

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

唐功建^{1,2}, 王 强^{1*}, 赵振华¹, Derek A. Wyman³, 陈海红⁴, 贾小辉^{1,2}, 姜子琦^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 悉尼大学地球科学学院地质与地球物理系, 新南威尔士 2006, 澳大利亚

4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 西准噶尔包古图地区的一些小型斑岩体或脉岩与铜金矿化的关系非常密切, 引起了人们的广泛关注。报道了一些斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果和岩石地球化学成分资料。Ⅱ、Ⅴ岩体的石英闪长斑岩中岩浆结晶锆石的定年结果分别为 314.9 ± 1.7 Ma 和 309.9 ± 1.9 Ma, Ⅲ岩体的闪长玢岩中岩浆结晶锆石的定年结果为 313.9 ± 2.6 Ma, 表明包古图地区的岩体形成于晚石炭世。包古图地区小岩体的岩石富 Na、高 Sr, 贫 Y 和 Yb, 无明显的 Eu 异常, 具有埃达克岩特征, 同时有些岩石富集 MgO (3.93%~4.78%), 具有高的 Mg[#] (68~74), 类似高镁安山岩。结合区域地质和岩浆岩的资料, 认为:(1) 包古图地区的小岩体形成于晚石炭世的岛弧环境, 并可能与石炭纪的洋脊俯冲有关, 其中埃达克质岩为俯冲洋脊两侧的板片熔融而形成, 而高镁闪长岩类为俯冲板片熔体与地幔橄榄岩相互作用的产物;(2) 包古图地区的铜金矿床也很可能与洋脊俯冲有关, 高氧逸度的板片熔体上升并与地幔橄榄岩相互作用, 这使得地幔中的金属硫化物不稳定, 释放出金属成矿物质, 从而使得 Cu、Au 等在熔体中不断富集而形成矿床。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 埃达克岩; 高镁闪长岩; 洋脊俯冲; 板片窗; 西准噶尔; 中亚造山带。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2009)01-0056-19

收稿日期: 2008-10-30

Geochronology and Geochemistry of the Ore-Bearing Porphyries in the Baogutu Area (Western Junggar): Petrogenesis and Their Implications for Tectonics and Cu-Au Mineralization

TANG Gongjian^{1,2}, WANG Qiang^{1*}, ZHAO Zhenhua¹, Derek A. Wyman³,
CHEN Haihong⁴, JIA Xiaohui^{1,2}, JIANG Zi-qi^{1,2}

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

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

3. School of Geosciences, Division of Geology and Geophysics, University of Sydney, NSW 2006, Australia

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The small porphyry plutons or dikes in the Baogutu area, western Junggar, have attracted wide attentions owing to the close association between them and Cu-Au mineralization. This paper presents new LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical data of ore-bearing porphyries in the Baogutu area. The quartz diorite porphyry bodies Ⅱ and Ⅴ and diorite porphyry body Ⅲ have crystallization ages of 314.9 ± 1.7 Ma, 309.9 ± 1.9 Ma, and 313.9 ± 2.6 Ma, respectively, suggesting they were generated in Late Carboniferous. They are characterized by high Na₂O/K₂O and high Sr values but low Y and Yb contents, and negligible Eu anomalies, similar to adakites. In addition, some samples have high MgO (3.93%~4.78%) and Mg[#] (47~74) values, similar to high-Mg andesite. Taking into account the data of regional geology and magmatic rocks, we suggest that (1)

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411308); 国家自然科学基金项目(Nos. 40721063, 40673037, 40572042); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-128)。

作者简介: 唐功建(1979—), 男, 博士研究生, 岩石地球化学专业。* 通讯作者, 王强, E-mail: wqiang@gig.ac.cn
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

The Baogutu intrusive rocks were possibly formed in an island-arc setting linking to ocean ridge subduction in Late Carboniferous, the adakitic magmas have likely formed by partial melting of the leading edge of the subducted ridge, and high-Mg diorites possibly originated from the interaction between adakitic melts and mantle peridotite; (2) The Baogutu Cu-Au mineralization might occur above a slab window during ocean ridge subduction, and the interaction between high oxygen fugacity slab melt and mantle peridotite caused the decomposition of metal sulfides and the Cu and Au mineralization.

Key words: zircon U-Pb dating; adakite; high-Mg diorites; ridge subduction; slab windows; West Junggar; Central Asian orogenic belt.

0 引言

西准噶尔地区位于中亚造山带中南部的阿尔泰造山带和天山造山带之间(图 1a), 西准噶尔褶皱带是在古生代由塔里木、哈萨克斯坦和西伯利亚等板块经聚合—俯冲—增生作用形成的(Coleman, 1989; Feng *et al.*, 1989)。西准噶尔地区出露大量晚古生代的中酸性侵入岩, 根据产状可以将这些中酸性侵入岩分成两类:一类是以巨大花岗岩基形式出露的花岗岩, 如庙儿沟、克拉玛依、阿克巴斯套和红山等岩体(Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006);另一类是以小岩株或岩脉形式出露的石英闪长斑岩、闪长玢岩和花岗闪长斑岩等, 主要分布在包古图地区

(金成伟等, 1993; 沈远超等, 1993)。基于对区内岩浆岩的研究, 许多研究者对西准噶尔地区晚古生代的构造环境提出了一些不同的认识, 包括洋内俯冲的岛弧(张连昌等, 2006)、岛弧增生(王方正等, 2002)、弧后盆地(金成伟等, 1993; 沈远超和金成伟, 1993)、小洋盆(朱宝清和冯益民, 1994)和碰撞后(Chen and Arakawa, 2005; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006)等环境。同时, 由于缺乏高精度同位素年代学资料, 包括西准噶尔地区在内的中亚造山带的大陆地壳的增生时限和方式也一直争论不休(Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000; Yakubchuk, 2002; Xiao *et al.*, 2004a, 2004b; Yakubchuk, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 高俊等, 2006; Liu and Pan, 2006; 王强等, 2006b; 肖文交等, 2006; Windley *et al.*, 2007;

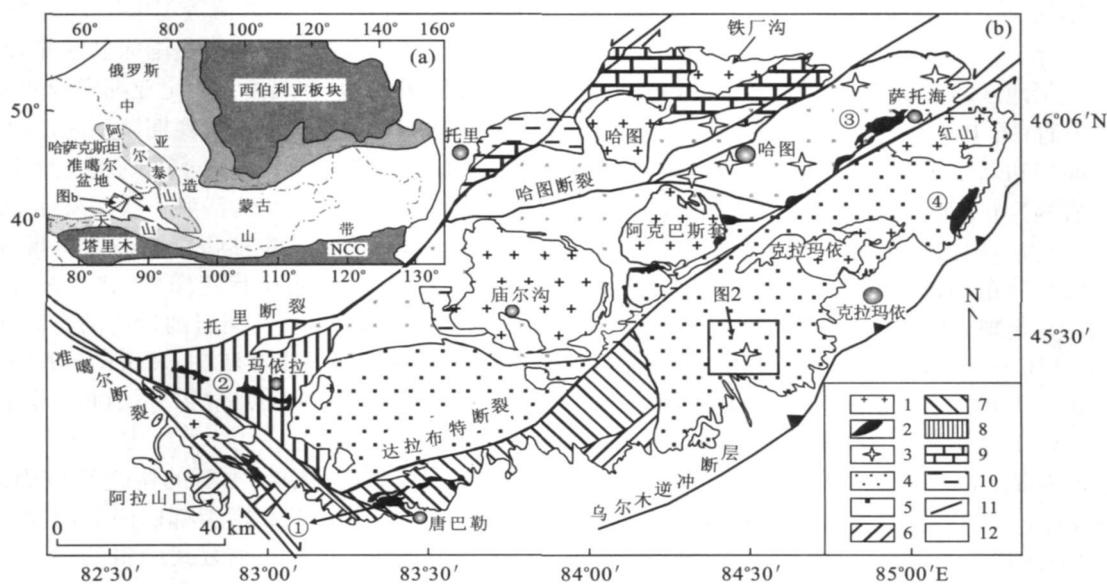


图 1 中亚造山带地质简图(Jahn *et al.*, 2000)(a)和西准噶尔地区地质简图(据 Buckman and Aitchison, 2004, 图 2 修改)(b)

Fig. 1 Geographic map showing Central Asia (modified from Jahn *et al.*, 2000) (a) and regional geological sketch map showing the West Junggar area (modified from Buckman and Aitchison, 2004) (b)

1. 花岗岩类;2. 蛇绿岩;3. 金矿点;4. 克拉玛依地体(石炭纪);5. 库鲁木地体(中—早石炭世);6. 拉巴地体(奥陶纪);7. 艾比湖—可可萨依地体(晚志留—早奥陶世);8. 玛依拉地体(早—中志留世);9. 托里地体(中—晚泥盆世);10. 二叠世沉积物/火山沉积物;11. 断层;12. 中生代沉积物;①唐巴勒;②玛依拉;③达拉布特;④克拉玛依

Wang *et al.*, 2007c; Zheng *et al.*, 2007; Qian *et al.*, 2007).

西准噶尔地区也是中亚造山带内一个重要的铜金矿化区, 其中包古图铜金矿区是该地区近几年新发现的一个很有前景的成矿区。该矿区位于准噶尔盆地西缘的达拉布特断裂以南、托里铜金成矿带的东段。包古图地区分布约有二十多个石英闪长斑岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩小岩株或脉岩, 有些小岩株周围出露大量中基性岩脉。最近, 有些学者认为这些与成矿有关的侵入岩可能是由俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩(张连昌等, 2006), 也有一些学者对矿床进行了 Re-Os 同位素定年(宋会侠等, 2007)。但是对这些斑岩的成矿年代学的研究, 除了前人对一些岩石进行了一些 K-Ar 和 Rb-Sr 年代学测试外(金成伟等, 1993; 沈远超和金成伟, 1993), 目前其形成时代一直缺乏精确的年龄制约。笔者近期对该地区的代表性成矿斑岩岩体进行了系统的主、微量元素分析, 并对那些具有典型埃达克岩特征的岩石进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年, 发现这些岩石主要形成于晚石炭世。本文将重点报道这一成果, 并讨论其动力学与成矿意义。

1 区域地质与岩体地质

西准噶尔地区的主要构造特征为 NE-SW 向断裂带非常发育(图 1b), 由北往南依次为托里、哈图、达拉布特断裂和乌尔木逆冲断层, 它们控制了蛇绿岩和花岗岩的分布。西准噶尔地区的一个特点就是蛇绿岩形态复杂, 均已变形, 由于后期的构造运动多沿着走滑断裂分布, 时代不一致, 跨度大, 从晚寒武到石炭纪均有出现。其中唐巴勒蛇绿岩是该地区最老的蛇绿岩(Coleman, 1989; Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; 肖序常和汤耀庆, 1991; Zhang *et al.*, 1993), 形成时代为晚寒武—奥陶纪; 辉长岩中斜长石和榍石的 Pb-Pb 年龄为 523.2 ± 7.2 Ma (Kwon *et al.*, 1989), 辉长岩的矿物—全岩的 Sm-Nd 内部等时线年龄为 489 ± 53 Ma, 玄武岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 447 ± 56 Ma(张弛和黄萱, 1992), 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 531 ± 15 Ma(Jian and Liu, 2005)。玛依拉蛇绿岩中发现有放射虫化石, 其时代为志留纪(辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 415 Ma 以前(Jian and Liu, 2005))。达拉布特蛇绿岩中辉长岩的 Sm-Nd 年龄为

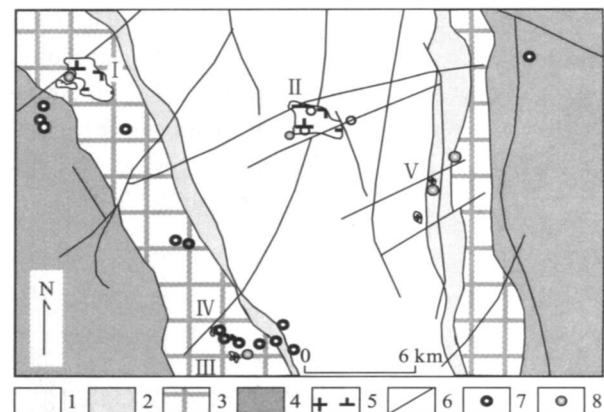


图 2 包古图矿区地质简图(据成勇和张锐, 2006 修改)

Fig. 2 Regional geological sketch map showing the Baogutu deposit

I. 希贝库拉斯组; 2. 包古图上亚组; 3. 包古图下亚组; 4. 太古勒组; 5. 岩体; 6. 断层; 7. 金矿点; 8. 铜矿点; I—V 为岩体编号

395 ± 12 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 8.9$ (张弛和黄萱, 1992), 但最近的 SHRIMP 年代学研究表明这一蛇绿岩形成于 $346 \sim 347$ Ma, 为早石炭世^①。克拉玛依蛇绿岩中蚀变辉长岩的锆石 SHRIMP 定年结果集中在 414.4 ± 8.6 Ma 和 332 ± 14 Ma(徐新等, 2006)。何国琦等(2007)通过对微体古生物的研究认为克拉玛依蛇绿岩形成于早古生代。黄汲清等(1990)认为在早石炭世晚期至中石炭世初期准噶尔南缘盆地北天山地区出现了新的洋盆, 称之为石炭纪亚洲洋或北天山洋。肖序常等(1992)认为早石炭晚期该地区也出现了洋盆并称之为北天山洋。王福同(2006)认为西准噶尔地区在晚石炭世晚期仍为浅海—深海环境。所以, 西准噶尔地区石炭纪仍然可能有洋盆出现。西准噶尔地区出露大量晚古生代花岗岩, 其显著特点是均具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 这些花岗岩的形成时间在 $274 \sim 340$ Ma(Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005; 高山林等, 2006; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006)。

包古图矿区(图 2)主要的构造线以南北向为主; 无论是地层、褶皱和断裂都以南北向为主, 矿区位于南北向的希贝库拉斯复式向斜的东翼, 断裂除了南北向的主要断裂外还有北东向的次级小断裂。矿区出露的地层主要为下石炭统的太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组的一套巨厚的半深海相一大陆坡相火山—碎屑沉积建造。其中太勒古拉组为杂色凝灰岩、凝灰质粉砂岩和灰绿色凝灰岩互层。包古

^①北京离子探针中心 2005 年年度报告. http://220.231.23.73/bjshrimpdce/2005_report_shrimp.dce. <http://www.cnki.net>

图组为灰—灰黑色薄层凝灰质粉砂岩和灰绿色凝灰岩互层。希贝库拉斯组为灰色厚层凝灰质砂岩、含砾砂岩和层凝灰岩。区内大约有 20 个规模较小, 大小数平方公里的石英闪长斑岩、闪长玢岩和花岗闪长斑岩类的小岩株或脉岩侵入下石炭世地层中, 其中以Ⅱ号和Ⅴ号岩株矿化最好, Ⅰ号、Ⅲ号、Ⅳ号也有矿化。本次研究为Ⅱ号、Ⅴ号和Ⅲ号岩体。

Ⅱ号岩体位于矿区的中部(图 2), 呈菱形, 侵位于希贝库拉组, 主要岩相由石英闪长斑岩和花岗闪长斑岩组成, 其中石英闪长岩主要矿物有长石、角闪石和石英, 次要矿物有黑云母和辉石, 副矿物有磁铁矿、钛铁矿和榍石等。花岗闪长斑岩主要矿物有长石、角闪石和石英, 次要矿物有黑云母, 副矿物有磁铁矿和榍石等。Ⅱ号岩体的矿化类型主要为斑岩铜矿。Ⅴ号岩体位于矿区的东部(图 2), 出露面积为 0.84 km², 侵位于包古图组上亚组和希贝库拉组的下亚组地层, 主要岩相由石英闪长斑岩和花岗闪长岩组成, 矿体的北半部以石英闪长斑岩为主, 南半部以花岗闪长斑岩为主, 二者关系不清楚, 化学成分也差别不大。岩体的主要矿物有斜长石、角闪石、石英和钾长石, 其中斜长石为自型, 聚片双晶发育, 石英含量较少, 一般在 5%, 次要矿物有黑云母和辉石, 副矿物有磷灰石和榍石等。Ⅴ号岩体的矿化类型也主要为斑岩铜矿。Ⅲ号矿床也称阔个沙也金矿, 位于包古图矿区的中南部(图 2), 岩体呈椭圆状, 侵位于包古图上亚组, 岩相主要为石英闪长岩和闪长玢岩, 主要矿物有长石、角闪石和石英, 次要矿物有黑云母和辉石, 副矿物有磷灰石和榍石等。岩体周围中基性脉岩极为发育, 大多呈 NE30°~60°平行排列, 脉宽 0.2~3.0 m, 长几十米到几公里不等, 倾向 NW, 倾角在 70°左右。这些脉岩的岩相由辉绿岩、闪长玢岩、石英闪长斑岩和二长花岗斑岩组成。Ⅲ号岩体的矿化类型也主要为斑岩铜矿。

2 分析方法

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重点实验室完成。主量元素分析是用 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)分析, 其详细步骤见 Li *et al.* (2005)。样品的含量由 36 种涵盖硅酸盐样品范围的参考标准物质双变量拟合的工作曲线确定, 基体校正根据经验的 Traill-Lachance 程序进行, 分析精度

优于 1%~5%。微量元素的分析则采用 Perkin-Elmer Scieux ELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 具体的流程见 Li (1997)。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 1。

为精选锆石样品, 先将新鲜的岩石样品粉碎至 120 目以下, 用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石, 再在双目镜下用手工方法逐个精选锆石颗粒, 未用任何化学试剂。本次锆石定年样品和主元素和微量元素分析的样品相对应。锆石阴极发光图像研究在中国科学院广州地球化学研究所 JXA-8100 电子探针仪上完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。ICP-MS 为 Agilent 公司生产的四极杆 ICP-MS Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 GeoLas 2005 深紫外(DUV) 193 nm ArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 激光斑束直径为 32 μm。参考物质为美国国家标准技术协会研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610, 锆石 U-Pb 年龄的测定采用国际标准锆石 91500 作为外标进行校正, 每隔 5 个分析点测一次标准, 保证标准和样品的仪器条件一致。在样品分析前后以及每隔 20 个测点各测一次 NIST SRM610, 以 Si 做内标, 测定锆石中的 U、Th、Pb 的含量。详细的分析流程及有关参数见(Yuan *et al.*, 2004)。元素的比率和元素的含量用 GLITTER(4.0 版)来处理, 年龄的计算和谐和图用 ISOPLOT(3.00 版)(Ludwig, 2003)来完成。分析数据列于表 2。

3 岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

3.1 样品 06XJ-145(与Ⅱ矿体共生的石英闪长斑岩)

绝大多数锆石都是透明自型晶, 棱柱状, 长约 50~150 μm, 长宽比在 1:5~3:1。锆石阴极发光图像显示普通的同心韵律环带(图 3)。27 个分析点显示锆石具有变化的 U (64×10^{-6} ~ 522×10^{-6})、Th (31×10^{-6} ~ 405×10^{-6})含量和 U / Th (0.76~2.65)比值, 为典型的岩浆锆石。在分析的 27 个点中的 22 个点在谐和图上形成单一和集中的聚集束, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $308 \pm 4(2\sigma)$ ~ $319 \pm 4(2\sigma)$ 之间, 加权年龄为 314.9 ± 1.7 Ma(图 3a)。这个年龄被解

表1 包古图成矿斑(玢)岩主量(%)、微量(10^{-6})元素组成Table 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Baogutu porphyries (porphyrites)

岩体	06XJ-145	06XJ-147	06XJ-153	06XJ-156	SWL07	BGT 17	BGT 23	BGT 39	BGT 40	BGT 43	BGT 46	BGT 48
SiO ₂	60.35	60.55	59.78	65.66	56.68	59.03	70.65	65.61	66.66	57.29	57.65	64.88
TiO ₂	0.72	0.69	0.71	0.44	0.71	0.77	0.19	0.58	0.53	0.68	0.86	0.55
Al ₂ O ₃	17.75	16.08	17.22	16.59	17.58	16.58	15.45	15.64	14.98	17.18	16.81	15.66
Fe ₂ O ₃	3.57	3.82	6.12	4.19	3.36	1.62	0.45	1.17	1.00	2.56	2.93	1.80
FeO	2.93	4.77	0.92	2.49	1.76	2.45	3.80	2.66				
MnO	0.06	0.06	0.10	0.08	0.01	0.10	0.02	0.02	0.01	0.09	0.10	0.03
MgO	3.93	4.78	3.26	1.44	3.15	3.65	0.46	2.66	2.25	3.96	3.99	2.26
CaO	6.24	7.13	5.18	1.80	5.63	6.08	2.11	3.02	2.43	6.76	6.51	3.41
Na ₂ O	5.31	4.70	3.82	4.61	4.26	1.09	5.58	1.99	4.75	5.12	4.30	4.25
K ₂ O	0.57	0.60	1.74	2.07	1.12	1.31	2.75	2.49	3.18	1.30	1.47	1.99
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.08	0.09	0.17	0.17	0.10	0.13	0.12	0.18	0.17	0.13
LOI	1.70	1.05	2.03	4.09	1.72	1.65	0.88	1.30	1.67	1.03	0.97	1.77
Σ	100.27	99.51	100.03	99.57	99.38	100.10	99.56	99.60	99.34	99.60	99.56	99.39
Mg [#]	72	74	55	44	66	58	47	66	70	67	65	60
Sc	12.2	13.2	11.7	1.91	26.4	14.6	1.89	11.8	7.41	16.9	16.1	9.14
V	97.2	127.4	134.3	65.0								
Cr	57.5	152	42.5	5.84								
Co	9.28	8.92	17.5	4.64								
Ni	44.4	62.0	33.5	9.07								
Ga	17.0	17.0	18.3	16.6								
Cs	1.14	1.66	1.07	0.917								
Rb	15.8	38.1	25.6	34.9	12.5	29.4	45.6	113.7	48.9	27.0	33.6	49.0
Ba	241	247	784	648	313	508	887	551	510	489	505	687
Th	2.58	3.21	2.47	2.31	0.790	1.89	5.93	5.10	2.63	2.34	2.31	5.38
U	1.01	1.07	0.755	0.679	0.250	0.370	1.08	1.72	1.50	0.500	0.540	1.55
Nb	2.71	3.35	2.26	2.36	1.98	2.62	4.17	4.66	3.68	2.72	3.25	3.78
Ta	0.228	0.244	0.171	0.209	0.110	0.160	0.280	0.330	0.250	0.190	0.230	0.310
La	9.3	11.0	9.94	9.68	5.63	9.09	24.1	11.2	3.85	10.7	10.4	15.2
Ce	24.8	27.8	21.6	18.9	12.2	20.0	44.7	23.2	8.8	23.2	22.7	29.5
Pb	2.58	2.16	5.77	7.94	3.05	5.00	8.66	3.54	3.22	4.40	5.70	5.56
Pr	3.54	3.78	2.97	2.61	1.79	2.85	5.52	3.03	1.18	3.21	3.15	3.99
Sr	716	561	769	346	629	659	515	467	357	645	610	481
Nd	14.8	15.3	12.3	10.0	8.15	12.1	19.7	11.9	5.02	13.7	13.4	15.8
Zr	125	128	111	125	36.4	82.4	122	178	180	119	91.0	167
Hf	3.49	3.62	3.39	3.49	1.23	2.54	3.70	5.07	5.03	3.33	2.76	4.59
Sm	3.17	3.27	2.62	1.89	2.15	2.89	3.29	2.56	1.35	3.26	3.15	3.21
Eu	0.877	0.933	0.840	0.582	0.810	0.890	0.940	0.660	0.520	1.02	0.990	0.920
Gd	2.92	3.00	2.52	1.69	2.03	2.56	2.47	2.30	1.44	3.12	2.93	2.80
Tb	0.482	0.507	0.443	0.270	0.330	0.410	0.350	0.360	0.260	0.510	0.480	0.450
Dy	2.75	2.86	2.48	1.53	2.00	2.46	2.00	2.12	1.61	2.99	2.75	2.48
Y	14.8	15.4	13.7	9.51	11.5	13.6	11.8	13.4	9.18	15.7	15.2	14.3
Ho	0.553	0.578	0.513	0.337	0.420	0.500	0.400	0.44	0.350	0.620	0.570	0.520
Er	1.59	1.56	1.45	1.00	1.17	1.37	1.19	1.27	1.04	1.65	1.55	1.45
Tm	0.229	0.226	0.211	0.156	0.180	0.210	0.200	0.20	0.170	0.240	0.250	0.230
Yb	1.55	1.48	1.46	1.08	1.17	1.35	1.37	1.33	1.15	1.57	1.53	1.49
Lu	0.239	0.231	0.215	0.172	0.180	0.200	0.230	0.210	0.180	0.250	0.240	0.240

注:06XJ-145 来源于Ⅱ号岩体;06XJ-153、06XJ-156 来源于Ⅲ号岩体;06XJ-147 来源于Ⅴ号岩体;其余岩体未分,主要来源于Ⅳ号岩体(张连昌等,2006a).

释为该样品的结晶年龄.其中有5个点明显偏老,在370 Ma左右,可能为捕获晶.

3.2 样品06XJ-147(与V矿体共生的石英闪长斑岩)

绝大多数锆石都是透明自型晶,长约30~

100 μm ,长宽比在1:1~3:1.阴极发光图像显示绝大多数锆石具有同心韵律环带,少量锆石具有扇形分带或者弱的分带(图3).22个分析点显示锆石具有相对一致的U(56×10^{-6} ~ 126×10^{-6})、Th($36 \times$

表2 包古图成矿(玢)岩锆石LA-ICPMS定年结果

Table 2 Zircon LA-ICPMS dating of porphyries (porphyry) in the Baogutu

分析点号	元素含量(10^{-6})		元素比值		同位素比值		年龄(Ma)						
	Th	U	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
06XJ145-1	31	64	2.08	0.054 09	0.001 78	0.376 28	0.012 30	0.050 45	0.000 68	375	49	324	9
06XJ145-2	227	331	1.46	0.056 54	0.000 98	0.393 28	0.007 10	0.050 44	0.000 61	474	20	337	5
06XJ145-3	46	83	1.81	0.055 13	0.001 90	0.385 43	0.013 16	0.050 70	0.000 70	417	52	331	10
06XJ145-4	57	118	2.08	0.052 23	0.001 67	0.365 95	0.011 67	0.050 82	0.000 69	295	48	317	9
06XJ145-5	155	199	1.28	0.050 64	0.001 37	0.355 80	0.009 66	0.050 95	0.000 65	224	39	309	7
06XJ145-6	90	190	2.11	0.053 96	0.002 23	0.373 39	0.015 22	0.050 19	0.000 75	369	65	322	11
06XJ145-7	54	98	1.83	0.055 75	0.001 57	0.389 43	0.010 98	0.050 66	0.000 67	442	39	334	8
06XJ145-8	341	259	0.76	0.054 22	0.001 44	0.370 11	0.009 85	0.049 50	0.000 64	380	37	320	7
06XJ145-9	109	176	1.62	0.058 03	0.002 26	0.391 23	0.015 02	0.048 90	0.000 71	531	59	335	11
06XJ145-10	36	71	1.97	0.050 55	0.002 90	0.348 31	0.019 67	0.049 97	0.000 85	220	99	303	15
06XJ145-11	174	219	1.26	0.040 04	0.003 15	0.271 93	0.021 22	0.049 26	0.000 85	-287	141	244	17
06XJ145-12	70	125	1.79	0.054 36	0.001 55	0.376 60	0.010 76	0.050 24	0.000 66	386	41	325	8
06XJ145-13	90	168	1.87	0.052 57	0.001 23	0.355 84	0.008 41	0.049 09	0.000 62	310	31	309	6
06XJ145-14	61	108	1.78	0.053 16	0.001 39	0.367 36	0.009 63	0.050 12	0.000 65	336	36	318	7
06XJ145-15	133	353	2.65	0.058 43	0.001 43	0.481 98	0.011 91	0.059 83	0.000 77	546	32	399	8
06XJ145-16	122	145	1.19	0.062 71	0.001 41	0.426 42	0.009 69	0.049 32	0.000 62	698	28	361	7
06XJ145-17	292	477	1.63	0.058 89	0.000 97	0.469 51	0.008 12	0.057 82	0.000 70	563	18	391	6
06XJ145-18	142	144	1.01	0.056 81	0.001 35	0.394 28	0.009 44	0.050 33	0.000 64	484	31	337	7
06XJ145-19	235	166	0.056 33	0.001 16	0.383 42	0.008 09	0.049 37	0.000 61	465	26	330	6	
06XJ145-20	297	298	1.01	0.055 16	0.001 05	0.385 12	0.007 57	0.050 63	0.000 62	419	23	331	6
06XJ145-21	268	552	2.06	0.058 64	0.000 98	0.473 59	0.008 26	0.058 57	0.000 71	554	19	394	6
06XJ145-22	62	82	1.32	0.054 34	0.002 63	0.368 67	0.017 57	0.049 21	0.000 79	385	78	319	13
06XJ145-23	119	178	1.49	0.057 80	0.001 46	0.399 09	0.010 16	0.050 08	0.000 65	522	33	341	7
06XJ145-24	131	193	1.47	0.057 80	0.001 33	0.479 28	0.011 17	0.060 14	0.000 77	522	29	398	8
06XJ145-25	405	419	1.03	0.058 46	0.001 93	0.402 63	0.013 21	0.049 95	0.000 70	547	47	344	10
06XJ145-26	165	204	1.24	0.052 50	0.001 32	0.367 70	0.009 34	0.050 80	0.000 66	307	35	318	7
06XJ145-27	155	328	2.12	0.056 31	0.001 08	0.447 69	0.008 83	0.057 66	0.000 71	465	23	376	6
06XJ147-1	59	84	1.42	0.056 63	0.002 00	0.385 59	0.013 43	0.049 38	0.000 68	477	53	331	10
06XJ147-2	97	126	1.30	0.058 24	0.003 73	0.392 27	0.024 55	0.048 84	0.000 92	539	104	336	18
06XJ147-3	57	68	1.19	0.055 35	0.002 14	0.382 03	0.014 56	0.050 05	0.000 71	426	60	329	11
06XJ147-4	69	80	1.15	0.051 06	0.001 57	0.352 55	0.010 83	0.050 06	0.000 65	244	47	307	8
06XJ147-5	61	83	1.36	0.056 42	0.001 62	0.384 45	0.011 03	0.049 41	0.000 64	469	41	330	8
06XJ147-6	103	119	1.16	0.056 20	0.001 77	0.381 87	0.011 93	0.049 26	0.000 66	460	45	328	9
06XJ147-7	77	93	1.21	0.052 98	0.001 70	0.357 22	0.011 37	0.048 89	0.000 66	328	48	310	9
06XJ147-8	36	56	1.55	0.047 94	0.002 83	0.327 39	0.018 98	0.049 52	0.000 85	96	97	288	15

续表2

分析点号	元素含量(10^{-6})		元素比值		同位素比值		年龄(Ma)								
	Th	U	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
06XJ147-9	51	66	1.29	0.05254	0.00181	0.35707	0.01220	0.04928	0.00067	309	53	310	9	310	4
06XJ147-10	46	61	1.34	0.06224	0.00194	0.43087	0.01328	0.05020	0.00068	682	43	364	9	316	4
06XJ147-11	53	77	1.46	0.06122	0.00369	0.41388	0.02437	0.04903	0.00091	647	95	352	18	309	6
06XJ147-12	70	86	1.23	0.05783	0.00152	0.39146	0.01028	0.04909	0.00064	523	35	335	8	309	4
06XJ147-13	67	90	1.33	0.05853	0.00201	0.40216	0.01364	0.04982	0.00070	550	49	343	10	313	4
06XJ147-14	45	57	1.28	0.05701	0.00338	0.39259	0.02276	0.04994	0.00091	492	96	336	17	314	6
06XJ147-15	50	63	1.26	0.05495	0.00200	0.37327	0.01345	0.04926	0.00070	410	55	322	10	310	4
06XJ147-16	51	75	1.46	0.05969	0.00198	0.40279	0.01323	0.04894	0.00068	592	47	344	10	308	4
06XJ147-17	64	77	1.21	0.05818	0.00190	0.39216	0.01271	0.04888	0.00067	537	47	336	9	308	4
06XJ147-18	47	64	1.38	0.06037	0.00371	0.41300	0.02486	0.04962	0.00093	617	98	351	18	312	6
06XJ147-19	87	104	1.20	0.05209	0.00157	0.35275	0.01062	0.04912	0.00066	289	44	307	8	309	4
06XJ147-20	47	66	1.39	0.07440	0.00224	0.50584	0.01506	0.04931	0.00069	1052	38	416	10	310	4
06XJ147-21	53	72	1.36	0.05201	0.00155	0.35385	0.01050	0.04934	0.00066	286	43	308	8	310	4
06XJ147-22	60	86	1.43	0.05174	0.00311	0.34406	0.02028	0.04824	0.00087	274	102	300	15	304	5
06XJ153-1	60	79	1.32	0.05541	0.00142	0.38002	0.00980	0.04975	0.00064	429	35	327	7	313	4
06XJ153-2	52	71	1.36	0.07051	0.00305	0.47553	0.02016	0.04892	0.00079	943	60	395	14	308	5
06XJ153-3	134	181	1.35	0.06039	0.00174	0.42034	0.01208	0.05048	0.00068	618	39	356	9	317	4
06XJ153-4	108	144	1.33	0.05242	0.00159	0.35181	0.01068	0.04868	0.00065	304	45	306	8	306	4
06XJ153-5	184	600	3.26	0.15216	0.00205	2.62991	0.03824	0.12535	0.00151	2370	11	1309	11	761	9
06XJ153-6	140	378	2.70	0.06459	0.00125	0.51744	0.01027	0.05811	0.00072	761	22	423	7	364	4
06XJ153-7	53	60	1.13	0.05169	0.00414	0.35423	0.02778	0.04970	0.00105	272	140	308	21	313	6
06XJ153-8	55	129	2.34	0.05175	0.00120	0.35918	0.00845	0.05033	0.00064	274	31	312	6	317	4
06XJ153-9	27	44	1.64	0.06675	0.00244	0.46670	0.01684	0.05071	0.00074	830	51	389	12	319	5
06XJ153-10	22	34	1.55	0.06740	0.00299	0.45614	0.01995	0.04908	0.00076	850	65	382	14	309	5
06XJ153-11	37	51	1.39	0.05837	0.00316	0.39312	0.02088	0.04885	0.00083	544	86	337	15	307	5
06XJ153-12	47	95	2.03	0.04996	0.00151	0.34570	0.01045	0.05019	0.00067	193	45	301	8	316	4
06XJ153-13	111	167	1.51	0.05798	0.00168	0.43793	0.01268	0.05478	0.00074	529	40	369	9	344	5
06XJ153-14	128	195	1.52	0.06447	0.00188	0.44417	0.01292	0.04997	0.00068	757	39	373	9	314	4
06XJ153-15	741	506	0.68	0.05542	0.00099	0.38530	0.00714	0.05042	0.00062	429	21	331	5	317	4
06XJ153-16	63	91	1.44	0.05855	0.00235	0.41321	0.01635	0.05118	0.00077	550	60	351	12	322	5
06XJ153-17	79	145	1.82	0.07504	0.00279	0.52597	0.01921	0.05083	0.00077	1070	49	429	13	320	5
06XJ153-18	87	183	2.12	0.05149	0.00116	0.34889	0.00800	0.04914	0.00062	263	30	304	6	309	4
06XJ153-19	825	1712	2.08	0.05450	0.00136	0.37880	0.00951	0.05041	0.00066	392	33	326	7	317	4
06XJ153-20	329	263	0.80	0.05590	0.00136	0.37718	0.00928	0.04893	0.00064	448	32	325	7	308	4
06XJ153-21	101	100	0.99	0.06182	0.00392	0.41240	0.02560	0.04838	0.00093	668	100	351	18	305	6
06XJ153-22	361	381	1.05	0.05671	0.00148	0.40136	0.01050	0.05133	0.00068	480	35	343	8	323	4

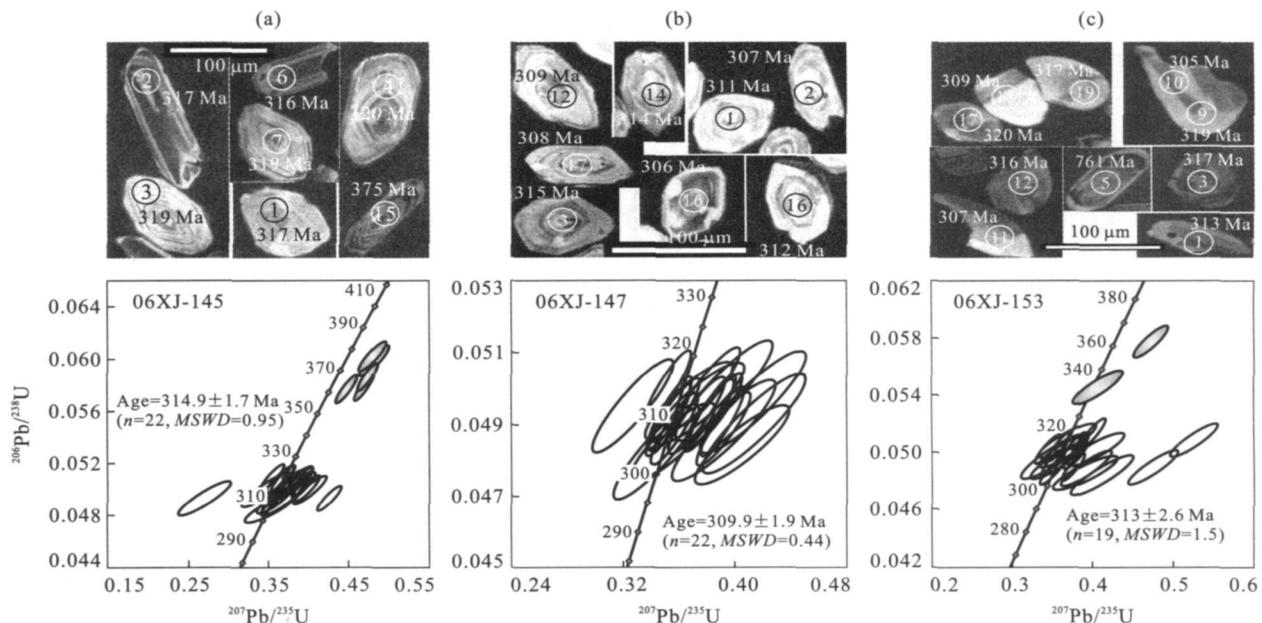


图3 包古图斑岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 谱和图和锆石 CL 图像

Fig. 3 LA-ICP MS zircon U-Pb concordia diagrams and zircon Cathodoluminescence (CL) images

$10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$)含量和 $U / Th (1.15 \sim 1.55)$ 比值,为典型的岩浆锆石.在分析的 23 个点中,所有点在谐和图上形成单一和集中的聚集束, $^{206} Pb / ^{238} U$ 年龄在 $304 \pm 5 (2\sigma) \sim 315 \pm 4 (2\sigma)$ 之间,加权年龄平均为 309.9 ± 1.9 Ma(图 3b),代表了岩浆的结晶年龄.

3.3 样品 06XJ-153(与Ⅲ矿体共生的闪长玢岩)

该样品的锆石的晶体形状复杂,长约 $30 \sim 100 \mu m$,长宽比在 $1:1 \sim 3:1$,有些呈棱柱状,有些呈圆状.棱镜状锆石显示同心韵律环带,而有些板状锆石无分带,有些圆形锆石呈弱的或者扇形分带(图 3).22 个分析点显示锆石具有变化的 $U (34 \times 10^{-6} \sim 1712 \times 10^{-6})$ 、 $Th (22 \times 10^{-6} \sim 825 \times 10^{-6})$ 含量和 $U / Th (0.68 \sim 3.26)$ 比值,但绝大部分在 $1.0 \sim 2.0$ 之间.在分析的 22 个点中的 19 个点在谐和图上形成单一和集中的聚集束, $^{206} Pb / ^{238} U$ 年龄在 $305 \pm 6 (2\sigma) \sim 322 \pm 5 (2\sigma)$ 之间,加权年龄平均为 313.9 ± 2.6 Ma(图 3c),这个年龄被解释为该样品的结晶年龄.其中有 2 个点(6, 13)明显偏老,分别为 364 Ma 和 344 Ma,为捕获晶.分析点 5 具有不谐和的年龄,其 $^{206} Pb / ^{238} U$ 年龄为 761 Ma,可能是继承锆石.

4 成矿斑岩地球化学特征

代表性的主元素和微量元素分析结果见表 1.根据表 1 并结合前人已发表的资料,包古图地区斑岩和

中基性脉岩具有一些相似的元素地球化学特征:岩性变化较大,从闪长岩到花岗岩,但以花岗闪长岩和闪长岩为主(图 4a),脉岩从辉长闪长岩到花岗闪长岩,以闪长岩为主,二者在 TAS 图(Middlemost, 1994)上除了个别点外均落入亚碱性区,在 AFM 图(图 4b)中均落入钙碱性区.岩体和脉岩的岩石都贫碱、富钠、贫钾,岩体 $K_2O + Na_2O$ 为 $2.40\% \sim 8.33\%$,平均为 5.80% , Na_2O / K_2O 为 $0.79 \sim 9.29$,平均为 2.86 ,脉岩 $K_2O + Na_2O$ 为 $4.10\% \sim 7.90\%$,平均为 5.40% , Na_2O / K_2O 为 $0.86 \sim 6.61$,平均为 2.27 .它们均含有高的 $Al_2O_3 (16.08\% \sim 17.75\%)$,变化的 $MgO (0.46\% \sim 4.78\%)$ 含量和 $Mg^{\#} (47 \sim 75)$ (表 1).包古图地区小型斑岩体的一些岩石(如Ⅱ和Ⅴ岩体)具有高的 $MgO (3.93\% \sim 4.78\%)$ 含量、 $Mg^{\#} (68 \sim 74)$,以及高的 $Cr (57.5 \times 10^{-6} \sim 151.9 \times 10^{-6})$ 、 $Ni (44.4 \times 10^{-6} \sim 62.0 \times 10^{-6})$ 等相容元素含量(表 1),同时具有高的 $Sr (561 \times 10^{-6} \sim 716 \times 10^{-6})$ 含量和相对低的 $Y (14.8 \times 10^{-6} \sim 15.4 \times 10^{-6})$ 含量.包古图地区斑岩具有相似的稀土和微量元素组成:稀土元素分布模式为轻稀土富集型,无明显 Eu 异常($\delta Eu = 0.88 \sim 1.0$),但重稀土元素分异不明显(图 4a);富集大离子亲石元素(LILE),如 Ba、K 和 Sr 具有明显的正异常,亏损高场强元素(HFSE)和重稀土元素,显示 Nb、P 的负异常,Ti 也有弱的负异常(图 4b).以上这些特点显示它们与俯冲带岩浆地球化学特征类似(Wilson, 1989).

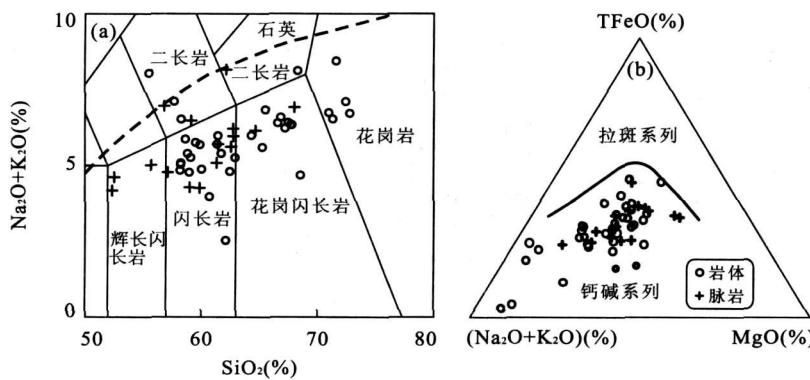


图 4 TAS (a) 和 AFM (b) 图

Fig. 4 (a) TAS and (b) AFM diagrams

a 图据 Middlemost(1994); b 图据 Irvine and Baragar(1971); 数据来源于表 1、张锐等(2006)、沈远超和金成伟(1993)

5 讨论

5.1 形成时代与构造背景

包古图地区的小岩体或脉岩一直缺乏高精度同位素年代学的制约,一般认为其形成于海西中期,如沈远超和金成伟(1993)给出的 V 号岩体的全岩一角闪石 Rb-Sr 为 322 ± 30 Ma, 角闪石 K-Ar 年龄为 322 ± 1.4 Ma, I 号岩体的锆石 U-Pb 的下交点年龄是 305 Ma。这些年代学资料误差较大或精度较低。另外, Rb-Sr、K-Ar 定年方法有其本身固有的缺点:(1)Rb-Sr 同位素体系易受到后期热扰动的影响而重新产生均一化,尤其在矿区,热液蚀变作用强烈,因此 Rb-Sr 等时线很难实现精确的同位素定年;(2)后期地质作用的影响容易使 K-Ar 封闭体系破坏所引起的放射成因氩的丢失,所以, K-Ar 法测年主要适用于年轻的地质热历史简单的地质体测年。由于包古图地区的小岩体或脉岩普遍受到矿化的影响,因此, Rb-Sr 和 K-Ar 同位素年龄可能较难精确地限定这些岩浆岩的形成时代。

本文新的年代学结果表明,包古图石英闪长斑(玢)岩的锆石均具有韵律环带结构,岩体的年龄在 $310 \sim 315$ Ma, 应该反映了岩浆岩的结晶年龄。所以,包古图地区斑(玢)岩形成于晚石炭世。目前虽然对西准噶尔地区蛇绿岩的形成时代一般认为是早古生代,但最近一些锆石 SHRIMP U-Pb 年代学的研究表明该地区的蛇绿岩时代有晚古生代石炭纪年龄的信息,如达拉布特蛇绿岩的 SHRIMP 年龄为 $346 \sim 347$ Ma, 为早石炭世, 达尔布特蛇绿岩中侵入玄武岩中的闪长岩脉有一组 325 ± 6 Ma 的年龄,而不整合于蛇绿岩之上地层中的辉石安山岩也有一组 $336 \pm$

5 Ma 的年龄, 克拉玛依蛇绿岩中蚀变辉长岩中也有一组 332 ± 14 Ma 的年龄(徐新等, 2006)。因此, 西准噶尔地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 年龄中普遍存在早石炭世($347 \sim 325$ Ma)的数据, 这与前人认为该地区石炭纪存有洋盆(石炭亚洲洋或北天山洋)相一致(黄汲清等, 1990; 肖序常等, 1992; 王福同, 2006)。笔者所测定的包古图地区斑(玢)岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄($310 \sim 315$ Ma)略微晚于该地区存在的早石炭世($347 \sim 325$ Ma)蛇绿岩。因此, 笔者认为包古图地区斑(玢)岩的形成很可能与洋盆在晚石炭世的消减有关, 应该形成在岛弧环境中。

5.2 岩石成因

包古图地区的斑(玢)岩具有埃达克岩的特征(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Martin et al., 2005): $\text{SiO}_2 = 56.68\% \sim 70.65\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.08\% \sim 17.75\%$, 高 Sr ($346 \times 10^{-6} \sim 769 \times 10^{-6}$), 低 Y ($9.51 \times 10^{-6} \sim 15.6 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($1.08 \times 10^{-6} \sim 1.55 \times 10^{-6}$), 无明显 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.88 \sim 1.0$)(图 5a), 高的 Sr/Y ($33 \sim 48$), 在 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ 图中(Defant and Drummond, 1993)均落入埃达克岩区(图 6)。这些岩石样品中, 有些样品具有高 MgO 、 $\text{Mg}^{\#}$ (图 7)和高的相容元素 Cr 和 Ni(表 1), 类似典型的埃达克型高镁安山岩(Kay, 1978; Yodzinski et al., 1995)。因此, 包古图地区的斑(玢)岩具有埃达克岩—高镁闪长岩组合的特点。

目前, 对埃达克质岩浆的形成提出了不同的机制, 主要包括:(1)俯冲洋壳熔融(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990), (2)增厚下地壳熔融(Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; 张旗等, 2001; Chung et al., 2003; Hou et al., 2004;

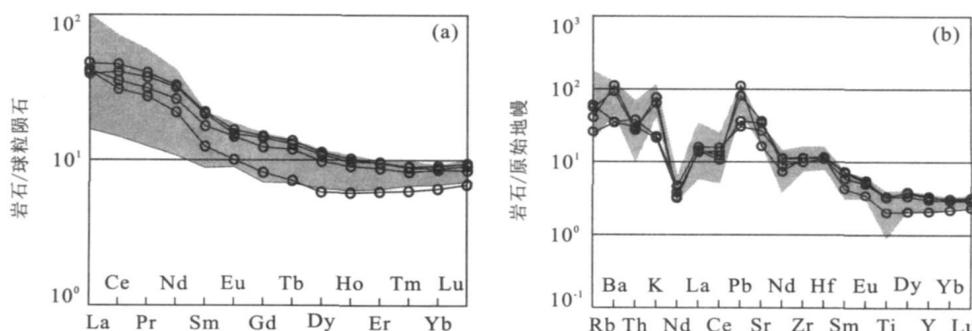


图 5 包古图地区斑(玢)岩稀土元素分布模式(a)和原始地幔标准化微量元素蜘蛛网(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989; 阴影部分的数据来源于张连昌(2006))

Fig. 5 (a) The chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns and (b) primitive mantle-normalized multi-element plots

Condie, 2005; Wang *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006b), (3)拆沉下地壳熔融(Kay and Kay, 1993; Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006a, 2007a; Hou *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2008), (4)玄武质岩浆的结晶分异(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006). 张连昌等(2006)根据包古图斑岩具有 MORB 的 Sr-Nd 同位素特征和高的镁指数,认为这些岩石是洋内俯冲的洋壳熔融形成的,岩浆在上升过程中受到了地幔橄榄岩的不均匀混染. 包古图地区的埃达克岩—埃达克型高镁闪长岩组合具有洋壳俯冲熔融形成的埃达克岩的特征:具有 MORB 的 Sr-Nd 同位素特征,并且富钠贫钾(表 1),与洋壳组分类似,而增厚下地壳熔融形成的埃达克岩往往富钾贫钠(Wang *et al.*, 2005, 2007a; Xiao and Clemens, 2007),并且下地壳熔融一般具有地壳的同位素特点. 岩体具有高的 MgO 和 Mg[#],高于变质玄武岩和榴辉岩的实验熔体(1~4 GPa),和受橄榄岩混染的熔体相似(Rapp *et al.*, 1999)(图 7). 所以包古图地区斑(玢)岩的形成可能与早石炭世洋盆在晚石炭世的俯冲消减有关,其中埃达克质岩石为俯冲洋壳的熔融形成,而高镁闪长岩为俯冲板片熔融形成的岩浆和地幔橄榄岩相互作用的结果.

除了小的斑岩体和脉岩以外,西准噶尔地区还出露大量的花岗岩基(图 1),如红山、克拉玛依、阿克巴斯套、庙尔沟等岩体. 这些岩体有的具有 I 型花岗岩特点,如克拉玛依岩体(Chen and Arakawa, 2005; 高山林等, 2006);有些类似铝质 A 型花岗岩,如红山岩体(苏玉平等, 2006),这些岩石均具有正的 ε_{Nd}(t)(6~9)和年轻的 Nd 同位素模式年龄(约 500 Ma),随着近年来 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆

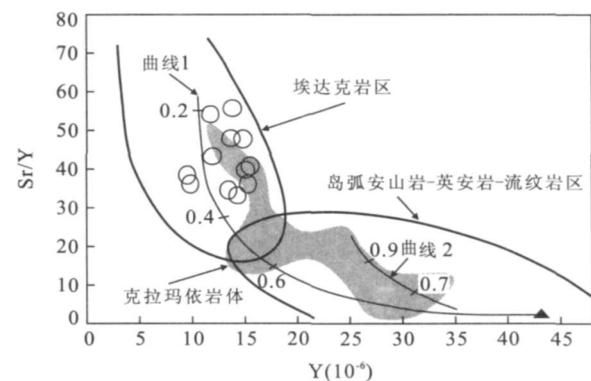
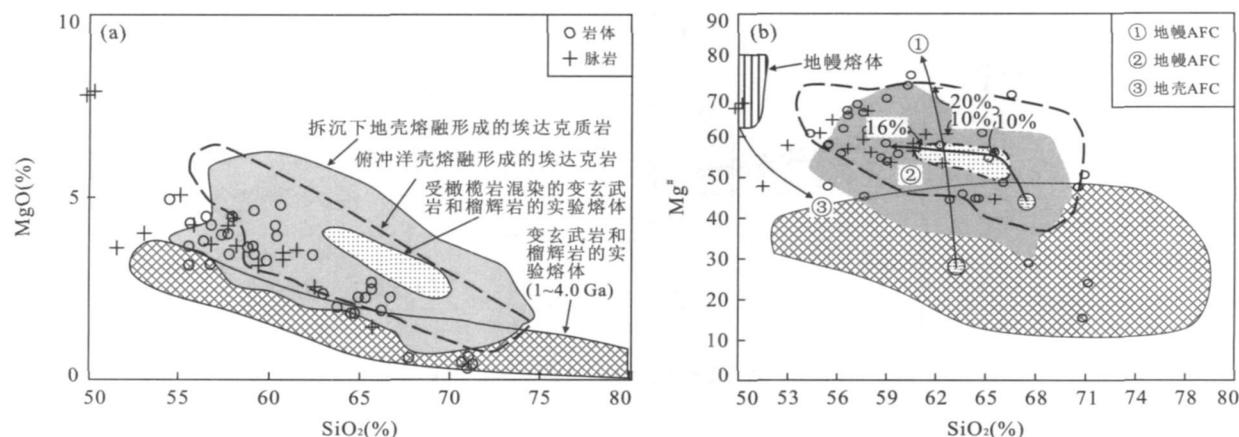


图 6 包古图地区斑(玢)岩 Sr/Y-Y 图(Defant and Drummond, 1993)

Fig. 6 Sr/Y-Y diagram

数据来源于表 1, 克拉玛依岩体数据来自于(Chen and Arakawa, 2005)

石定年技术的应用,在该区积累了相当数量的高质量岩浆岩的年代学数据资料. 图 8 是西准噶尔地区花岗岩类锆石 U-Pb 高精度年龄的汇总,显示岩浆活动集中在 274~340 Ma 之间,有两个峰值,一个是 315 Ma 的次级峰值,另外一个是 305 Ma 主峰值. 而包古图地区的斑(玢)岩就是属于次级峰期岩浆活动的产物. 次级峰期形成的岩浆岩以花岗闪长岩和闪长岩类为主,在这些岩石的样品中有一部分样品类似埃达克岩和高镁闪长岩类(图 6),而主峰期形成的岩浆岩以碱长花岗岩为主,部分岩体的岩石类似 A 型花岗岩. 如果包古图地区埃达克质斑(玢)岩—高镁闪长岩组合的形成与早石炭世洋盆在晚石炭世的俯冲消减有关,那么紧随其后的 I 型和铝质 A 型花岗岩类的形成很可能与板片窗效应有关;因软流圈的上涌导致地幔减压熔融,产生的玄武质岩浆发生大规模底侵,在来自软流圈或底侵玄武质岩浆热的作用下形成.

图 7 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ (a) 和 $\text{SiO}_2\text{-Mg}^{\#}$ (b) 图Fig. 7 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ (a) and $\text{SiO}_2\text{-Mg}^{\#}$ (b) diagrams

数据来源于表 1、张锐等(2006)、沈远超和金成伟(1993), 底图转引自(王强等, 2006b)

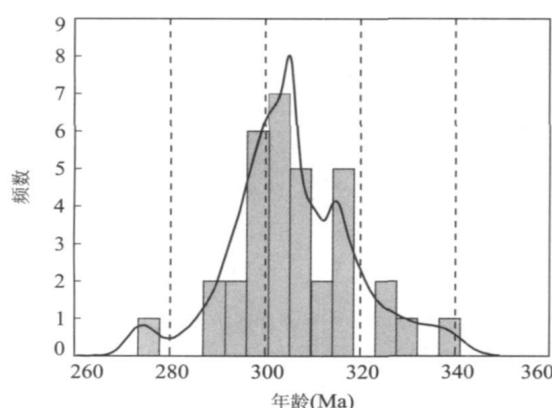


图 8 西准噶尔地区花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄直方图

Fig. 8 Age histograms for the granitoids in the West Junggar
数据除本次研究外还包括 Xian *et al.* (2003)、刘志强等(2005)、
高山林等(2006)、韩宝福等(2006)、徐新等(2006)、袁峰等
(2006)和 Zhou *et al.* (2006, 2007)

用下, 年轻的下地壳发生部分熔融形成花岗岩。

5.3 动力学与成矿意义

5.3.1 动力学背景 西准噶尔地区蛇绿岩时代不一致, 跨度大, 从晚寒武到石炭纪都有出现(Coleman, 1989; Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; 肖序常和汤耀庆, 1991; Zhang *et al.*, 1993; Jian and Liu, 2005; 徐新等, 2006), 甚至同一蛇绿岩也有多组年龄信息, 这些年龄主要集中在 530~395 Ma 和 347~332 Ma。所以, 该地区存在的古洋盆可能有多期, 闭合时间可能也是多期。目前对西准噶尔地区晚古生代构造演化有不同的认识: 很多人将准噶尔地区广泛发育的正 ϵ_{Nd} (t) 和低($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 的花岗岩做为后碰撞地壳垂向生长的标志, 大量的同

位素定年表明, 西准噶尔地区岩体的形成时间大约在 274~340 Ma(Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005; 高山林等, 2006; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006)。韩宝福等(2006)认为西准噶尔后碰撞深成岩浆活动的时限在 340~275 Ma 之间, 李华芹等(2000)认为西准噶尔地区后造山花岗岩类的侵位时代发生在中石炭世之后, 所以西准噶尔地区在晚石炭世早已进入后碰撞阶段, 准噶尔洋应该在晚石炭世之前早已关闭。但肖文交等(2006)认为新疆北部在晚石炭世一二叠纪可能仍存在活动陆缘。因此, 古亚洲洋构造域南部复杂增生造山作用最后延至晚石炭世晚期一二叠纪。高山林等(2006)也认为晚石炭世准噶尔地区仍存在洋盆体制。准噶尔盆地南缘的北天山巴音沟蛇绿混杂岩形成于早石炭世(344.0 ± 3.4 Ma)(徐学义等, 2006)。最近的研究表明, 在天山北部地区也存在洋壳石炭纪的俯冲和熔融作用, 并且形成了典型的岛弧岩浆岩组合埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 玄武岩组合(王强等, 2006; Wang *et al.*, 2007c)。

笔者认为恰当的地球动力学模型至少要能够能够解释:(1)岩石组合, 埃达克岩—高镁安山(或闪长质)岩类和 I 型花岗岩类—A 型花岗岩的成因, 即由钙碱性岩浆到碱性岩浆, 埃达克岩—高镁安山岩组合往往形成于俯冲的岛弧环境(Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007c); 而 A 型花岗岩往往产于伸展背景(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992; Wu *et al.*, 2002), 在由洋脊俯冲作用下形成的板片窗上出露有 A 型花岗岩, 如阿拉斯加的 McKinley Sequence 岩体。

(Hung *et al.*, 2007), 南美智利的黑云母正长花岗岩 San Lorenzo 岩体 (Suarez and De La Cruz, 2001), 也被认为是由洋脊俯冲作用所形成的 (Cande and Leslie, 1986); (2) 岩石形成的时间, 岩石组合形成在一个非常短的时间间隔, 峰值相隔只有 10 Ma (图 8); (3) 成矿问题, 次级峰期的岩石往往和铜金矿有关, 而主峰期的岩石不成矿。另外, 古地理研究显示石炭纪早期西准噶尔地区为深海一次深海环境, 太古勒拉组、包古图组和希贝库拉组均为海相火山碎屑沉积 (宋春晖等, 1996; 王福同, 2006), 石炭纪晚期为次深海—浅海环境。这与智利三联点地区 (Chile Triple Junction) 的上新世火山—沉积组合相似, 而该区在过去的 14 Ma 以来一直有洋脊俯冲作用 (Guivel *et al.*, 1999)。

笔者认为洋脊俯冲模式可以解释西准噶尔地区晚古生代构造演化。包古图地区埃达克岩—高镁闪长岩组合与日本、厄瓜多尔、墨西哥巴哈半岛、阿拉斯加、内蒙古等地出露的埃达克岩或高镁安山岩相类似, 而这些具有特殊地球化学特征的岩石往往和洋脊俯冲形成的板片窗作用相关 (Sisson *et al.*, 2003; Kamei, 2004; Bellon *et al.*, 2006; Cole *et al.*, 2006; Manya *et al.*, 2007; Pallares *et al.*, 2007; Jian *et al.*, 2008)。许多学者认为中亚造山带内的花岗岩具有正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 的特点, 具有年轻同位素的特征, 认为这些花岗岩是在碰撞后伸展背景下来自软流圈地幔的热玄武质底侵岩浆加热而使年轻的下地壳发生部分熔融形成的 (Chen and Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2004; Chen and Arakawa, 2005)。为了解释下地壳熔融所需的热源, Kovalenko *et al.* (2004) 认为需要有地幔柱或热点的作用, 但 Windley *et al.* (2007) 认为中亚造山带在古生代没有地幔柱和热点的证据。如果将西准噶尔地区包古图斑(玢)岩附近的一些碱长花岗岩体作为后碰撞的标志 (Chen and Arakawa, 2005; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006), 那么如何解释比之仅早 10 Ma 左右的埃达克岩—高镁闪长岩组合的成因则需要更深入地探讨。但是, 洋脊俯冲可以解释在如此短的时间内形成这两类岩石, 当洋脊俯冲时, 洋脊两侧的板片容易熔融而形成埃达克岩类, 板片熔融形成的岩浆上升和地幔橄榄岩相互作用形成高镁闪长岩类, 几乎于此同时洋脊俯冲所造成的板片窗使得软流圈地幔上涌, 使年轻的下地壳熔融形成一些具有后碰撞特点的花岗岩类, 这和现在欧亚大陆的东侧发生的洋脊俯冲相似 (Kinoshita, 1997, 1999,

2002; Maruyama *et al.*, 1997; Marwama, 1997; Kim *et al.*, 2005)。另外西准噶尔地区出露大量的中基性脉岩 (李辛子等, 2004) 也与在洋脊俯冲地质现象比较类似 (Sisson *et al.*, 2003)。

几乎所有的俯冲带最终都以和扩张脊相互作用而结束 (Sisson *et al.*, 2003), 所以在大洋闭合的时候洋脊俯冲事件可能比今天所知道的多。最近, 刘希军等 (2007) 提出了东准噶尔克拉麦里蛇绿岩是由准噶尔洋的洋脊俯冲作用形成的, Jian *et al.* (2008) 和 Liu *et al.* (2008) 等认为内蒙古地区有洋脊—海沟相互作用。因此, 在中亚造山带的聚合历史和大陆地壳的增生过程中洋脊俯冲可能是一个重要的机制。

5.3.2 铜金成矿意义

自从埃达克岩被识别以来, 越来越多的证据表明埃达克质岩石与斑岩型或热液型铜金矿床在时空上往往密切相关, 具有明显的偏向性和亲和性 (Thieblemont *et al.*, 1997; Sajona and Maury, 1998; Defant and Kepezhinskas, 2001; Oyarzun *et al.*, 2001; Bissig *et al.*, 2003; Reich *et al.*, 2003; 王强等, 2003; Wang *et al.*, 2006a, 2007b; Zhang *et al.*, 2006b), 尽管目前对铜金矿化的机制还有不一致的认识 (Rabbia *et al.*, 2002; Richards, 2002; 张旗等, 2004; Richards and Kerrich, 2007), 但有研究认为埃达克岩可以作为斑岩型或热液型铜金矿床的找矿标志 (Defant *et al.*, 2002)。Cu、Au 是亲硫元素, 主要赋存于地幔和铁镁质岩石, 所以玄武质洋壳熔融形成的埃达克岩具有良好的成矿物质来源, 同时埃达克岩浆具有高的氧逸度 (Mungall, 2002)。Mungall (2002) 认为板片熔体可以携带大量的 Fe_2O_3 , 当携带大量 Fe_2O_3 的板片熔体进入到富金属硫化物的地幔楔时, 将会导致地幔楔橄榄岩 f_{O_2} 的增高, 地幔中的金属硫化物将被氧化, Cu、Au 等将顺利进入到板片熔体或岛弧岩浆中, 另外俯冲板片富含挥发分 H_2O 和 Cl, 挥发分 Cl 在高温高压下是 Cu、Au 等金属元素的强烈配合剂, 它们将与 Cu、Au 形成稳定的配合物随岩浆一起迁移 (熊小林等, 2005), 有利于成矿。

包古图矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 310 Ma (宋会侠等, 2007), 与斑岩的形成时代 (315~310 Ma) 相一致, 所以包古图斑岩与铜金矿化有密切的关系。笔者认为, 包古图铜金矿床很可能在由洋脊俯冲作用形成的板片窗上, 如阿拉斯加地区的金矿 (Haeussler *et al.*, 1995, 2003)。当洋脊俯冲时, 洋脊两侧的板片容易熔融而形成埃达克质岩浆, 埃达克质岩浆上升和地幔橄榄岩相互作用, 其

中高氧逸度的岩浆使得地幔中的硫化物不稳定,以氧化状态的形式溶解于硅酸盐中,从而使得Cu、Au等金属元素在熔体中不断富集而形成矿床。而洋脊俯冲时由于板片窗作用使得软流圈上涌使下地壳熔融形成的岩浆氧逸度不高且缺乏成矿物质来源,所以不利于成矿。因此,西准噶尔地区闪长岩类的小岩株或脉岩与铜金成矿关系密切,具有重要的铜金勘探意义。

6 结论

(1)包古图岩体的形成时代在310~315 Ma,形成于晚石炭世岛弧环境。(2)包古图斑岩为埃达克岩—高镁安山岩(闪长岩)组合,很可能是由洋脊俯冲作用形成的,其中埃达克质岩为俯冲洋脊两侧的板片熔融而形成,而高镁闪长岩为俯冲板片熔体与地幔橄榄岩相互作用的产物。(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闪长类斑(玢)岩小岩株有利于形成Cu、Au矿床。

致谢:感谢郑建平教授的热情约稿和审稿专家的宝贵建议。室内主量、微量元素分析得到了刘颖和胡光黔老师的帮助,锆石年代学分析得到了刘勇胜教授和宗克清的帮助,在此一并表示感谢!

References

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416):144—146.
- Bellon, H., Aguilera-Robles, A., Calmus, T., et al., 2006. La Purisima volcanic field, Baja California Sur (Mexico): Miocene to quaternary volcanism related to subduction and opening of an asthenospheric window. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 152(3—4):253—272.
- Bissig, T., Clark, A., Lee, J., et al., 2003. Petrogenetic and metallogenetic responses to Miocene slab flattening: New constraints from the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile/Argentina. *Mineralium Deposita*, 38(7):844—862.
- Buckman, S., Aitchison, J. C., 2004. Tectonic evolution of Palaeozoic terranes in West Junggar, Xinjiang, NW China. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1):101—129.
- Cande, S. C., Leslie, R. B., 1986. Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research*, 91(B1):471—496.
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1):33—51.
- Chen, B., Arakawa, Y., 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar fold-belt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5):1307—1320.
- Chen, B., Jahn, B. M., 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5):691—703.
- Cheng, Y., Zhang, R., 2006. Mineralization regularity of Cu-Au deposits in the Baogutu area, western Junggar, Xinjiang. *Geology and Prospecting*, 42(4):11—15 (in Chinese with English abstract).
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11):1021—1024.
- Cole, R. B., Nelson, S. W., Layer, P. W., et al., 2006. Eocene volcanism above a depleted mantle slab window in southern Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 118(1—2):140—158.
- Coleman, R. G., 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8(3):621—635.
- Condie, K. C., 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 80(1—4):33—44.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294):662—665.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21(6):547—550.
- Defant, M. J., Kepezhinskas, P., 2001. Adakites: A review of slab melting over the past decade and the case for a slab-melt component in arcs. *EOS*, 82(5).
- Defant, M. J., Xu, J. F., Kepezhinskas, P., et al., 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2):129—142.
- Eby, G. N., 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1—2):115—134.
- Eby, G. N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7):641—644.
- Feng, Y., Coleman, R. G., Tilton, G., et al., 1989. Tectonic evolution of the West Junggar region, Xinjiang, China.

- Tectonics, 8(4):729—752.
- Gao, J., Long, L. L., Qian, Q., et al., 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1049—1061 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019):892—897.
- Gao, S. L., He, Z. L., Zhou, Z. Y., 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in West Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 24(2) (in Chinese with English abstract).
- Guivel, C., Lagabrielle, Y., Bourgois, J., et al., 1999. New geochemical constraints for the origin of ridge-subduction-related plutonic and volcanic suites from the Chile Triple Junction (Taitao Peninsula and Site 862, LEG ODP141 on the Taitao ridge). *Tectonophysics*, 311(1—4):83—111.
- Haeussler, P. J., Bradley, D. C., Goldfarb, R. J., et al., 1995. Link between ridge subduction and gold mineralization in southern Alaska. *Geology*, 23(11):995—998.
- Haeussler, P. J., Bradley, D. C., Goldfarb, R. J., 2003. Brittle deformation along the Gulf of Alaska margin in response to Paleocene-Eocene triple junction migration. In: Sisson, V. B., Pavlis, T. L., Roeske, S. M., et al., eds., *Geology of a transpressional orogen developed during ridge-trench interaction along the North Pacific margin*. Geological Society of America, Special Paper, 391, 119—140.
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Liu, J. B., Zhang, Y. Q., et al., 2007. Keramay ophiolitic melange formed during Early Paleozoic in western Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1573—1576 (in Chinese with English abstract).
- Hou, M. L., Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., et al., 2007. Contrasting origins of Late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, East China: Implications for crustal thickening to delamination. *Geological Magazine*, 144(4):619—631.
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1—2):139—155.
- Huang, F., Li, S. G., Dong, F., et al., 2008. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, Central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. *Chemical Geology*, 255(1—2):1—13.
- Huang, J. Q., Jiang, C. F., Wang, Z. X., 1990. Plate tectonics and accordion-style of Xinjiang and its adjacent area. *Xinjiang Geology Science*, 1(1):3—16 (in Chinese).
- Hung, C., Chung, S., Cole, R., et al., 2007. Zircon U-Pb ages for the McKinley Sequence and associated plutons, Central Alaska range. *Eos. Trans. AGU*, 88(52): Abstract T11B—0574.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5):523—548.
- Jahn, B. M., Capdevila, R., Liu, D., et al., 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5):629—653.
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2):82—92.
- Jian, P., Liu, D. Y., 2005. SHRIMP dating of SSZ ophiolites from northern Xinjiang Province, China: Implications for generation of oceanic crust in the Central Asian orogenic belt. In: Sklyarov, E. V., ed., *Structural and tectonic correlation across the Central Asian orogenic collage: Northeastern segment*. Guidebook and abstract volume of the Siberian workshop IGCP—480, 246.
- Jian, P., Liu, D. Y., 2008. Time scale of an Early to Mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian orogenic belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth. *Lithos*, 101(3—4):233—259.
- Kamei, A., 2004. An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(1):43—58.
- Kay, R. W., 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1—2):117—132.
- Kay, R. W., Kay, S. M., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1—3):177—189.
- Kim, S. W., Oh, C. W., Choi, S. G., et al., 2005. Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon metamorphic belt, South Korea, and implications for Northeast Asian tectonics. *International Geology Review*, 47(3):248—269.
- Kinoshita, O., 1997. Slab window-related magmatism caused by

- the Kula-Pacific ridge subduction beneath the Eurasia continent in the Cretaceous. *Episodes*, 20(3):185—187.
- Kinoshita, O., 1999. A migration model of magmatism explaining a ridge subduction, and its details on a statistical analysis of the granite ages in Cretaceous Southwest Japan. *Island Arc*, 8(2):181—189.
- Kinoshita, O., 2002. Possible manifestations of slab window magmatism in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics*, 344(1—2):1—13.
- Kovalenko, V. I., Yarmolyuk, V. V., Kovach, V. P., et al., 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5):605—627.
- Kwon, S. T., Tilton, G. R., Coleman, R. G., et al., 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4):719—727.
- Li, H. Q., Chen, F. W., Cai, H., 2000. Study on Rb-Sr isotopic ages of gold deposits in West Junggar area, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 74(2):181—192 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 1997. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze craton, SE China. *Geochemical Journal*, 31:323—337.
- Li, X. H., Qi, C. S., Liu, Y., et al., 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50(21):2481—2486.
- Li, X. Z., Han, B. F., Ji, J. Q., et al., 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China. *Geochimica*, 33(6):574—584 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Y., Jian, P., Kröner, A., et al., 2008. Early Paleozoic ridge-trench interaction in the Central Asian orogenic belt of Inner Mongolia, China. *American Journal of Science* (in press).
- Liu, S., Hu, R. Z., Feng, C. X., et al., 2008. Cenozoic high Sr/Y volcanic rocks in the Qiangtang terrane, northern Tibet: Geochemical and isotopic evidence for the origin of delaminated lower continental melts. *Geological Magazine*, 145(4):463—474.
- Liu, W., Pan, X. F., 2006. Methane-rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post-collisional mafic-ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo-Asian Ocean through to the post-collisional period. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(3—4):286—301.
- Liu, X. J., Xu, J. F., Hou, Q. Y., et al., 2007. Geochemical characteristics of Karamaili ophiolite in East Junggar, Xinjiang: Products of ridge subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 23:1591—1602 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Han, B. F., Ji, J. Q., et al., 2005. Ages and geochemistry of the post-collisional granitic rocks from eastern Alataw Mountains, Xinjiang, and implications for vertical crustal growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):623—639 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4:1—70.
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3—4):581—593.
- Manya, S., Maboko, M. A. H., Nakamura, E., 2007. The geochemistry of high-Mg andesite and associated adakitic rocks in the Musoma-Mara greenstone belt, northern Tanzania: Possible evidence for Neoarchaean ridge subduction? *Precambrian Research*, 159(3—4):241—259.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1—2):1—24.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleo-geographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6(1):121—142.
- Marwama, S., 1997. Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed. *Island Arc*, 6:91—120.
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Rev.*, 37:215—224.
- Mungall, J. E., 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 915—918.
- Oyarzun, R., Márquez, A., Lillo, J., et al., 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36(8):794—798.
- Pallares, C., Maury, R. C., Bellon, H., et al., 2007. Slab-tearing following ridge-trench collision: Evidence from Miocene volcanism in Baja California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161(1—2):95—117.
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6):1491—1521.

- Qian, Q., Gao, J., Klemd, R., et al., 2007. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiate, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s00531-007-0268-x.
- Rabbia, O., Hernández, L., King, R., et al., 2002. Discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun et al. (*Mineralium Deposita* 36, 794–798, 2001). *Mineralium Deposita*, 37(8): 791–794.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356.
- Reich, M., Parada, M., Palacios, C., et al., 2003. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of Central Chile: Metallogenetic implications. *Mineralium Deposita*, 38(7): 876–885.
- Richards, J., 2002. Discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun et al. (*Mineralium Deposita* 36, 794–798, 2001). *Mineralium Deposita*, 37(8): 788–790.
- Richards, J. P., Kerrich, R., 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537–576.
- Sajona, F. G., Maury, R. C., 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series II A Earth and Planetary Science*, 326(1): 27–34.
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307.
- Shen, Y. C., Jin, C. W., 1993. The relationships of magma activity and gold mineralization in West Junggar. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Shen, Y. C., Jin, C. W., Qi, J. Y., 1993. Gold metallogenetic law and forming mechanism in west Junggar mineralized concentrating region. In: Tu, G. C., ed., New improvement of solid geosciences in northern Xinjiang. Science Press, Beijing, 295–310 (in Chinese).
- Sisson, V. B., Pavlis, T. L., Roeske, S. M., et al., 2003. Introduction: An overview of ridge-trench interactions in modern and ancient settings. In: Sisson, V. B., Pavlis, T. L., Roeske, S. M., et al., eds., *Geology of a transpressional orogen developed during ridge-trench interaction along the North Pacific margin*. Geological Society of America, Special Paper, 1–18.
- Song, H. X., Liu, Y. L., Qu, W. J., et al., 2007. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1981–1988 (in Chinese with English abstract).
- Su, Y. P., Tang, H. F., Hou, G. S., et al., 2006. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35(1): 55–67 (in Chinese with English abstract).
- Suarez, M., De La Cruz, R., 2001. Jurassic to Miocene K-Ar dates from eastern Central Patagonian Cordillera plutons, Chile (45°–48°S). *Geological Magazine*, 138(1): 53–66.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Thiéblemont, D., Stein, G., Lescuyer, J. L., 1997. Epithermal and porphyry deposits: The adakite connection. *CR Acad. Sci. II A*, 325(2): 103–109.
- Wang, F. T., 2006. The palaeogeographic and geo-ecological Atlas of Xinjiang Uygur Autonomous region. SinoMaps Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, F. Z., Yang, M. Z., Zhen, J. P., 2002. Geochemical evidence of the basement assembled by island arc volcanics terranes in Junggar basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., et al., 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33(6): 465–468.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007a. Early Cretaceous adakitic granites in the northern Dabie complex, Central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609–2636.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007b. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. *Journal of Geology*, 115(2): 149–161.
- Wang, Q., Wyman, D. A., Zhao, Z. H., et al., 2007c. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt. *Chemical Geology*, 236(1–2): 42–64.

- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2006a. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, dexiong, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1), 119—144.
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xu, J. F., et al., 2006b. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1), 11—30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., 2003. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 10(4), 561—572 (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.
- Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis. Springer, London, 1—466.
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W., et al., 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1), 31—47.
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1—2), 143—173.
- Xian, W. S., Sun, M., Zhang, L. F., et al., 2003. Late Paleozoic vertical crustal growth of western Junggar, Xinjiang in China: Evidence from petrology and Nd-isotope in charnockites and alkaline granites. *Geophysical Research Abstracts*, 5.
- Xiao, L., Clemens, J. D., 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95(3—4), 399—414.
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenetic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleoasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5), 1062—1076 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2004a. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaiids: Implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3), 339—342.
- Xiao, W. J., Zhang, L. C., Qin, K. Z., et al., 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4), 370—395.
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. Tectonic evolution of the north Xinjiang and its adjacent region. Geological Publishing House, Beijing, 1—180 (in Chinese).
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., 1991. On tectonic evolution of the southern margin of the paleozoic composite megastuture zone. Beijing Technol. Press, Beijing, 1—150 (in Chinese).
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Li, J. Y., et al., 1991. On tectonic evolution of the southern margin of the paleozoic composite megasuture zone. Beijing Technol. Press, Beijing, 1—150 (in Chinese).
- Xiong, X. L., Cai, Z. Y., Niu, H. C., et al., 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenetic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3), 967—976 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12), 1111—1114.
- Xu, X., He, G. Q., Li, H. Q., et al., 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33(3), 470—475 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. Y., Li, X. M., Ma, Z. P., et al., 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou ophiolite in the northern Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(8), 1168—1176 (in Chinese with English abstract).
- Yakubchuk, A., 2002. The Baikalide-Altaid, Transbaikal-Mongolian and North Pacific orogenic collages: Similarity and diversity of structural patterns and metallogenetic zoning. *Geological Society of London, Special Publications*, 204(1), 273—297.
- Yakubchuk, A., 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5), 761—779.
- Yogodzinski, G. M., Kay, R. W., Volynets, O. N., et al., 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Kom-andorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5), 505—519.
- Yuan, F., Zhou, T. F., Tan, L. G., et al., 2006. Isotopic ages of the I type granites in west Junggar Sawuer region. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5), 1238—1248 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate

- U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geoanalytical and Geostandard Newsletters*, 28(3), 353–370.
- Zhang, C., Huang, X., 1992. Age and tectonic settings of ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509–524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Zhai, M. G., Allen, M. B., et al., 1993. Implications of Paleozoic ophiolites from western Junggar, NW China for the tectonics of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 150(3): 551–561.
- Zhang, H. F., Zhang, L., Harris, N., et al., 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 75–88.
- Zhang, L. C., Xiao, W. J., Qin, K. Z., et al., 2006b. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41(2): 188–200.
- Zhang, L. C., Wan, B., Jiao, X. J., et al., 2006a. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar. *Geology in China*, 33(3): 626–631 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., 2001. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian period: Implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248–255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qin, K. Z., Wang, Y., et al., 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 195–204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Zhang, Y. X., Tong, G. S., et al., 2006. Major breakthrough in copper exploration in the Baogutu porphyry copper deposit, western Junggar, Xinjiang, and its significance. *Geology in China*, 33(6): 1354–1360 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2007. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks beneath the Junggar basin, NW China: Implications for the formation and evolution of the basin basement. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5–6): 778–794.
- Zhou, M. F., Michael, L. C., Yang, Z. G., et al., 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209(3–4): 233–257.
- Zhou, T. F., Tan, L. G., Fan, Y., et al., 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of the Ka'erjiao intrusion in the Sawur region in West Junggar, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 322–329.
- Zhou, T. F., Yuan, F., Tan, L. G., et al., 2006. Geodynamic significance of the A-type granites in the Sawuer region in West Junggar, Xinjiang: Rock geochemistry and SHRIMP zircon age evidence. *Science in China (Series D)*, 49(2): 113–123.
- Zhu, B. Q., Feng, Y. M., 1994. Plate tectonics and evolution in West Junggar of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 12(2): 91–105 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 成勇,张锐,2006.新疆西准噶尔地区铜金矿成矿规律浅析.地质与勘探,42(4): 11–15.
- 高俊,龙灵利,钱青,等,2006.南天山:晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?岩石学报,22(5): 1049–1061.
- 高山林,何治亮,周祖翼,2006.西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义.新疆地质,24(2): 125–130.
- 韩宝福,季建清,宋彪,等,2006.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.岩石学报,22(5): 1077–1086.
- 何国琦,刘建波,张越迁,等,2007.准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂带的厘定.岩石学报,23(7): 1573–1576.
- 黄汲清,姜春发,王作勋,1990.新疆及邻区板块构造及手风琴式运动.新疆地质科学,1(1): 3–16.
- 金成伟,沈远超,张秀棋,等,1993.西准噶尔岩浆活动及其与构造环境和金矿化的关系.见:涂光炽主编,新疆北部固体地球科学新进展.北京:科学出版社,137–150.
- 李华芹,陈富文,蔡红,2000.新疆西准噶尔地区不同类型金矿床 Rb-Sr 同位素年代研究.地质学报,74(2): 181–192.
- 李辛子,韩宝福,季建清,等,2004.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.地球化学,33(6): 574–584.
- 刘希军,许继峰,侯青叶,等,2007.新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学:洋脊俯冲的产物.岩石学报,23(7): 1591–1602.
- 刘志强,韩宝福,季建清,等,2005.新疆阿拉套山东部后碰撞岩浆活动的时代、地球化学性质及其对陆壳垂向增长的意义.岩石学报,21(3): 623–639.
- 沈远超,金成伟,1993.西准噶尔地区岩浆活动与金矿化关系.中国科学院地质研究所编,新疆准噶尔地区地质志.北京:科学出版社,137–150.

- 系·新疆北部地球科学系列书·北京:科学出版社·
- 沈远超,金成伟,齐进英,等,1993.西准噶尔金矿化集中区的成矿模式和形成机理·见:涂光炽主编,新疆北部固体地球科学新进展·北京:科学出版社,295—310.
- 宋会侠,刘玉琳,屈文俊,等,2007.新疆包古图斑岩铜矿矿床地质特征·岩石学报,23(8): 1981—1988.
- 苏玉平,唐红峰,侯广顺,等,2006.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·地球化学,35(1): 55—67.
- 王方正,杨梅珍,郑建平,2002.准噶尔盆地岛弧火山岩地体拼合基底的地球化学证据·岩石矿物学杂志,21(1): 1—10.
- 王福同,2006.新疆维吾尔自治区古地理及地质生态图集·北京:中国地图出版社·
- 王强,许继峰,赵振华,2003.强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au 成矿作用·地学前缘,10(4): 561—572.
- 王强,赵振华,许继峰,等,2006b.天山北部石炭纪埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 岛弧玄武质岩:对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义·岩石学报,22(1): 11—30.
- 肖文交,韩春明,袁超,等,2006.新疆北部石炭纪一二叠纪独特的构造—成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约·岩石学报,22(5): 1062—1076.
- 肖序常,汤耀庆,1991.古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化·北京:科学技术出版社,1—150.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,1992.新疆北部及其邻区大地构造·北京:地质出版社,1—180.
- 熊小林,蔡志勇,牛贺才,等,2005.东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义·岩石学报,21(3): 967—976.
- 徐新,何国琦,李华芹,等,2006.克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息·中国地质,33(3): 470—475.
- 徐学义,李向民,马中平,等,2006.北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世:来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据·地质学报,80(8): 1168—1176.
- 袁峰,周涛发,谭绿贵,等,2006.西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义·岩石学报,22(5): 1238—1248.
- 张弛,黄萱,1992.新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨·地质论评,38(6): 509—524.
- 张连昌,万博,焦学军,等,2006a.西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义·中国地质,33(3): 626—631.
- 张旗,钱青,王二七,2001.燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示·地质科学,36(2): 248—255.
- 张旗,秦克章,王元龙,等,2004.加强埃达克岩研究,开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面·岩石学报,20(2): 195—204.
- 张锐,张云孝,佟更生,等,2006.新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义·中国地质,33(6): 1354—1360.
- 朱宝清,冯益民,1994.新疆西准噶尔板块构造及演化·新疆地质,12(2): 91—105.