

藏北多龙矿集区尕尔勤枕状玄武岩地球化学 及 SHRIMP 测年

林 彬^{1,2)}, 唐菊兴¹⁾, 宋 扬^{1)*}, 王 勤³⁾, 曹华文⁴⁾,
Michael BAKER²⁾, 张乐骏²⁾, 李玉彬⁵⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 澳大利亚塔斯马尼亚大学卓越矿床研究中心, 澳大利亚塔斯马尼亚霍巴特 7005;

3) 成都理工大学, 四川成都 610059; 4) 成都地调中心, 四川成都 610081;

5) 西藏地质调查研究院, 西藏拉萨 850001

摘 要: 多龙是西藏班—怒成矿带中最大的斑岩 Cu(Au)矿集区, 其区域动力学演化历史一直是研究的热点。矿集区内尕尔勤地区侏罗系海相沉积地层中发现了枕状玄武岩块, 对其成岩时代和岩石地球化学的研究, 将有助于了解班公湖—怒江洋盆的演化历史。岩石地球化学分析显示, 枕状玄武岩稀土元素总量较低(ΣREE 为 $38.01 \times 10^{-6} \sim 63.56 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分异不明显, 标准化配分曲线属于平坦型, 表现出 E-MORB 的特征。离子探针分析(SHRIMP)获得其锆石 U-Pb 年龄为 $(298 \pm 11) \text{ Ma}$, 与区域晚石炭—早二叠地层中基性岩脉和玄武岩时代一致, 可能是早二叠世班怒洋初始裂解时期大规模火山活动的产物。

关键词: SHRIMP 测年; 岩石地球化学; 枕状玄武岩; 多龙; 西藏

中图分类号: P588.145; P59; P597 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.05.10

Petrogeochemistry and SHRIMP Dating of Ga'erqin Pillow Basalt in Duolong, Northern Tibet

LIN Bin^{1,2)}, TANG Ju-xing¹⁾, SONG Yang^{1)*}, WANG Qin³⁾, CAO Hua-wen⁴⁾,
Michael BAKER²⁾, ZHANG Le-jun²⁾, LI Yu-bin⁵⁾

1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Centre of Excellence in Ore Deposit (CODES), University of Tasmania, Hobart, Tasmania, Australia 7005;

3) Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

4) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081;

5) Institute of Geological Survey of Tibet, Lhasa, Tibet 850001

Abstract: Duolong is one of the largest porphyry Cu (Au) ore concentration areas, its dynamic history always being the hot topic for study. Pillow basalt was discovered in Jurassic marine sedimentary strata of Ga'erqin area. Geochronological and geochemical study is helpful to revealing the evolution history of Bangong Co-Nujiang Ocean. Geochemical data show that basalt has low REE (ΣREE $38.01 \times 10^{-6} \sim 63.56 \times 10^{-6}$) and no significant differentiation between LREE and HREE. The chondrite-normalized REE patterns are flat, similar to features of E-MORB. SHRIMP dating shows that the age of pillow basalt is $(298 \pm 11) \text{ Ma}$, coinciding with ages of mafic dykes and basalt

本文由国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201511017)、自然科学基金项目(编号: 41402178)、中国地质科学院基本科研业务费(编号: YYWF201608)、中国地质调查局二级项目(编号: DD20160026)、中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(编号: DD20160346)和国家留学基金委项目联合资助。

收稿日期: 2017-06-25; 改回日期: 2017-07-23。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 林彬, 男, 1987年生。博士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业, 长期从事西藏地区矿床学研究。

E-mail: linbinlxt@sina.com。

*通讯作者: 宋扬, 男, 1983年生。副研究员。构造地质学专业, 长期从事西藏地区构造地质、矿床学及基础地质研究工作。

E-mail: songyang100@126.com。

in Late Carboniferous to Early Permian strata. All of these phenomena may be the products of large-scale volcanic activity for the opening of Bannu Ocean in early Permian strata.

Key words: SHRIMP dating; petrogeochemistry; pillow basalt; Duolong; Tibet

西藏班—怒成矿带是近年来取得找矿突破的重要区带,成矿带西段多龙矿集区多个大型-超大型矿床的发现更是让其成为了国内外地质学者关注的焦点(唐菊兴等, 2014, 2016, 2017; 刘治博等, 2017)。众多矿床学学者已经对多龙矿集区内的成矿作用, 矿化特征, 成岩成矿时代以及含矿斑岩地球化学特征等方面进行了详细的探究, 初步揭示早白垩世(~120 Ma)斑岩-浅成低温热液成矿 Cu(Au, Ag)作用事件(Lin et al., 2017a, b)。然而, 对于与成矿事件密切相关的区域动力学背景演化, 却一直研究较弱, 且争议颇多(曲晓明等, 2013; Li et al., 2014), 制约区域基础地质研究, 也严重地影响了区域找矿模型建立和找矿方向的判别。在 2014—2016 年野外地质调查工作中, 多龙矿集区尕尔勤地区发现零星出露枕状玄武岩, 呈不规则状产于早侏罗世曲色组海相沉积地层。玄武岩作为全球分布最广的火山岩之一, 其成因与壳幔演化及区域构造密切相关, 是反演地幔物质成分, 分析和判别构造环境和岩石圈动力学背景的重要探针(张树明等, 2002)。为此, 本文对尕尔勤地区的枕状玄武岩进行岩石学地球化学及年代学研究, 以期探究其岩石成因及构造背景, 并为多龙矿集区区域动力学机制研究提供参考依据。

1 区域地质背景

多龙矿集区主要位于班公湖—怒江缝合带北侧, 羌塘地体南缘, 区域地层单元主要为晚古生代—早中生代浅海-半深海相沉积地层(图 1), 主要为: 上石炭统展金组(C_{2z})和曲地组(C_{2q}), 下二叠统龙格组(P_{1lg}), 上三叠统日干配错组(T_{3r}), 中下侏罗统色哇组(J_{1-2s})(前人曾细分为曲色组和色哇组, 由于二者在岩石类型, 矿物成分, 形成时代, 化石种类等方面均无明显差异, 所以本文统称为色哇组), 下白垩统美日切错组(K_{1m})和上白垩统阿布山组(K_{2a}), 以及新近系的康托组(N_3k)(图 2)。其中, 展金组主要为深灰色中薄层变质粉砂岩, 灰黑色-浅绿色斑岩, 泥灰岩夹玄武岩和灰质角砾岩, 发育水平层理和滑塌沉积构造, 属于深水陆棚盆地-斜坡环境。曲地组则主要为褐灰色、褐黄色、浅绿灰色中-厚层状长石石英中细砂岩、石英砂岩与石英粉砂岩、钙质板岩互层, 顶部夹薄层玄武岩, 发育斜层理, 交错层理和粒序层理, 属滨海-浅成沉积。龙格组主要为浅灰、灰白色厚层-块状角砾状灰岩、结晶灰岩夹中-厚层状砾屑、砂屑灰质白云岩、生物碎屑灰岩与灰色薄层状结晶白云岩不等厚互层, 与上下地层均呈断层接触。日干配错

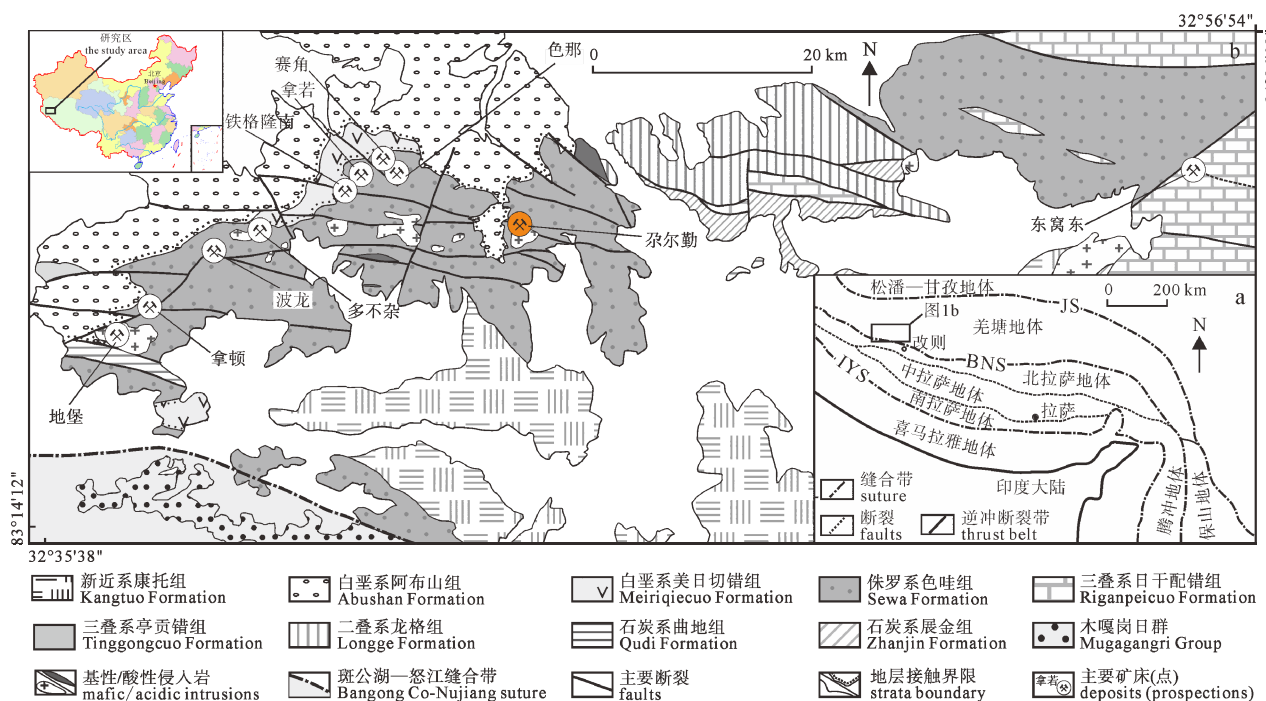


图 1 多龙矿集区大地构造位置图(a)及区域地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location (a) and simplified geological map (b) of Duolong area

图 1a 中, IYS-印度—雅鲁藏布江缝合带; BNS-班公湖—怒江缝合带; JS-金沙江缝合带

In Fig. 1a, IYS-Indus-Yarlung Zangbo suture; BNS-Bangong Co-Nujiang suture; JS-Jiangshajiang suture

组主要为深灰色中-薄层状灰岩、黄灰色中-薄层状泥灰薄层生物碎屑灰岩、结晶灰岩不等厚互层，与下伏地层为断层接触，与上覆色哇组为连续沉积。色哇组也主要为深灰色、灰色薄层状粉砂岩与深灰色泥岩不等厚互层或韵律互层，夹灰绿色玄武岩，浅薄层硅质岩及灰岩团块，属深水-半深水类复理石沉积环境。美日切错组主要为英安岩、安山岩火山沉积地层，与上下地层均为角度不整合接触。阿布山组为暗

紫色、紫色中厚层状至巨厚层状细砾岩、角砾岩、砂岩互层，层理不明显。康托组为一套以紫红色砂砾岩为主，底部夹基性火山岩的地层(图 2)。

区域内受俯冲挤压作用强烈，发育多组近东西向断裂和少量南北向断裂，对同期或后期酸性岩浆侵位有明显的控制作用，但由于地表覆盖较厚，断裂露头少，区域内构造地质研究较为薄弱。区域岩浆活动较强，多沿构造线分布，主要有三类：一为呈透镜状或不规则状产出的辉长岩脉和零星产出的枕状玄武岩块；二为与成矿作用有关的花岗闪长斑岩、闪长岩、花岗斑岩等中酸性侵入岩脉；三为成矿后期美日切错组地层中的英安岩、安山岩等陆相火山岩。

2 样品采集

样品采集于多龙矿集区东部尕尔勤地区，岩石呈灰绿色-墨绿色，枕状、团块状产于曲色组沉积地层中，局部有探槽揭露(图 3)。岩石呈隐晶质结构(间隐结构)，枕状、团块状构造，直径约 30~60 cm。边部发育细小的杏仁状构造，杏仁主要为方解石，局部发育少量方解石脉，有弱碳酸盐化。玄武岩主要组成矿物为斜长石和辉石。其中斜长石呈半自形，呈长条状杂乱无序排列，在斜长石形成的三角空隙中填充有粒状辉石，隐晶-玻璃质物质(图 3)。在岩石显微结构观察的基础上，选择较新鲜、杏仁较少的样品进行岩石地球化学分析。同时，选大块枕状岩石样品进行碎样及锆石挑选。

3 分析方法及结果

玄武岩主微量分析在西南冶金地质测试中心完成，主量元素采用 XRF 分析测试，稀土和微量元素采用 ICP-MS 分析。锆石的制靶，阴极发光及背

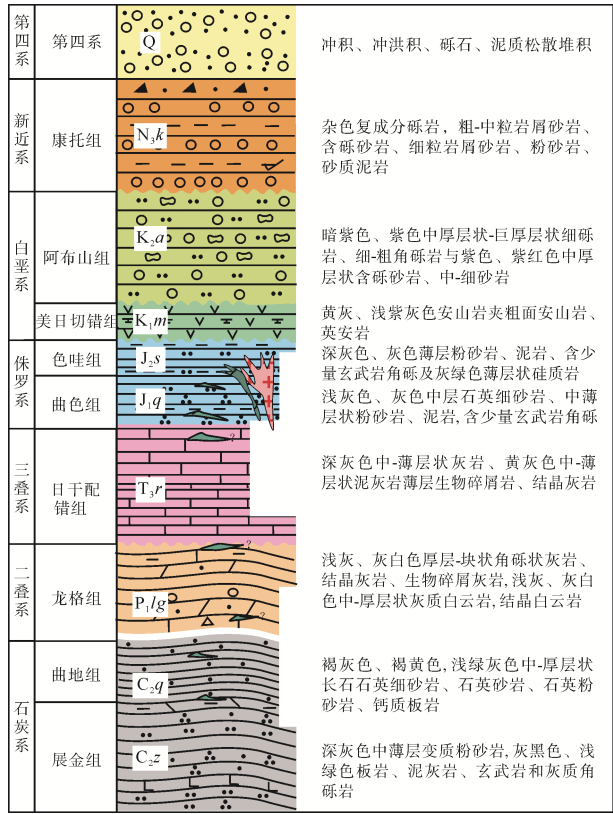


图 2 多龙矿集区区域地层层序柱状图
(据 1:25 万物玛幅区调报告)

Fig. 2 Histogram of regional strata in Duolong area
(after 1: 250 000 Regional Geological Survey of Wuma Sheet)

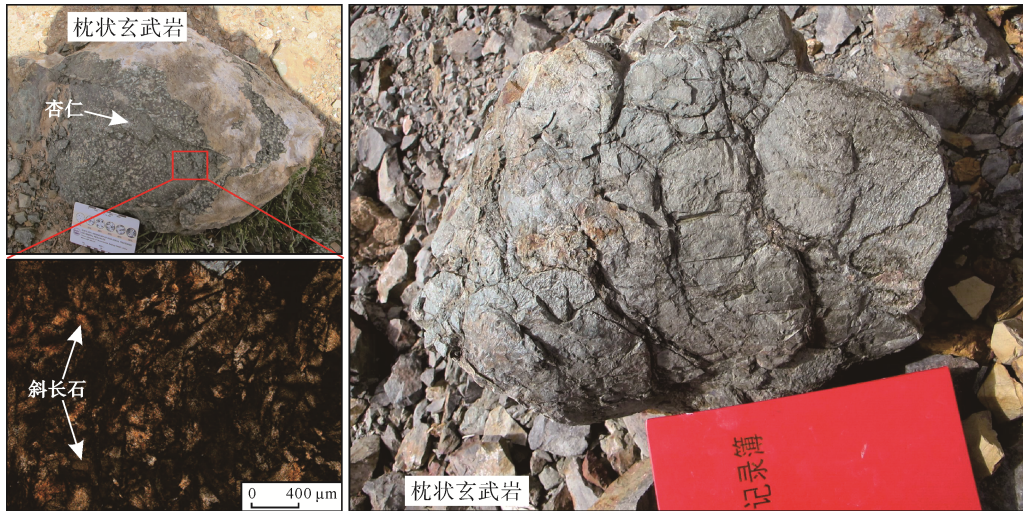


图 3 尕尔勤地区枕状玄武岩露头及镜下照片

Fig. 3 Photographs showing Ga'erqin pillow basalt outcrop and macrostructures

反射和 SHRIMP U-Pb 同位素测试全部在北京离子探针中心完成, 单个锆石分析二次离子流束斑直径大小为 30 μm, 具体测试方法及流程参考宋彪等(2002)。对锆石测年结果采用 Isoplot 3 程序处理, 测试结果见图 7。单个测试数据误差和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄加权平均值误差为 1δ。

3.1 主微量分析结果

分析样品的 SiO_2 质量分数变化于

42.42%~48.90%(图 4a), $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 11.86%~17.54%, $\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 1.94%~3.21%, $\omega(\text{FeO})$ 为 6.03%~8.06%, $\omega(\text{MgO})$ 为 6.24%~10.04%, $\omega(\text{CaO})$ 为 4.79%~12.27%, $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.62%~2.19%, $\omega(\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.90%~3.19%, $\omega(\text{TiO}_2)$ 为 1.13%~1.67%, $\omega(\text{LOI})$ 为 4.56%~6.89%, Mg# 值为 58~67(见表 1)。其中 X-GB1 样品中, SiO_2 含量略低于 45%, 且其结晶水 H_2O^+ 含量较高, 可能受蚀变作用的影响, 一定程度的降低了 SiO_2 的含

表 1 尕尔勤地区枕状玄武岩主量/%、微量和稀土元素/ 10^{-6} 分析结果
Table 1 Analyses of major elements/%, trace elements and rare earth elements/ 10^{-6} of pillow basalts from Ga'erqin

样品编号	X-GB1	X-GB2	X-GB3	X-GB4	样品编号	X-GB1	X-GB2	X-GB3	X-GB4
SiO ₂	42.42	48.52	48.57	48.90	Yb	2.68	2.40	2.02	2.67
Al ₂ O ₃	16.47	17.54	11.86	13.88	Lu	0.40	0.35	0.32	0.43
Fe ₂ O ₃	3.21	2.10	2.59	1.94	Y	26.32	25.46	20.01	23.81
FeO	8.06	6.03	6.43	6.28	ΣREE	46.33	38.01	57.35	63.56
MgO	10.04	8.10	10.02	6.24	LREE	30.31	23.50	44.06	45.75
CaO	7.55	4.79	8.98	12.27	HREE	16.03	14.51	13.29	17.81
Na ₂ O	1.90	2.89	1.97	3.19	LREE/HREE	1.89	1.62	3.32	2.57
K ₂ O	1.21	2.19	0.62	0.76	La _N /Yb _N	1.06	0.82	2.67	2.40
TiO ₂	1.67	1.47	1.13	1.17	δEu	0.90	0.76	0.95	1.14
MnO	0.31	0.21	0.22	0.21	δCe	0.97	1.10	1.07	0.69
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.14	0.16	Rb	27.55	68.30	20.51	23.49
H ₂ O ⁺	5.01	4.77	3.99	2.25	Ba	37.05	103.20	26.09	60.56
CO ₂	1.49	0.90	3.05	2.18	Th	0.64	0.47	0.59	0.80
LOSS	6.61	5.48	6.89	4.56	U	0.30	1.19	0.17	0.16
Mg#	62	65	67	58	K	10078	18138	5180	6326
La	3.95	2.74	7.52	8.95	Ta	0.50	0.42	0.55	0.60
Ce	11.12	8.73	18.82	15.26	Nb	7.83	7.78	10.02	11.27
Pr	1.96	1.36	2.46	3.24	Sr	132.30	121.00	79.63	141.20
Nd	9.27	7.48	11.32	12.75	Nd	9.27	7.48	11.32	12.75
Sm	3.02	2.49	2.95	3.95	P	581	555	625	688
Eu	0.97	0.69	0.99	1.60	Zr	102.43	91.32	86.13	88.92
Gd	3.53	3.10	3.43	4.62	Hf	3.11	2.83	2.81	2.99
Tb	0.69	0.65	0.62	0.81	Sm	3.02	2.49	2.95	3.95
Dy	4.51	4.14	3.65	5.00	Ti	9988	8811	6802	7019
Ho	0.99	0.92	0.81	1.03	Cr	557.78	485.58	351.33	344.18
Er	2.79	2.58	2.13	2.83	Ni	124.3	136.1	137.1	149.8
Tm	0.43	0.39	0.31	0.41	Au*	117.1	2.0	8.4	4.4

注: Au 含量单位为 10^{-9} ; 微量元素 $\text{K}=\text{K}_2\text{O}\times10\,000\times0.830\,13$; $\text{Ti}=\text{TiO}_2\times10\,000\times0.599\,5$; $\text{P}=\text{P}_2\text{O}_5\times10\,000\times0.436\,46$ 。

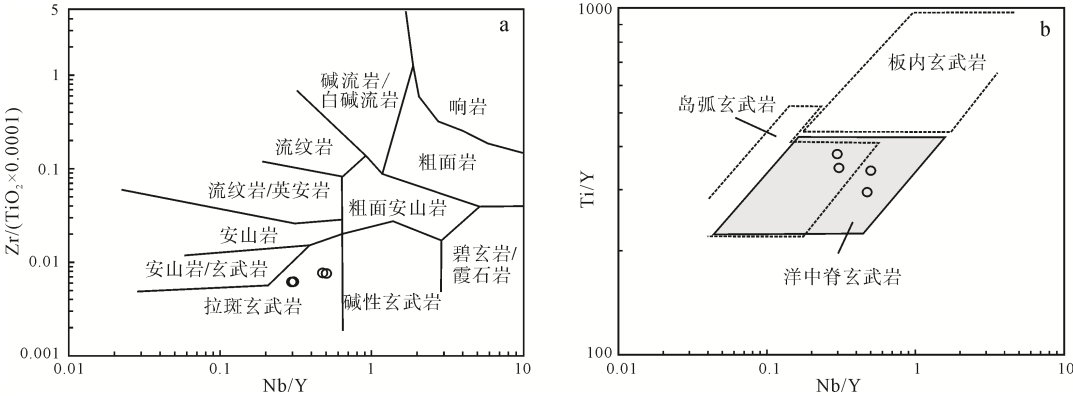


图 4 枕状玄武岩 $\text{Zr}/(\text{TiO}_2\times0.0001)$ vs Nb/Y (a, 据 Winchester and Floyd, 1977)及 Ti/Y vs Nb/Y (b, 据 Pearce, 1982)
Fig. 4 $\text{Zr}/(\text{TiO}_2\times0.0001)$ versus Nb/Y diagram (a, after Winchester and Floyd, 1977) and Ti/Y vs Nb/Y diagram (b, after Pearce, 1982) of pillow basalt

量。此外,该样品中 Au 的含量为 117.1×10^{-9} , 有明显的 Au 异常值,同时,主量元素中 Fe_2O_3 (3.21%) 和 FeO (8.06%) 含量均较高,说明可能有少量显微金赋存在黄铁矿等铁硫化物中。此外,在 $\text{Zr}/(\text{TiO}_2 \times 0.0001)\text{-Nb/Y}$ 图上(图 4a),所有样品均落入拉斑玄武岩中,较高的 Mg# 值和 Cr 含量 ($344.18 \times 10^{-6} \sim 557.78 \times 10^{-6}$),显示该岩浆较接近于原生岩浆成分,主要来源于地幔物质。玄武岩的 ΣREE 含量为 $38.01 \times 10^{-6} \sim 63.56 \times 10^{-6}$,与 E-MORB ($\Sigma \text{REE} = 49.01 \times 10^{-6}$) 和 N-MORB 相近 ($\Sigma \text{REE} = 39.11 \times 10^{-6}$),但明显低于洋岛玄武岩(OIB $\Sigma \text{REE} = 198.96 \times 10^{-6}$)。轻重稀土分异并不明显或略富集轻稀土元素, $(\text{La/Yb})_N$ 为 0.82~2.67,基本无 Eu 异常,与 E-MORB 相似,明显不同于 OIB 和 N-MORB。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上,整体呈平缓型,略微富集轻稀土(图 5a)。在原始地幔标准化微量元素配分曲线上,与 E-MORB 玄武岩

相似,整体呈平缓型,相对 N-MORB 玄武岩富集 Rb, Ba, Th, U, K 等大离子亲石元素及 Nb, Ta 等高场强元素,但其值却远低于 OIB 玄武岩。所以,单纯从主微量元素特征来看,尕尔勤枕状玄武岩与 E-MORB 玄武岩相似,明显不同 N-MORB 和 OIB 玄武岩(图 5b)。

由于主量元素及部分大离子亲石元素(如 Rb, U, K)受流体改造和蚀变作用影响明显,所以为进一步判定尕尔勤玄武岩岩石类型及动力学背景,可采用活动性弱的高场强元素进行判别图解(邓晋福等, 2015)。首先可判别是否存在板内玄武岩,然后如果不存板内玄武岩则进一步判别其他构造环境(张旗等, 1990)。Ti/Y-Nb/Y 图中,玄武岩均落入洋中脊玄武岩中,无板内玄武岩特征(图 4b)。同时,在 Ti/1000-Zr-3Y 图中显示枕状玄武岩不具板内玄武岩特征,而落入岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩混合区域(图 6a)。同时, Hf/3-Th-Ta 判别图中则将其限定为

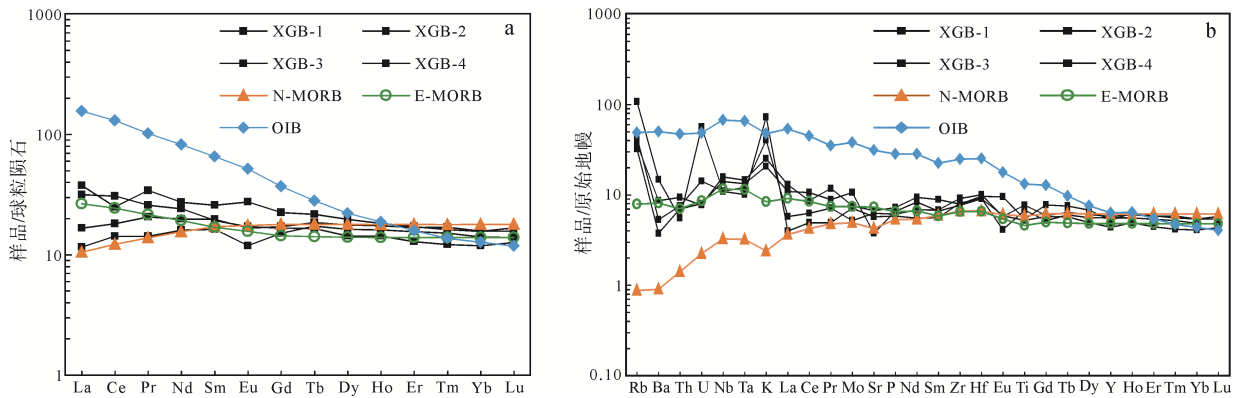


图 5 枕状玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(球粒陨石、原始地幔、N-MORB、E-MORB、OIB 数据据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram of pillow basalt (b)
(chondrite, primitive mantle, N-MORB, E-MORB and OIB after Sun and McDonough, 1989)

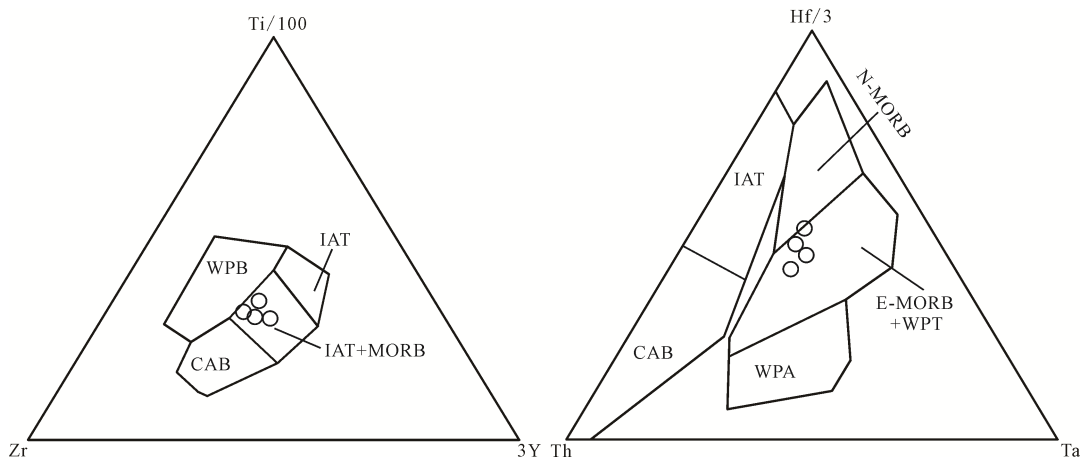


图 6 枕状玄武岩构造判别图(底图据闫臻等, 2012)
Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagram of pillow basalt (after YAN et al., 2012)
WPB-板内玄武岩; IAT-岛弧拉斑玄武岩; CAB-钙碱性玄武岩; MORB-洋中脊玄武岩; WPA-板内碱性玄武岩;
WPT-板内拉斑玄武岩; E-MORB 富集型洋中脊玄武岩; N-MORB 正常洋中脊玄武岩
WPB-within plate basalts; IAT-island arc tholeiites; CAB-calc-alkali basalt; MORB-middle ocean ridge basalt; WPA-within-plate alkaline
basalt; WPT-within-plate tholeiite; E-MORB enriched middle ocean ridge basalt; N-MORB normal middle ocean ridge basalt

表 2 尕尔勤枕状玄武岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年代学分析测试结果
Table 2 SHRIMP zircon U-Pb data of Ga'erqin pillow basalts

样点	$\omega_B/\%$		$\omega_B/10^{-6}$		Th/U	比值								年龄($\pm 1\sigma$)/Ma			不和谐度/%
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	误差/%	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	误差/%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	误差/%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	误差/%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
2	1.07	156	111	6.20	0.74	21.780	± 2.2	0.047 6	6.8	0.301	7.1	0.045 92	2.2	289.4 ± 6.1	78 ± 160	263 ± 13	-271
4	0.88	262	51	10.90	0.20	20.730	± 1.1	0.049 6	11.0	0.330	11.0	0.048 23	1.1	303.7 ± 3.3	178 ± 250	308 ± 65	-70
5	1.29	218	153	8.04	0.72	23.600	± 1.3	0.055 0	11.0	0.322	11.0	0.042 37	1.3	267.5 ± 3.5	414 ± 250	279 ± 18	35
6	1.75	155	83	6.13	0.55	22.090	± 1.5	0.046 6	12.0	0.291	13.0	0.045 28	1.5	285.5 ± 4.1	28 ± 300	248 ± 25	-920
7	0.09	408	188	83.20	0.48	4.222	± 1.0	0.090 9	2.1	2.967	2.3	0.236 80	1.0	1 370 ± 12	1 444 ± 39	1 287 ± 29	5
10	0.37	115	40	4.68	0.35	21.220	± 1.6	0.055 5	6.9	0.360	7.1	0.047 12	1.6	296.8 ± 4.6	431 ± 150	303 ± 26	31

注: Pb_c 、 Pb^* 分别为普通铅和放射成因铅, 普通铅用 ^{204}Pb 校正。

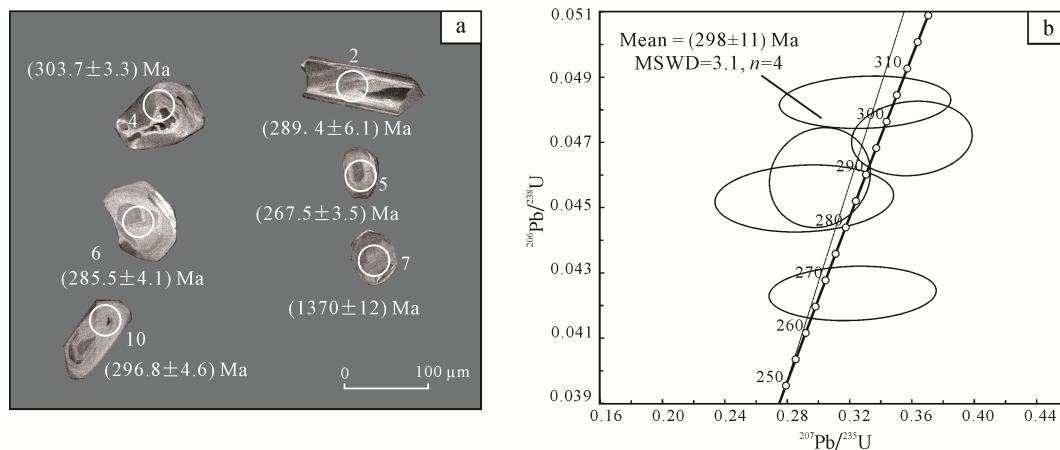


图 7 枕状玄武岩阴极发光图(a)及 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图(b)
Fig. 7 CL images (a) and zircon SHRIMP U-Pb concordia diagram (b) of pillow basalt

E-MORB+WPT 区域(图 6b), 但无论微量元素和其他判别图中均显示其无板内玄武岩特征, 而与 E-MORB 玄武岩相似。所以, 综合主微量元素特征及各类判别图解结果显示, 尕尔勤枕状玄武岩呈现富集型大洋中脊拉斑玄武岩(E-MORB)特征(王金荣等, 2017)。

3.2 SHRIMP 锆石测年结果

基性岩浆由于锆不饱和, 很少能形成自生岩浆锆石, 多捕掳早期继承锆石。本次从锆石靶中选择锆石形态较好, 多呈板状或长柱状, 发育明显振荡环带, 无明显继承核的锆石进行年龄测试(图 7a)。此次共对 10 粒锆石进行了 SHRIMP U-Pb 年龄测试, 获得 6 个有效数据测点, 锆石 Th/U 比值多 > 0.4 , 说明其为岩浆锆石。测试结果中(详见表 2), 除点 7 锆石表面年龄值为(1 370 ± 12) Ma 和点 5 表面年龄为(266.1 ± 3.7) Ma, 远离其他年龄之外, 其余 4 个测试值分布较为集中, 基本都落在的谐和线上(图 7b)。就锆石形态学而言, 7 号锆石外面仍有细小的白色环带, 呈现弱核幔结构, 说明其可能是玄武质岩浆上升捕获的锆石, 其年龄值可能代表捕获锆石年龄, 也可能是核幔混合年龄值, 5 号锆石可能受裂隙的影响或后期流体改造的作用, 导致年龄值偏低。剩余 4 个有效测点的获得平均值年龄为(298 ± 11) Ma

(MSWD=3.1), 对枕状玄武岩的形成时代给出了较为可靠的参考年龄, 即 298 Ma 左右, 属早二叠世岩浆活动的产物。

4 讨论

班怒洋的构造演化问题一直是争议的焦点, 尤其是其班怒洋开启时限(潘桂棠等, 1983; 黄启帅等, 2012; Metcalfe et al., 2013)。早期, 潘桂棠等(1983)曾根据区域岩石组合和分布特征以及海相地层沉积环境的变化, 认为班怒洋开启时限为晚三叠或早侏罗世。王冠民等(2002)并将其细分为初始裂谷、原洋裂谷和残余弧后盆地三个阶段(卫万顺等, 2003)。随着藏北地区基础地质调查的进步, 羌塘地体裂解时限也逐步提前(耿全如等, 2011), 东巧等地 254 Ma 左右的 MORB 型蛇绿岩的发现将班怒洋初始裂解时限提前至晚二叠世(黄启帅等, 2012)。Metcalfe 等(2013)将班怒洋的演化与冈瓦纳大陆的裂解结合起来, 通过对西藏、云南、缅甸、泰国等地区的详细的地层、古生物、古地磁及继承锆石的对比研究, 认为中特提斯洋(包括班怒洋)初始裂解应该发生在早二叠世, 即 295~270 Ma。

那么, 作为班—怒缝合带的重要组成部分, 多龙地区侏罗世海相沉积地层为何会产出早二叠世枕

状玄武岩块体? 看起来似乎十分矛盾。然而仔细推敲不难解释, 多龙矿集区整体位于班怒缝合带北侧, 属于大尺度增生地体的重要组成部分, 在增生楔中, 地层及岩石组合本来就十分复杂。此外, 区域资料表明, 侏罗世海相沉积地层属于强水动力环境下复理石沉积, 其区域层位中, 不仅包括大量灰绿色玄武岩块体, 也含有少量古生代灰岩块体以及条带状硅质岩。而这类灰绿色玄武岩或枕状玄武岩及灰岩块体均代表深海-半深海环境下的火山喷发及碳酸盐沉积作用的产物, 明显不同于色哇组地层的形成环境, 所以, 这类玄武岩块体及灰岩块体可能是侏罗世班怒洋北向俯冲增生过程中, 早期地层及岩石块体发生裂解、迁移并混杂在侏罗世的色哇组沉积地层中的。

此外, 这类玄武岩块起源于何处? 对动力学背景又有什么指示意义呢? 玄武岩锆石结晶年龄为 ~ 298 Ma, 岩石地球化学特征揭示其为富集型大洋中脊拉斑玄武岩, 属早二叠世海相火山活动的产物。矿集区内及外围普遍发育早二叠世和晚石炭世地层中 were 发育大量玄武岩夹层, 而这类玄武岩形成时代也在 279~285 Ma 之间, 与尕尔勤枕状玄武岩近乎一致(Zhai et al., 2013; 王明等, 2014)。翟庆国等(2009)曾报道羌塘地体中部基性辉绿岩墙侵位时代为 284 Ma 和 302 Ma, 认为其属于中特提斯洋初始裂解的产物。随着对区域填图工作中对该套基性岩脉及玄武岩的大量发现, 及详细的岩石地球化学和同位素年代学研究, 表明其具有富轻稀土板内玄武岩特征(王明等, 2014), 多具有正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 并提出这类广泛出露的基性岩脉和玄武岩是早二叠世(~ 290 Ma)深部地幔柱作用形成的大火成岩省的组成部分(Zhai et al., 2013; Wang et al., 2014)。地幔柱(或热点)的观点正逐步获得其他学者的认可, 也陆续发现新的证据和现象加以支持(Liao et al., 2015; Zhang et al., 2017), 并普遍认为羌塘地体是冈瓦纳大陆的组成部分, 在早二叠世(~ 298 Ma)发生了初始裂解(Metcalf, 2013), 从而形成中特提斯洋(含班怒洋)。所以, 从尕尔勤枕状玄武岩的产出位置, 岩石类型和结晶时代等特征初步判定, 其成因可能与羌塘地体中部的基性岩脉和玄武岩一致, 都是早二叠世地幔柱(热点)集中侵位或喷发的产物。然而, 是否真的存在大火成岩省呢? 大火成岩省有着严格定义要求: 即与地幔柱上升和岩石圈伸张有关的, 较短时间内(1~5 Ma), 覆盖面积超过 50 000 km² 或 100 000 km² 的各种以铁镁质岩石为主的火山岩岩石组合(朱弟成等, 2013)。同时, 大火成岩省形成大型裂谷环境, 所以通常伴随大规模双峰式火山岩的

产出。而目前羌塘中部基性火山岩产物的范围仅为 150 km $\times$ 500 km(Wang et al., 2014), 同时区域上并未发现同时期产出的大规模酸性火山岩端元。所以, 羌塘地体中出露的早二叠世基性岩脉或玄武岩成因, 以及是否真的存在大火成岩省, 还需要进一步开展详细的基础地质研究工作。

对于多龙矿集区而言, 色哇组海相地层中玄武岩虽然作为外来岩块被捕获, 看似与多龙矿集区成矿作用无关。但早二叠世玄武岩块的发现, 不仅印证了中特提斯洋初始裂解的时限为早二叠世(Metcalf, 2013), 而非前人认为的三叠世(曹圣华等, 2006)。而且, 二叠世的玄武岩能被侏罗世的色哇组地层捕获, 说明其侏罗世区域动力活动强及构造变形应较为强烈, 这也反映侏罗世可能是班怒洋北向俯冲最为强烈的时期。同时, 区域基础地质调查表明, 多龙矿集区色哇组地层成分较为复杂, 厚度大于 500 m, 既含有不等厚的砂岩、粉砂岩互层, 也发育众多块状、透镜状、不规则状玄武岩质火山岩或火山角砾岩(1: 25 万物玛幅区调报告), 说明其沉积环境水动力条件较强, 区域沉降活动强烈, 可能属于俯冲-造山活动早期活动大陆边缘环境。此外, 由于目前多龙矿集区矿田构造研究工作较为薄弱, 而色哇组地层又是多龙矿区最重要的赋矿地层, 所以, 未来对色哇组地层的构造解体及物质来源研究就尤为重要, 这将有助于清晰了解多龙矿集区成矿作用的地层条件和成矿前的空间格架。

5 结论

(1) 尕尔勤枕状玄武岩稀土总量含量较低(ΣREE 为 $38.01 \times 10^{-6} \sim 63.56 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分异不明显, 有富集性大洋中脊玄武岩(E-MORB)特征。

(2) 枕状玄武岩形成时代为 (298 ± 11) Ma, 与区域基性岩脉和玄武岩形成时代一致, 同属于早二叠世班怒洋初始裂解时期大规模火山活动的产物。

致谢: 感谢西藏金龙矿业股份有限公司和西藏地勘局地质五队对本次野外地质工作的大力支持和帮助, 感谢北京离子探针中心测试人员对 SHRIMP U-Pb 分析的帮助, 感谢项目组成员在野外和室内工作的帮助。最后, 感谢审稿专家及主编提出的宝贵修改意见!。

Acknowledgements:

This study was supported by the Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China (No. 201511017), National Natural Science Foundation of China (No. 41402178), Central

Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. YYWF201608)、Chinese Geological Survey (Nos. DD20160026 and DD20160346), and China Scholarship Council.

参考文献:

- 曹圣华, 邓世权, 肖志坚, 廖六根. 2006. 班公湖—怒江结合带西段中特提斯多岛弧构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 25-32.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. 地质论评, 61(4): 717-734.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 彭智敏, 张璋. 2011. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 30(8): 1261-1274.
- 黄启帅, 史仁灯, 丁炳华, 刘德亮, 张晓冉, 樊帅权, 支霞臣. 2012. 班公湖MOR型蛇绿岩Re-Os同位素特征对班公湖—怒江特提斯洋裂解时间的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 465-478.
- 刘治博, 王文磊, 宋扬, 王勤. 2017. 多龙矿集区控矿构造信息提取、识别与融合[J]. 地球学报, 38(5): 803-812.
- 潘桂棠, 郑海翔, 徐跃荣, 王培生, 焦淑沛. 1983. 初论班公湖—怒江结合带[C]//青藏高原地质文集: 229-242.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 陈华. 2013. 西藏班公湖—怒江缝合带中段A-型花岗岩的岩浆源区与板片断离[J]. 地质学报, 87(6): 759-772.
- 四川省地质调查院. 2006. 1:25万物玛幅区域地质调查报告[R]. 四川省: 四川省地质调查院.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石SHRIMP样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(S1): 26-30.
- 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 林彬, 杨超, 郭娜, 方向, 杨欢欢, 王艺云, 高轲, 丁帅, 张志, 段吉琳, 陈红旗, 栗登逵, 冯军, 刘治博, 韦少港, 贺文, 宋俊龙, 李彦波, 卫鲁杰. 2016. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(6): 663-690.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 王勤, 王艺云, 杨超, 陈红旗, 李彦波, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 宋俊龙, 杨欢欢, 段吉琳, 高珂, 方向, 谭江云. 2014. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 35(1): 6-10.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-613.
- 王冠民, 钟建华. 2002. 班公湖—怒江构造带西段三叠纪—侏罗纪构造—沉积演化[J]. 地质论评, 48(3): 297-303.
- 王金荣, 陈万峰, 张旗, 焦守涛, 杨婧, 潘振杰, 王淑华. 2017. N-MORB和E-MORB数据挖掘——玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论[J]. 岩石学报, 33(3): 993-1005.
- 王明, 李才, 解超明, 吴彦旺, 范建军, 徐建鑫. 2014. 藏北羌塘南部冈玛错地区展金组玄武岩的成因及其构造意义[J]. 地质通报, 33(11): 1768-1777.
- 卫万顺, 张宇辉, 陆彦明, 刘桂阁. 2003. 西藏班公湖—怒江成矿带中段岩浆演化及其金矿成岩成矿动力学模式[J]. 黄金科学技术, 11(3): 1-10.
- 闫臻, 郭现轻, 付长垒, 王涛, 王宗起, 李继亮. 2012. 秦祁昆结合部晚三叠世OIB型玄武岩岩石学、地球化学及SHRIMP锆石U-Pb年代学研究[J]. 地学前缘, 19(5): 164-176.
- 翟庆国, 李才, 王军, 纪战胜, 王永. 2009. 藏北羌塘地区基性岩墙群锆石SHRIMP定年及Hf同位素特征[J]. 科学通报, 54: 3331-3337.
- 张旗. 1990. 如何正确使用玄武岩判别图[J]. 岩石学报, 2: 87-94.
- 张树明, 王方正. 2002. 玄武岩在研究岩石圈深部过程及构造背景中的应用[J]. 地球科学进展, 17(5): 685-692.
- 朱弟成, 夏瑛, 裘碧波, 王青, 赵志丹. 2013. 为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J]. 岩石学报, 29(11): 3659-3670.

References:

- CAO Sheng-hua, DENG Shi-quan, XIAO Zhi-jian, LIAO Liu-gen. 2006. The archipelagic arc tectonic evolution of the Meso-Tethys in the western part of the Bangong Lake-Nujiang suture zone[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(4): 25-32(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, LIU Cui, FENG Xiao-yan, XIAO Qin-hui, DI Yong-jun, SU Shang-guo, ZHAO Guo-chun, DUAN Pei-xin, DAI Meng. 2015. On the Correct Application in the Common Igneous Petrological Diagrams: Discussion and Suggestion [J]. Geological Review, 61(4): 717-734(in Chinese with English abstract).
- GENG Quan-ru, PAN Gui-tang, WANG Li-quan, PENG Zhi-min, ZHANG Zhang. 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co- Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1261-1274(in Chinese with English abstract).
- HUANG Qi-shuai, SHI Ren-deng, DING Bing-hua, LIU De-liang, ZHANG Xiao-ran, FAN Shuai-quan, ZHI Xia-chen. 2012. Re-Os isotopic evidence of MOR-type ophiolite from the Banggong Co for the opening of Banggong- Nujiang Tethys Ocean[J]. Acta Petrologica ET Mineralogica, 31(4): 465-478(in Chinese with English abstract).
- LI Jin-Xiang, QIN Ke-zhang, LI Guang-Ming, RICHARDS J P, ZHAO Jun-xing, CAO Ming-Jian. 2014. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic intermediate-felsic intrusions in central Tibet: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Lithos, (198-199): 77-91.
- LIAO Shi-yong, WANG Dong-bing, TANG Yuan, YIN Fu-guang, CAO Shu-nan, WANG Li-quan, WANG Bao-di, SUN Zhi-Ming. 2015. Late Paleozoic Woniusi basaltic province from Sibumasu terrane: Implications for the breakup of eastern Gondwana's northern margin[J]. Geological Society of America Bulletin, 127: 1313-1330.
- LIN Bin, CHEN Yu-Chuan, TANG Ju-xing, WANG Qin, SONG Yang, YANG Chao, WANG Wen-lei, HE Wen, ZHANG Le-jun. 2017b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr Ages of the Tiegelongnan Porphyry Cu-(Au) Deposit in the Bangong Co-Nujiang Metallogenic Belt of Tibet, China: Implication for Generation of Super-Large Deposit[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 91: 602-616.
- LIN Bin, TANG Ju-xing, CHEN Yu-chuan, SONG Yang, HALL G, WANG Qin, YANG Chao, FANG Xiang, DUAN Ji-lin, YANG Huan-huan. 2017a. Geochronology and Genesis of the Tiegelongnan Porphyry Cu (Au) Deposit in Tibet: Evidence from U-Pb, Re-Os Dating and Hf, S, and H-O Isotopes[J]. Resource Geology, 67(1): 1-21.
- LIU Zhi-bo, WANG Wen-lei, SONG Yang, WANG Qin. 2017.

- Geo-information Extraction and Integration of Ore-controlling Structure in the Duolong Ore Concentration Area of Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 803-812(in Chinese with English abstract).
- METCALFE I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33.
- PAN Gui-tang, ZHENG Hai-xiang, XU Yue-rong, WANG Pei-sheng, JIAO Shu-pei. 1983. A preliminary study on Bangong Co-Nujiang suture[C]. *Contribution to the Geology of the Qianghai-Xizang (Tibet) Plateau*, 229-242(in Chinese with English abstract).
- PEARCE J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//THORPE R S. *Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, England: John Wiley and Sons: 528-548.
- QU Xiao-ming, XIN Hong-bo, DU De-dao, CHEN Hua. 2013. Magma Source of the A-Type Granite and Slab Break-Off in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 759-772 (in Chinese with English abstract).
- SONG Biao, ZHANG Yu-hai, WANG Yu-sheng, JIAN Ping. 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26-30(in Chinese with English abstract).
- SUN S S, MCDONOUGH W S. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313-345.
- TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, LIN Bin, YANG Chao, GUO Na, FANG Xiang, YANG Huan-huan, WANG Yi-yun, GAO Ke, DING Shuai, ZHANG Zhi, DUAN Ji-lin, CHEN Hong-qi, SU Deng-kui, FENG Jun, LIU Zhi-bo, WEI Shao-gang, HE Wen, SONG Jun-long, LI Yan-bo, WEI Lu-jie. 2016. Geological Characteristics and Exploration Model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) Deposit: The First Ten Million Tons Metal Resources of a Porphyry-epithermal Deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(6): 663-690(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SUN Xing-guo, DING Shuai, WANG Qin, WANG Yi-yun, YANG Chao, CHEN Hong-qi, LI Yan-bo, LI Yu-bin, WEI Lu-jie, ZHANG Zhi, SONG Jun-long, YANG Huan-huan, DUAN Ji-lin, GAO Ke, FANG Xiang, TAN Jiang-yun. 2014. Discovery of the epithermal deposit of Cu(Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Huan-huan, GAO Xin, ZHANG Ze-bin, ZOU Bing. 2017. Mineralization, Exploration and Resource Potential of Porphyry-skarn-epithermal Copper Polymetallic Deposits in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 571-613(in Chinese with English abstract).
- The Geological Survey institute of the Sichuan. 1981. Regional Map and Report of Wuma sheet at the scale of 1:250,000[R]. Sichuan: The Geological Survey institute of the Sichuan(in Chinese).
- WANG Guan-min, ZHONG Jian-hua. 2002. Tectonic- sedimentary evolution of the west segment of the Bangong Co-Nujiang structural belt in the Triassic and Jurassic[J]. *Geological Review*, 48(3): 297-303(in Chinese with English abstract).
- WANG Jin-rong, CHEN Wang-Feng, ZHANG Qi, JIAO Shou-tao, YANG Jing, PAN Zhen-jie, WANG Shu-hua. 2017. Preliminary research on data mining of N-MORB and E-MORB: Discussion on method of the basalt discrimination diagrams and the character of MORB's mantle source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 993-1005(in Chinese with English abstract).
- WANG Ming, LI Cai, WU Yan-wang, XIE Chao-ming. 2014. Geochronology, geochemistry, Hf isotopic compositions and formation mechanism of radial mafic dikes in northern Tibet[J]. *International Geology Review*, 56: 187-205.
- WANG Ming, LI Cai, XIE Chao-ming, WU Jian-jun, XU Jian-xin. 2014. Petrogenesis of the basalt of Zhanjin Formation in the Gangmar Co area, southern Qiangtang, and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1768-1777 (in Chinese with English abstract).
- WEI Wan-shun, ZHANG Yu-hui, LU Yan-ming, LIU Gui-ge. 2003. Magmatic evolution and metallogenic model of gold deposit in the middle part of Bangonghu-Nujiang metallogenic belt, Tibet[J]. *Gold Science and Technology*, 11(3): 1-10(in Chinese with English abstract).
- WINCHESTER J A, FLOYD P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325-342.
- YAN Zhen, GUO Xian-qing, FU Chang-lei, WANG Tao, WANG Zong-qi, LI Ji-liang. 2012. Petrology, geochemistry and SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Triassic OIB-basalt in the conjunction of the Qinling-Qilian-Kunlun orogens[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 164-176(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Qing-Guo, JAHN Bor-ming, SU Li, ERNST R E, WANG Kuo-lung, ZHANG Ru-yuan, WANG Jun, TANG Suo-han. 2013. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of a mafic dyke swarm in the Qiangtang terrane, northern Tibet and geodynamic implications[J]. *Lithos*, 174: 28-43.
- ZHAI Qin-guo, LI Cai, WANG Jun, JI Zhan-sheng, WANG Yong. 2009. SHRIMP U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from the mafic dyke swarms in central Qiangtang area, Northern Tibet[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 54: 3331-3337(in Chinese).
- ZHANG Qi. 1990. The correct use of the basalt discrimination diagram[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 87-94(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shu-ming, WANG Fang-zheng. 2002. Basalt's action on research geosphere deep-course and structural setting[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(5): 685-692(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-xiu, ZHANG Kai-jun. 2017. Early Permian Qiangtang flood basalts, northern Tibet, China: A mantle plume that disintegrated northern Gondwana?[J]. *Gondwana Research*, 44: 96-108.
- ZHU Di-cheng, XIA Ying, QIU Bi-bao, WANG Qing, ZHAO Zhi-dan. 2013. Why do we need to propose the Early Cretaceous Comei large igneous province in southeastern Tibet?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3659-3670.