西藏拉萨地块盐湖石英闪长岩成因: 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学 及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的制约

彭勃¹⁾,李宝龙¹⁾,秦广洲²⁾,周磊³⁾,李宇飞⁴⁾

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)成都理工大学地球科学学院,成都,610059;3)四川省地质矿产勘查开发局化探队,四川德阳,618000;
 4)中国冶金地质总局内蒙古地质勘查院,呼和浩特,010000

内容提要:西藏阿里盐湖地区发育不同类型的火成岩,通常被认为形成于班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲板片 发生断离的构造背景。本文报道了盐湖石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,全岩地球化学以及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素数据。盐湖石英闪长岩的锆石²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄为 118.5±1.9Ma,属早白垩世晚期。石英闪长岩样 品主量元素表现为富钠的钙碱性岩石系列,A/CNK 值介于 0.84~0.89 之间,属准铝质。微量元素富集 Rb、K、 Th、U 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),强烈亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti 等高场强元素(HFSE)和重 稀土元素(HREE),无明显的 Eu 异常(δEu=0.81~0.98),无白云母和碱性暗色矿物,属准铝质未分异的 I 型花岗 岩。盐湖石英闪长岩的(⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_i 值为 0.7045~0.7048,ε_{Nd}(t)值介于+0.5~+2.1 之间,ε_{Hf}(t)值介于+7.9~ +13 之间,Hf 同位素模式年龄 t_{DM2}变化于 283~674Ma 之间。基于同位素以及岩石地球化学数据,表明盐湖石英 闪长岩很可能是具亏损地幔印记的新生下地壳在角闪岩相发生部分熔融作用形成的。结合本文以及区域上的研 究资料,盐湖石英闪长岩的形成时代和岩石地球化学特征与盐湖复式岩体中的花岗岩存在较大差异,具较低的锆

关键词:藏北;班公湖-怒江特提斯洋;拉萨地块;盐湖复式岩体;SHRIMP U-Pb 年代学;Sr-Nd-Pb-Hf 同位素

青藏高原的形成与演化一直以来是地学界讨论 和研究的热点(Yin and Harrison, 2003; Mo Xuanxue et al., 2003; Pan Guitang et al., 2006)。 众所周知,青藏高原是由一系列地块拼贴而成,发育 多条缝合带,由北至南依次发育龙木错-双湖缝合 带,班公湖-怒江缝合带以及印度-雅鲁藏布江缝合 带(图 1a、b),其中班公湖-怒江缝合带更是近年来 青藏高原地质研究的热点地区,一大批大型一超大 型的斑岩-砂卡岩-浅成低温热液矿床相继发现 (Tang Juxing et al., 2013, 2014, 2016, 2017; Lin Bin et al., 2016, 2017; Wang Qin et al., 2018), 一些关键的地质问题也得到深入研究(Li et al., 2014; Li J X et al., 2016; Wang et al., 2016),但 由于班公湖-怒江特提斯洋本身复杂的构造演化历 史,至今仍有许多重要的地质问题存有争议,尤其是 有关俯冲极性、闭合过程及时限等方面的认识不 统一。

拉萨地块,位于班公湖-怒江缝合带以南,印度-雅鲁藏布江缝合带以北。地理位置上,西达噶尔县, 东至林芝地区,东西延伸约 2500km,南北宽约 150 ~300km,总面积约 49.3×10⁴ km²。根据拉萨地块 的岩石圈结构及构造属性,以狮泉河-纳木错蛇绿混

引用本文:彭勃,李宝龙,秦广洲,周磊,李宇飞. 2019. 西藏拉萨地块盐湖石英闪长岩成因:锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的制约.地质学报,93(3):606~621, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019044. Peng Bo, Li Baolong, Qin Guangzhou, Zhou Lei, Li Yufei. 2019. Petrogenesis of the quartz diorite in the Yanhu area of Lhasa terrance, Tibet: constraints from zircon SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. Acta Geologica Sinica, 93(3):606~621.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41802103)、中国博士后科学基金(编号 2018M641434)和中国地质调查局项目(编号 DD20160026)联合资助成果。

收稿日期:2018-07-18;改回日期:2018-11-07;网络发表日期:2019-01-11;责任编辑:周健。

作者简介:彭勃,男,1989年生。博士,主要从事矿床成矿理论与矿床地球化学方面研究。Emial:p.engbo@163.com。通讯作者:李宝龙, 男,1982年生。副研究员,主要从事岩石学与区域构造研究。Emial:xinzhongguolong@163.com。

杂岩带(SNMZ)和洛巴堆-米拉山断裂带(LMF)为 分界线,将拉萨地块进一步划分为北部、中部和南部 三个部分(图 1b, Zhu et al., 2009a, 2011, 2013)。 拉萨地块中北部是解决班公湖-怒江特提斯洋俯冲 极性和闭合时限的关键位置,但相比于班公湖-怒江 缝合带北缘的南羌塘地块,其研究仍较为薄弱,最新 的研究表明在拉萨地块中北部发现一系列晚侏罗 世一早白垩世的岩浆活动,蛇绿岩以及洋岛的研究 也表明早白垩世早期洋盆仍具有相当规模(Wang et al., 2016),因此多数学者认为班公湖-怒江特提 斯洋存在着晚侏罗世一早白垩世的南向俯冲作用 (Hsü et al., 1995; Zhu et al., 2011, 2013)。然而 对于南向俯冲增生的过程研究较少,目前仍缺乏精 确的年代学制约。本文研究的藏北盐湖地区,位于 拉萨地块北部,区内产出大规模花岗质岩基,中基性 火山岩,为早白垩世班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲 及随后的板片断离提供了重要的线索和依据(Zhu et al., 2016)。然而,本次研究在盐湖巨型花岗岩 基中新识别出一套石英闪长岩,表明该岩体并不是 由单一岩相组成,盐湖复式岩体中的不同侵入岩能 否用统一的地球动力学机制解释需要进一步探讨。

本文报道盐湖石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素数 据,结合拉萨地块中北部白垩纪构造演化的研究成 果,对盐湖石英闪长岩的岩石成因及区域地球动力 学背景提供了重要约束。

1 区域地质背景

盐湖复式岩体位于班公湖-怒江缝合带南缘,北 拉萨地块西段(图 1c)。区域出露地层主要包括多 尼组(K₁d)、郎山组(K₁l)、去申拉组(K₁q)及竟柱山 组(K₂j)(图 2)。其中,盐湖岩体的主要围岩为下白



图 1 青藏高原地理位置(a)和构造分区图(b)(据 Pan Guitang et al., 2006)以及拉萨地块地质图(c) (改自 Chang Qingsong et al., 2011)

Fig. 1 Geographic map(a) and tectonic framework of the Tibetan Plateau (b) (after Pan Guitang et al., 2006),

and geological sketch map of the central Tibetan Plateau (c) (modified after Chang Qingsong et al., 2011)

JSSZ—金沙江缝合带;LSSZ—龙木错-双湖缝合带;BNSZ—班公湖-怒江缝合带;SNMZ—狮泉河-纳木错混杂岩带;LMF—洛巴堆-米拉山斯裂带;IYZSZ—印度-雅鲁藏布江缝合带;NL—北拉萨地块;CL—中拉萨地块;SL—南拉萨地块;年龄数据来自 Zhu et al., 2009b, 2011; Sui et al., 2013; Li S M et al., 2014;Wei et al., 2017; Wei Shaogang et al., 2017; Li Bin et al., 2017

JSSZ—Jinsha suture zone; LSSZ—Longmu Co-Shuanghu suture zone; BNSZ—Bangong-Nujiang suture zone; SNMZ—Shiquan River-Nam Tso melange zone; LMF—Luobadui-Milasahn fault; IYZSZ—Indus-Yarlung Zangbo suture zone; NL—northern Lhasa subterrane; CL—central Lhasa subterrane; SL—south Lhasa subterrane; Data are from Zhu et al., 2009b, 2011; Sui et al., 2013; Li S M et al., 2014; Wei et al., 2017; Wei Shaogang et al., 2017; Li Bin et al., 2017 垩统去申拉组的一套砂板岩夹中基性火山岩的岩石 组合,岩体与围岩间呈侵入接触关系,围岩中的砂板 岩由于受到强烈的热变质作用,发生明显的角岩化, 中基性火山岩也发生强烈的变质变形作用。区域岩 浆岩以中酸性侵入岩为主,多呈大型的花岗质岩基 产出,除盐湖岩体之外,还包括昂龙岗日、阿翁错、帕 阿、革吉等大型岩体(图 2),岩石类型主要为石英闪 长岩、二长花岗岩、花岗斑岩、白云母花岗岩等。区 域构造主要以断裂构造为主,多呈北西-南东向展 布,由北向南分别为纳屋错断裂带、盐湖断裂带、吓 拉错断裂带、聂耳错断裂带、邦巴断裂带,其中盐湖复 式岩体就夹持于盐湖断裂与吓拉错断裂之间(图 2)。

2 岩体特征及样品采集

盐湖复式岩体主要呈岩基状产出,总体呈 NW-SE 向展布,出露长约 155km,宽约 55km,出露面积 约 850km²(图 2),亦可见部分岩株、岩脉。主要岩 性为浅灰色中粒花岗岩、浅灰色细粒似斑状黑云母 花岗岩、紫灰色中粒似斑状黑云母花岗岩、灰色中粗 粒似斑状黑云母花岗岩、灰色中粒二长花岗岩以及



图 2 盐湖及相邻区域岩浆岩分布略图(改自 Geological Survey of Sichuan Province, 2004[•]) Fig. 2 Simplied geological map showing the distribution of magmatic rock in Yanhu and its adjacent area (modified from Geological Survey of Sichuan Province, 2004[•])

1-蛇绿岩;2一火山角砾岩;3-安山玄武岩;4-英安岩;5-流纹岩;6-粗面岩;7-早白垩世闪长岩;8-早白垩世石英闪长岩;9-早白垩 世石英闪长岩;10-晚白垩世花岗岩;11-晚白垩世黑云母花岗岩;12-晚白垩世二长花岗岩;13-晚白垩世碱长花岗岩;14-古近纪花岗 斑岩;15-古近纪白岗岩;16-中新统雄巴组;17-始-渐新统邦巴组;18-早白垩统去申拉组;19-早白垩统多尼组;20-早白垩统捷嘎组; 21-取样位置;22-断裂;F₁-纳屋错断裂带;F₂-盐湖断裂带;F₃-吓拉错断裂带;F₄-聂耳错断裂带;F₅-邦巴断裂带

1—Ophiolite; 2—valcanic breccia; 3—adesitic basalt; 4—dacite; 5—rhyolite; 6—trachyte; 7—Early Cretaceous diorite; 8—Early Cretaceous quartz-diorite; 9—Early Cretaceous quartz diorite; 10—Late Cretaceous granite; 11—Late Cretaceous biotite granite; 12—Late Cretaceous adamellite; 13—Late Cretaceous alkali-feldspar granite; 14—Paleogene granite porphyry; 15—Paleogene alaskite; 16—Miocene Xiongba Formation; 17—Eocene-Oligocene Bangba Formation; 18—Early Cretaceous Qushenla Formation; 19—Early Cretaceous Duoni Formation; 20—Early Cretaceou Jiaga Formation; 21—sample locations; 22—fault; F_1 —Nawucuo fault; F_2 — Yanhu fault; F_3 —Xialacuo fault; F_4 —Nie' ercuo fault; F_5 —Bangba fault





灰白色中细粒黑云母石英闪长岩,后期亦有沿构造裂隙贯入的细晶岩脉,闪长玢岩脉和花岗斑岩脉等。

本次用于进行年代学、地球化学及同位素测试 的样品为盐湖岩体西部的中细粒黑云母石英闪长 岩,采自野外新鲜的岩体露头,具体采样位置如图 2。样品为块状构造,中细粒半自形粒状结构,主要 由石英(~20%)、斜长石(~55%)、角闪石(~20%) 及少量黑云母(~5%)组成(图 3a)。其中斜长石呈 半自形板柱状,粒度 3~4mm,多见聚片双晶,角闪 石呈半自形一他形的板条状,粒度约 4~5mm,解理 明显,石英呈他形粒状,粒度 2~3mm,呈填隙状充 填于斜长石颗粒之间(图 3b)。

3 分析方法

3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

用于测年的样品在河北省地质测绘院实验室进行选样,锆石 U-Pb 年龄分析在北京离子探针中心 SHRIMP-II上完成,相关样品靶的制备和实验流程 参见 Song Biao et al. (2002)和 Yang Jialin et al. (2018)。激光束斑大小为 20~30 μ m。测试中应用 RSES 参考锆石 TEM(417Ma)进行元素分馏校正, 具体情况见 Black et al. (2003)。每分析一次标准 TEM,然后分析 3 个待测锆石点,每个测点记录采 用 5 次 扫 描。数 据 处 理 采 用 Isoplot 软 件 (Ludwing, 2003),普通 Pb 由实测²⁰⁴ Pb 校正;所有 测点的误差均为 1 σ ,所采用的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均 年龄具 95%的置信度。

3.2 岩石地球化学

岩石地球化学样品由河北省地质测绘院实验室

粉碎成 200 目粉末,主量及微量元素的分析在核工 业北京地质研究院分析测试研究中心测试完成,主 量元素 测试使用 X 射线荧光光谱仪(飞利浦 PW2404),其中 Al₂O₃、SiO₂、MgO、Na₂O 检测限为 0.015%, CaO、K₂O、TiO₂ 检 测 限 为 0.01%, Fe₂O₃^T、MnO、P₂O₅ 检测限为 0.005%;FeO 用容量 法完成(检测限为 0.1%)。微量元素及稀土元素使 用电感耦合等离子体质谱 Finingan MAT HR-ICP-MS(Element I型)完成。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素

全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析在核工业北京地质 研究院分析测试研究中心测试完成,同位素分析均 采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,其中铷锶条件为 单带,M+,质量分馏用⁸⁶ Sr/⁸⁸ Sr=0.1194 校正,标准 测量结果:NBS987 为 0.710250 \pm 7,实验室流程本底: Rb 2×10⁻¹⁰ g, Sr 2×10⁻¹⁰ g;钐钕条件为三带,M+, 质量分馏用¹⁴⁶ Nd/¹⁴⁴ Nd=0.7219 校正,标准测量结 果:JMC 为¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd=0.512109 \pm 3。全流程本底 Sm、Nd 小于 50pg;铅同位素测定用磷酸硅胶将样品 点在铼带上,用静态接受方式测量铅同位素比值。 NBS 981 未校正结果: ²⁰⁸ Pb/²⁰⁶ Pb=2.164940 \pm 15, ²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb=0.914338 \pm 7, ²⁰⁴ Pb/²⁰⁶ Pb=0.0591107 \pm 2,全流程本底 Pb <100 pg。

3.4 锆石 Hf 同位素

锆石原位微区 Hf 同位素测试在中国地质调查 局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找 矿重点实验室利用 Neptune 型多接收等离子体质 谱仪和 Geolas Pro 型激光剥蚀系统联用的方法完

2019 年

成的,详细测试流程可参照 Hou Kejun et al. (2007)。测试束斑直径为 32μm,激光剥蚀的样品 气溶胶由氦气作为载气输送到质谱仪中进行测试, 为了调节和提高仪器灵敏度,气路中间引入了氩气 和少量氮气。所有测试位置与 U-Pb 定年点位相同 或靠近。每分析 10 个样品测点分析一次锆石标准 GJ-1 作为监控,本次实验 GJ-1 的测试精准度为 0.282030±40(2δ)。Hf 模式年龄的计算公式及计 算过程中各种参数的选择见相关文献(Blichert et al., 1997;Griffin et al., 2000)。

4 分析结果

4.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学

盐湖石英闪长岩样品锆石 CL 图像(图 4)显示, 锆石多呈长柱状,长宽比约为 2:1,晶体自形程度 较好,发育明显且狭窄的震荡环带,显示出岩浆锆石 特征。年龄分析结果(表 1)显示,锆石中 Th、U含量相对较低,Th含量介于 $44 \times 10^{-6} \sim 275 \times 10^{-6}$ 之间,U含量介于 $74 \times 10^{-6} \sim 330 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 比值为 0.61~1.12,均大于 0.4,总体上显示为岩浆 成因 锆石 (Belousova et al., 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003)。通过锆石阴极发光、透射光和 反射光的研究,选择了 12 个测点进行了 SHRIMP U-Pb 分析,分析点较为集中,大多数落在谐和线及 其附近(图 4),获得²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄为 118.5±1.9Ma,MSWD=1.7(图 4),该年龄代表了 该期石英闪长岩的侵位时代,属早白垩世晚期。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

盐湖石英闪长岩样品主量元素及特征值列于表 2,测试样品 SiO₂含量较为集中,介于 59.39%~ 63.03%之间,FeO=3.41%~4.46%,Fe₂O₃=5.07%

	表 1	盐湖石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄
Table 1	SHRIMP	U-Pb ages of zircons from the quartz diorite in Yanhu area

测占	含量(×10 ⁻⁶)		Th/II	206 DL *			同位素比值	(±%)			年龄(N	$I(a) \pm 1\sigma$	
侧点	$^{206}\mathrm{Pb_{c}}$	U	Th	111/0	F D	²⁰⁷ Pb * / ²⁰	⁶ Pb *	²⁰⁷ Pb * / ²	²³⁵ U	²⁰⁶ Pb * / ²	³⁸ U	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{208}\mathrm{Pb}/^{232}\mathrm{Th}$
1		152	114	0.77	2.46	0.077	17	0.204	17	0.01934	2.3	123.5 \pm 2.9	148 ± 18
2	1.88	119	90	0.78	1.87	0.0476	11	0.118	11	0.01797	1.9	114.8 ± 2.2	108.3 \pm 6.6
3	—	181	196	1.12	2.82	0.058	18	0.146	19	0.01825	2.2	116.6 \pm 2.5	$126\pm\!10$
4	—	132	92	0.73	2.10	0.069	15	0.183	16	0.01915	2.2	122.3 \pm 2.7	154 ± 17
5	2.40	74	44	0.61	1.21	0.044	39	0.114	39	0.01856	3.0	118.6 \pm 3.5	$99\!\pm\!26$
6	_	188	143	0.79	3.06	0.0644	10	0.170	10	0.01916	1.7	122.3 \pm 2.1	130.4 \pm 9.3
7	2.95	107	104	1.00	1.80	0.0353	18	0.092	18	0.01902	2.0	121.5 \pm 2.4	102.9 \pm 7.1
8	0.08	256	247	1.00	4.18	0.0492	11	0.129	11	0.01900	2.5	121.3 \pm 3.0	117.2 ± 7.0
9	—	191	189	1.02	2.99	0.0493	10	0.124	10	0.01828	1.6	116.7 \pm 1.9	126.3 \pm 6.0
10	—	174	125	0.75	2.73	0.0636	5.0	0.1621	5.3	0.01850	1.8	118.2 \pm 2.1	133.7 \pm 6.0
11	1.36	222	180	0.84	3.52	0.0448	13	0.112	13	0.01822	1.7	116.4 \pm 2.0	105.4 \pm 7.4
12	1 52	330	275	0.86	5.17	0.0398	15	0.098	15	0.01794	22	114.6 ± 2.5	100.6 ± 7.0

注:²⁰⁶ Pb_c和²⁰⁶ Pb*分别代表普通铅和放射性铅,用实测²⁰⁴ Pb 校正普通铅,表中误差均为 1σ。



图 4 盐湖地区石英闪长岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图及阴极发光图像 Fig. 4 Concordia diagram of zircon U-Pb ages and CL images of quartz diorite in the Yanhu area ~7.16%, CaO=4.62%~5.87%, MgO=2.29% ~3.51%, Mg^{*} 值变化于 32.62~38.22。Na₂O= 3.59%~3.92%, K₂O=2.14%~3.37%, 相对富 钠贫钾(K₂O/Na₂O=0.55~0.94)。在全碱-硅 (TAS)图解中(图 5), 样品均落入了亚碱性岩石系 列中的闪长岩及石英闪长岩区域,结合野外及镜下 的石英含量,将其确定为石英闪长岩。在SiO₂-K₂O 图解中,石英闪长岩样品落入钙碱性-高钾钙碱性的 岩石区域(图 6a)。Al₂O₃=16.03%~16.29%, 铝 饱和指数 A/CNK 介于 0.84~0.89 之间, 在 A/ CNK-A/NK 图解中显示为准铝质的岩石系列(图





Fig. 5 Plots of total alkai versus SiO₂ (TAS) of quartz diorite in the Yanhu area (after Irvine and Baragar, 1971)

表 2 盐湖石英闪长岩主量元素含量(%)

Table 2	Major element	contents	(%)	of th	e quartz	diorite
	fror	n Yanhu	area			

样品号	YH-1	YH-2	YH-4	17YH-1	17YH-2
SiO_2	61.01	62.3	59.43	59.39	63.03
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	16.06	16.17	16.29	16.28	16.03
Fe_2O_3	6.12	5.19	7.16	6.54	5.07
FeO	4.46	3.69	3.41	4.23	3.87
CaO	5.39	4.88	5.87	5.54	4.62
MgO	2.85	2.44	3.00	3.51	2.29
K_2O	2.73	3.16	2.31	2.14	3.37
Na_2O	3.66	3.69	3.79	3.92	3.59
${\rm TiO}_2$	0.90	0.80	0.94	0.97	0.76
P_2O_5	0.18	0.17	0.20	0.20	0.16
MnO	0.13	0.12	0.13	0.15	0.11
LOI	0.94	1.07	0.85	0.89	0.93
Mg♯	33.76	34.22	35.18	38.22	32.62
$\rm K_2O/Na_2O$	0.75	0.86	0.61	0.55	0.94
A/NK	1.80	1.70	1.87	1.86	1.68
A/CNK	0.86	0.88	0.84	0.86	0.89



图 6 盐湖石英闪长岩 SiO₂-K₂O图(a,据 Peccerillo et al., 1976)和 A/CNK-A/NK 图(b,据 Maniar et al., 1989) Fig. 6 Plot of SiO₂ vs. K₂O (a) (after Peccerillo et al., 1976) and A/CNK vs. A/NK (b) (after Maniar et al., 1989) of quartz diorite from the Yanhu area

6b),总体上盐湖石英闪长岩样品属于富钠钙碱性-高钾钙碱性系列准铝质岩石。

4.2.2 微量元素

盐湖石英闪长岩样品微量元素及特征值列于表 3,样品稀土总量介于101.90×10⁻⁶~128.61× 10⁻⁶之间,在稀土元素配分曲线上,显示出轻稀土元 素富集,重稀土元素相对平坦的曲线特征(图7a)。 LREE/HREE值为6.97~9.05,无明显的Eu异常 (δ Eu=0.81~0.98)。样品稀土元素配分曲线变化 一致,显示出同源岩浆演化特征。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b) 可以看出,样品明显富集 Rb、K、Th、U 等大离子亲 石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),强烈亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti 等高场强元素(HFSE)和重稀 土元素(HREE)。Rb/Sr=0.19~0.24,平均值为 0.21,Th/La=0.30~0.44,平均值为0.38,Th/Nb =0.68~1.05,平均值0.84,La/Nb=1.83~2.36, 平均值2.21。

表 3 盐湖石英闪长岩微量元素含量(×10⁻⁶)

Table 3 Trace elements contents ($\times 10^{-6}$) of quartz diorite from the Yanhu area												
样品号	YH-1	YH-2	YH-4	17YH-1	17YH-2	标样测定值(GSR-6)	标准值(GSR-6)					
Li	36.50	16.30	26.10	27.98	15.70	22.00	20.00					
Be	1.62	1.38	1.39	1.46	1.32	0.87	0.80					
Sc	17.50	11.80	16.70	16.98	10.85	6.60	6.00					
V	174.00	153.00	193.00	202.00	141.00	35.40	36.00					
Cr	25.20	18.70	15.20	16.58	16.20	33.60	32.00					
Co	14.80	12.30	17.10	18.40	11.42	9.60	9.00					
Ni	13.70	12.30	11.70	12.36	11.72	16.60	18.00					
Ga	21.40	17.70	21.00	19.64	16.35	7.11	7.10					
Rb	104.00	93.50	84.80	83.70	94.20	29.20	32.00					
Sr	485.00	389.00	422.00	432.00	481.00	917.00	913.00					
Υ	21.30	14.50	23.20	24.30	13.50	35.40	36.00					
Zr	26.60	25.70	21.80	24.25	23.91	61.60	62.00					
Nb	13.40	10.40	13.30	13.20	9.91	6.89	6.60					
Mo	0.73	0.65	0.77	0.79	0.60	0.35	0.38					
Cd	0.10	0.11	0.17	0.18	0.13	0.08	0.07					
Ba	465.00	428.00	403.00	406.00	438.00	118.00	120.00					
La	24.60	24.60	29.60	29.90	23.43	14.101	15.00					
Ce	47.10	41.50	44.60	45.50	40.30	23.80	25.00					
Pr	6.45	5.43	6.34	6.59	5.12	2.96	3.40					
Nd	25.10	19.60	23.10	24.47	17.92	11.40	12.00					
Sm	5.40	4.01	4.26	4.63	3.97	2.16	2.40					
Eu	1.33	1.15	1.28	1.32	1.02	0.49	0.51					
Gd	4.46	3.04	4.16	4.29	2.93	1.93	1.90					
Tb	0.81	0.57	0.75	0.76	0.52	0.31	0.35					
Dy	4.26	3.01	3.98	4.07	2.83	1.70	1.60					
Ho	0.78	0.55	0.79	0.80	0.51	0.33	0.33					
Er	2.33	1.53	2.60	2.71	1.44	0.94	1.00					
Tm	0.35	0.25	0.36	0.40	0.21	0.14	0.17					
Yb	2.23	1.53	2.71	2.83	1.49	0.90	0.90					
Lu	0.34	0.28	0.33	0.34	0.21	0.13	0.14					
Hf	0.93	1.22	1.17	1.03	1.46	1.74	1.80					
Та	1.05	0.75	1.07	1.12	0.67	0.44	0.42					
Th	10.50	10.10	9.44	8.92	10.40	3.64	4.10					
U	1.70	1.48	2.85	3.93	1.21	1.78	1.90					
ζEu	0.81	0.98	0.93	0.90	0.88	_	_					
$(La/Sm)_N$	2.77	3.73	4.23	3.93	3.59	—	—					
LREE/HREE	7.07	8.95	6.97	6.94	9.05	_	_					
(La/Yb) _N	7.27	10.59	7.19	6.96	10.36	—	—					
$(Gd/Yb)_N$	1.60	1.59	1.23	1.21	1.57	—	—					
$T_{ m zr}$ (°C)	612	616	596	605	614	_	_					

4.3 Sr-Nd-Pb 同位素

本次研究对盐湖石英闪长岩样品进行了全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析,测试结果列于表 4,样品 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值变化范围较小,介于 0.7055~0.7058 之 间,计算 的 初 始 值 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr);为 0.7045 ~ 0.7048,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.5126~0.5126,计算的 初始值(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd);为 0.5125~0.5126, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 介于+0.5~+2.1。盐湖石英闪长岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 16.686~16.745,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 变化范围 为 15.590~15.613,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 38.864 ~38.902,计算获得 µ 值介于 9.41~9.46 之间。

4.4 锆石 Hf 同位素

在对盐湖石英闪长岩样品进行锆石 SHRIMP U-Pb 测年研究的基础上,同时对其进行了锆石的 微区原位 Hf 同位素分析,测试结果见表 5。盐 湖石英闪长岩样品中锆石的¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 比值介于 0.282921~0.283066 之间,锆石初始 Hf 同位素 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值介+7.9~+13 之间,平均值 11.4。Hf 同 位素 二阶段模式年龄 $t_{\rm DM2}$ 变化于 283~674Ma 之间。



图 7 盐湖石英闪长岩球粒陨石标准化稀土模式配分图(a)(标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化 微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element multi-variation diagrams (b) for quartz diorite from the Yanhu area (chondrite-and mantle-normalization values are from Boynton, 1984 and Sun et al., 1989)

5 讨论

5.1 岩石成因类型

盐湖石英闪长岩主量元素表现为富钠的钙碱性 岩石系列,且A/CNK值小于1(0.84~0.89),未出 现白云母、石榴子石、堇青石等特征矿物,可以排除 过铝质S型花岗岩的可能。在(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/CaO图解中(图8a),盐湖石英闪长 岩样品均落入未分异的花岗岩区域,1000Ga/Al值 较低(1.93~2.52),且未出现碱性的暗色矿物,不具 备 A 型花岗岩的地球化学特征,同时 P₂O₅ 的含量 很低(小于 0.20),且随着 SiO₂ 含量的增加而降低, 显示出 I 型花岗岩的变化趋势(图 8b)。显微镜下 观察矿物以石英、角闪石、斜长石为主。因此我们将 盐湖石英闪长岩厘定为准铝质未分异的 I 型花 岗岩。

前人获得盐湖复式岩体中二长花岗岩中的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为+5.5~+9.7, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为-0.4~+0.1 (Yu Feng,2010),与本文获得盐湖石英闪长岩样品 相近,暗示了盐湖复式岩体相似的岩浆源区,但是盐

表 4 盐湖石英闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果 Table 4 Analytic results of Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Yanhu quartz diorite

				ĩ											
投旦	$^{87}Rb/$	87 Cu / 86 Cu	2 -	(⁸⁷ Sr/	Sm	Nd	$^{147}\mathrm{Sm}/$	$^{143}\mathrm{Nd}/$	2	$(^{143}\mathrm{Nd}/$	au(t)	$^{206}\mathrm{Pb}/$	$^{207}\mathrm{Pb}/$	$^{208}\mathrm{Pb}/$	
件写	⁸⁶ Sr	51/ 51	20	${}^{86}{ m Sr})_{i}$	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁴ Nd	28	$^{144}\mathrm{Nd})_{\mathrm{i}}$	ENd(U)	$^{204}\mathrm{Pb}$	$^{204}\mathrm{Pb}$	$^{204}\mathrm{Pb}$	μ
YH-1	0.620	0.705891	0.000011	0.704842	5.40	25.1	0.130066	0.512694	0.000007	0.512593	2.1	18.73	15.612	38.902	9.46
YH-2	0.695	0.705848	0.000012	0.704672	4.01	19.6	0.123687	0.512608	0.000007	0.512512	0.5	18.686	15.613	38.864	9.46
YH-4	0.581	0.705516	0.000018	0.704533	4.26	23.1	0.111490	0.512611	0.000008	0.512524	0.8	18.745	15.590	38.887	9.41

表 5 盐湖石英闪长岩样品锆石的 Lu-Hf 同位素数据 Table 5 Zircon Lu-Hf isotopic data for Yanhu quartz diorite

点号	年龄(Ma)	$^{176}{ m Yb}/^{177}{ m Hf}$	$^{176}{ m Lu}/^{177}{ m Hf}$	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	2σ	$(^{176}{\rm Hf}/^{177}{\rm Hf})_{i}$	$\epsilon_{\rm Hf}(0)$	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	$t_{\rm DM1}({ m Ma})$	$t_{\rm DM2}({ m Ma})$	$f_{ m Lu/Hf}$
1	118.5	0.039438	0.000958	0.283031	0.000029	0.283029	9.2	11.7	312	428	-0.97
2	118.5	0.043589	0.001014	0.283069	0.000031	0.283066	10.5	13.0	259	343	-0.97
3	118.5	0.044903	0.001091	0.283067	0.000034	0.283064	10.4	12.9	263	348	-0.97
4	118.5	0.026960	0.000647	0.282954	0.000029	0.282952	6.4	9.0	419	602	-0.98
5	118.5	0.042010	0.000993	0.283095	0.000033	0.283093	11.4	13.9	221	283	-0.97
6	118.5	0.027675	0.000653	0.282991	0.000031	0.282989	7.7	10.3	367	518	-0.98
7	118.5	0.034674	0.000824	0.283014	0.000034	0.283012	8.6	11.1	335	466	-0.98
8	118.5	0.030392	0.000712	0.283067	0.000033	0.283065	10.4	13.0	260	345	-0.98
9	118.5	0.038622	0.000895	0.282959	0.000033	0.282957	6.6	9.1	414	591	-0.97
10	118.5	0.034241	0.000813	0.282922	0.000030	0.282921	5.3	7.9	465	674	-0.98
11	118.5	0.027610	0.000649	0.283040	0.000032	0.283038	9.5	12.0	298	407	-0.98
12	118.5	0.036495	0.000870	0.283063	0.000034	0.283061	10.3	12.8	267	356	-0.97

湖复式岩体中的二长花岗岩与石英闪长岩相比,更 富硅、富碱,微量元素上亏损 Ba、Sr、Zr、Hf、P、Ti 更 显著(图 7b),稀土元素配分曲线(图 7a)上,二长花 岗岩样品呈"V"型谷状,具强烈的负 Eu 异常(*ð*Eu 为 0.04~0.55),显示出 M 型四分效应的一些特 征,反映了母岩浆经历了高度的分离结晶作用,属于 高演化岩浆体系(Bau,1996; Irber,1999; Jahn et al.,2001),结合前人的研究将盐湖二长花岗岩厘 定为过铝质高分异的 I 型花岗岩。

5.2 岩浆源区

一般认为钙碱性 I 型花岗岩类主要有以下 3 种成因模式:① 下地壳变质基性岩石的部分熔融 (Chappell et al., 1974);② 幔源玄武质岩浆强烈的 分离结晶作用(Beard et al., 1991);③ 受幔源岩浆 改造的沉积物的重熔(Clemens, 2003; Kemp et al., 2007)。

目前的研究认为在过亲岩浆元素(如 Ta、Th、

La和Ce)和亲岩浆元素(如Zr、Hf和Sm)的H-(H/M)图解中,水平排列的岩石为分离结晶成因, 而倾斜排列的岩石为部分熔融成因。如图 9 所示, 盐湖石英闪长岩样品具有倾斜的排列分布,表现为 部分熔融成因,而且不相容元素,稀土元素并未发生 明显的富集,因此盐湖石英闪长岩不可能是幔源玄 武质岩浆强烈分离结晶作用的产物。一般情况下, 受幔源岩浆改造的沉积物重熔形成的岩石具有较为 宽泛的 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值(高达 10 个 ϵ 单位)(Kemp et al., 2007), 而盐湖石英闪长岩样品中锆石的 ε_{Hf}(t) 值 (+7.9~+13)变化范围相对较小(5.1个 ε 单位), 表现为相对均一的岩浆源区。另一方面,根据 Sr-Nd 同位素体系,选取盐湖玄武岩代表新生下地壳 的幔源端元,宁中过铝质 S 型花岗岩代表拉萨地块 古老基底的熔体,如图 10 所示,盐湖花岗闪长岩与 盐湖玄武岩同位素组成相似,表明岩浆源区并未受 到古老基底物质的混合,原始岩浆可能直接来源于



图 8 盐湖石英闪长岩样品(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/CaO 图解(a)(Whalen et al., 1987)和 SiO₂-P₂O₅ 图解(b) Fig. 8 (Zr+Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/CaO (Whalen et al., 1987)(a) and SiO₂-P₂O₅(b) diagrams for Yanhu quartz diorite



图 9 盐湖石英闪长岩样品 Th/Hf-Th (a)和 Ce/Zr-Ce (b)图解 Fig. 9 Th/Hf-Th (a) and Ce/Zr-Ce (b) diagrams for Yanhu quartz diorite



图 10 盐湖石英闪长岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-e_{Nd}(t) 图解 (据 Wang et al., 2014)

 Fig. 10
 Plots of (*7 Sr/*6 Sr); vs. whole-rock ε_{Nd}(t)

 of theYanhu quartz diorite (after Wang et al., 2014)

 用于混合计算的端元:新生地壳(以~130Ma 盐湖玄武岩为代表;

 Sui Qinglin, 2014):(*7 Sr/*6 Sr);=0.7042, ε_{Nd}(t)=3.8, ε_{Hf}(t)=

 12.9, Sr=528×10⁻⁶, Nd=13.5×10⁻⁶; 拉萨基底熔体(以强过

 榴花岗岩样品 08DX17 为代表;据 Zhu et al., 2011):(*7 Sr/*6 Sr);

 =0.7402, ε_{Nd}(t)=-15.4, Sr=131×10⁻⁶, Nd=43.40×10⁻⁶

 The compositions of end-members used for mixing calculations

 are: the juvenile lower crust (represented by ca. 130 Ma Yanhu

 basalts;Sui Qinglin, 2014):(*7 Sr/*6 Sr);=0.7042, ε_{Nd}(t)=3.8,

 ε_{Hf}(t)=12.9, Sr=528×10⁻⁶, Nd=13.5×10⁻⁶; the Lhasa

 basement-derived melt (represented by a strongly peraluminous

 granite sample of 08DX17; Zhu et al., 2011):(*7 Sr/*6 Sr);=

 0.7402, ε_{Nd}(t)=-15.4, Sr=131×10⁻⁶, Nd=43.40×10⁻⁶

亏损地幔的部分熔融或者是具亏损地幔印记的新生 下地壳的部分熔融(Salters and Hart, 1991; Corfu and Stott, 1993; Peter and Roland, 2003),因此排 除了沉积物熔体参与的可能。样品微量元素原始比 值的平均值(La/Nb=2.21, Th/Nb=0.84, Th/La =0.38, Rb/Sr=0.21),明显不同于原始地幔的平 均值(La/Nb=0.94, Th/Nb=0.177, Th/La= 0.125, Rb/Sr=0.034), 而是相对接近大陆地壳的 平均值(La/Nb=2.2, Th/Nb=0.44, Th/La= 0.204, Rb/Sr = 0.35; Saunders et al., 1988, Weaver, 1991, Taylor and McLennan, 1995), 暗示 了壳源的岩浆源区。样品主量元素具有相对高的 SiO₂ 含量以及相对低的 Mg[#] 值(32.62~38.22), 明显不同于地幔直接部分熔融形成的岩浆(Kamei et al., 2004; Jiang et al., 2006), 而与玄武质岩石 部分熔融形成的中酸性岩浆相似(Rapp et al., 1999)。多数学者认为,铅同位素计算出的μ值大 于 9.58 具高放射成因壳源 Pb 的特征,代表了上地 壳的平均值, μ 值小于 9.58,为低放射成因 Pb,而地 幔的 Pb 同位素组成为 8~9(Doe and Zartman, 1979),盐湖石英闪长岩样品的 μ 值为 9.41 至 9.46,低于上地壳,但明显高于地幔,以上特征表明 原始岩浆可能直接来源于新生的下地壳。如图 11 所示,样品点落入了 MORB 与 EM [[之间,且相对 更接近 MORB 区域,一般认为,EMII 型地幔与俯冲 及陆壳再循环的壳幔相互作用密切相关(Hart, 1988; Sun and McDonough, 1989; Menzies, 1990; Weaver, 1991),表明源区主体可能为俯冲背景相 关的新生玄武质下地壳。

盐湖石英闪长岩样品 Sr 含量(平均 441× 10⁻⁶)较高,具微弱的 Eu 负异常(0.81~0.98),Y 含量(平均 19.36×10⁻⁶)和 Yb 含量(2.15×10⁻⁶) 相对较低,表明源区无或具少量斜长石的残留,且可 能存在少量石榴子石。然而样品重稀土元素配分曲 线较为平坦,且 Y/Yb 比值介于 8.56~9.55 之间 (小于 10),表明岩浆源区主要残留相为角闪石,而 非石榴子石(Sun Deyou et al., 2004)。因此我们认 为盐湖石英闪长岩的残留相可能是含石榴子石角闪 岩。实验岩石学的研究也表明,镁铁质下地壳岩石 在角闪岩相条件下脱水熔融可以产生中酸性岩浆 (Rushmer, 1991; Rapp et al., 1995; Pedford et al., 2001)。综上所述,盐湖石英闪长岩很可能是 具亏损地幔印记的新生下地壳在角闪岩相条件下发 生部分熔融作用形成的。

5.3 地球动力学背景探讨

盐湖石英闪长岩位于大型的盐湖复式花岗岩体 的北西部,有关盐湖复式岩体形成的地球动力学机



图 11 盐湖石英闪长岩 ²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb-²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 图解 (据 Zindler et al., 1986)

Fig. 11 207 Pb/ 204 Pb- 206 Pb/ 204 Pb diagram for the Yanhu quartz diorite (after Zindler et al. , 1986)

DDM—亏损型地幔; HIUH—异常高²³⁸U/²⁰⁴Pb型地幔;

EMI-富集 I 型地幔;EMII-富集 II 型地幔

DMM—Depleted MORB mantle; HIUM—high U/Pb mantle; EMI—type I enriched mantle; EMII—type II enriched mantle 制,前人已经进行了大量的研究(Yu Feng, 2010; Zhu et al., 2011; Sui et al., 2013)。已有的研究 表明,区域上在113±5Ma期间发育了一套代表伸 展背景的岩石组合(Zhu et al., 2011), Qu et al. (2012) 在班公湖-怒江缝合带的中部地区识别出一 组 A₂ 型花岗岩,形成时代为 114~110Ma; Chen et al. (2014) 在拉萨地块的中北部发现一套板内玄武 岩与 A₂ 型花岗岩的岩石组合,形成时代为~ 113Ma; Sui et al. (2013)获得盐湖地区高镁玄武岩 及双峰式火山岩的年龄在 112~109Ma 之间。总体 上,118~110Ma期间拉萨地块中北部表现出高温 特点的岩浆作用,并且有更多幔源物质的参与(Zhu et al., 2016)。因此将盐湖二长花岗岩的形成背景 解释为班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲板片发生断 离引起上覆岩石圈的伸展背景(Zhu et al., 2011; Qu Xiaoming et al., 2013)。然而本文研究获得的 盐湖石英闪长岩形成时代(~118Ma)要稍早于盐湖 二长花岗岩(~107Ma)以及流纹岩(~110Ma)的形 成时代(Yu Feng, 2010)。岩石地球化学特征方面 也存在明显差异,盐湖石英闪长岩样品属于准铝质 未分异的钙碱性系列岩石,而盐湖二长花岗岩及流 纹岩总体上表现出一套过铝质高度分异的高钾钙碱 性系列岩石。因此,不能简单地将盐湖复式岩体划 归为统一的构造背景。

盐湖石英闪长岩样品微量元素富集 Rb、K、Th、 U 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素 (LREE),强烈亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti 等高场强 元素(HFSE)和重稀土元素(HREE),这些特征与 俯冲带弧岩浆岩地球化学特征相似,在(Yb+Ta)-Rb、(Y+Nb)-Rb、Yb-Ta、Y-Nb 图解中(图 12),盐 湖石英闪长岩样品点均落入了火山弧花岗岩区域, 且与西部的阿翁错岩体相似,暗示两个岩体的形成 于统一的构造背景,可能与板片俯冲有关。

由于受到软流圈上涌带来的热作用,板片断离 引起上覆岩石圈熔融形成的岩石通常具有较高的结 晶温度,例如,西藏冈底斯东段察隅高分异的 I 型花 岗岩锆石饱和温度为 789~821℃(Zhu Dingcheng et al.,2009),甚至达到了 A 型花岗岩的形成温度 (800℃以上)(Peng et al.,2017)。对于盐湖复式岩 体,Yu Feng(2010)计算得到二长花岗岩的锆石饱 和温度为 733~795℃,而本文通过计算分析,盐湖 石英闪长岩的锆石饱和温度明显低于二长花岗岩,



图 12 盐湖石英闪长岩(Yb+Ta)-Rb (a)、(Y+Nb)-Rb (b)、Yb-Ta (c)、Y-Nb (d)图解(据 Pearce,1984) Fig. 12 (Yb+Ta)-Rb, (Y+Nb)-Rb, Yb-Ta and Y-Nb diagrams for the Yanhu quartz diorite (after Pearce,1984)

介于 596~614℃之间(计算公式 T_{xx} (℃) = {12900/ [lnD_{xt(培体)} + 0.85M+2.95]}-273, M = (Na+K+ 2Ca)/(Si×Al), Watson and Harrison, 1983), 与俯 冲背景下的 I 型花岗岩相近(King et al., 1997)。 因此通过对比我们认为, 盐湖石英闪长岩的形成与 113±5Ma 期间发生的高温、伸展构造背景的岩浆 作用明显不同, 暗示了石英闪长岩形成尚未受到软 流圈上涌的热作用, 更可能与板片断离前的俯冲背 景密切相关。

区域上的研究表明,早于盐湖石英闪长岩产出 的还发育一套中基性火山岩组合,包括钙碱性安山 岩,高铝玄武岩,石英闪长岩等,形成时代介于130 \sim 116Ma(Sui Qinglin, 2014; Yu Yushuai et al., 2018),记录了班公湖-怒江特提斯洋的南向俯冲。 在昂龙岗日-盐湖岩浆弧中,与盐湖石英闪长岩近于 同期集中发育了120~117Ma中酸性侵入岩,包括 阿翁错岩基花岗岩(~120Ma)及其闪长质包体(~ 117Ma),均表现为一套未分异的 I 型花岗岩类(数 据未刊出),这套未分异的花岗岩类主要形成于班公 湖-怒江特提斯洋南向俯冲作用的晚期,表明120~ 117Ma 期间北拉萨地块西段构造体制经历了重要 的转变。综合研究认为在早白垩世北拉萨地块有两 期集中爆发的岩浆活动,分别为113±5Ma的双峰 式火山岩,A2型花岗岩,高分异过铝质的 I 型花岗 岩构成的一套高温、伸展背景的岩石组合以及120 ~117Ma的钙碱性安山岩,高铝玄武岩,未分异准 铝质的I型花岗岩构成的一套与俯冲作用相关的岩 石组合,前者代表了板片断裂上覆岩石圈伸展的构 造背景,后者可能代表了板片断离前,持续俯冲的板 片发生了折返,同时考虑到该时期火山岩以及中酸 性侵入岩均分布于相对狭窄的 NW-SE 向线性区 域,我们认为该时期班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲 板片角度变陡,高角度的俯冲作用导致洋壳板片发 生大规模脱水作用,释放富含溶解物的流体交代上 地幔,并诱发其部分熔融。部分熔融的地幔熔体形 成玄武质岩浆,玄武质岩浆发生底侵作用,加剧了壳 幔间的相互作用,促使北中拉萨地块新生下地壳物 质发生部分熔融,随后原始岩浆快速上侵至浅部地 壳,形成 NW-SE 向的昂龙岗日、阿翁错以及盐湖复 式岩体中早期未分异的I型花岗岩类。

6 结论

(1)盐湖石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为118.5±1.9Ma,属早白垩世晚期,早于盐湖二长

花岗岩的形成时代。

(2)盐湖石英闪长岩为富钠的钙碱性岩石系列, 属准铝质未分异的 I 型花岗岩,很可能是具亏损地 幔印记的新生下地壳在角闪岩相条件下发生部分熔 融作用形成的。

(3)盐湖石英闪长岩具有相对低的锆石饱和温 度(596~614℃),可能形成于板片断离前,班公湖-怒江特提斯洋持续南向俯冲的板片发生折返,俯冲 角度变陡的深俯冲背景。

致谢:感谢自然资源部科技与国际合作司赵财 胜处长为笔者提供的支持,感谢编辑部周老师的认 真修改以及审稿人的宝贵意见。锆石样品制靶、 SHRIMP U-Pb 测年工作得到北京离子探针中心各 位老师的帮助,岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素测 试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完 成,锆石 Hf 同位素由中国地质调查局西安地质调 查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 协助完成,在此一并表示感谢。

注 释

 四川省地质调查院.2004.中国人民共和国区域地质调查报告1: 250000 革吉县幅.

References

- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems; Evidence from Y/ Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. Contributions to Mineralogy and Petrology, 123(3); 323~333.
- Beard J S, Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and watersaturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6. 9 kb. Journal of Petrology, 32: 365~401.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200: 155~170.
- Blichert T J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148: 243~258.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Rare Earth Element Geochemistry, 63 \sim 114.
- Chang Qingsong, Zhu Dingcheng, Zhao Zhidan, Dong Guochen, Mo xuanxue, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, 2011. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Early Cretaceous Rena-Co rhyolites from southern margin of Qiangtang, Tibet, and their implications. Acta Petrologica Sinica, 27: 2034 \sim 2044 (in Chinese with English abstract).
- Chappell B W, White A J R. 1974. Twocontrasting granite types. Pacific Geology, 8: 173~174.
- Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, Meng F Y, Wang Q, Santosh M, Wang L Q, Dong G C, Mo X X. 2014. Slab breakoff triggered ca. 113Ma magmatism around Xainza area of the Lhasa Terrane, Tibet. Gondwana Research, 26(2):449~463.
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence. Earth Science Reviews, 61(1-2): $1\sim18$.

- Corfu F, Stott G M. 1993. Age and petrogenesis of two Late Archean magmatic suites, northwestern superior province, Canada: Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic relation. Journal of Petrology, 34: 817~838.
- Doe B R, Zartman R E. 1979. Plumbotectonics, the phanerozoic. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2: 22~70.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbergh E V, O' Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1): 133~147.
- Hart S R. 1988. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies. Earth & Planetary Science Letters, 90(3): 273~296.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2595~2604(in Chinese with English abstract).
- Hsü K J, Guitang P, Sengör A M C. 1995. Tectonic evolution of theTibetan plateau: a working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. International Geology Review, 37: 473~508.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3-4): 489~508.
- Irvine T H, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8:523~548.
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H, Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. Lithos, 59(4):171~198.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Liang H F, Dai B Z. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogr-anite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. Earth and Planetary Science Letters, 241:617~663.
- Kamei A, Owada M, Nagao T, Shiraki K. 2004. High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, Southern Japan arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions. Lithos, 75:359~371.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, Paterson B A, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. Science, 315: 980~983.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. J. Petrol., 38: 371~391.
- Li J X, Qin K Z, Li G M, Richards J P, Zhao J X, Cao M J. 2014. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic intermediate-felsic intrusions in central Tibet: petrogenetic and tectonic implications. Lithos, 198~199(1): 77~91.
- Li S M, Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Sui Q L, Liu S A, Liu D, Mo X X. 2014. Northward subduction of Bangong-Nujiang Tethys: insight from Late Jurassic intrusive rocks from Bangong Tso in western Tibet. Lithos, 205: 284~297.
- Li S M, Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Zhang L L, Liu S A, Chang Q S, Lu Y H, Dai J C, Zheng Y C. 2016. Slab-derived adakites and subslab asthenosphere-derived OIB-type rocks at 156±2 Ma from the north of Gerze, central Tibet: Records of the Bangong-Nujiang oceanic ridge subduction during the Late Jurassic. Lithos, 262: 456~469.
- Lin Bin, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, Feng Jun, Li Yanbo, Tang Xiaoqian, Lin Xin, Liu Zhibo, Wang Yiyun, Fang Xiang, Yang Chao, Yang Huanhuan, Fei

Fan, Li Li, Gao Ke. 2016. Zircon U-Pb Ages and Hf isotopic composition of the ore-bearing porphyry in Dibao Cu (Au) deposit, Duolong ore concentration area, Xizang (Tibet), and its geological significance. Geological Review, $62(6):1565 \sim 1578$ (in Chinese with English abstract).

- Lin Bin, ChenYuchuan, Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, Fang Xiang, Liu Zhibo, Wang Yiyun, Feng Jun, Li Yanbo, Yang Huanhuan, Chen Lie, Fu Yangang. 2017. Geochronology and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of ore-bearing porphyry in the Dongwodong copper polymetallic deposit, North Tibet and their implications for exploration direction. Acta Geologica Sinca, 91 (9):1942~1958 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 310-A geochronological toolkit for Microsoft Excel. U. S. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1~70.
- Maniar M L, Kalonia D S, Simonelli A P. 1989. Use of liquid chromatography and mass spectroscopy to select an oligomer representative of polyester hydrolysis pathways. Journal of Pharmaceutical Sciences, 78(10): 858~862.
- Menzies M A. 1990. Archaean, Proterozoic, Phanerzoiclithospheres. In: Menzies M A, ed. Continental Mantle. New York: Oxford Science Publications, 67~86.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Dong Guochen, Zhou Su, Guo Tieying, Zhang Shuangquan, Wang Liangliang. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 10(3): 135~148 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Li Guangming, Zhao Zhidan, Geng Ruquan, Liao Zhongli. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution. Acta Petrologica Sinica, 22 (03): 521~533 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1984. Trace Element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry ofEocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy & Petrology, 58(1): 63 ~81.
- Peter D K, Roland M. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems inzircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 327 ~341.
- Petford N, Gallagher K. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. Earth & Planetary Science Letters, 193(3):483~499.
- Qu X M, Wang R J, Xin H B, Jiang Y H, Chen H. 2012. Age and petrogenesis of A-type granites in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibetan plateau. Lithos, 146~147 (8): 264~275.
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Du Dedao, Chen Hua. 2013. Magma source of the A-type granite and slab break-off in the midddle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibet plateau. Acta Geologica Sinica, 87(6):759~772 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crustmantle recycling. Journal of Petrology, 36: 891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction betweens lab derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constramts at 3. 8 GPa. Chemical Geology, 160: 335~356.
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. Contributions to Mineralogy & Petrology, 107(1):41~59.
- Salters V T M, Hart S R. 1991. The mantle sourceocean ridges, island, arcs: The Hf-isotope connection. Earth and Planetary Science Letters, 104: 364~380.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J. 1988. Origin of MORB andchemically-depleted mantle reservoirs. Trace element

constraints. Journal of Petrology, Special_Volume (1): 415 ${\sim}445.$

- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48 (Suppl.): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Sui Q L, Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Chen Y, Santosh, M., Hu Z C, Yuan H L, Mo X X, 2013. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone. Lithos, $168 \sim 169(3)$; 144 ~ 159 .
- Sui Qinglin. 2014. Chronology, petrogenesis, and tectonic implication of magmatic rocks from Yanhu in northern Lhasa Terrane, Tibet. Dissertation for master degree of China University of Geosciences (Beijing), 1~99 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Gao Shan. 2004. The final closing time of West Lumulun River-Changchun-Yanji plate suture zone. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), (02): 174~181 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunder A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 2: 313~345.
- Tang Juxing, Zhang Zhi, Li Zhijun, Sun Yan, Yao Xiaofeng, Hu Zhenghua, Wang Hongxing, Song Junlong, He Lin. 2013. The metallogenis, deposit model and prospecting direction of the Ga' erqiong-Galale copper-gold ore field, Tibet. Acta Geoscientica Sinica, 34(04):385~394 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Sun Xingguo, Ding Shuai, Wang Qin, Wang Yiyun, Yang Chao, Chen Hongqi, Li Yanbo, Li Yubin, Wei Lujie, Zhang Zhi, Song Junlong, Yang Huanhuan, Duan Jilin, Gao Ke, Fang Xiang, Tan Jiangyun. 2014. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet. Acta Geoscientica Sinica, 35(01):6 ~10 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, Lin Bin, Yang Chao, Guo Na, Fang Xiang, Yang Huanhuan, Wang Yiyun, Gao Ke, Ding Shuai, Zhang Zhi, Duan Jilin, Chen Hongqi, Su Dengkui, Feng Jun, Liu Zhibo, Wei Shaogang, He Wen, Song Junlong, Li Yanbo, Wei Lujie. 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. Acta Geoscientica Sinica, 37(06): 663~690(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Q, Yang Huanhuan, Gao Xin, Zhang Zebin, Zhou Bing. 2017. Mineralization, exploration and resource potential of porphyry-skarn-epithermal copper polymetallic deposits in Tibet. Acta Geoscientica Sinica, 38(05):571~613 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. Layered Igneous Rocks. San Francisco: Freeman WH & CO, 150~203.
- Wang B D, Wang L Q, Chung S L, Chen J L, Yin F G, Liu H, Li X B, Chen L K. 2016. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan ocean: insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites. Lithos, 245: 18 ~33.
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Liu S A, Chung S L, Li S M, Liu D, Dai J G, Wang L Q, Mo X X. 2014. Origin of the ca. 90 Ma magnesia-rich volcanic rocks in SE Nyima, central Tibet: Products of lithospheric delamination beneath the Lhasa-Qiangtang collision zone. Lithos, 198~199(3):24~37.
- Wang Qin, Lin Bin, Tang Juxing, Song Yang, Li Yubin, Hou Junfu, Li Yubin, Wei Lujie. 2018. Diagenesis, lithogenesis and geodynamic setting of intrusions in Senadong area, Duolong district, Tibet. Earth Science, 43(04):1125~1141(in Chinese with English abstract).

- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited, temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64: 295 \sim 304.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end member compositions: trace element and isotopic constrains. Earth and Planetary Science Letters, 104(2-4): 381~397.
- Wei S G, Tang J X, Song Y, Liu Z B, Feng J, Li Y B. 2017. Early Cretaceous bimodal volcanism in the Duolong Cu mining district, western Tibet. Record of slab breakoff that triggered ca. 108~113 Ma magmatism in the western Qiangtang terrane. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 588~607.
- Wei Shaogang, Tang Juxing, Song Yang, Liu Zhibo, Wang Qin, Lin Bin, He Wen, Feng Jun. 2017. Petrogenesis, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the intermediatefelsic volcanic rocks from the Duolong deposit in the Bangonghu-Nujiang suture zone, Tibet, and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 91 (1): 132 ~ 150 (in Chinese with English Abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Yang Jialin, Gu Yuchao, Yang Fengchao, Li Dongtao, Ju Nan, Jia Hongxiang. 2018. SHRIMP U-Pb ages, elements geochemistry and Hf isotopic characteristics of the Dajinshan granite in Liaodong peninsula and geological significance. Geological Review, 64 (6): 1541 ~ 1556 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Harrison T M. 2003. Geologicevolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 28(28): 211~280.
- Yu Feng. 2010. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the granitoid in southern Yanhu of Gangdese, Tibet. Dissertation for master degree of China University of Geosciences (Beijing), $1 \sim 62$ (in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Gao Yuan, Yang Zhusen, Tian Shihong, Zhou Yun, Zhang Weiqiang. 2018. Geochronology and genesis of quartz diorite-porphyrites of the Deneng copper polymetallic deposit, Coqen, Tibet, China: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. Acta Geologica Sinica, 92(7):1458~1473 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Pan G T, Wu F Y. 2009a. Zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of Permian peraluminous granite in the Lhasa terrane, southern Tibet: implications for Permian collisional orogeny and paleogeography. Tectonophysics, 469: 48~60.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S, Wu F Y. 2009b. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-westtraverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. Chemical Geology, 268: 298~312.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. Earth and Planetary Science Letters, 301: 241~255.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. Gondwana Research, 23(4): 1429~1454.
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, Wang Q, Zhao Z D, Liu S A, Wang L Q. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction. Lithos, 245:7~17.
- Zhu Dingcheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, Zhao Zhidan, Niu Yaoling Zhou Changyong, Yang Yueheng. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. Science China (Ser D-Earth Sci), 39(07):833~848 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. Annual Review

of Earth and Planetary Sciences, 14(1): 493~573.

参考文献

- 常青松,朱弟成,赵志丹,董国臣,莫宣学,刘勇胜,胡兆初.2011. 西藏羌塘南缘热那错早白垩世流纹岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素及其意义.岩石学报,27(07):2034~2044.
- 侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若,谢桂青.2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报,23 (10):2595~2604.
- 林彬,陈毓川,唐菊兴,宋扬,王勤,冯军,李彦波,唐晓倩,林鑫, 刘治博,王艺云,方向,杨超,杨欢欢,费凡,李力,高轲. 2016. 西藏多龙矿集区地堡 Cu(Au)矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义.地质论评,62(6):1565 ~1578.
- 林彬,陈毓川,唐菊兴,宋扬,王勤,方向,刘治博,王艺云,冯军, 李彦波,杨欢欢,陈列,付燕刚.2017.藏北东窝东铜多金属矿 床含矿斑岩年代学、Sr-Nd-Pb 同位素及成矿预测.地质学报, 91(9):1942~1958.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘, 10(3):135~148.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,朱弟成,王立全,李光明,赵志丹,耿全 如,廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学 报,22(03):521~533.
- 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.地质学报,87(6):759 ~772.
- 宋彪,张玉海,万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作年龄测定 及有关现象讨论. 地质论评,48(增刊):26~30.
- 隋清霖. 2014. 西藏拉萨地块盐湖地区早白垩世岩浆岩年代学、岩 石成因及构造意义.中国地质大学(北京)硕士学位论文,1~99.
- 孙德有,吴福元,张艳斌,高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块 缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版),02:174~181.
- 唐菊兴,张志,李志军,孙燕,姚晓峰,胡正华,王红星,宋俊龙,

何林. 2013. 西藏尕尔穷-嘎拉勒铜金矿集区成矿规律、矿床模型与找矿方向.地球学报,34(04):385~394.

- 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,高轲,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.地球学报,35(01):6~10.
- 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,粟登逵,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.地球学报,37(06):663~690.
- 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. 地球学报,38(05):571~613.
- 王勤,林彬,唐菊兴,宋扬,李彦波,侯俊富,李玉彬,卫鲁杰. 2018. 多龙矿集区色那东岩体年龄、成因与动力学背景.地球科 学,43(04):1125~1141.
- 韦少港,唐菊兴,宋扬,刘治博,王勤,林彬,贺文,冯军.2017.西 藏班公湖-怒江缝合带美日切错组中酸性火山岩锆石 U-Pb 年 龄、Sr-Nd-Hf 同位素、岩石成因及其构造意义.地质学报,91 (1):132~150.
- 杨佳林,顾玉超,杨凤超,李东涛,鞠楠,贾宏翔. 2018. 辽东半岛 大金山花岗岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、元素地球化学和 Hf 同 位素特征及地质意义. 地质论评,64(6):1541~1556.
- 于枫.2010. 西藏冈底斯盐湖南部花岗岩的岩石学、地球化学与成因.中国地质大学(北京)硕士学位论文,1~62.
- 于玉帅,高原,杨竹森,田世洪,周云,张炜强. 2018. 西藏措勤县德 能铜多金属矿床石英闪长玢岩时代与成因:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 地质学报,92 (07):1458~1473.
- 朱弟成,莫宣学,王立全,赵志丹,牛耀龄,周长勇,杨岳衡.2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代 学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束.中国科学(D辑:地球科 学),39(07):833~848.

Petrogenesis of the quartz diorite in the Yanhu area of Lhasa terrance, Tibet: constraints from zircon SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes

PENG Bo¹⁾, LI Baolong^{*1)}, QIN Guangzhou²⁾, ZHOU Lei³⁾, LI Yufei⁴⁾

 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037;

2) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

3) Geochemistry Exploration Brigade of Sichuan Bureau of Exploration and Development

of Geology and Minerals Resources, Deyang, Sichuan, 618000;

4) The Inner Mongolia Geological Survey Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Huhehaote,010000
 * Corresponding author: xinzhongguolong@163.com

Abstract

The compositional diversity of rock types in the Yanhu area is usually considered as the tectonic setting that southward subduction of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean lithosphere broken off. In this paper, we report for the first time the zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition data, wholerock major and trace element composition data, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic data from Yanhu quartz diorite. SHRIMP U-Pb dating yields a weighted mean of 118.5 \pm 1.9 Ma, indicating that Yanhu quartz diorite belongs to late Early Cretaceous. Geochemically, the quartz diorite from Yanhu belongs to Na-rich calcalkali series, $A/CNK=0.84\sim0.89$ and are metaluminous. The quartz diorite enriched in Rb,K,Th,U and light rare earth elements (LREEs), relatively depleted in Nb, Ta, Zr, Hf, P, Ti and heavy rare earth elements (HREEs), without Eu anomalies ($\delta Eu = 0.81 \sim 0.98$). No alkaline mafic minerals and muscovite were observed duringoptical microscopy. All these features above suggest that quartz diorite belongs to metaluminous unfractionated I-type granite. The quartz diorite yielded whole-rock $\varepsilon_{Nd}(t)$ of $\pm 0.5 \sim \pm 2.1$ and $({}^{87} \text{Sr}/{}^{86} \text{Sr})_i = 0.7045 \sim 0.7048$, the zircons $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are $+7.9 \sim +13$, and the model ages (t_{DM2}) range 283 Ma to 674 Ma. Based on integrated isotopic and geochemical data, we infer that the quartz diorite formed by the partial melting of juvenile lower crustal material derived from depleted mantle under amphibolite facies. Based on the above data, combined with the regional geological background, we conclude that the quartz diorite are different from granites in Yanhu composite body in age and geochemical characteristics, have relative low zircon saturated temperature (596 \sim 614 °C), suggesting mantle-derived materials had not involved in the petrogenesis of the Yanhu quartz diorite, the parent magma may formed before the slab broke off, sustainable subducted slab of Bangong-Nujiang Tethyan ocean had returned and the subduction angle becomes steep, enter geodynamic movement of deep subduction.

Key words: North Tibet; Bangong-Nujiang Tethyan ocean; Lhasa terrance; Yanhu composite body; SHRIMP U-Pb geochronology; Sr-Nd-Pb-Hf isotopes