

西准噶尔包古图富镁闪长质岩墙的时代、 地球化学特征以及铜金成矿意义

尹继元¹ 陈文¹ 喻顺¹ 龙晓平²
袁超² 张彦¹ 李洁¹ 孙敬博¹ 刘新宇¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 同位素热年代学实验室, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 西准噶尔包古图地区广泛发育富镁闪长质岩墙。对这些岩墙进行角闪石 Ar-Ar 和锆石 U-Pb 定年分别获得 (313.1±3.5)Ma 和 (316.3±3.8) Ma 的年龄, 显示其主要形成于晚石炭世。闪长质岩墙以富 Si(SiO₂=56.8 %~62.9 %)、Mg(MgO=2.39 %~4.04 %、Mg#=54~62)、Cr(Cr=30×10⁻⁶~80×10⁻⁶)、Ni(Ni=20×10⁻⁶~62×10⁻⁶)为特征, 具有弱的 Eu 负异常和高 Sr/Y 比值(36~44), 强烈亏损 HREE(Yb=1.32×10⁻⁶~1.54×10⁻⁶、Y=13.1×10⁻⁶~15.5×10⁻⁶), 富集 LILE(K、Sr、Ba), 亏损 HFSE(Nb、Ta、Ti)。这些特点显示, 这些闪长质岩墙可能是由俯冲的板片熔体与地幔橄榄岩反应而成, 与洋脊俯冲有关。而闪长质岩墙的形成过程也有利于铜金矿床的形成, 显示该区有良好的成矿远景。

关键词: 包古图; 富镁闪长岩; 岩墙; 锆石 U-Pb; 角闪石 Ar-Ar; 铜金矿化; LA-ICP-MS

中图分类号: P588.12³; P597³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)04-1030-14

石炭—二叠纪是西准噶尔构造演化和成矿作用的一个关键时期^[1-8], 但对这一关键时期的地球动力学背景仍然存在着争议。一些学者认为是后碰撞环境^[9-15], 另一些学者则认为是岛弧环境^[16-17], 而最新的一些研究则认为是洋脊俯冲环境^[18-25]。西准地区出露有大量晚古生代中基性岩墙, 是了解该区成矿背景和构造演化的重要窗口。前人西准噶尔地区中基性岩墙开展过年代学和地球化学研究, 认为这些岩墙由高 Mg、低 Mg、辉绿质岩石组成, 形成于 241~271 Ma, 是后碰撞作用的产物^[13, 26-27]。目前的研究显示, 这些岩墙中还包括有赞岐质, 富 Mg 质, 富 Nb 质岩石, 形成于 292~321 Ma, 是洋脊俯冲作用的产物^[20-25, 28-30]。上述研究主要集中在克拉玛依和红山地区。包古图是西准噶尔乃至中亚造山带重要的铜金成矿区, 该地区也分布有大量的中基性岩墙, 对这些

岩墙缺乏系统的地质研究, 尤其是年代学方面的研究, 这在很大程度上限制了对该区成矿规律和构造演化的深入探索。因此, 本文以包古图地区的中基性岩墙(尤其高镁质岩墙)为研究对象, 开展锆石 U-Pb 和角闪石 Ar-Ar 测年, 结合地球化学研究, 有望制约包古图中基性岩墙的结晶年龄, 并讨论其岩石成因和成矿意义。

1 构造背景和样品来源

西准噶尔包古图地区位于达拉布特断裂以南, 克拉玛依市以西(图 1)。该区下石炭统是一套与海相火山活动有关的浊积岩层, 主要沉积地层包括希贝库拉斯组、包古图组和太勒古拉组。太勒古拉组下部为一套海底喷发的玄武岩熔岩、玄武质凝灰岩、凝灰质角砾岩和硅质岩等; 上部为一套浊流沉积相、由层

收稿日期: 2013-03-13; 改回日期: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(41203026, 41273012), 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J1209), 公益性行业专项经费(201211074-05)和中国地质调查局地质矿产调查评价专项(12120113015600)联合资助。

作者简介: 尹继元, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事同位素年代学和地球化学研究, E-mail: yinjiyuan1983@163.com。

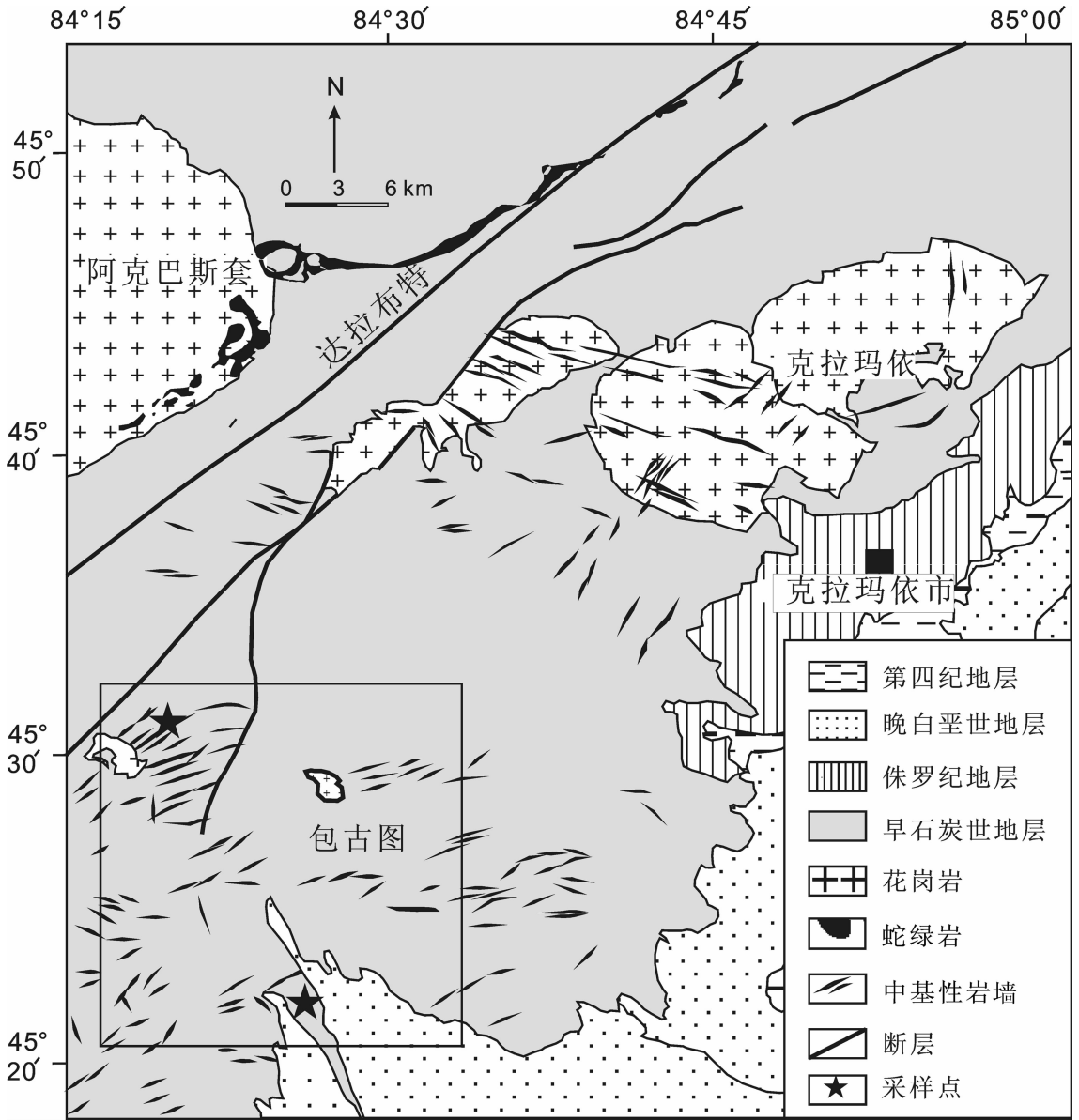


图 1 新疆西准噶尔中基性岩墙群分布示意图
 (据新疆维吾尔自治区区域地质图(1:200000)——克拉玛依幅和尹继元等^[21])
 Fig.1 Distribution of intermediate-basic dykes in west Junggar

理不清晰的硅质粉砂岩、凝灰质粉砂岩、硅质泥岩、粉砂质泥岩组成,局部见硅质条带^[31]。包古图组主要出露在包古图和柳树沟等地,该组主要为凝灰质砂岩、层凝灰岩、凝灰质粉砂质泥岩、凝灰质砂岩、凝灰岩、砂岩、硅质岩。佟丽莉等^[32]对包古图组中的安山岩进行锆石 LA-ICP-MS 测年,获得锆石 U-Pb 年龄(345.6±6.2) Ma,而这套安山岩为一套深海相细碎屑岩夹火山熔岩韵律沉积,主要岩性为灰至灰黑色玄武质火山角砾岩、杏仁状玄武岩、杏仁状安山岩及粗安岩等,与其密切伴生的有泥质硅质岩、硅质粉砂

岩夹紫红色硅质岩和沉凝灰岩等。安芳和朱永峰^[33]在包古图组的蚀变凝灰岩中获得了 328~342 Ma 的最新锆石年龄。希贝库拉斯组主要出露在达拉布特断裂西部地区的包古图河东北侧希贝库拉斯一带。该组主要为灰、青灰色厚层凝灰质砂岩与层凝灰岩并含有大量浊流沉积的灰岩、泥岩和生物碎屑灰岩岩块或透镜体,富含化石。

包古图分布着各类中酸性侵入岩,主要以中大型的岩株,超浅成相的岩枝或岩墙形式产出。它们主要由闪长岩、石英闪长斑岩、闪长玢岩和花岗闪长斑

岩等组成,侵入到下石炭统中。这些侵入岩的锆石 U-Pb 定年结果集中在 310~332 Ma^[34-35]。而包古图斑岩铜矿中辉钼矿的 Re-Os 定年结果为 310~315 Ma^[36-38]。

包古图地区岩墙走向以 NNE 向为主,侵入到下石炭统之中(图 2)。本文研究样品采自包古图河流域两侧的铜金矿区内。岩墙主要由闪长质岩石组成,斑状结构为主,矿物组合主要有斜长石(35%~40%)、角闪石(30%~35%)、辉石(5%~15%)、钾长石和石英含量小于 5%,副矿物有不透明氧化物、锆石和磷灰石。

2 实验方法

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在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完成,所用仪器为 Finnigan Neptune MC-ICP-MS 和与之配套的 New Wave UP213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所在束斑直径为

25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U,Th 含量以锆石 M127(U:923 $\times 10^{-6}$; Th:439 $\times 10^{-6}$;Th/U:0.475)^[39]为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定 2 个锆石 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序^[40],测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石 U-Pb 谐和图由 Isoplot 3.0 程序获得,详细实验测试过程可参见相关文献^[41]。本次样品分析过程中,Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 (335.7 ± 2.5)Ma(n=6,2 σ),对应的年龄推荐值为 (337.13 ± 0.37)Ma(2 σ)^[42],两者在误差范围内

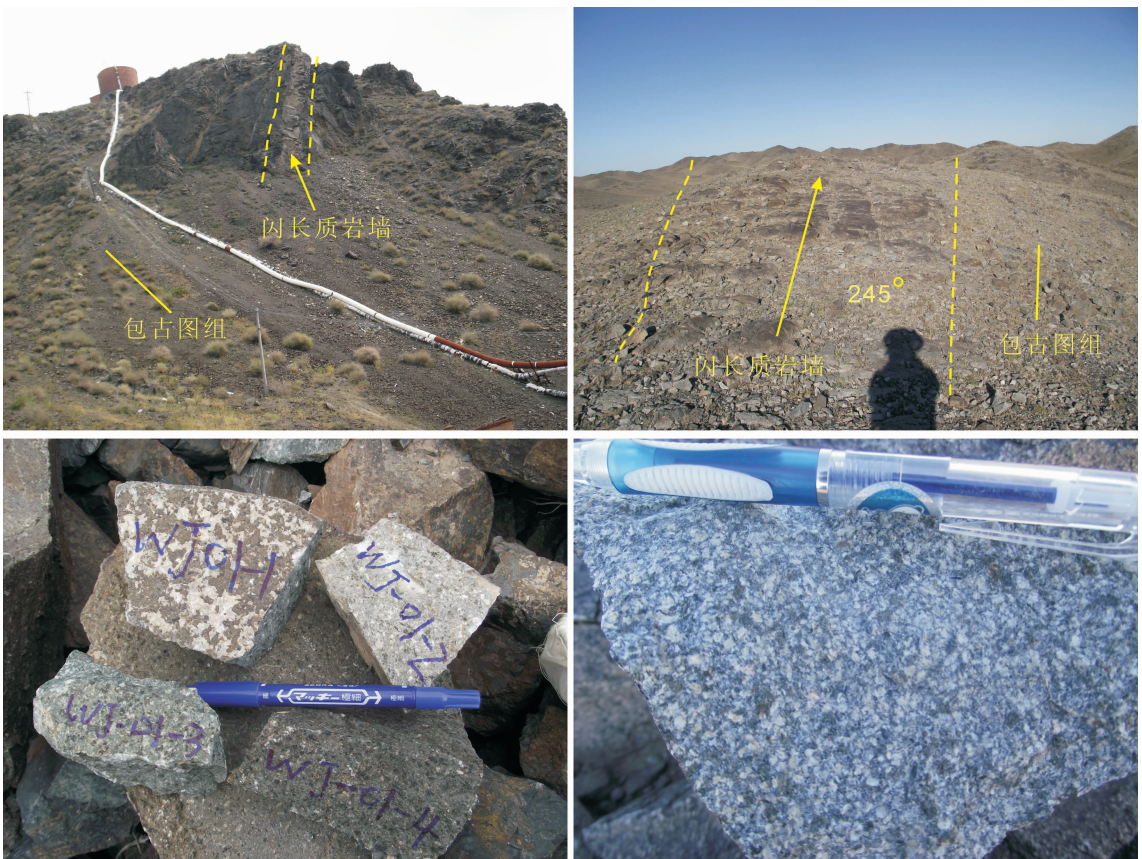


图 2 包古图地区闪长质岩墙的野外和手标本照片

Fig.2 Field and hand specimen photos of dioritic dykes from Baogutu area

基本一致。分析数据列于表 1。

Ar-Ar 定年分析在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室完成。首先挑选角闪石单矿物,将选纯的角闪石(纯度>99%)用超声波清洗。清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的,使用 H4 孔道,中子流密度约为 $2.60 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。照射总时间为 1440 min,积分中子通量为 $2.25 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$;同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样:ZBH-25 黑云母标样,其标准年龄为 $(132.7 \pm 1.2) \text{ Ma}$, K 含量为 7.6%。样品的阶段升温加热使用石墨炉,每阶段加热 30 min,净化 30 min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的,每个峰值均采集 20 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.0002389$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ 年}^{-1}$;用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线^[43]。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见有关文献^[44-46]。本次样品 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果见表 2。

主、微量元素的分析测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学国家重点实验室完成。对于进行主量、微量元素分析的样品,选取蚀变较弱的样品,经清除表面杂质后破碎成岩屑,然后放到稀盐酸中浸泡 1 h,去掉次生的碳酸盐矿物,用去离子水在超声波中清洗样品,并重复 2~3 次,烘干后用磨样机磨至 200 目供化学分析。主量元素分析是用 Rigaku RIX2000 型荧光光谱仪(XRF)分析,其详细步骤见 Li et al.^[47]。微量元素的分析则采用 Perkin-ElmerSciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),具体的流程见 Li^[48]。使用 USGS 标准 W-2 和 G-2 及国内标准 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测样品的元素含量,分析精度一般为 2%~5%。分析数据列于表 3。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

WJ-01-5 中的 20 粒锆石多数呈柱状和粒状,

长 $80 \sim 200 \mu\text{m}$,宽 $50 \sim 90 \mu\text{m}$,长宽比为 1~2。锆石晶形完整,自形程度高,生长环带清楚。20 个分析点中有 10 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $312.0 \sim 320.3 \text{ Ma}$,Th/U 值为 $0.53 \sim 1.48$,为典型的岩浆锆石。这 10 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(316.3 \pm 3.8) \text{ Ma}$ (图 3,表 1),代表了岩浆的结晶年龄。其中有 10 个点偏离谐和线,这可能是由于不同程度的普通 Pb 的贡献,或者是结晶后 U 和 Pb 同位素的增加或丢失,这种不一致往往是由于测量时 ^{207}Pb 偏高,但当锆石年龄小于 1000 Ma 时一般不影响 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

3.2 角闪石 Ar-Ar 定年结果

进行角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的样品 WJ1145 采自包古图地区,其阶段加热分析测试结果见表 2 及图 4。在加热的初期阶段 $700 \sim 940^\circ\text{C}$,释放了少量的 ^{39}Ar ,年龄结果也差别较大,将其剔除。而 $1230 \sim 1300^\circ\text{C}$,其年龄值变化也较大,可能有过剩氩存在,也将其剔除。 $1020 \sim 1180^\circ\text{C}$ 加热阶段,释放的 ^{39}Ar 占总量的 55.6%,形成相对一致的年龄坪,其年龄加权平均值为 $(313.1 \pm 3.5) \text{ Ma}$ (图 4,表 2),代表岩墙的角闪石冷却年龄。该年龄与闪长质岩墙的锆石 U-Pb 定年结果在误差范围内一致。

3.3 主微量元素特征

这些闪长质岩墙的 SiO_2 含量为 56.8%~62.9%,全碱含量为 5.31%~6.30%, Al_2O_3 含量较高(15.9%~16.3%)(表 3)。在 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ 图解中,样品主要落在闪长岩的区域(图 5)。这些样品具有较高的 MgO (2.39%~4.04%)含量和 $\text{Mg}^\#$ (54~62)和所有样品都投在高镁安山岩区域(图 6)。

这些闪长质岩墙具有相对低的稀土总量($\Sigma \text{REE} = 54.6 \times 10^{-6} \sim 80.8 \times 10^{-6}$)(表 3),其稀土分布模式呈现出 LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.6 \sim 6.5$) 略富集, HREE ($(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.5 \sim 1.7$),相对弱的 Eu ($\text{Eu}^*/\text{Eu} = 0.72 \sim 0.87$) 负异常等特征(图 7-a)。这些闪长质岩墙具有高的 Sr ($537 \times 10^{-6} \sim 591 \times 10^{-6}$)、Ba ($654 \times 10^{-6} \sim 2192 \times 10^{-6}$) 含量, Sr/Y(36~44) 比值,在 Sr/Y-Y 图解中,所有样品都投在了埃达克岩区域(图 8),而且这些岩墙的 HREE 强烈亏损 ($\text{Yb} = 1.32 \times 10^{-6} \sim 1.54 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Y} = 13.1 \times 10^{-6} \sim 15.5 \times 10^{-6}$)。

在原始地幔标准化图解中,这些闪长质岩墙富集大离子亲石元素(LILE)(如 Ba、K、Sr、Rb 和 U)和 LREE,相对亏损高强度场元素 Nb、Ta、Ti、P 和重稀土元素,呈现出显著的 TNT 异常(图 7-b)。以上这些

表 1 包古图闪长质岩墙的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素数据
 Table 1 U-Pb composition of zircons from Baogutu dioritic dykes as measured by LA-ICP-MS

Th/U	同位素比值					同位素年龄/Ma							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
WJ-01-5-1	1.48	0.05140	0.00090	0.3505	0.0078	0.04960	0.00080	257.5	38.9	303.1	5.9	312.0	4.8
WJ-01-5-2	0.86	0.05290	0.00070	0.3674	0.0069	0.05040	0.00080	324.1	29.6	317.7	5.1	317.2	4.7
WJ-01-5-4	0.77	0.0541	0.0026	0.3736	0.0200	0.0503	0.0015	372.3	109.2	322.3	14.8	316.6	9.1
WJ-01-5-5	1.06	0.0579	0.0031	0.396	0.027	0.0502	0.0029	527.8	116.7	338.9	19.8	315.6	18.1
WJ-01-5-6	1.16	0.0575	0.0020	0.399	0.023	0.0501	0.0017	522.3	75.9	341.1	16.8	314.9	10.5
WJ-01-5-10	1.63	0.0556	0.0014	0.3850	0.0074	0.0503	0.0012	435.2	49.1	330.7	5.4	316.3	7.4
WJ-01-5-11	0.53	0.0593	0.0019	0.410	0.014	0.0502	0.0006	588.9	73.1	348.9	9.9	315.9	4.0
WJ-01-5-16	0.87	0.0564	0.0037	0.3887	0.0093	0.0504	0.0025	477.8	143.5	333.4	6.8	317.1	15.4
WJ-01-5-17	1.02	0.0555	0.0014	0.3852	0.0075	0.05030	0.00080	435.2	62.0	330.9	5.5	316.5	5.1
WJ-01-5-18	0.60	0.0531	0.0015	0.372	0.010	0.05090	0.00080	331.5	30.6	321.1	7.4	320.3	4.7
WJ-01-5-3	1.11	0.0704	0.0060	0.494	0.043	0.0512	0.0020	942.6	169.4	407.5	29.0	322.2	12.0
WJ-01-5-7	0.80	0.1181	0.0060	0.919	0.059	0.0566	0.0021	1928.1	90.7	661.7	31.4	355.1	13.0
WJ-01-5-8	1.84	0.0578	0.0021	0.429	0.037	0.0537	0.0027	520.4	77.8	362.3	26.0	337.3	16.5
WJ-01-5-9	1.11	0.0774	0.0078	0.569	0.057	0.0537	0.0018	1131.5	201.9	457.6	36.9	336.9	11.0
WJ-01-5-12	0.73	0.0764	0.0014	0.561	0.012	0.0533	0.0006	1105.6	38.1	452.0	7.7	334.7	3.8
WJ-01-5-13	0.89	0.0558	0.0015	0.448	0.012	0.05820	0.00070	455.6	57.4	375.6	8.5	364.5	4.2
WJ-01-5-14	0.82	0.0566	0.0010	0.457	0.008	0.05860	0.00060	476.0	43.5	382.1	5.6	367.4	3.4
WJ-01-5-15	0.69	0.0602	0.0010	0.4476	0.0075	0.05400	0.00050	609.3	41.7	375.6	5.3	338.8	2.8
WJ-01-5-19	0.64	0.0732	0.0038	0.567	0.043	0.0560	0.0025	1020.4	99.1	455.8	27.9	351.3	15.1
WJ-01-5-20	0.88	0.0740	0.0026	0.505	0.022	0.0497	0.0010	1040.4	71.1	415.2	14.5	312.6	6.3

表 2 包古图闪长质岩墙的 WJ1145 角闪石 Ar-Ar 阶段加热升温数据

Table 2 Ar - Ar stepwise heating data for amphibole samples from Baogutu dioritic dykes

T/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	F	$^{39}\text{Ar}(\times 10^{14}\text{mol})$	$^{39}\text{Ar}(\text{Cum.})\%$	Age/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
	角闪石 重量=117.70 mg				J=0.002811				
700	3865.9790	12.7229	15.0157	2.4421	108.7403	0.16	6.57	481	294
780	2319.2581	7.5343	15.7927	1.4863	95.2010	0.09	10.52	428	119
860	1728.0780	5.5836	25.6699	1.0903	81.6302	0.07	13.52	373	146
940	795.2188	2.4530	30.8808	0.5416	74.3992	0.06	15.9	343	46
1020	341.0060	0.9549	36.6195	0.0258	63.2892	0.09	19.74	295.4	7.9
1100	146.9798	0.2847	23.5346	0.1611	65.7640	0.25	30.15	306.0	4.5
1180	103.4235	0.1263	17.0149	0.1624	68.2311	0.98	71.46	316.5	2.9
1230	495.0621	1.4382	70.5649	0.4803	79.5649	0.45	90.22	364.2	3.7
1300	532.3586	1.6126	56.1051	0.3882	62.6525	0.23	100	292.6	4.3

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值;总气体年龄=338.8 Ma;F= $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$,为放射性成因 $^{40}\text{Ar}^*$ 与 ^{39}Ar 的比值。

特点显示它们与俯冲带岩浆地球化学特征类似^[53]。

4 讨论

4.1 岩石成因

与正常的岛弧钙碱性安山岩相比^[54],包古图闪长质岩墙具有更高的 $\text{Mg}^\#$ 、 MgO 、 Cr ($30 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$)、 Ni ($20 \times 10^{-6} \sim 62 \times 10^{-6}$) 含量(表 3),类似于高镁安山岩^[55-56]。这些特征可能是由原始岩浆与地幔橄榄岩相互平衡所致^[55]。然而,对富镁闪长质岩浆的形成仍然存在争议。不同的机制被提出来解释这些富镁闪长岩的成因,如:受交代的富集地幔部分熔融的产物^[57-59];由板片熔体与地幔楔反应形成^[60-61];由拆沉下地壳熔融的熔体与地幔橄榄岩反应形成^[62-63];消减沉积物熔融,以及随后的熔体与地幔楔反应而成^[56,64]。上述机制都有一个相同的前提,即富镁闪长岩的形成需要一个被交代的地幔源区,而差异则表现在交代组分的来源不同。由于交代组分的不同,其形成的岩浆在地球化学特征上也有一定差异。在俯冲消减环境,交代组分主要来自板片流体、沉积物熔融的熔体或俯冲板片熔体。然而,在拆沉环境下,交代组分主要来自拆沉下地壳熔体。不同的交代组分所交代的岩浆具有不同的地球化学特征,如不同的 Th 、 Sr 含量等,不同的 Eu^*/Eu 、 Ba/La 、 Th/Yb 和 Sr/Y 比值。

俯冲的沉积物熔体与地幔橄榄岩反应也可以解释高的 MgO 、 Cr 、 Ni 含量。这种模式意味着俯冲沉积物对富镁闪长质岩浆作了非常重要的贡献。在岛弧岩浆中, Th/Yb 比值是沉积物或其熔体参与程度

的示踪剂,而 Ba/La 比值则是流体参与程度的示踪剂^[65]。西准噶尔地区的富镁闪长岩具有相对低的 Th/Yb (0.6~2.6) 比值,相对高的 Ba/La (24~183) 比值。在 $\text{Ba}/\text{La}-\text{Th}/\text{Yb}$ 图解中,这些富镁闪长岩的投点平行于 Ba/La 轴(图 9),表明流体参与了成岩过程,而普通沉积物的贡献较小。

拆沉下地壳熔体在上升过程中与地幔橄榄岩反应能合理地解释富镁闪长质岩浆中高的 MgO 、 Cr 、 Ni 含量。但是,地壳发生拆沉作用的一个必要前提是,地壳加厚且达到榴辉岩相^[66]。与俯冲洋壳板片相比,下地壳通常是“干的”。然而,富镁闪长岩具有高的 Ba/La 比值(48~257)(图 9),可能代表流体参与了成岩过程。因此,具有高水逸度的富镁闪长质岩浆并不能稳定地用拆沉下地壳模式来解释。

更重要的是,后碰撞模式并没有得到下列地质证据的支持:(1) 上石炭统的浊积岩和化石研究清楚地揭示出西准噶尔地区在该时期为深海相环境^[67-68]。(2) 古地磁学研究显示,直到晚石炭世,准噶尔岛弧与伊犁板块也没有接触^[69-70]。(3) 古地理研究显示,直到 290 Ma,在西准噶尔托里以南的柳树沟一带为浅海-次深海环境,以细碎屑沉积为主,夹含放射虫硅质岩、玄武岩和铁碧玉岩及灰岩凸镜体,生物稀少,厚度 752 m^[71]。上述证据表明,西准噶尔地区在石炭纪仍为岛弧体系。因此,在石炭纪,西准噶尔地区不太可能是后碰撞环境。

西准噶尔的富镁闪长岩具有富 Sr 、高 Sr/Y 比值等特征,在 $\text{Y}-\text{Sr}/\text{Y}$ 图解中,所有样品都投在埃达克岩区域(图 8)。而且,它还具有强烈的 HREE 亏损

表 3 包古图地区闪长质岩墙的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})化学成分Table 3 Chemical compositions (%) and trace element abundances of dioritic dykes from Baogutu area (10^{-6})

sample	WJ-01-2	WJ-01-3	WJ-01-4	WJ-01-6	WJ1145-1	WJ1145-2	WJ1145-3	WJ1145-4
Al ₂ O ₃	16.20	15.89	16.09	15.96	16.17	16.14	16.21	16.27
CaO	4.46	5.45	4.99	3.48	4.73	4.67	4.71	4.80
Fe ₂ O _{3T}	5.77	5.71	5.68	4.74	5.27	5.35	5.19	5.20
K ₂ O	1.64	1.29	1.41	2.04	1.86	1.82	1.87	1.83
MgO	3.85	3.94	4.04	2.39	3.21	3.24	3.18	3.20
MnO	0.08	0.10	0.10	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08
Na ₂ O	4.66	4.20	3.90	4.24	4.14	4.06	4.20	4.17
P ₂ O ₅	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16
SiO ₂	57.1	56.8	57.4	62.9	61.7	61.7	61.7	61.6
TiO ₂	0.71	0.70	0.71	0.57	0.67	0.66	0.66	0.66
烧失量	5.05	5.52	5.28	2.94	1.54	1.60	1.54	1.54
总计	99.7	99.8	99.7	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
Mg [#]	61	62	62	54	59	59	59	59
Na ₂ O+K ₂ O	6.30	5.49	5.31	6.29	6.00	5.88	6.07	6.00
Sc		13.0		9.02	9.88	10.6	9.42	10.7
Ti		4160		3060	3991	4161	3801	4179
V		126		88.3	110	113	104	113
Cr		78.7		29.8	80.4	71.8	66.8	79.1
Mn		706		654	617	636	587	622
Co		19.8		10.1	15.6	16.9	15.6	15.7
Ni		62.0		20.1	44.1	45.6	41.7	45.2
Cu		42.3		13.0	65.2	66.2	65.5	56.4
Zn		72.5		52.5	54.3	54.1	50.6	54.2
Ga		18.0		17.2	18.9	19.7	18.6	19.9
Ge		1.54		1.30	1.37	1.33	1.30	1.55
Rb		28.5		37.1	26.6	26.4	25.8	27.0
Sr		581		537	579	561	568	591
Y		13.1		13.6	14.9	15.5	14.5	15.2
Zr		87.6		127	132	139	131	135
Nb		1.95		2.92	2.70	2.77	2.70	2.74
Cs		0.69		0.44	0.30	0.29	0.27	0.27
Ba		2192		1034	682	678	654	693
La		8.53		12.7	13.0	14.0	12.7	13.0
Ce		19.0		26.5	29.0	30.2	28.9	29.2
Pr		2.66		3.54	3.87	4.07	3.87	3.95
Nd		12.08		14.46	16.33	17.46	16.64	16.95
Sm		2.68		3.04	3.32	3.55	3.28	3.49
Eu		0.62		0.74	0.87	0.89	0.88	0.88
Gd		2.53		2.73	2.92	3.08	2.98	3.07
Tb		0.38		0.43	0.44	0.45	0.45	0.45
Dy		2.46		2.56	2.69	2.87	2.76	2.78
Ho		0.50		0.53	0.56	0.59	0.56	0.57
Er		1.46		1.48	1.62	1.59	1.54	1.61
Tm		0.21		0.23	0.23	0.24	0.23	0.24
Yb		1.32		1.53	1.48	1.54	1.44	1.48
Lu		0.20		0.24	0.23	0.23	0.23	0.23
Hf		2.37		3.39	3.41	3.53	3.36	3.40
Ta		0.17		0.26	0.23	0.23	0.22	0.25
Pb		3.30		6.84	6.22	5.52	4.41	4.33
Th		1.69		3.42	3.08	3.11	3.08	3.11
U		0.65		1.08	0.94	0.94	0.87	0.92
∑REE		54.6		70.7	76.5	80.8	76.4	78.0
Sr/Y		44		40	39	36	39	39
Ba/La		257		82	52	48	51	53

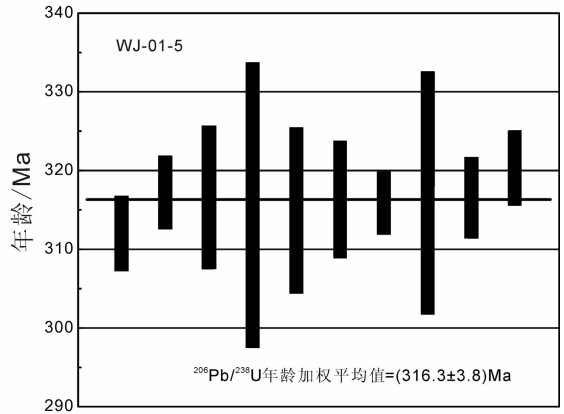
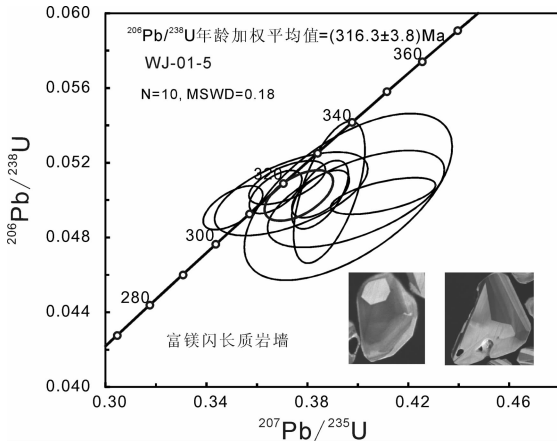


图 3 包古图地区闪长质岩墙的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄谐和图

Fig.3 U-Pb concordia diagram and ²⁰⁶Pb/²³⁸U age plot of zircon from dioritic dykes in Baogutu area

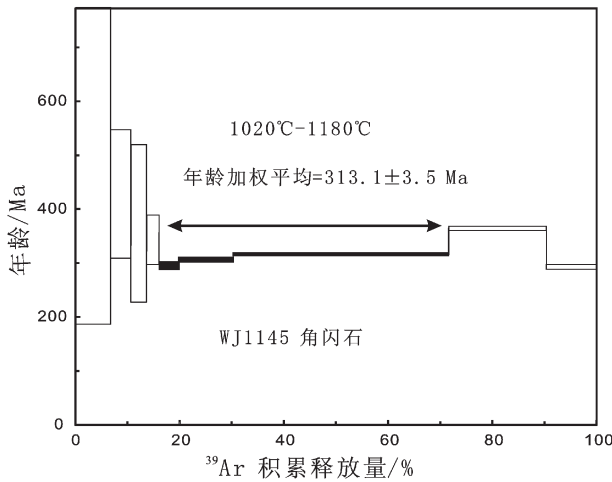


图 4 包古图地区闪长质岩墙的角闪石 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱
Fig.4 Amphibole ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum for dioritic dykes in Baogutu area

(如: Yb=0.64×10⁻⁶~1.32×10⁻⁶, Y=7.18.7×10⁻⁶~13.0×10⁻⁶)和 Nb、Ta、Ti 异常。在源区残留物中,石榴子石和金红石的存在可以解释 HREE 的亏损和 Nb、Ta、Ti 的负异常,而斜长石的缺失则可以解释正的 Sr 异常^[60,72]。这些富镁闪长岩可能主要受俯冲板片的部分熔融作用控制。

这些特征与俯冲的洋壳板片部分熔融形成的埃达克岩浆在上升过程中与地幔橄榄岩反应所形成的岩浆特征类似^[55,60],代表了一个异常高热、高地温梯度的构造环境。

4.2 动力学背景与成矿意义

4.2.1 动力学背景

西准噶尔地区石炭纪的构造环境仍然存在不同

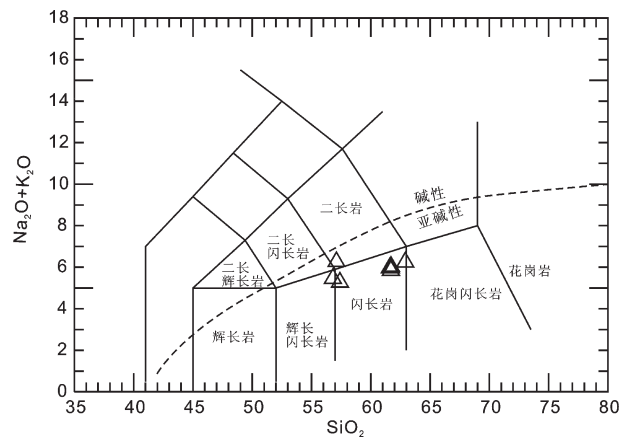


图 5 SiO₂-(Na₂O+K₂O)图^[49]

Fig.5 SiO₂-(Na₂O+K₂O) diagram

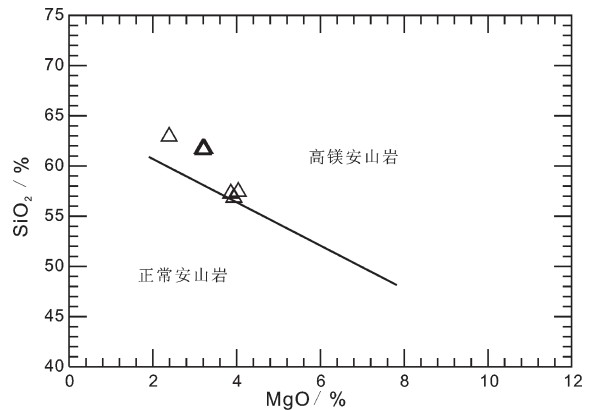


图 6 包古图地区闪长质岩墙的 MgO-SiO₂ 图解^[50]
Fig.6 MgO versus SiO₂. diagram of dioritic dykes from Baogutu area

的看法,如:后碰撞环境^[9-15]或岛弧环境^[16-17]。最近,通过大量的岩石学和地球化学研究,一些学者识别出

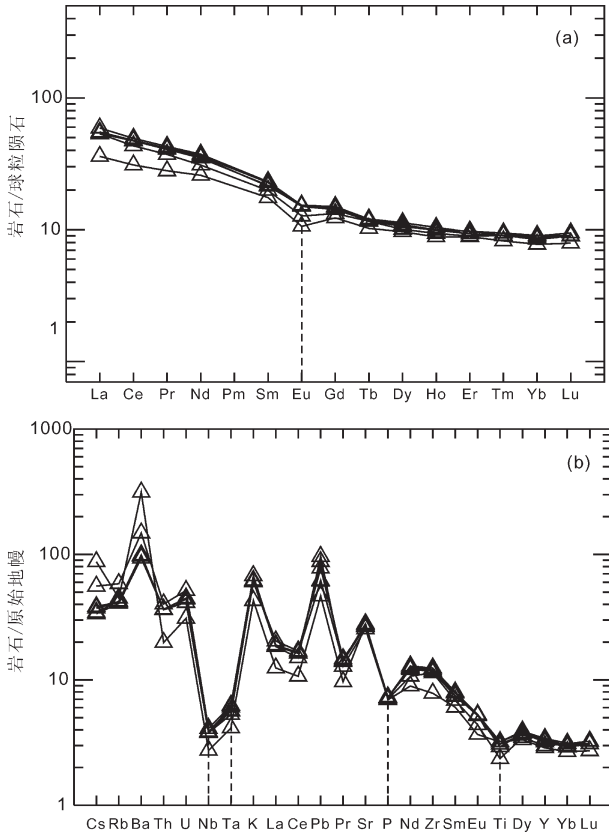


图7 包古图闪长质岩墙的球粒陨石标准化REE分布模式图和微量元素原始地幔标准化蛛网图, (球粒陨石和原始地幔值引自文献[51])

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergram for dioritic dykes in Baogutu area

一些特殊岩石类型(如:埃达克岩、拉斑玄武岩、富镁闪长岩、赞岐岩和紫苏花岗岩等),形成于晚石炭世—早二叠世,并用洋脊俯冲模式来解释这些岩石的成因[18-25]。本文研究显示,包古图富镁闪长质岩墙也类似于俯冲带岩浆地球化学特征[53],它与上述特殊岩石组合同时形成。所以,笔者趋向认为包古图地区晚石炭纪的富镁闪长质岩墙是形成于高温、拉张的洋脊俯冲环境。

4.2.2 成矿意义

洋脊俯冲产生的强烈的壳幔相互作用有利于产生Cu、Au、Ni等金属矿产,如阿拉斯加南部的Au矿就产生于扩张洋脊俯冲造成的板片窗之上[73]。埃达克岩—富镁安山岩与斑岩型或热液型铜、金矿床具有密切的关系已经被大家所公认[74-76]。

铜是亲硫元素,在火山岩中主要形成含铜硫化物,也有部分赋存于铁镁矿物之中。金为亲硫和亲铁

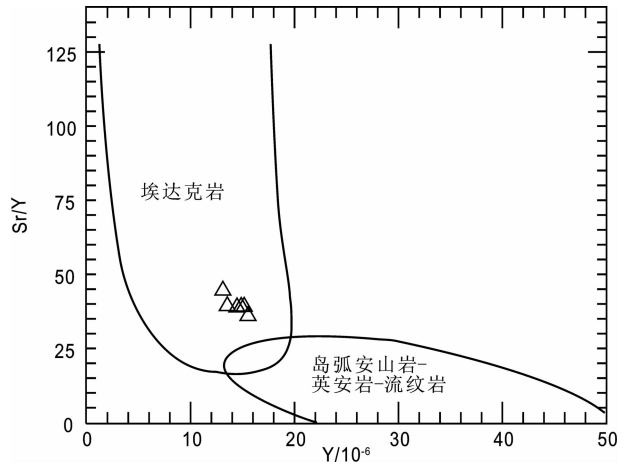


图8 包古图闪长质岩墙的Y-Sr/Y图[52]
Fig.8 Y versus Sr/Y diagram of dioritic dykes in Baogutu area

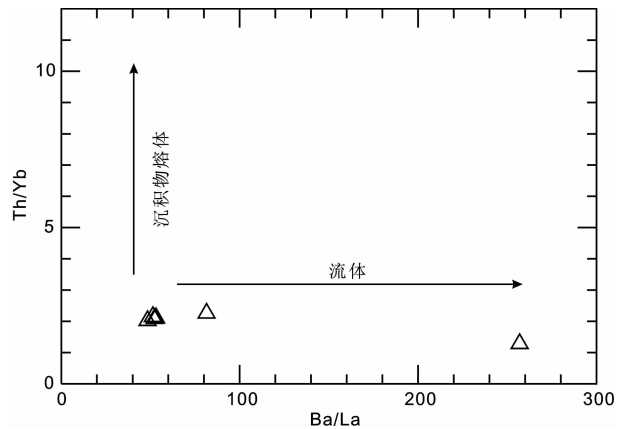


图9 包古图闪长质岩墙的Ba/La-Th/Yb图[65]
Fig.9 Th/Yb-Ba/La diagram of dioritic dykes from Baogutu area

元素,在火山岩中主要分布于硫化物内,铁钛矿物次之[77-78]。铜、金成矿主要与成矿物质来源和氧逸度两个因素直接相关[79-80]。世界斑岩铜矿绝大多数产于板块俯冲带[81]。亲铜元素一般存在于地幔和铁镁质岩石中[82-83]。因此,是否形成富集Cu、Au的岩浆,主要看穿过地幔和地壳,到达浅部的过程中硫化物是否饱和或稳定。而硫化物饱和与否的控制因素是氧逸度(f_{O_2}),高的氧逸度(f_{O_2})有利于抑制硫化物饱和,从而形成Cu、Au高度富集的岩浆。当年轻俯冲洋壳熔体与地幔楔发生反应时,板片熔体所携带的大量 Fe_2O_3 将进入到地幔楔,使地幔楔橄榄岩的 f_{O_2} 增高,地幔中的金属硫化物将被氧化,亲铜元素(如Au,

Cu)等顺利进入到板片熔体或岛弧岩浆中,从而导致铜金矿床的形成^[83]。

在西准噶尔地区分布有一定量的晚古生代铜-金等矿床,包古图斑岩铜矿(310~315 Ma)和包古图富镁闪长质岩墙(313~316 Ma)的形成时代一致^[23,26,28-29],表明它们之间具有密切的成因关系。可能与该时期西准噶尔洋脊俯冲有关。当洋脊俯冲时,洋脊两侧的板片熔融形成的熔体在上升过程中与地幔楔反应,使地幔楔橄榄岩的 f_{O_2} 增高,硫化物不稳定,使地幔中的金属硫化物氧化而溶解于硅酸盐中,从而使Cu、Au等元素富集形成矿床。所以,西准噶尔地区富镁闪长岩和埃达克岩与铜、金成矿关系密切。

5 结论

(1)包古图闪长质岩墙的形成时代在313~316 Ma,形成于晚石炭世岛弧环境。

(2)包古图闪长质岩墙显示了高的MgO、Cr、Ni等富镁闪长岩的特征,很可能是由洋脊俯冲作用形成的,是俯冲板片熔体在上升过程中与地幔楔的反应的产物。

(3)包古图地区的铜金矿床也很可能与洋脊俯冲有关,其中由洋脊俯冲作用形成的富镁闪长质岩墙有利于形成Cu、Au矿床,显示该区具有良好的铜金成矿远景。

致谢: 样品的主微量元素测试得到广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室的张云迎、胡光黔、刘颖、涂湘林等的热心帮助。样品的锆石U-Pb定年分析得到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侯可军等的帮助,在此表示感谢!

参考文献(References):

[1] Yakubchuk A. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2004, 23:761-779.

[2] Seltmann R, Porter T M. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of central Eurasia I. Tectonic, geologic and metallogenic setting, and significant deposits[C]//Porter T M. (ed.). *Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*. PGC Publishing, Adelaide, 2005, 2, 467-512.

[3] Shen P, Shen Y C, Liu T B, et al. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16, 227-242.

[4] 王莉娟, 朱和平. 新疆准噶尔盆地西缘哈图金矿成矿流体[J]. *中国*

地质, 2006, 33(3):666-671.

Wang Lijuan, Zhu Heping. Ore-forming fluid of the Hatu gold deposit on the western margin of the Junggar basin, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3):666-671 (in Chinese with English abstract).

[5] 张锐, 张云孝, 佟更生, 等. 新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义[J]. *中国地质*, 2006, 33(6):1354-1360.

Zhang Rui, Zhang Yunxiao, Tong Gengsheng, et al. Major breakthrough in copper exploration in the Baogutu porphyry copper deposit, western Junggar, Xinjiang, and its significance [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (6):1354-1360 (in Chinese with English abstract).

[6] 庞绪成, 朱浩锋, 胡瑞忠, 等. 新疆包尔图铜矿稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(6):1699-1709.

Pang Xucheng, Zhu Haofeng, Hu Ruizhong, et al. REE geochemical character of the Baertu copper deposit in Xinjiang and its geological significance [J]. *Geology in China*, 2010, 37(6):1699-1709 (in Chinese with English abstract).

[7] 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 新疆北部大地构造演化阶段与斑岩-浅成低温热液矿床的构造环境类型[J]. *中国地质*, 2012, 39(3):695-716.

Wang Yuwang, Wang Jingbin, Long Lingli, et al. Tectonic evolution stages of northern Xinjiang and tectonic types of porphyry-epithermal deposits [J]. *Geology in China*, 2012, 39(3):695-716 (in Chinese with English abstract).

[8] 李智明, 薛春纪, 王剑辉, 等. 中国新疆及周边国家和地区典型矿床特征对比研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(1):160-168.

Li Zhiming, Xue Chunji, Wang Jianhui, et al. Comparative study of the characteristics of typical mineral deposits in Xinjiang, China, and its neighboring countries and regions [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):160-168(in Chinese with English abstract).

[9] Chen B, Arakawa Y. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar fold-belt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69, 1307-1320.

[10] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23:691-703.

[11] Chen J F, Han B F, Ji J Q, et al. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 2010, 115:137-152.

[12] Zhou T F, Yuan F, Fan Y, et al. Granites in the Sawuer region of the west Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance [J]. *Lithos*, 2008, 106:191-206.

[13] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5), 1077-1086.

Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, et al. Late Paleozoic vertical

- growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (5):1077-1086 (in Chinese with English abstract).
- [14] 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 等. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究 [J]. *地球化学*, 2006, 35 (1), 55-67.
Su Yuping, Tang Hongfeng, Hou Guangsun, et al. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang [J]. *Geochemica*, 2006, 35(1):55-67 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邹滔, 王京彬, 王玉往, 等. 新疆克拉玛依岩体的岩浆混合作用成因: 岩石地球化学证据 [J]. *中国地质*, 2011, 38(1):65-76.
Zou Tao, Wang Jingbin, Wang Yuwang, et al. Magma mixing in the Karamay rock body of west Junggar, Xinjiang: evidence from geochemistry [J]. *Geology in China*, 2011, 38(1):65-76(in Chinese with English abstract).
- [16] 张连昌, 万博, 焦学军, 等. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3), 626-631.
Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejun, et al. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar [J]. *Geology in China*, 2006, 33(3):626-631 (in Chinese with English abstract).
- [17] 高山林, 何治亮, 周祖翼. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义 [J]. *新疆地质*, 2006, 24(2), 125-130.
Gao Shanlin, He Zhiliang, Zhou Zuyi. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in West Junggar, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2006, 24(2):125-130 (in Chinese with English abstract).
- [18] Geng H Y, Sun M, Yuan C, et al. Geochemical, Sr - Nd and zircon U - Pb - Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? [J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3/4):373-398.
- [19] Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China) [J]. *Chemical Geology*, 2010, 277:281-300.
- [20] 尹继元, 袁超, 孙敏, 等. 新疆哈图早二叠世富镁闪长岩的 Ar-Ar 年代学、地球化学特征及其与铜金矿化的关系 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(7):2171-2182.
Yin Jiyuan, Yuan Chao, Sun Min, et al. Age, geochemical features and possible petrogenesis mechanism of early Permian magnesian diorite in Hatu, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7):2171-2182 (in Chinese with English abstract).
- [21] 尹继元, 袁超, 孙敏, 等. 新疆西准噶尔晚古生代的大地构造演化的岩浆活动记录 [J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(2):275-288.
Yin Jiyuan, Yuan Chao, Sun Min, et al. Tectonic settings of the late Palaeozoic in West Junggar, Xinjiang: restriction from magma [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2):275-288(in Chinese with English abstract).
- [22] 尹继元, 袁超, 孙敏, 等. 新疆西准噶尔地区赞岐岩(sanukite)的地球化学特征, 成因机制及其与铜金矿化的关系 [J]. *地球化学*, 2009, 38(5):123-132.
Yin Jiyuan, Yuan Chao, Sun Min, et al. Sanukitic dykes in West Junggar, Xinjiang: Geochemical features, petrogenesis and links to Cu-Au Mineralization [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5):123-132 (in Chinese with English abstract).
- [23] Yin J Y, Long X P, Yuan C, et al. A late Carboniferous slab window: geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dykes in West Junggar, NW China [J]. *Lithos*, 2013, 175/176:146-162.
- [24] 尹继元, 陈文, 龙晓平, 等. 西准噶尔白杨河地区早二叠纪闪长岩的年代学和地球化学: 岩石成因和构造意义 [J]. *地球化学*, 2013, 42(4):361-372.
Yin J Y, Chen W, Long X P et al., Age and Geochemical Characteristics of early Permian Diorite in the Baiyanghe Region, West Junggar: Petrogenesis and Tectonic Implication [J]. *Geochimica*, 2013, 42(4):361-372.
- [25] Ma C, Xiao W J, Windley B F, et al. Tracing a subducted ridge - transform system in a late Carboniferous accretionary prism of the southern Altai: Orthogonal sanukitoid dyke swarms in Western Junggar, NW China [J]. *Lithos*, 2012, 140:152-165.
- [26] 齐进英. 新疆准噶尔脉岩群地质及成因 [J]. *岩石学报*, 1993, 9(3), 288-299.
Qi Jinying. Geology and genesis of vein rock group in Western Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(3): 288-299 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李辛子, 韩宝福, 季建清, 等. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学 [J]. *地球化学*, 2004, 33(6), 574-584.
Li Xinzi, Han Baofu, Ji Jianqing, et al. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China [J]. *Geochimica*, 2004, 33(6): 574-584(in Chinese with English abstract).
- [28] Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Late Carboniferous high $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth [J]. *Lithos*, 2012, 84, 86-102.
- [29] 冯乾文, 李锦铭, 刘建峰, 等. 新疆西准噶尔克拉玛依岩体中暗色岩墙的形成时代及地质意义——来自锆石 LA-ICP-MS 和角闪石 Ar-Ar 定年的证据 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(7):2158-2170.
Feng Qianwen, Li Jinyi, Liu Jianfeng, et al. Ages and geological significance of the dark dykes emplaced in the Karamay pluton and adjacent area, in western Junggar, Xinjiang, NW China: Evidence from LA-ICP-MS zircon chronology and Ar-Ar amphibole chronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7):2158-2170(in Chinese with English abstract).
- [30] 冯乾文, 李锦铭, 刘建峰, 等. 新疆西准噶尔红山岩体及其中闪长质岩墙的时代——来自锆石 LA-ICP-MS 定年的证据 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2935-2949.

- Feng Qianwen, Li Jinyi, Liu Jianfeng, et al. Ages of the Hongshan granite and intruding dioritic dyke swarms, in western Junggar, Xinjiang, NW, China: Evidence from LA-ICP-MS zircon chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9):2935-2949(in Chinese with English abstract).
- [31] 李华芹, 陈富文, 蔡红. 新疆西准噶尔地区不同类型金矿床 Rb-Sr 同位素年代研究[J]. *地质学报*, 2000, 74(2):181-192.
Li Huaqin, Chen Fuwen, Cai Hong. Study on Rb-Sr isotopic ages of gold deposits in West Junggar Area, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2):181-192(in Chinese with English abstract).
- [32] 佟丽莉, 李永军, 张兵, 等. 新疆西准噶尔达尔布特断裂带南包古图组安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质时代[J]. *新疆地质*, 2009, 27(3):226-230.
Tong Lili, Li Yongjun, Zhang Bing, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geologic age of the Baogutu formation andesite in the south of Daerbut faulted zone, Western Junggar[J]. *Xinjiang Geology*, 2009, 27(3):226-230(in Chinese with English abstract).
- [33] 安芳, 朱永峰. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(06):1437-1445.
An Fang, Zhu Yongfeng. SHRIMP U-Pb zircon ages of tuff in Baogutu Formation and their geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(06):1437-1445(in Chinese with English abstract).
- [34] 唐功建, 王强, 赵振华, 等. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义[J]. *地球科学*, 2009, 34(1), 56-74.
Tang Gongjian, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and its geological significance of Baogutu porphyry mineralization[J]. *Earth Science*, 2009, 34(1): 56-74(in Chinese with English abstract).
- [35] 申萍, 沈远超, 潘成泽, 等. 新疆哈图-包古图金铜矿集区锆石年龄及成矿特点[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 2875-2893.
Shen Ping, Shen Yuanchao, Pan Chengze, et al. Zircon age and metallogenic characteristics of the Hatu-Baogutu Au-Cu metallogenic concentric region in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10):2875-2893(in Chinese with English abstract).
- [36] 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 等. 新疆包古图斑岩铜矿床地质特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8):1981-1988.
Song Huixia, Liu Yulin, Qu Wenjun, et al. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 39(10):1466-1472(in Chinese with English abstract).
- [37] 刘玉琳, 郭丽爽, 宋会侠, 等. 新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿年代学研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 2009, 39(10):1466-1472.
Liu Yulin, Guo Lishuang, Song Huixia, et al. Geochronology of Baogutu porphyry copper deposit in western Junggar area, Xinjiang of China[J]. *Science in China(Series D)*, 2009, 39(10):1466-1472(in Chinese).
- [38] Shen P, Shen Y C, Pan H D, et al. Geochronology and isotope geochemistry of the Baogutu porphyry copper deposit in the West Junggar region, Xinjiang, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49:99-115.
- [39] Nasdala, L, Hofmeister W, Norberg N. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249:1-35.
- [40] Liu Y S, Gao S, Hu Z C. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal Petrology*, 2010, 51:537-571.
- [41] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4):481-492
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In Situ U-Pb Zircon Dating using laser ablation-multi Ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4):481-492(in Chinese with English abstract).
- [42] SláMa J, Kosler J, Condon D J. Plesovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249:404-416.
- [43] Ludwig K R. Isoplot/Ex, rev.2.49: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2001, (1a): 55.
- [44] 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究—以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. *地质论评*, 2006, 52(4): 556-561.
Zhang Yan, Chen Wen, Chen Kelong, et al. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss—Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 2006, 52(4): 556-561(in Chinese with English abstract).
- [45] 陈文, 万渝生, 李华芹, 等. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. *地质学报*, 2011, 85(11):1918-1947.
Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, et al. Isotope geochronology: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(11): 1918-1947(in Chinese with English abstract).
- [46] 陈文, 张彦, 张岳桥, 等. 青藏高原东南缘晚新生代抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 867-872.
Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, et al. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau—evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 867-872(in Chinese with English abstract).
- [47] Li X H, Qi C S, Liu Y. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21):2481-2486.
- [48] Li X H. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze craton, SE China[J]. *Geochemical Journal*, 1997, 31:323-337.
- [49] Middlemost E A K. Naming materials in the magma igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37:215-224.
- [50] McCarro J J, Smellie J L. Tectonic implications of fore-arc

- magnesian and generation of high-magnesian andesites: Alexander island[J]. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155(2):269-280.
- [51] Sun S, McDonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42:313.
- [52] Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens; potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. *Geology*, 1993, 21, 547-550.
- [53] Wilson M. *Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach* [J]. London: Unwin Hyman, 1989, 466.
- [54] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Earth and Planetary Science Annual Review*, 1995, 23:251-285.
- [55] Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1995, 107:505-519.
- [56] Tatsumi Y. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan [J]. *Geology*, 2001, 29:323-326.
- [57] Stern R, Hanson G. Archean high-Mg granodiorite: a derivative of light rare earth element enriched monzodiorite of mantle origin [J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32:201-238.
- [58] Smithies R H, Champion D C. The Archean High-Mg diorite suite: Links to Tonalite-Tonalite-Granodiorite magmatism and implications for early Archean crustal growth [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41, 1653-1671.
- [59] Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle [J]. *Precambrian Research*, 2007, 152, 27-47.
- [60] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 Gpa [J]. *Chemical Geology*, 1999, 160:335-356.
- [61] Smithies R H, Van-Kranendonk M J, Champion D C. The Mesoarchean emergence of modern-style subduction [J]. *Gondwana Research*, 2007, 11:50-68.
- [62] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L. et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. *Nature*, 2004, 432: 892-897.
- [63] Huang F, Li S G, Dong F, et al. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2008, 255:1-13.
- [64] Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, et al. Setouchi high-Mg andesites revisited: geochemical evidence for melting of subducted sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160:479-492.
- [65] Woodhead J D, Hergt J M, Davidson, et al. Hafnium isotope evidence for conservation element mobility during subduction zone processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192:331-346.
- [66] 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等. 大陆下地壳拆沉模式初探 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(2), 265-276.
Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Yuanlong, et al. A model of delamination of continental lower crust [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 265-276(in Chinese with English abstract).
- [67] 李菊英, 晋慧娟. 新疆准噶尔盆地西北缘石炭纪浊积岩系中遗迹化石的发现及其意义 [J]. *地质科学*, 1989, 63, 9-15.
Li Juying, Jin Huijuan. The trace fossils discovery and its environment significance in Carboniferous turbidite series, the northwest border of Junggar basin, Xinjiang [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1989, 63, 9-15 (in Chinese with English abstract).
- [68] 晋慧娟, 李育慈. 准噶尔盆地西北缘石炭纪生物成因的沉积构造研究 [J]. *科学通报*, 1998, 43(17):1888-1891.
Jin Huijuan, Li Yuci. Carboniferous biogenic sedimentary structures on the northwestern margin of Jungar basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43 (17):1888-1891 (in Chinese with English abstract).
- [69] Wang B, Chen Y, Zhang S, et al. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263: 288-308.
- [70] Choulet, F, Chen Y, Wang B, F, et al. Late Paleozoic paleogeographic reconstruction of Western Central Asia based upon paleomagnetic data and its geodynamic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42, 867-884.
- [71] 王福同. 新疆维吾尔自治区古地理及地质生态图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2006.
Wang Futong. *The Paleogeographic and Geocological Atlas of Uygur Autonomous Region* [M]. Beijing: SinoMaps Press, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [72] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- [73] Haeussler P J, Bradley D, Goldfarb R, et al. Link between ridge subduction and gold mineralization in southern Alaska [J]. *Geology*, 1995, 23:995-998.
- [74] Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Gisements epithermaux et porphyriques; la connexion adakite [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II. Sciences de la Terre et des Planetes*, 1997, 325(2):103-109.
- [75] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II. Sciences de la Terre et des Planetes*, 1998, 326(1):27-34.

- [76] 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 新疆西天山莫斯早特石英钠长斑岩铜矿床——一个与埃达克质岩石有关的铜矿实例[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 249–258.
Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. A case study on porphyry Cu deposit related with adakitic quartz albite porphyry in Mosizaote, Western Tianshan, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 249–258 (in Chinese with English abstract).
- [77] Bornhorst T, Rose J W. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks from Guatemala [J]. The Journal of Geology, 1986, 94, 412–418.
- [78] Boyle R. The geochemistry of gold and its deposits [J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1979, 280:584.
- [79] Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 144:347–364.
- [80] Wang Q, Xu J, Jian P, Bao Z, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. Journal of Petrology, 2006, 47:119–144.
- [81] 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 等. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨[J]. 岩石学报, 2004, 20, 229–238.
Rui Zongyao, Zhang Lisheng, Chen Zhenyu, et al. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (2): 229–238 (in Chinese with English abstract).
- [82] Sillitoe R. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44: 373–388.
- [83] Mungall J. Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. Geology, 2002, 30:915–918.

Age, geochemical features and Cu–Au mineralization significance of the magnesian dioritic dykes in Baogutu area of west Junggar

YIN Ji-yuan¹, CHEN Wen¹, YU Shun¹, LONG Xiao-ping², YUAN Chao²,
ZHANG Yan¹, LI jie¹, SUN Jing-bo¹, LIU Xin-yu¹

(1. Laboratory of Isotope Thermochronology, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The magnesian dioritic dykes widely distributed in west Junggar of Xinjiang recorded the Late Paleozoic tectonic evolutionary history of the area. The LA-ICP-MS zircon U-Pb and amphibole Ar-Ar dating of dioritic dykes yielded a ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 316.3±3.8 Ma and a plateau age of 313.1±3.5 Ma, respectively, suggesting that they were generated in Late Carboniferous. The magnesian dioritic dikes (56.8%–62.9%) are characterized by high MgO (2.39%–4.04%; Mg[#]= 54–62), Cr (30×10⁻⁶–80 ×10⁻⁶), and Ni (20×10⁻⁶–62×10⁻⁶) content. These samples show negligible to negative Eu values, high Sr/Y (36–44) ratios, strong depletion of HREE (e.g., Yb = 1.32×10⁻⁶–1.54×10⁻⁶ and Y=13.1×10⁻⁶–15.5×10⁻⁶), and enrichment of large-ion-lithophile elements (LILE) (K, Sr, Ba) with negative Nb–Ta–Ti anomalies. These features are compatible with slab-derived adakites interacted with mantle materials and related to ridge subduction. The interaction between high oxygen fugacity slab melt and mantle peridotite caused the decomposition of metal sulfides and the Cu and Au mineralization. Baogutu area of west Junggar thus has good metallogenic prospect.

Key words: Baogutu; magnesian diorite; dyke; zircon U-Pb; amphibole Ar-Ar; copper-gold mineralization, LA-ICP-MS

About the first author: YIN Ji-yuan, male, born in 1983, doctor, majors in geochemistry and isotope geochronology; E-mail: yinjiyuan1983@163.com.