

新疆东准噶尔绿石沟高 Ba-Sr 石英二长岩的 锆石 U-Pb 年龄、成因及地质意义

赵建新^{1,2}, 童英¹, 孟贵祥³, 王涛¹, 张招崇⁴, 张建军¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 江西省地质矿产勘查开发局 912 地质队, 江西鹰潭 335001;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 绿石沟岩体位于东准噶尔琼河坝矿集区, 向东侵入到绿石沟铜矿赋矿围岩中泥盆统北塔山组火山岩中。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示该岩体形成于 354 ± 1 Ma, 为早石炭世。其主要岩石类型为石英二长岩, 含有大量的基性微粒包体, 具有较高的硅、钙、钾含量 ($\text{SiO}_2 = 62.31\% \sim 65.31\%$, $\text{CaO} = 3.71\% \sim 4.89\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.85\% \sim 3.54\%$), 属高钾钙碱性系列。铝含量较高 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.44\% \sim 16.29\%$), 属准铝质 ($A/\text{CNK} = 0.93 \sim 0.99$, $A/\text{NK} = 1.68 \sim 1.96$) I 型花岗岩。稀土元素总量较低 ($\sum \text{REE} = 90.82 \times 10^{-6} \sim 111.36 \times 10^{-6}$), 轻稀土元素相对富集, Eu 呈弱的负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.68 \sim 0.87$)。富集大离子亲石元素 (K、Rb、Ba、Sr 等), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、P、Ti 等), 具有高 Ba ($758 \times 10^{-6} \sim 1113 \times 10^{-6}$)、Sr ($401.8 \times 10^{-6} \sim 512.5 \times 10^{-6}$) 含量和高 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、Sr/Y 值, 显示出高 Ba-Sr 花岗岩的特征, 应是幔源基性岩浆与壳源岩浆混合的产物, 可能形成于俯冲环境向造山后环境的构造转换阶段。

关键词: 东准噶尔; 琼河坝; 铜矿; 高 Ba-Sr; 石炭纪

中图分类号: P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0743-12

Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Lüshigou high Ba-Sr quartz-monzonite in East Junggar, Xinjiang, and its geological significance

ZHAO Jian-xin^{1,2}, TONG Ying¹, MENG Gui-xiang³, WANG Tao¹, ZHANG Zhao-chong⁴
and ZHANG Jian-jun¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. No. 912 Geological Surveying Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Yingtan 335001, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Lüshigou pluton is located in the Qionghaba ore concentration area in East Junggar. This pluton intruded into the host rock of the Lüshigou copper deposit. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from this pluton yielded an early Carboniferous age of 354 ± 1 Ma. The main rock type of the pluton is quartz-monzonite with many mafic-ultramafic enclaves inside. These quartz-monzonites have high SiO_2 ($62.31\% \sim 65.31\%$), Al_2O_3 ($15.44\% \sim 16.29\%$), CaO ($3.71\% \sim 4.89\%$) and K_2O ($2.85\% \sim 3.54\%$) contents, exhibiting high-K calc-alkaline and metaluminous characteristics ($A/\text{CNK} = 0.93 \sim 0.99$, $A/\text{NK} = 1.68 \sim 1.96$), and belonging to I-type granite. The total REE values of them are low ($90.82 \times 10^{-6} \sim 111.36 \times 10^{-6}$) with relative enrichment of LREE and Eu negative anomaly ($\delta \text{Eu} = 0.68 \sim 0.87$). The primitive mantle normalized trace element patterns are characterized by

收稿日期: 2013-10-08; 接受日期: 2017-07-26

基金项目: 中国地质调查局资助项目 (12120113096500, 12120113094000, 1212010811933)

作者简介: 赵建新 (1988-), 男, 助理工程师, 主要从事矿产勘查、矿业权评估及矿业经济研究工作, E-mail: nikil@126.com; 通讯作者: 童英 (1974-), 男, 博士, 研究员, 主要从事花岗岩地球动力学研究, E-mail: yingtong@cags.ac.cn。

the enrichment of the LILE (K, Rb, Ba, Sr) and depletion of the HFSE (Nb, Ta, P, Ti). The quartz-monzonite has high Ba ($758 \times 10^{-6} \sim 1113 \times 10^{-6}$), Sr ($401.8 \times 10^{-6} \sim 512.5 \times 10^{-6}$) values with high $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$, Sr/Y ratios, distinct Nb, Ta and Ti depletion, and are comprehensively called high Ba-Sr granitoid. These characters indicate that the Lüshigou pluton was probably formed by the magma-mixing of the mantle-derived mafic magma and crustal partial melting magma during the tectonic transition period from subduction to post-orogenic setting in the late Paleozoic.

Key words: East Junggar; Qionghaba; copper deposit; high Ba-Sr; Carboniferous

Fund support: Project of China Geological Survey(12120113096500, 12120113094000, 1212010811933)

近年来,在东准噶尔东段的琼河坝地区发现了丰富的金属矿床,包括蒙西铜矿(张永等,2010)、琼河坝铜矿(屈迅等,2009)、桑南铜矿、铜华岭铜矿(郭丽爽等,2009)以及和尔赛铜矿(杜世俊等,2010)等斑岩型矿床;宝山铁矿(张锦祥等,2007)、灰西沟铁矿、琼河坝铁矿和绿石沟铜矿(刘德权等,2005)等夕卡岩型矿床;天工石铜金矿和云英山金矿(王登红等,2009)等热液型矿床,形成一个矿集区。前人对这些矿床及相关岩体进行了一定的研究,不断推进对该地区成矿和构造演化的认识(陈毓川等,2007),如屈迅等(2009)认为琼河坝斑岩铜矿带可能是南蒙古 Oyu Tolgai 中泥盆世斑岩铜矿带的西延;杨富全等(2010)认为琼河坝地区斑岩铜矿带可能主要形成于晚志留世至早泥盆世。这些研究更多的集中在成矿方面,相对而言,该地区发育的大量花岗岩的研究程度较低,只是一些与中古生代成矿关系密切的岩体获得了关注,一些岩体可能与成矿没有直接关系,但对研究成矿时代及成矿背景却具有重要意义,如绿石沟岩体。该岩体位于琼河坝西部,宝山铁矿北侧、绿石沟铜矿西侧,向东侵入到宝山铁矿、绿石沟铜矿的赋矿围岩中泥盆统北塔山组火山岩中,对该岩体进行研究,可以对绿石沟铜矿成矿时代提供很好地限定作用。本文拟通过对绿石沟岩体进行锆石 U-Pb 定年和地球化学研究,探讨其成因,并结合区域地质资料,为探讨区域构造演化和成矿提供限定信息。

1 区域地质及岩体地质

绿石沟岩体位于新疆哈密市伊吾县境内,淖毛湖镇以北 35 km 处,分布在琼河坝大沟以西,呈岩株产出,南北向展布,出露面积约 35 km²。大地构造位置位于东准噶尔阿尔曼太和卡拉麦里蛇绿岩带之间(图 1a)。该地区出露的地层主要有中上奥陶统荒草坡群(O_{2-3h})含化石的火山碎屑岩;中泥盆北塔山组

(D_{2b})海相的中基性火山熔岩及中酸性火山碎屑岩夹碳酸盐岩地层;下石炭统黑山头组(C_{1h})滨海、浅海相碎屑岩和中性火山岩以及第四系(Q)。区内岩浆活动较为强烈,中酸性侵入岩广泛分布,主要形成于古生代。

绿石沟岩体向东侵入到绿石沟铜矿赋矿围岩中泥盆统北塔山组中,从该套地层北侧开始,在岩体顶部出现少量的残留地层,由南往北逐渐变少。岩体南侧与下石炭统黑山头组呈断层接触,西侧则被二叠纪花岗闪长岩侵入,北侧侵入有正长花岗岩(图 1c)。岩体内部发育大量的中基性岩墙,以辉绿岩岩墙为主,多沿北西向和北东向展布。其主要岩石类型包括石英二长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩等,主体为石英二长岩(图 2a),岩体没有发生变形,含有大量的暗色包体(图 2b),岩体只发生少量的绿泥石化,未见其它类型蚀变。

2 样品概况及测试方法

2.1 样品概况

锆石 U-Pb 测年样品(H703-06-8.2)采自岩体中心部位,坐标为: N95°2′32.2″, E44°4′32.3″(图 1c)。岩性为石英二长岩,呈灰白色,具半自形粒状结构,块状构造,主要造岩矿物有钾长石(~35%),呈半自形片状;斜长石(~45%),多呈自形-半自形片状,发育聚片双晶,表面高岭土化;石英(~15%),呈它形粒状;角闪石(~5%),副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等(图 2)。

2.2 测试方法

锆石单矿物分离在河北省廊坊区域地质调查研究所完成,将原岩样品粉碎,经常规重选和电磁选后,在双目镜下挑选锆石。将完整的典型锆石颗粒置于 DEVCON 环氧树脂中,待固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射

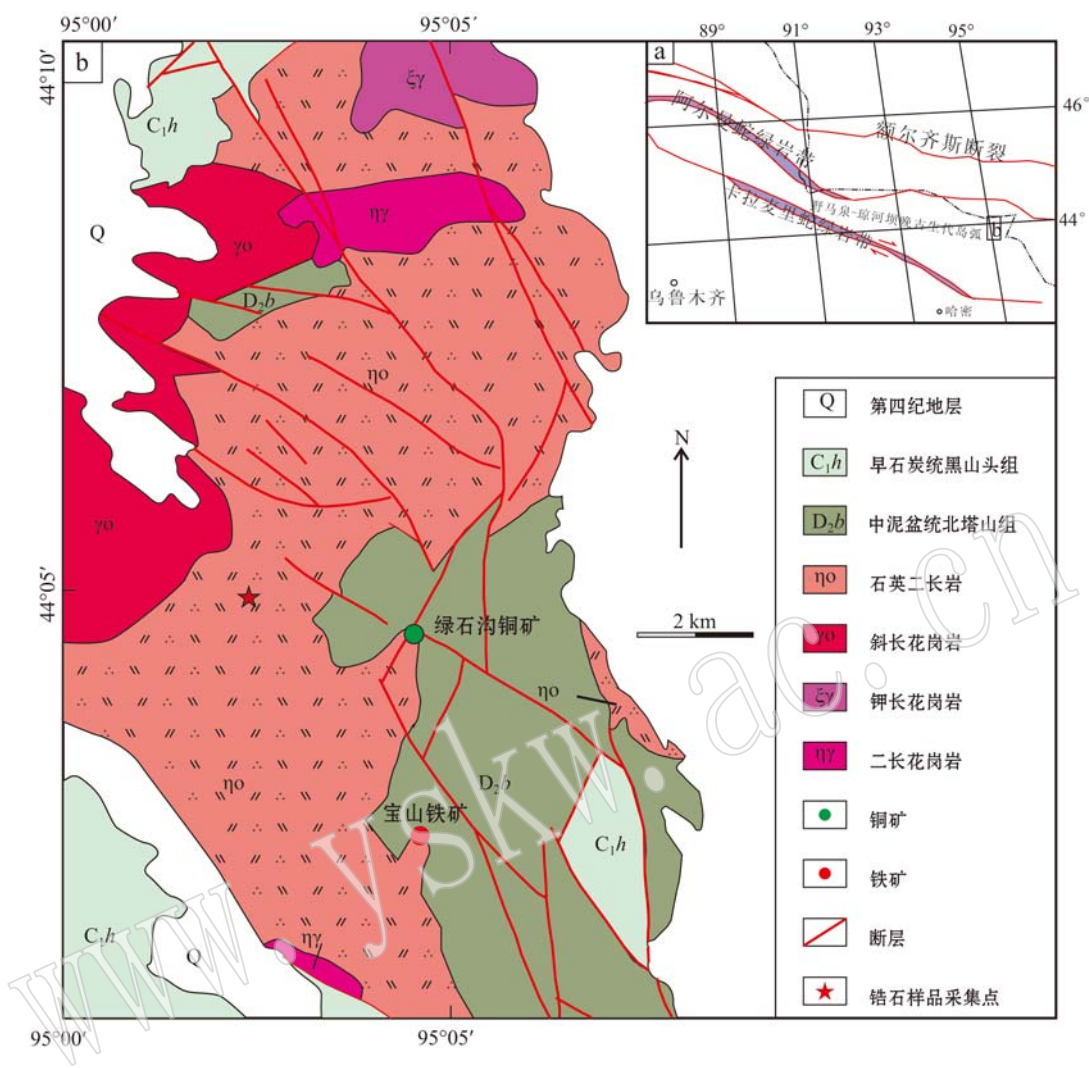


图 1 绿石沟岩体区域地质简图(大地构造位置图据董连慧等, 2009)
Fig. 1 Geological map of the Lüshigou pluton (tectonic location after Dong Lianhui *et al.* , 2009)

光)照相和锆石的阴极发光(CL)照相, 锆石的透射光、反射光和阴极发光照相在北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。样品的锆石以长柱状为主, 少量呈粒状, 大致可分为两种类型: 一种具有明显的核边结构, 另一种震荡环带发育、连续, 呈现典型的岩浆锆石特征(图 3)。同位素定年主要选择具有连续环带的锆石分析, 同时也对具有核边结构的锆石开展少量分析。

锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质调查中心同位素实验室完成, 使用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。激光剥蚀的斑束为 35 μm, 能量密度为 13~14 J/cm², 频率为 8~10 Hz, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune(MC-ICP-MS)。锆石标样

采用 TEMORA 标准锆石。数据处理采用中国地质大学 Liu 等(2008)编写的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwig(2003)的 Isoplot 程序进行作图, 采用²⁰⁸Pb对普通铅进行校正。利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

样品的主量和微量分析在加拿大温哥华 Acme 实验室完成。首先精确选取 0.2 g 样品粉末进行 Lithium metaborate/tetraborate 融合和硝酸稀释溶解, 将样品/助溶剂的融合物于马弗炉上在 1 050 ℃ 的温度下加热 15 min。提取熔融物, 倒入 100 mL 由去离子水和 ACS 级纯度硝酸配置的 5% 浓度的 HNO₃ 中。将溶液摇晃 2 h 使其充分溶解, 取其一部分置于聚丙烯分析管内。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和 Ba、Sc、Cu、Zn、

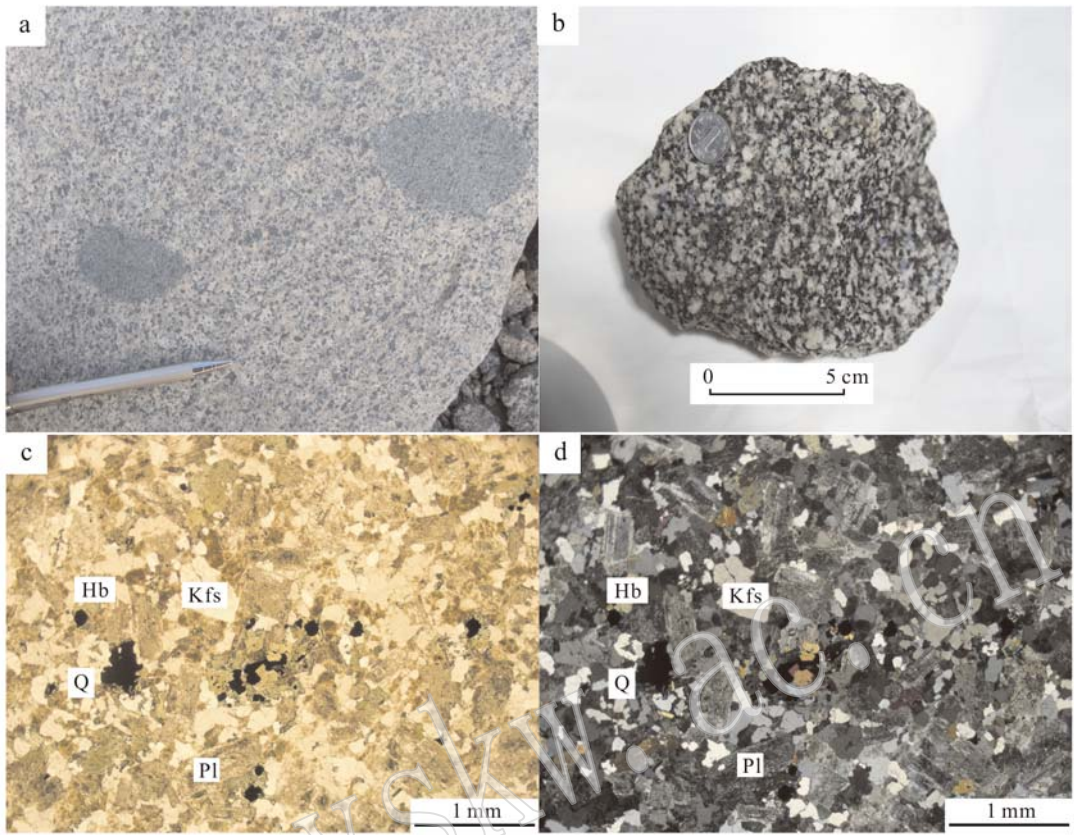


图 2 绿石沟石英二长岩野外照片(a)、手标本照片(b)和显微照片(c 单偏光,d 正交偏光)

Fig. 2 Field (a), specimen (b), microscope plainlight (c) and crossed nicols (d) photographs of the Lüshigou quartz-monzonite
Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Q—石英; Hb—角闪石
Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Q—quartz; Hb—hornblende

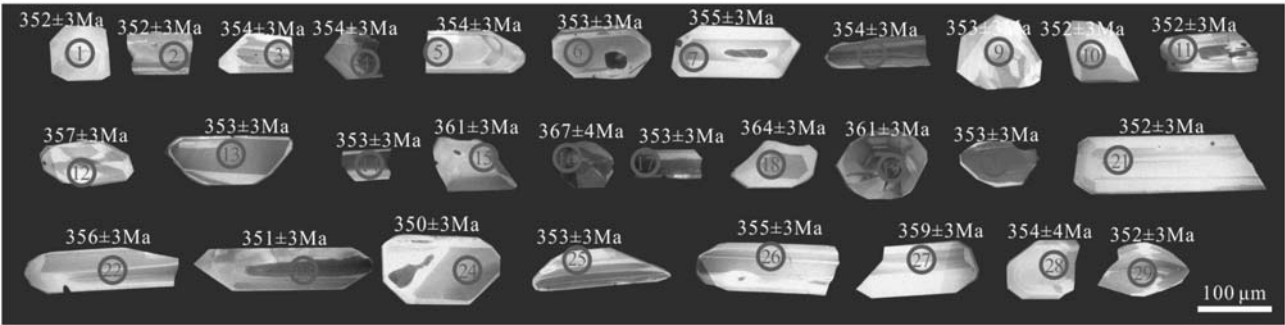


图 3 绿石沟石英二长岩(H703-06-8.2)锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircon crystals from the Lüshigou quartz-monzonite (H703-06-8.2)

Ni 含量的分析。在 ICP-MS 上进行其它微量元素及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分析,称取 0.5 g 样品,置于 3 mL 高温的(95℃)王水中进行溶解,通过 ICP-MS 进行分析。所有的分析以 OS-18 为标准样,精度均优于 ±3%。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素分析和年龄计算结果
锆石的测试结果列于表 1,4 个测点(点 15、16、

表 1 绿石沟石英二长岩(H703-06-8.2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of the Lüshigou quartz-monzonite (H703-06-8.2)

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						表观年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	7	76	119	0.64	0.056 1	0.000 5	0.415 0	0.030 9	0.053 6	0.004 0	352	3	352	26	356	169
2	18	284	296	0.96	0.056 2	0.000 5	0.414 8	0.030 5	0.053 6	0.003 8	352	3	352	26	352	161
3	10	136	171	0.79	0.056 5	0.000 5	0.417 2	0.023 6	0.053 6	0.003 0	354	3	354	20	354	127
4	9	108	159	0.68	0.056 5	0.000 5	0.417 7	0.022 8	0.053 6	0.002 9	354	3	354	19	354	121
5	34	496	542	0.91	0.056 4	0.000 4	0.416 6	0.006 3	0.053 6	0.000 8	354	3	354	5	354	35
6	12	104	210	0.50	0.056 3	0.000 4	0.415 9	0.016 6	0.053 6	0.002 1	353	3	353	14	353	88
7	12	133	205	0.65	0.056 6	0.000 5	0.418 3	0.041 7	0.053 6	0.005 4	355	3	355	35	355	227
8	18	266	296	0.90	0.056 4	0.000 4	0.417 0	0.013 4	0.053 6	0.001 7	354	3	354	11	355	71
9	6	57	108	0.52	0.056 3	0.000 5	0.416 2	0.030 3	0.053 6	0.003 9	353	3	353	26	354	163
10	7	77	125	0.62	0.056 2	0.000 5	0.415 0	0.027 2	0.053 6	0.003 4	352	3	352	23	353	145
11	20	304	326	0.93	0.056 0	0.000 5	0.414 9	0.027 7	0.053 7	0.003 4	352	3	352	24	358	145
12	11	125	177	0.71	0.057 0	0.000 5	0.421 6	0.014 3	0.053 7	0.001 7	357	3	357	12	358	73
13	19	248	307	0.81	0.056 3	0.000 5	0.415 8	0.024 1	0.053 6	0.003 0	353	3	353	20	353	127
14	18	240	295	0.81	0.056 4	0.000 5	0.416 3	0.026 7	0.053 6	0.003 4	353	3	353	23	353	144
15 [#]	6	54	106	0.51	0.057 7	0.000 5	0.427 5	0.026 0	0.053 8	0.003 2	361	3	361	22	362	135
16 [#]	5	56	84	0.66	0.058 6	0.000 6	0.435 7	0.061 9	0.054 0	0.007 6	367	4	367	52	369	317
17	18	248	283	0.88	0.056 2	0.000 5	0.415 5	0.022 6	0.053 6	0.002 8	353	3	353	19	354	119
18 [#]	8	85	131	0.65	0.058 0	0.000 5	0.430 7	0.032 4	0.053 8	0.004 0	364	3	364	27	364	167
19 [#]	13	15	244	0.06	0.057 5	0.000 4	0.427 4	0.013 9	0.053 9	0.001 7	361	3	361	12	366	72
20	24	345	376	0.92	0.056 3	0.000 4	0.416 1	0.016 1	0.053 6	0.002 0	353	3	353	14	353	86
21	4	37	74	0.50	0.056 1	0.000 5	0.414 9	0.033 6	0.053 6	0.004 4	352	3	352	29	354	185
22	8	83	124	0.67	0.056 8	0.000 5	0.420 1	0.032 3	0.053 6	0.004 1	356	3	356	27	356	173
23	17	237	256	0.93	0.056 0	0.000 4	0.477 3	0.023 8	0.061 8	0.003 0	351	3	396	20	666	105
24	14	167	222	0.75	0.055 8	0.000 4	0.455 9	0.016 9	0.059 2	0.002 2	350	3	381	14	575	80
25	6	68	100	0.69	0.056 2	0.000 5	0.416 0	0.029 9	0.053 6	0.003 8	353	3	353	25	356	160
26	8	94	124	0.76	0.056 6	0.000 5	0.418 1	0.025 2	0.053 6	0.003 1	355	3	355	21	355	132
27	11	127	183	0.70	0.057 2	0.000 5	0.424 0	0.029 0	0.053 8	0.003 7	359	3	359	25	361	155
28	4	34	65	0.52	0.056 2	0.000 5	0.415 1	0.038 2	0.053 6	0.005 0	353	3	353	32	353	209
29	8	108	136	0.79	0.056 5	0.000 6	0.417 5	0.042 3	0.053 6	0.005 4	354	4	354	36	355	229

注：采用²⁰⁶Pb 对普通铅进行校正，# 表示未参与岩体形成年龄计算的分析点，在图 5 中以虚线表示。

18、19)结果相对较老(~363 Ma), 15 号点边部具有包裹体,可能受到影响,而 16、18、19 都具有核边结构,可能有残留核的影响(图 4)。其它 25 个具有连

续环带的锆石的分析结果都落在谐和线附近,集中分布(图 5),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 354 ± 1 Ma(MSWD=2.1),可以代表岩体的形成年龄。

3.2 岩石地球化学特征

地球化学分析结果见表 2。岩石为中酸性(SiO₂ = 62.31% ~ 65.31%), 富钾(K₂O = 2.72% ~ 3.54%), 在 SiO₂ - K₂O 图解(图 5a) 中属高钾钙碱性系列。具有较高的铝、钙含量(Al₂O₃ = 15.44% ~ 16.29%, CaO = 3.71% ~ 4.89%), 全部落在准铝质范围内(A/CNK = 0.93 ~ 0.99, A/NK = 1.68 ~ 1.96)(图 5b)。Mg[#] 值为 47.9 ~ 51.6, 平均为 50.3。

岩体的稀土元素总量较低(ΣREE = 90.82 × 10⁻⁶ ~ 111.36 × 10⁻⁶), 轻稀土元素相对富集(LREE/HREE 为 4.5 ~ 5.82), 轻、重稀土之间分馏相对明显,(La/Yb)_N 为 3.70 ~ 5.50, 重稀土内部分馏较弱,(Gd/Yb)_N 为 1.18 ~ 1.46。球粒陨石标准化稀土配分曲线(图 6a)呈明显右倾,具有弱的 Eu 异

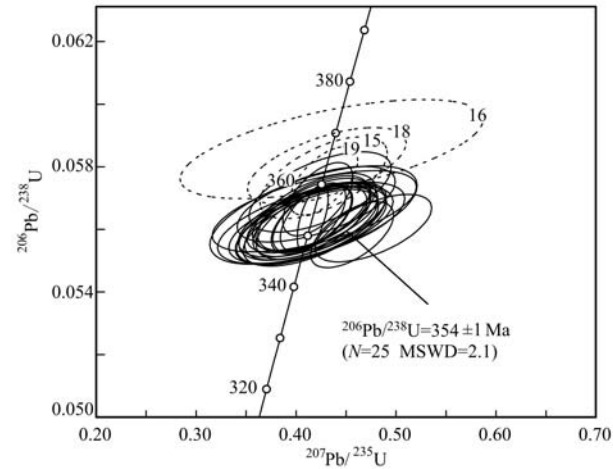


图 4 绿石沟石英二长岩(H703-06-8.2)锆石 U-Pb 谐和图解

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Lüshigou quartz-monzonite (H703-06-8.2)

表 2 绿石沟石英二长岩的主量($w_B/\%$)、微量和稀土($w_B/10^{-6}$)元素含量

Table 2 Chemical analysis results of the Lùshigou quartz-monzonites

样号	H703-06-8.2	H703-07-3.2	H703-07-4.1	H703-07-5.2	H703-07-8.1	H710-1.1	H710-2
SiO ₂	65.31	62.66	62.61	62.36	64.81	64.65	62.31
TiO ₂	0.49	0.54	0.55	0.57	0.48	0.50	0.53
Al ₂ O ₃	15.44	16.11	15.86	16.11	15.88	15.45	16.29
Fe ₂ O ₃	4.70	5.59	5.59	5.73	5.06	4.96	5.22
MnO	0.10	0.11	0.10	0.11	0.10	0.09	0.11
MgO	2.00	2.56	2.49	2.55	2.00	2.08	2.39
CaO	4.19	4.85	4.82	4.89	4.60	4.07	3.71
Na ₂ O	3.02	3.13	3.16	3.13	3.27	3.11	3.68
K ₂ O	3.41	2.85	2.92	2.90	2.72	3.54	3.35
P ₂ O ₅	0.10	0.13	0.11	0.15	0.10	0.12	0.14
Los	1.00	1.20	1.50	1.20	0.70	1.20	2.00
Total	99.76	99.74	99.74	99.73	99.77	99.78	99.73
A/CNK	0.95	0.94	0.93	0.94	0.95	0.95	0.99
A/NK	1.78	1.96	1.90	1.94	1.91	1.73	1.68
Mg [#]	49.8	51.6	50.9	50.9	47.9	49.4	51.6
Y	18.0	18.7	20.3	21.1	19.0	20.6	17.6
La	16.7	15.4	16.4	14.4	14.60	11.7	12.6
Ce	33.5	31.7	34.8	30.4	30.8	27.0	28.1
Pr	4.13	4.00	4.21	4.05	3.94	3.58	3.49
Nd	16.1	17.1	17.4	16.3	16.8	14.3	13.6
Sm	3.47	3.64	3.92	3.89	3.73	3.47	3.32
Eu	0.81	0.87	0.91	0.93	0.86	0.77	0.92
Gd	3.67	3.54	3.68	3.60	3.55	3.44	3.16
Tb	0.51	0.49	0.54	0.54	0.48	0.58	0.51
Dy	3.19	3.59	3.92	3.62	3.41	3.45	2.66
Ho	0.65	0.67	0.65	0.66	0.64	0.77	0.63
Er	1.97	2.13	1.90	2.22	2.00	2.28	1.85
Tm	0.28	0.28	0.28	0.29	0.28	0.36	0.28
Yb	2.23	2.14	2.14	2.51	2.04	2.27	1.79
Lu	0.33	0.28	0.31	0.30	0.29	0.38	0.31
ΣREE	105.54	104.53	111.36	104.81	102.42	94.95	90.82
LREE/HREE	5.82	5.54	5.79	5.09	5.57	4.50	5.54
δEu	0.69	0.74	0.73	0.76	0.72	0.68	0.87
(La/Yb) _N	5.37	5.16	5.50	4.12	5.13	3.70	5.05
Ba	862	794	785	814	758	848	1113
Co	11.7	14.2	14.1	14.7	12.3	11.5	12.2
Cs	1.00	0.80	1.00	0.80	1.40	0.90	0.90
Ga	13.5	14.4	15.3	14.5	15.7	14.0	13.9
Hf	4.90	3.90	3.80	5.50	3.70	4.20	4.10
Nb	3.90	3.50	3.60	3.20	3.50	4.90	3.60
Rb	72.3	59.9	68.4	58.7	54.3	70.9	62.7
Sr	402	472	487	534	461	429	513
Ta	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30
Th	5.50	5.00	6.20	4.30	4.30	6.80	5.00
U	1.30	2.00	0.80	1.80	1.00	3.00	1.20
V	113	141	141	147	122	113	132
Zr	157	134	139	179	129	148	132

注: Fe₂O₃ 为全铁含量。

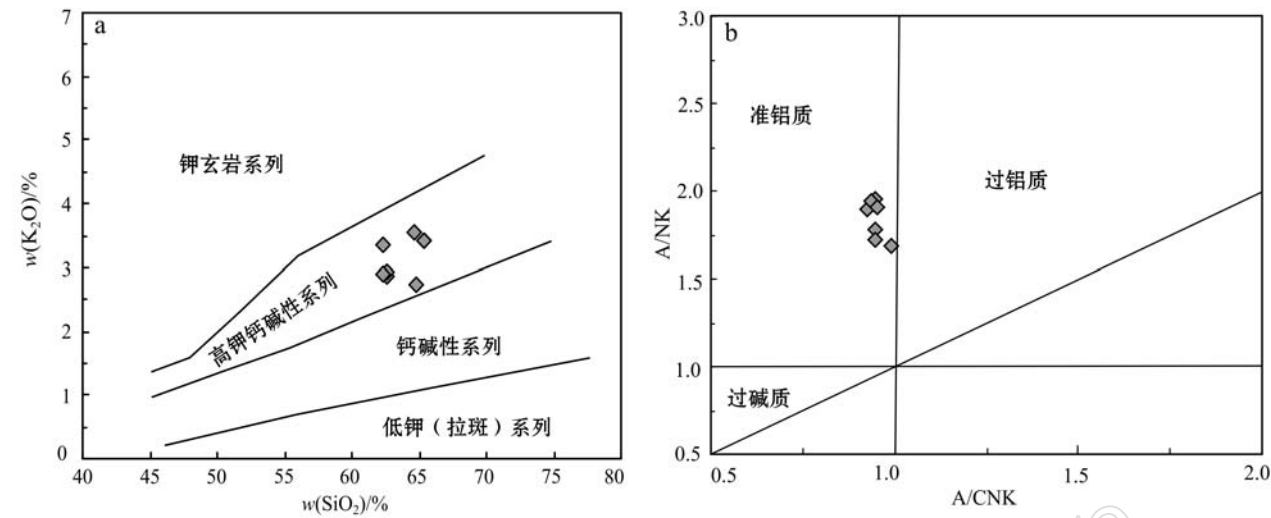


图 5 绿石沟石英二长岩 K_2O-SiO_2 图解(a)和 $A/NK-A/CNK$ 图解(b)(据 Ewart, 1982)
Fig. 5 Diagrams of K_2O-SiO_2 (a) and $A/NK-A/CNK$ (b) for the Lushigou quartz-monzonite (after Ewart, 1982)

常($\delta Eu=0.68\sim0.87$)。

在原始地幔标准化蛛网图解中(图 6b),样品表现为亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,相对富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素,尤其是岩石具有高的 Ba、Sr 含量(Ba 为 $758\times10^{-6}\sim1\,113\times10^{-6}$,平均为 853×10^{-6} ,Sr 为 $402\times10^{-6}\sim534\times10^{-6}$,平均 471×10^{-6})。同时,绿石沟岩体具有高 La_N/Yb_N (3.3~5.9)、 Sr/Y (20.83~29.12) 比值以及低 Y、Yb、Rb 含量。这些地球化学特征与高 Ba-Sr 花岗岩所具有的特征(Tarney and Jones, 1994; Fowler *et al.*, 1996, 2001; 陈斌等,2002; 钱青等,2002)相一致。在 Rb-Sr-Ba 图解(图 7)中,所有样品点也都落在高 Ba-Sr

花岗岩区域内,显示该岩体应属于高 Ba-Sr 花岗岩类。

4 讨论

4.1 岩体形成时代及意义

前人对琼河坝地区的岩浆活动进行过研究,如郭丽爽等(2009)测定铜华岭铜矿区内闪长玢岩、英云闪长岩和二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 427 Ma、422 Ma 和 418 Ma。蒙西矿区含矿斜长花岗斑岩的年龄为 411.7 ± 7.1 Ma(王登红等,2009),含矿花岗斑岩的年龄为 412.7 ± 3.3 Ma(张永等,2010)。

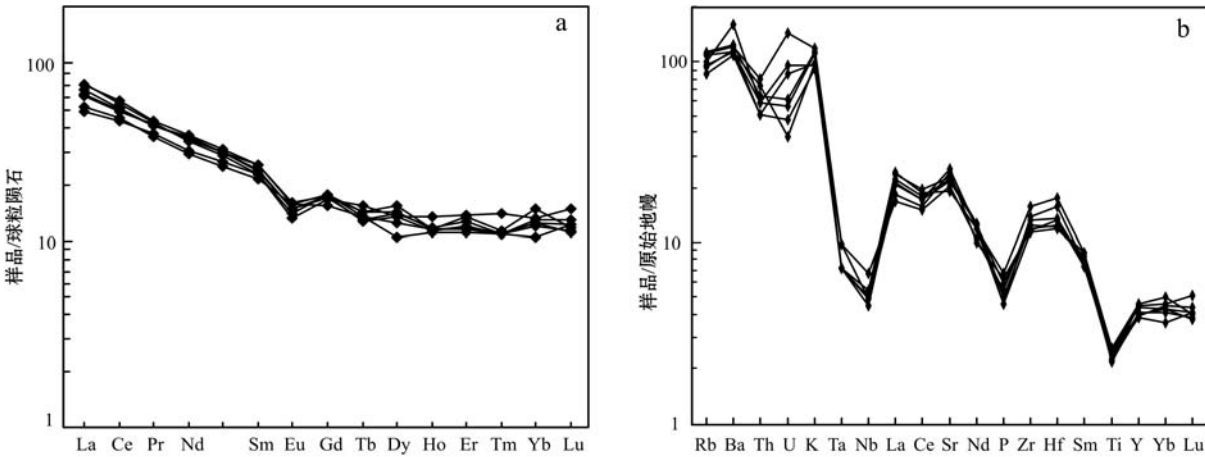


图 6 绿石沟石英二长岩稀土元素分配模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized trace element patterns (b) for the Lushigou quartz-monzonites (after Sun and McDonough, 1989)

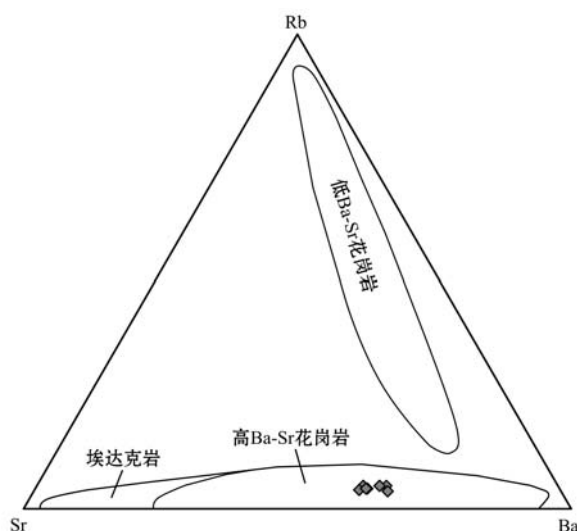


图7 绿石沟石英二长岩的 Sr-Rb-Ba 图解
(底图据 Tarney and Jones, 1994)

Fig. 7 Rb-Sr-Ba diagram for the Lushigou quartz-monzonites (after Tarney and Jones, 1994)

杜世俊等(2010)对和尔赛铜矿相关岩体进行锆石 CAMECA U-Pb 测年结果显示,钾长花岗岩年龄为 429 Ma、花岗闪长岩年龄为 411 Ma、花岗闪长斑岩主体年龄为 410.5 Ma。整体上,琼河坝地区表现为志留纪—早泥盆世岩浆活动强烈。

此次锆石 U-Pb 测年结果显示,绿石沟岩体年龄为 354 ± 1 Ma (MSWD = 2.1),表明在琼河坝地区,除 410~420 Ma 的岩浆侵入活动之外,在早石炭世还存在较年轻一期岩浆侵入活动。

新疆地矿局第二区调大队经矿产普查认为绿石沟岩体与绿石沟铜矿矿体在空间上关系密切,岩浆后期热液为成矿提供了热液和成矿物质。但是经过野外观察及钻孔岩心揭示的信息显示,绿石沟岩体侵入到绿石沟铜矿赋矿围岩中,岩体与矿体不直接接触,两者之间为稍晚侵入的正长花岗岩。矿化只出现在火山岩中,而在岩体(包括正长花岗岩)与火山岩的接触带以及岩体内部均未发生矿化,可以认为绿石沟铜矿形成于绿石沟岩体侵位之前,即早石炭世之前,而绿石沟铜矿赋矿围岩为中泥盆统北塔山组,成矿应略晚于中泥盆世,表明绿石沟铜矿应形成于中晚泥盆世。

4.2 岩石成因

绿石沟石英二长岩属于准铝质、高钾钙碱性系列花岗岩类,不含白云母、堇青石等矿物,CIPW 标准矿物计算显示,刚玉体积分数小于 1%,表明其应

属于 I 型花岗岩。样品富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损高场强元素,Eu 负异常较弱,表明早期斜长石分异作用不明显。

Tarney 等(1994)提出了高 Ba-Sr 花岗岩有几种可能成因:① 与洋底高原的俯冲熔融有关,如埃达克岩(Defant and Drummond, 1990, 1993);② 与地幔柱的作用有关;③ 岩石圈地幔受软流圈富碳酸岩流体交代;④ 与富集 Ba、Sr 的基性岩浆底侵作用等有关,如南美安第斯花岗岩(Petford and Atherton, 1996);⑤ 幔源基性岩浆与地壳酸性岩浆混合也可以形成高 Ba-Sr 花岗岩(Fowler and Henney, 1996; Ajaji *et al.*, 1998; 陈斌等,2002; 钱青等,2002)。

绿石沟石英二长岩的许多地球化学特征与 Adakite(张旗等,2001,2003)类似,如高 Sr、低 HREE,亏损 Nb 元素, Al_2O_3 大于 15% 等,而且源自板片俯冲或加厚地壳部分熔融的 Adakite 也具有较高的 Ba 含量,但是以下几个特征与 Adakite 明显不同:① $Mg^\#$ 值平均为 50.32(Adakite 达 51)(戴雪灵等,2010);② Y 和 Yb 的平均含量分别为 19.33×10^{-6} 和 2.16×10^{-6} (Adakite 分别为小于 18×10^{-6} 和 1.9×10^{-6});目前在新疆及邻区可能存在的地幔柱也是形成于二叠纪(Zhang *et al.*, 2010),在琼河坝及周边地区未发现早石炭世存在地幔柱的证据,基本可以排除地幔柱成因;另外,岩石圈地幔受软流圈富碳酸岩流体交代形成的高 Ba-Sr 花岗岩一般具有较高的 Zr/Hf 值(Dupuy *et al.*, 1992; Yaxley *et al.*, 1998),如康坪花岗岩(王艳芬等,2012)的 Zr/Hf 值达到 40 以上,明显高出球粒陨石或洋中脊玄武岩等未分异岩石中的 Zr/Hf 值(37 ± 2 , Kamber and Collerson, 2000)。绿石沟石英二长岩的 Zr/Hf 值为 32.00~36.58,平均为 33.93,明显偏低,因此排除其富碳酸岩流体交代地幔软流圈成因;再有,从基性岩浆分异成酸性花岗岩需要大量角闪石的分离结晶,按照重稀土元素在角闪石中的分配特征(Rollinson and Rollinson, 1993),大量角闪石的分离结晶会造成残余岩浆中 Gd/Yb 值的明显降低,但绿石沟石英二长岩的 Gd/Yb 值并没有随着 SiO_2 的增大或 $Mg^\#$ 的降低呈现出明显减小趋势。陆壳熔融通常是富钠的(Rutter and Wyllie, 1988; Rapp and Watson, 1995; Douce, 1999),不能形成具高钾钙碱性特征的花岗质岩石。而 Douce(1999)根据陆壳岩石熔融结果提出高钾钙碱性花岗岩浆通常是壳幔混合的结果,在 $FeO^T - MgO$ 图解上(图 8),绿石沟岩

体样品均沿岩浆混合趋势线分布, 绿石沟岩体发育大量基性暗色包体(图 2b), 两者之间的界线有时模糊, 为岩浆混合成因提供了很好的支持。因此, 绿石沟岩体应为幔源基性岩浆与地壳酸性岩浆混合的产物。

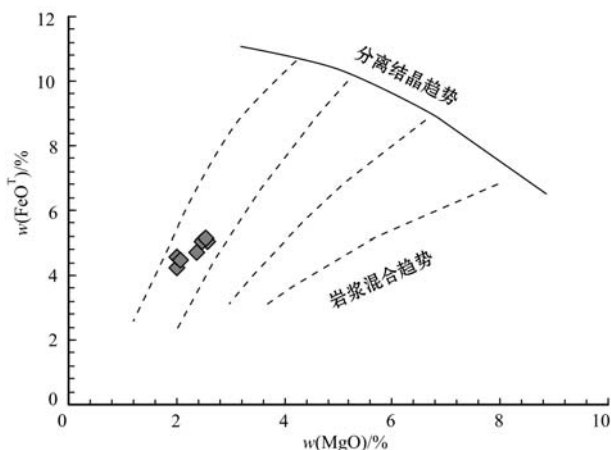


图 8 绿石沟石英二长岩 FeO^T - MgO 图解
(Zorpi *et al.*, 1991)

Fig. 8 Diagram of FeO^T versus MgO for the Lùshigou quartz-monzonites (after Zorpi *et al.*, 1991)

4.3 形成构造环境探讨

I 型花岗岩能产生于多种构造背景之下, 以单独一个 I 型花岗岩岩体的地球化学特征来讨论其构造环境有失偏颇, 因此结合东准噶尔地区区域构造岩浆演化, 来确定绿石沟岩体形成的构造背景。东准噶尔地区(包括东准噶尔北缘)古生代的构造岩浆活动一直受到地学界关注(Han *et al.*, 1997; Jahn, 2001, 2004; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006, 2008, 2010; 童英等, 2010; 张招崇等, 2006; 唐红峰等, 2007, 2008, 2009; 吕书君等, 2012), 前人研究获得了大量的锆石 U-Pb 年龄, 为理解东准噶尔地区的构造演化提供了依据。早期的结果显示东准噶尔岩浆活动的高峰期主要为 325~310 Ma 和 305~280 Ma 两个时期(韩宝福等, 2006)。而近年来随着研究的深入(吕书君等, 2012), 特别是琼河坝地区大量与成矿有关的岩浆岩 U-Pb 年龄的获得, 如铜华岭中酸性侵入岩(418.5、422.8、427.4 Ma, 郭丽爽等, 2009)和尔赛岩体(410.5 Ma, 杜世俊等, 2010)等, 显示东准噶尔地区除晚古生代与造山后有关的岩浆活动强烈外, 在早-中古生代也是一个高峰期, 与俯冲关系密切。

早石炭世(360~340 Ma)似乎出现一个岩浆宁

静期, 与阿尔泰地区古生代的岩浆活动(王涛等, 2010; Tong *et al.*, 2012)具有相似性。重要的是, 整个东准噶尔地区在晚石炭世就开始发育大规模的碱性(A 型)花岗岩(童英等, 2010; 及其中的参考文献), 揭示全面的区域性造山后伸展, 表明早中古生代的俯冲作用并没有延续到晚石炭世, 早石炭世应是一个重要构造环境转换期, 形成于 354 Ma 的绿石沟岩体正是这个时期的产物。

5 结论

(1) 绿石沟岩体锆石 U-Pb 年龄为 354 ± 1 Ma, 形成于早石炭世早期, 表明在琼河坝地区除了晚志留世一早泥盆世的岩浆活动以外, 还存在早石炭世的岩浆活动。同时表明绿石沟铜矿的成矿时期应在中晚泥盆世。

(2) 绿石沟岩体主要岩石类型为高钾钙碱性的准铝质石英二长岩, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 相对富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素, 属高 Ba-Sr 的 I 型花岗岩系列, 是幔源基性岩浆与地壳岩浆混合而产生的。

(3) 绿石沟岩体可能形成于俯冲环境向造山后环境的构造转换期。

致谢 室内实验室分析测试和数据处理得到天津地质调查中心耿建珍老师的指导和帮助, 审稿专家给予了宝贵的审稿意见, 在此表示衷心的感谢。

References

- Ajaji T, Weis D, Giret A, *et al.* 1998. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tanncherfi intrusive complex, northeastern Morocco: geochemical, isotopic and geochronological evidence[J]. *Lithos*, 45(1): 371~393.
- Chen Bin, Zhai Mingguo and Shao Ji'an. 2002. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang Complex: Major and Trace Element evidence[J]. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 46(9): 941~953 (in Chinese).
- Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanling, *et al.* 2007. Research on Large Scale Ore Concentration Area of Strategic Mineral Resources in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 156~171(in Chinese).
- Dai Xueling, Peng Shenglin and Hu Xiangzhao. 2010. Adakite in Xi-

- aosigou porphyry copper-molybdenum deposit, Hebei Province: age, geochemical characteristics and geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 517~528.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6 294): 662~665.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21(6): 547~550.
- Dong Lianhui, Xu Xingwang, Qu Xun, *et al.* 2009. Tectonic setting and formation mechanism of the circum-Junggar porphyritic copper deposit belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 713~737(in Chinese with English abstract).
- Douce A E P. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55~75.
- Du Shijun, Qu Xun, Deng Gang, *et al.* 2010. Chronology and tectonic setting of the intrusive bodies and associated porphyry copper deposit in Hersai area, eastern Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2 981~2 996(in Chinese with English abstract).
- Dupuy C, Liotard J M and Dostal J. 1992. Zr/Hf fractionation in intraplate basaltic rocks: carbonate metasomatism in the mantle source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2 417~2 423.
- Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range[J]. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*: 25~95.
- Fowler M B and Henney P J. 1996. Mixed Caledonian appinite magmas: implications for lamprophyre fractionation and high Ba-Sr granite genesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126(1~2): 199~215.
- Fowler M B, Henney P J, Darbyshire D P F, *et al.* 2001. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: the Rogart pluton, Sutherland[J]. *Journal of the Geological Society*, 158(3): 521~534.
- Guo Lishuang, Zhang Rui, Liu Yulin, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age of Tonghualing intermediate-acid intrusive rocks, eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(5): 819~824(in Chinese with English abstract).
- Han B, Wang S, Jahn B, *et al.* 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 138(3): 135~159.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 077~1 086(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M. 2001. The third workshop of IGCP-420(continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia)[J]. *Episodes*, 24: 272~273.
- Jahn B M. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 599~603.
- Kamber B S and Collerson K D. 2000. Role of 'hidden' deeply subducted slabs in mantle depletion[J]. *Chemical Geology*, 166(3): 241~254.
- Liu Dequan, Tang Yanling and Zhou Ruhong. 2005. The Copper Ore and Nickel Ore Deposits in Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Liu Y, Hu Z, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Kenneth R. Ludwig.
- Lü Shujun, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating for intrusions in Laoshankou ore district in northern margin of East Junggar and their significances[J]. *Geological Review*, 58(1): 149~164(in Chinese with English abstract).
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1 491~1 521.
- Qian Qing, Chung Sunlin, Lee Tongyi, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275~292(in Chinese with English abstract).
- Qu Xun, Xu Xingwang, Liang Guanglin, *et al.* 2009. Geology and Re-Os age of the Mengxi Cu-Mo deposit and element geochemistry of intrusions in the Qiongheba area and its constraint to tectonic setting of the Qiongheba magmatic arc in eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 765~776(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rollinson H R and Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[J]. Longman Scientific & Technical Essex.

- Rutter M J and Wyllie P J. 1988. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust[J]. *Nature*, 331(6 152): 159~160.
- Su Yuping, Tang Hongfeng and Cong Feng. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkaline granite body in East Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117~126 (in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, *et al.* 2006. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175~184(in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Zheng Jianping, Tang Huayun, *et al.* 2010. Zircon U-Pb and Hf isotopes of volcanic rocks from the Batamayineishan Formation in the eastern Junggar Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(30): 2 931~2 943(in Chinese).
- Sun S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping, *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: Constraint from isotopic ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 989~1 997(in Chinese with English abstract).
- Tang Hongfeng, Su Yuping, Qiu Huaning, *et al.* 2009. Ar-Ar age of tin mineralization in the Beilekuduk tin metallogenic belt, East Junggar, Xinjiang (NW China)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 303~1 309(in Chinese with English abstract).
- Tang Hongfeng, Zhao Zhiqi, Huang Rongsheng, *et al.* 2008. Primary Hf isotopic study on zircons from the A-type granites in eastern Junggar of Xinjiang, Northwest China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4): 335~342(in Chinese with English abstract).
- Tarney J and Jones C E. 1994. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models[J]. *Journal of the Geological Society*, 151(5): 855~868.
- Tong Y, Wang T, Siebel W, *et al.* 2012. Recognition of early Carboniferous alkaline granite in the southern Altai orogen: post-orogenic processes constrained by U-Pb zircon ages, Nd isotopes, and geochemical data[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 937~950.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619~641(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Huaqin, Ying Lijuan, *et al.* 2009. Copper and gold metallogenic epoch and prospecting potential in Qionghaba area of Yiwu County, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 73~82(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, *et al.* 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altai orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: Perspectives from Chinese Altai[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595~618(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanfen, Shao Yi, Jiang Shaoyong, *et al.* 2012. Petrogenesis of Indosinian high Ba-Sr granites in Laoniushan batholith, Shaanxi Province and their tectonic implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 133~149(in Chinese with English abstract).
- Yaxley G M, Green D H and Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 39(11~12): 1 917~1 930.
- Yang Fuquan, Yan Shenghao, Liu Guoren, *et al.* 2010. Geological characteristics and metallogenesis of porphyry copper deposits in Junggar, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 956~970(in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, *et al.* 2010. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? [J]. *Lithos*, 119(3): 537~552.
- Zhang Jinxiang, Nie Weidong, Zhao Xianli, *et al.* 2007. Geological characteristics and metallogenic model of the Baoshan iron deposit and some prospecting indicators in the Yiwu county, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 25(4): 368~372(in Chinese).
- Zhang Qi, Wang Yan, Liu Hongtao, *et al.* 2003. On the spatiotemporal distribution and geodynamic environments of adakites in China annex: Controversies over differing opinions for adakites in China[J]. *Earth Science Frontier*, 10(4): 385~400(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Wang Yuanlong. 2001. Preliminary study on the components of the lower crust in East China Plateau during anshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic composition of adakite-like rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 505~513(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Liang Guanglin and Wu Qianyi. 2010. The vein character and formation mechanism of the Mengxi Cu-Mo deposit in East Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(10): 2 997~3 006(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, *et al.* 2006. The SHRIMP zircon age of the granites in northeastern Junggar, Xinjiang

- [J]. Chinese Science Bulletin, 51(13): 1 565~1 574(in Chinese).
- Zorpi M J, Coulon C and Orsini J B. 1991. Hybridization between felsic and mafic magmas in calc-alkaline granitoids—a case study in northern Sardinia, Italy[J]. Chemical Geology, 92(1): 45~86.
- ### 附中文参考文献
- 陈 斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据[J]. 中国科学: D 辑, 32(11): 896~907.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 2007. 中国新疆战略性固体矿产大型矿集区研究[M]. 北京: 地质出版社, 156~171.
- 戴雪灵, 彭省临, 胡祥昭. 2010. 河北小寺沟铜钼矿埃达克岩: 年龄, 地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(3): 517~528.
- 董连慧, 徐兴旺, 屈 迅, 等. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜钼矿带的地质构造背景与形成机制[J]. 岩石学报, 25(4): 713~737.
- 杜世俊, 屈 迅, 邓 刚, 等. 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成矿时代与形成的构造背景[J]. 岩石学报, 26(10): 2 981~2 996.
- 郭丽爽, 张 锐, 刘玉琳, 等. 2009. 新疆东准噶尔铜华岭中酸性侵入体锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 45(5): 819~824.
- 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(1)—后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 22(5): 1 077~1 086.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床[M]. 北京: 地质出版社, 222~244.
- 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 等. 2012. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质论评, 58(1): 149~164.
- 钱 青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比[J]. 岩石学报, 18(3): 275~292.
- 屈 迅, 徐兴旺, 梁广林, 等. 2009. 蒙西斑岩型铜钼矿地质地球化学特征及其对东准噶尔琼河坝岩浆岛弧构造属性的制约[J]. 岩石学报, 25(4): 765~776.
- 苏玉平, 唐红峰, 丛 峰. 2008. 新疆东准噶尔黄羊山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 矿物学报, 28(2): 117~126.
- 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 等. 2006. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 175~184.
- 苏玉平, 郑建平, 汤华云, 等. 2010. 东准噶尔盆地巴塔玛依内山组火山岩锆石 U-Pb 年代及 Hf 同位素研究[J]. 科学通报, 55(30): 2 931~2 943.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 等. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. 岩石学报, 23(8): 1 989~1 997.
- 唐红峰, 苏玉平, 邱华宁, 等. 2009. 新疆东准噶尔贝勒库都克锡矿带锡成矿的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄[J]. 岩石学报, 25(6): 1 303~1 309.
- 唐红峰, 赵志琦, 黄荣生, 等. 2008. 新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究[J]. 矿物学报, 28(4): 335~342.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619~641.
- 王登红, 李华芹, 应立娟, 等. 2009. 新疆伊吾琼河坝地区铜、金矿成矿时代及其找矿前景[J]. 矿床地质, 28(1): 73~82.
- 王 涛, 童 英, 李 舫, 等. 2010. 阿尔泰山带花岗岩时空演变, 构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595~618.
- 王艳芬, 邵 毅, 蒋少涌, 等. 2012. 陕西老牛山印支期高 Ba-Sr 花岗岩成因及其构造指示意义[J]. 高校地质学报, 18(1): 133~149.
- 杨富全, 闫升好, 刘国仁, 等. 2010. 新疆准噶尔斑岩铜矿地质特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 29(6): 956~971.
- 张锦祥, 聂卫东, 赵献丽, 等. 2007. 新疆伊吾县宝山铁矿地质特征、成矿模式与找矿方向[J]. 新疆地质, 25(4): 368~372.
- 张 旗, 王 焰, 刘红涛, 等. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景: 国内关于埃达克岩的争论[J]. 地学前缘, 10(4): 385~400.
- 张 旗, 王 焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr, Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 17(4): 505~513.
- 张 永, 梁广林, 吴倩怡, 等. 2010. 东准噶尔蒙西斑岩铜钼矿床脉体特征及其形成机制[J]. 岩石学报, 26(10): 2 997~3 006.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 科学通报, 51(13): 1 565~1 574.