36-61.
- Mo Xuanxue, Niu Yaoling, Dong Guochen, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2008, 250(1-4): 49-67.
- Sillitoe Richard H. Porphyry Copper Systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3-41.
- Tremblay M M, Fox M, Schmidt J L. Erosion in southern Tibet shut down at ~ 10 Ma due to enhanced rock uplift within the Himalaya [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(39): 12030-12035.
- Wen Daren, Liu Dunyi, Chung Sunlin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2008, 252(3-4): 191-201.
- Williams H, Turner S, Kelley S, et al. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism [J]. *Geology*, 2001, 29(4): 339-342.
- Yang Zhiming, Goldfarb Richard, Chang Zhaoshan. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by subduction of the Indian continental plate [J]. *Society of Economic Geologists*, 2016, 19: 279-300.
- Yanites B J, Kesler S E. A climate signal in exhumation patterns revealed by porphyry copper deposits [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 462.
- Yin A, Harrison T M, Ryerson F J, et al. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B9): 18175-18201.
- Yin A, Harrison T M, Murphy M A, et al. Tertiary deformation history of southeastern and southwestern Tibet during the Indo-Asian collision [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(11): 1644-1664.
- Zhao Junxing, Qin Kezhang, Xiao Bo, et al. Thermal history of the giant Qulong Cu-Mo deposit, Gangdese metallogenic belt, Tibet: Constraints on magmatic-hydrothermal evolution and exhumation [J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 390-409.
- Zhou Aorigele, Dai Jingen, Li Yalin, et al. Differential exhumation histories between Qulong and Xiongcu porphyry copper deposits in the Gangdese copper metallogenic Belt: Insights from low temperature thermochronology [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 107: 801-819.
- Zhou Aorigele, Tang Juxing, Zheng Ming. Eocene uplift and exhumation in Gangdese area: Evidence from zircon U-Pb ages and Al-in-biotite geobarometer [J]. *China Geology*, 2020, 3(4): 652-655.