doi：10.13745/j.esf.2014.05.014

西天山卡特巴阿苏大型金铜矿赋矿二长花岗岩岩石学、元素组成和时代

冯　博[1]，薛春纪[1,*]，赵晓波[1]，丁振信[1]，张　祺[1]，俎　波[1]，杨维忠[2]，林泽华[2]，陈　威[2]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室；中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院，北京 100083
2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第一区域地质调查大队，新疆 乌鲁木齐 830011

FENG Bo[1]，XUE Chunji[1,*]，ZHAO Xiaobo[1]，DING Zhenxin[1]，ZHANG Qi[1]，ZU Bo[1]，YANG Weizhong[2]，LIN Zehua[2]，CHEN Wei[2]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*；*School of Earth Sciences and Resources*，*China University of Geosciences(Beijing)*，*Beijing* 100083，*China*
2. *Geological Survey Party* 1，*Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Mining*，*Ürümqi* 830011，*China*

FENG Bo，XUE Chunji，ZHAO Xiaobo，et al. Petrology，geochemistry and zircon U-Pb isotope chronology of monzogranite of the Katbasu Au-Cu deposit，western Tianshan，Xinjiang Province. *Earth Science Frontiers*，2014，21(5)：187-195

Abstract：The ore-bearing rock of the large Au-Cu ore deposit of Katbasu which was recently discovered in Western Tianshan is the monzogranite. The studies of petrology，geochemistry and zircon U-Pb isotope chronology of the monzogranite indicate that it occurred in the Middle Tianshan uplift zone that is in the south margin of the Yili-Central Tianshan Plate. The monzogranite is mainly composed of K-feldspar，plagioclase (An=20)，quartz，biotite and a small amount of mafic minerals and has the medium-coarse granitic texture and massive structure. It belongs to high-potassium calc-alkali granitic series formed in an island-arc environment and has the characteristics of I-type granite：K-rich (K_2O/Na_2O=0.82－1.16)，(A/CNK=0.85－1.09)，high $Mg^{\#}$ ($Mg^{\#}$=58.22－64.26). The LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from granite yielded an age of (345.5±2.6) Ma (MSWD=1.19，n=24) indicating the early Carboniferous invasion. The monzogranite is an arc magma located in the south margin of active continental margins，which was formed by the South Tianshan Ocean crust subduction under the Yili-Central Tianshan Plate and probably the partial melting of the South Tianshan Ocean crustal rocks.

Key words：monzogranite；ore-bearing rock；large Au-Cu ore deposits；Katbasu；Western Tianshan，Xinjiang

摘　要：新疆西天山新发现的卡特巴阿苏大型金铜矿床赋矿岩石主体为二长花岗岩。对容矿的二长花岗岩进行岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 法年代学研究表明，岩石形成于伊犁—中天山地块南缘隆起带，主要由钾长石、斜长石(An=20)、石英和少量黑云母组成，中粗粒花岗结构，块状构造；岩石富钾(K_2O/Na_2O=0.82～1.16)，A/CNK=0.85～1.09，镁值较高($Mg^{\#}$=58.22～64.26)，主体属高钾钙碱性岛弧岩浆系列，具 I 型花岗岩特征。锆石 U-Pb 法测得二长花岗岩(345.5±2.6) Ma(MSWD=1.19，n=24)的成岩年龄，反映早石炭世侵位，应是南天山洋向北俯冲在伊犁—中天山地块南缘活动大陆边缘形成的岛弧岩浆侵入体，岩浆可能为南天山洋俯冲洋壳部分熔融产物。

关键词：二长花岗岩；容矿岩石；大型金铜矿；卡特巴阿苏；新疆西天山

中图分类号：P618.51；P618.41　**文献标志码**：A　**文章编号**：1005－2321(2014)05－0187－09

收稿日期：2014－02－10；**修回日期**：2014－05－06

基金项目：国家科学支撑计划项目(2011BAB06B02)；国家自然科学基金项目(U1303292)；中国地质调查工作项目(1212011220926)

作者简介：冯　博(1990—)，男，硕士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail：fengbocugb@163.com

* **通讯作者简介**：薛春纪(1962—)，男，博士，教授，从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和研究工作。E-mail：chunji.xue@cugb.edu.cn

西天山最为重要的成矿带是“亚洲金腰带”[1],尤其新疆西天山境外的中亚邻区产有众多大型-超大型和世界级金铜矿床,令世人关注[1-3]。“亚洲金腰带”向东延伸进入我国新疆西天山[1],最近在新源县南部那拉提山新发现卡特巴阿苏大型金铜矿床,呈现出良好的找矿前景[4]。这个新发现的金铜矿床赋存于矿区二长花岗岩体中,鲜明的矿床地质特征指示后者在热液蚀变过程中发生矿化,与金铜成矿的时空及成生关系密切[4]。所以,及时正确阐明赋矿二长花岗岩的性质和成岩背景是认识矿床成因和成矿条件的关键。文中以卡特巴阿苏大型金铜矿区大面积出露的非矿化未蚀变二长花岗岩为对象,开展岩石学、元素地球化学、岩石年代学研究,试图为区域金铜矿成矿研究和找矿勘探提供新参考。

1 区域地质

卡特巴阿苏金铜矿处在“亚洲金腰带”东段[1],在西天山区域地质中位于中天山北部,北邻 Nikolaev—那拉提北缘深大断裂(图 1a),中天山南缘为 Atbashi—Inylchek—那拉提南缘深大断裂[1,5-8]。中天山是近东西走向的隆起带,前寒武纪基底多有出露,从老到新包括古元古界那拉提岩群(Pt_1n)、中元古界长城系泊仑干布拉克群(Chb)、星星峡岩群(Chx)和中元古界蓟县系科克苏群(Jxk)等古老变质岩组合;盖层主要为上古生界巴音布鲁克组(S_3by)安山岩、玄武安山岩以及浅海相砂岩和灰岩夹层。中天山隆起带内古生代中性和酸性岩浆侵入体广泛出露,早古生代侵入体包括夏特地区闪长岩(锆石 U-Pb 年龄(470±7.4) Ma)[8]、森木塔斯地区闪长岩(锆石 U-Pb 年龄(429.2±4.6) Ma)和黑云母花岗闪长岩(锆石 U-Pb 年龄(494.2±5.8) Ma)[9];晚古生代侵入体出露更为广泛,如科克苏河东岸黑云母花岗岩(锆石 U-Pb 年龄(407±12) Ma)、二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄(352.4±9) Ma)、那拉提地区二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄(366±11) Ma)[9]、恰布河北岸花岗闪长岩(锆石 U-Pb 年龄(349±7) Ma)、穹库什台地区二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄(336.9±1.1) Ma)[10]。

中天山北侧属哈萨克斯坦—伊犁板块,在元古宙变质基底之上的盖层主要由古生代早—中期活动大陆边缘岛弧海相火山岩夹细碎屑岩和碳酸盐岩组成,其中晚古生代侵入体发育,二叠系转为磨拉石建造[4,11]。中天山南侧属塔里木板块,地层岩石建造主要为塔里木北缘被动陆缘沉积,其中常见二叠纪偏碱性岩浆侵入体[6-8]。

2 岩体地质和岩相学

二长花岗岩在卡特巴阿苏金铜矿区出露面积最大,呈岩床或岩株状,是热液蚀变及金铜矿体和矿化体的主要容矿地质体(图 1b)。碱长花岗岩出露面积稍小,呈岩株或岩枝状,与二长花岗岩呈相变接触关系,到目前其中未发现金铜矿体或矿化体。矿区花岗闪长岩稍晚侵入,呈岩枝或岩脉状侵入到二长花岗岩和碱长花岗岩中(图 1b、c),其中也见发生热液蚀变形成的金铜矿体或矿化体。另外,矿区更晚阶段岩浆侵入还形成闪长岩、闪长玢岩等岩脉。

二长花岗岩呈肤红色,块状构造,中粗粒结构(图 2a),主要由斜长石(约 30%)、钾长石(约 35%)和石英(约 20%)及少量黑云母(约 8%)组成(图 2b),副矿物见磁铁矿、磷灰石、榍石和锆石等。斜长石呈半自形粒状结构,大小为 0.5 mm×3 mm,长宽比介于 2∶1~3∶2,聚片双晶发育,An=20;钾长石呈他形粒状,粒径为 0.3~3.0 mm,显条纹结构;石英呈他形粒状,粒径为 0.6~4.0 mm,波状消光显著,表面较干净;黑云母半自形片状晶形,一组完全解理,大小为 0.4 mm×1.6 mm(图 2b)。

3 样品及分析

本次研究对卡特巴阿苏金铜矿体主要赋矿岩体二长花岗岩开展了主量和微量元素组成分析及其锆石 U-Pb 法测年。岩石样品采自矿区 PD08 号勘探坑道内(图 1b),远离金铜矿体,没有发生热液蚀变和金铜矿化;样品新鲜,没有风化。

岩石的元素组成分析在中国核工业集团北京地质研究院分析测试研究中心完成。样品先按 1∶5 的比例放入 $Li_2B_4O_7$ 溶液中,在 1 050~1 250 ℃下熔化,然后将熔化样品制成玻璃薄片,在 AB-104L-PW2404 型 X 荧光光谱仪上进行主量元素分析,分析精度优于 1%,分析结果见表 1。微量元素分析时,先将样品粉碎并在玛瑙罐中磨细至 200 目,取 50 mg 置于 Teflon 烧瓶,分别用 HNO_3 和 HF 溶解 2 d,然后加入 $HClO_4$ 进一步溶解,水浴蒸干后用

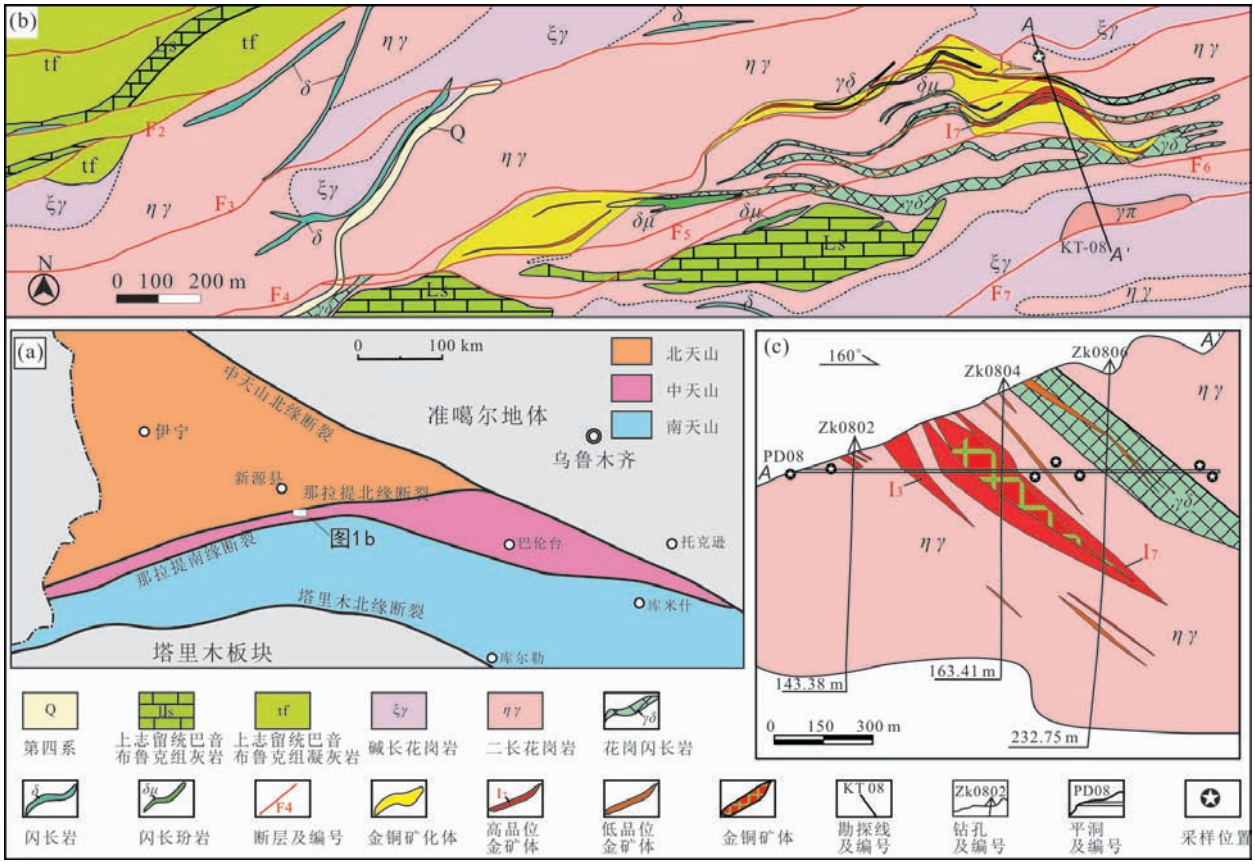

图 1　新疆西天山区域图(图 a)、卡特巴阿苏金铜矿区地质图(图 b)和 08 勘探线剖面图(图 c)[4]

Fig. 1　Simplified geological map of the Chinese Western Tianshan (a), geological map(b) and geological cross section along No. 08 prospecting line (c) of Katbasu Au-Cu deposit, Western Tianshan, Xinjiang[4]

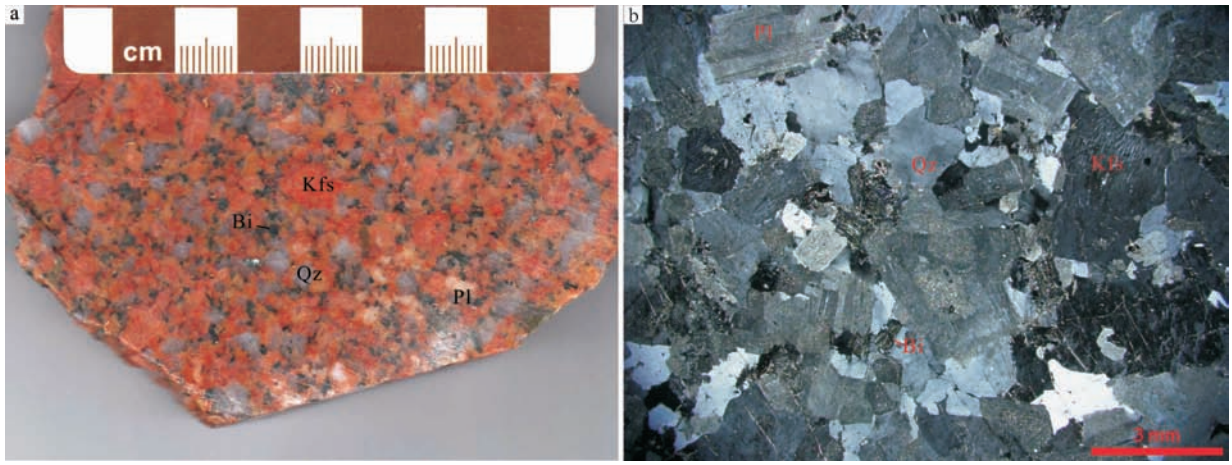

图 2　西天山卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩岩相学照片

Fig. 2　Photographs of monzogranite in Katbasu Au-Cu deposit, Western Tianshan

Qz—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bi—黑云母。

5%HNO_3 溶液将样品稀释到 50 mL,最后在 ELEMENT-XR 型等离子体质谱仪上完成微量元素分析,同时分析 GBW 系列标样以保证数据质量,分析精度优于 2%,分析结果见表 1。

岩石大样粉碎、筛分和淘洗并经重选和电磁选后,在实体显微镜下逐粒挑选获得锆石样品;用 DEVCON 环氧树脂将锆石颗粒逐一固定于靶脱,研磨至颗粒中部后再抛光;然后对锆石进行阴极发光照相(图 3)。用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 进行仪器优化,以标准锆石

91500(年龄 1 064 Ma[12])为外标,在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室使用 LA-ICP-MS 完成 U-Pb 法测年,所用仪器为 Elan6100DRC 型,激光束斑直径为 36 μm,数据处理使用 CommPbCorr 软件[13],$^{206}Pb/^{238}U$ 加权年龄使用 ISOPLOT 软件计算[14],测年结果见表 2 和图 4。

表 1 西天山卡特巴阿苏二长花岗岩元素组成

Table 1 Element compositions of monzogranite, Katebasu, Western Tianshan

样品编号	w_B/%															
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	TiO_2	MnO	LOI	Total	$Mg^{\#}$	A/NK	A/NCK	δ
KT-57	67.78	14.69	1.44	1.58	1.15	1.92	4.05	4.03	0.13	0.48	0.05	2.35	99.81	64.26	1.33	1.01	2.63
KT-58	65.09	14.90	0.72	1.95	1.10	2.18	3.94	4.59	0.12	0.45	0.04	4.51	99.79	58.22	1.30	0.97	3.29
KT-59	65.84	15.43	1.73	1.93	1.53	2.38	4.23	3.48	0.14	0.57	0.06	2.25	99.77	66.19	1.44	1.03	2.60
KT-60	66.52	14.78	0.47	1.27	0.99	2.96	4.27	4.52	0.12	0.48	0.04	3.26	99.80	65.72	1.24	0.85	3.29
KT-61	66.93	14.88	1.00	1.78	1.17	2.33	4.12	3.90	0.13	0.47	0.04	2.89	99.81	61.88	1.35	0.98	2.69
KT-62	67.64	15.22	1.34	1.78	1.17	1.51	4.04	4.21	0.13	0.47	0.06	2.03	99.78	61.88	1.36	1.09	2.76
KT-63	67.39	14.83	1.15	1.60	1.08	2.25	4.00	4.28	0.12	0.47	0.03	2.45	99.81	62.51	1.32	0.97	2.81

样品编号	$w_B/10^{-6}$																							
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
KT-57	47.7	87.4	11.3	35.4	6.7	1.15	5.66	1.01	4.96	0.96	2.74	0.54	3.24	0.44	6.43	1.91	6.16	45.9	6.51	5.31	3.78	5.03	48.5	17.5	129
KT-58	44.1	79.3	10.2	31.8	6.02	1.05	5.13	0.916	4.55	0.88	2.52	0.50	3.05	0.41	6.39	1.85	5.73	43.7	6.51	3.88	4.24	5.18	54.1	18.1	143
KT-59	41.7	77.3	9.97	31.2	5.95	1.09	5.08	0.913	4.65	0.91	2.64	0.53	3.26	0.46	9.3	2.55	10.8	58.8	9.73	7.93	4.49	3.31	50.1	19.5	125
KT-60	40.7	78.3	10.4	33.6	6.61	1.36	5.71	1.05	5.42	1.06	3.03	0.59	3.56	0.48	4.91	1.94	5.54	42.4	5.17	1.4	4.24	7.49	35.2	18.5	139
KT-61	47.7	89.0	11.5	36.4	6.89	1.22	5.78	1.02	4.98	0.96	2.76	0.54	3.27	0.45	6.21	2.13	6.41	48.7	5.65	4.64	4.09	3.95	57.8	18.8	132
KT-62	43.8	81.7	9.79	32.9	6.1	1.11	5.03	0.764	4.38	0.98	2.48	0.44	2.67	0.46	7.14	1.59	5.24	44.7	5.25	5.43	4.21	30.5	45.0	17.1	133
KT-63	48.6	82.5	9.57	32.1	6.5	1.07	5.01	0.73	4.11	0.94	2.45	0.44	2.75	0.40	6.66	1.73	5.53	43.1	5.98	3.95	3.79	5.94	36.9	16.9	124

样品编号	$w_B/10^{-6}$																				∑LREE/∑HREE	δEu	δCe
	Sr	Y	Nb	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Ta	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U	Zr	Hf	∑REE			
KT-57	214	25.7	16.9	0.867	0.063	0.028	0.832	1.65	862	1.54	0.977	0.004	0.618	46.5	0.151	13.4	2.8	242	5.52	209.2	9.70	0.56	0.89
KT-58	225	23.8	15.8	1.060	0.102	0.037	0.591	2.14	1 089	1.45	1.210	0.004	0.674	41.8	0.099	16.4	3.32	252	6.03	190.44	9.60	0.56	0.88
KT-59	224	25.5	16.8	0.802	0.038	0.037	0.335	1.95	678	1.40	0.676	0.005	0.575	21.3	0.077	14.7	3.69	310	7.40	185.67	9.06	0.59	0.90
KT-60	185	29.4	17.3	0.893	0.124	0.020	0.380	1.79	1 075	1.51	4.000	0.005	0.606	13.2	0.078	14.0	2.99	356	8.49	191.89	8.17	0.66	0.91
KT-61	208	26.4	17.3	0.806	0.174	0.017	0.388	1.88	850	1.55	0.939	0.004	0.632	17.8	0.058	16.9	2.52	288	6.88	212.48	9.75	0.58	0.90
KT-62	199	23.2	13.8	1.030	0.037	0.062	0.58	1.73	845	1.55	1.140	0.005	0.649	15.7	0.150	17.6	11.80	159	4.82	192.62	10.18	0.59	0.93
KT-63	251	24.0	13.9	0.872	0.039	0.050	0.847	1.65	809	1.48	0.769	< 0.002	0.640	39.1	0.174	17.0	3.75	197	5.46	197.18	10.71	0.55	0.88

注:A/NK=molar ratio $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$;A/CNK=molar ratio $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$;$Mg^{\#}=100Mg/(Mg+0.9Fe_{total})$;TFe=FeO+0.899 8$Fe_2O_3$。

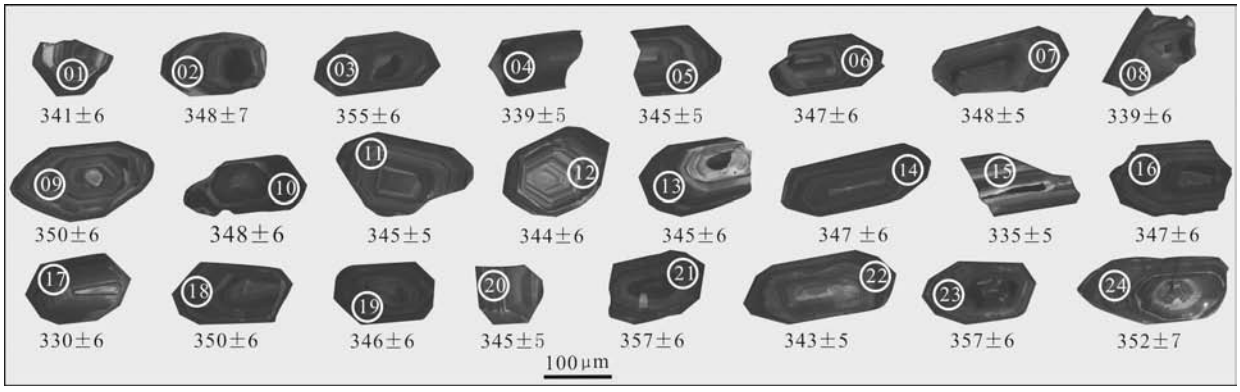

图 3 西天山卡特巴阿苏二长花岗岩中锆石 CL 图像及 $^{206}Pb/^{208}U$ 视年龄

Fig. 3 CL images and $^{206}Pb/^{208}U$ apparent age of zircons from Katbasu monzogranite, Western Tianshan

表 2　西天山卡特巴阿苏二长花岗岩锆石 U-Pb 法测年结果

Table 2　Zircon U-Pb dating result of Katbasu monzogranite, Western Tianshan

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	普通 Pb 校正同位素比值(±1σ)						普通 Pb 校正同位素年龄(±1σ)/Ma					
	U	Th	Pb		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$		$^{207}Pb^*/^{235}U$		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
KT-01-01	476.99	418.62	30.99	0.88	0.051 97	0.001 72	0.390 18	0.018 85	0.054 39	0.000 98	284	73	335	14	341	6
KT-01-02	841.83	715.02	53.61	0.85	0.055 78	0.001 93	0.431 51	0.022 18	0.055 51	0.001 10	443	69	364	16	348	7
KT-01-03	513.85	348.00	32.65	0.68	0.052 91	0.001 62	0.419 39	0.018 82	0.056 62	0.000 95	325	72	356	13	355	6
KT-01-04	1 036.35	523.82	59.55	0.51	0.053 55	0.001 55	0.398 44	0.017 08	0.053 98	0.000 89	352	65	341	12	339	5
KT-01-05	633.77	392.40	38.59	0.62	0.055 93	0.001 52	0.425 85	0.017 35	0.054 90	0.000 88	449	58	360	12	345	5
KT-01-06	799.72	438.22	48.30	0.55	0.055 18	0.001 43	0.423 21	0.016 74	0.055 32	0.000 90	419	56	358	12	347	6
KT-01-07	565.46	355.49	34.96	0.63	0.054 60	0.001 52	0.419 30	0.017 40	0.055 44	0.000 90	396	60	356	12	348	5
KT-01-08	627.73	405.85	37.48	0.65	0.051 76	0.001 54	0.383 79	0.017 02	0.054 00	0.000 94	275	59	330	12	339	6
KT-01-09	713.82	447.33	44.11	0.63	0.055 94	0.001 78	0.429 73	0.019 64	0.055 78	0.000 90	450	71	363	14	350	6
KT-01-10	2 393.49	2 474.41	165.58	1.03	0.059 15	0.001 76	0.454 23	0.020 75	0.055 41	0.001 06	572	67	380	14	348	6
KT-01-11	625.83	423.92	38.83	0.68	0.053 52	0.001 52	0.408 45	0.017 19	0.054 99	0.000 89	351	64	348	12	345	5
KT-01-12	284.11	206.01	17.44	0.73	0.051 15	0.001 98	0.383 90	0.020 79	0.054 73	0.000 99	248	89	330	15	344	6
KT-01-13	627.63	411.24	38.71	0.66	0.053 24	0.001 68	0.401 33	0.018 49	0.054 92	0.000 94	339	67	343	13	345	6
KT-01-14	736.15	572.01	46.76	0.78	0.054 67	0.001 58	0.416 94	0.018 38	0.055 25	0.001 00	399	72	354	13	347	6
KT-01-15	357.58	338.52	22.88	0.95	0.050 87	0.001 73	0.375 84	0.017 94	0.053 33	0.000 85	235	82	324	13	335	5
KT-01-16	763.61	568.96	47.70	0.75	0.049 82	0.001 48	0.382 78	0.017 14	0.055 22	0.000 98	187	66	329	13	347	6
KT-01-17	528.27	324.66	30.70	0.61	0.054 33	0.002 04	0.396 77	0.021 37	0.052 49	0.001 01	385	88	339	16	330	6
KT-01-18	1 171.25	866.00	74.78	0.74	0.054 04	0.001 48	0.420 12	0.017 45	0.055 84	0.000 94	373	61	356	12	350	6
KT-01-19	1 093.17	664.81	66.45	0.61	0.055 28	0.001 54	0.424 01	0.017 95	0.055 17	0.000 95	423	56	359	13	346	6
KT-01-20	326.73	170.04	19.21	0.52	0.050 14	0.001 77	0.385 50	0.018 95	0.054 98	0.000 89	201	81	331	14	345	5
KT-01-21	1 152.89	797.12	73.20	0.69	0.053 29	0.001 55	0.416 94	0.018 23	0.056 88	0.000 99	341	62	354	13	357	6
KT-01-22	478.78	264.13	28.32	0.55	0.052 73	0.001 59	0.396 23	0.017 37	0.054 68	0.000 89	317	67	339	13	343	5
KT-01-23	497.04	387.80	32.58	0.78	0.054 69	0.001 84	0.429 42	0.020 78	0.057 01	0.000 98	400	74	363	15	357	6
KT-01-24	178.88	158.27	11.58	0.88	0.055 54	0.002 53	0.432 38	0.019 63	0.054 80	0.000 94	434	103	368	19	352	7

注：* 代表放射性成因 Pb，其同位素比值和年龄为通过普通 Pb 校正的数据，校正方法据文献[13]。

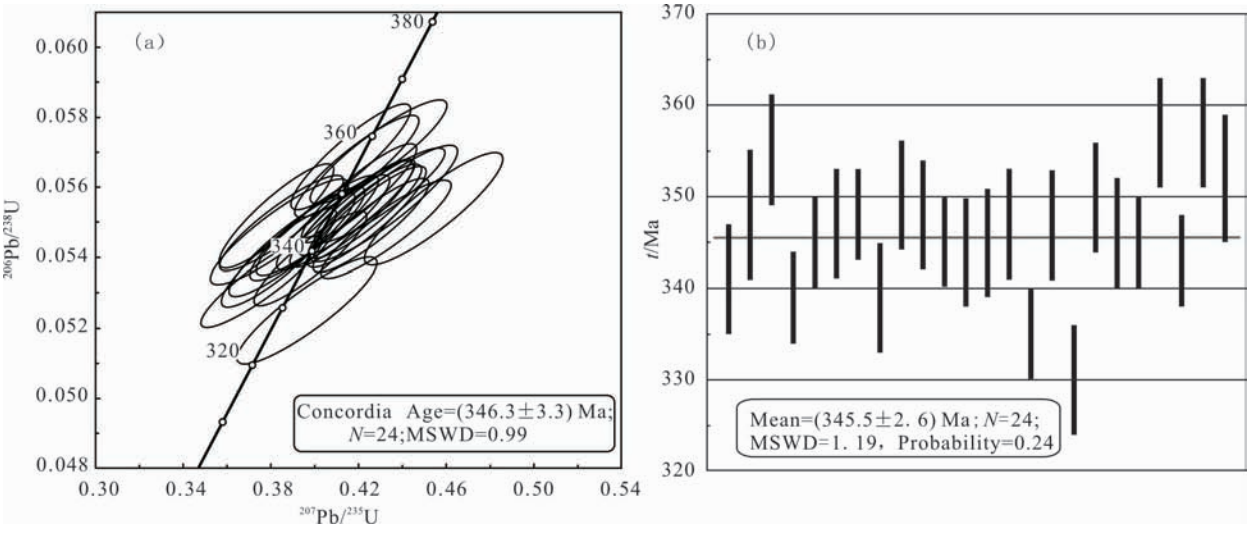

图 4　西天山卡特巴阿苏二长花岗岩锆石 U-Pb 法谐和年龄(a)和加权平均年龄(b)

Fig. 4　Zircon U-Pb concordia age (a) and weighted average age (b) of Katbasu monzogranite, Western Tianshan

4 讨论

卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩 SiO_2 质量分数集中于 65.09%～67.78%,MgO 质量分数为 0.99%～1.53%(表 1),具较高的 $Mg^{\#}$ (58.22～66.19),表明该岩体经历了中等程度的结晶分异作用[15]。岩石 Al_2O_3 质量分数为 14.69%～15.43%,铝饱和指数 A/CNK 介于 0.85～1.09,在 A/CNK-A/NK 图解中处在准铝质及过铝质范围内(图 5a)。岩石 Na_2O 含量为 3.94%～4.27%,K_2O 含量为 3.48%～4.59%,K_2O/Na_2O=0.82～1.16,全碱变化于 7.71%～8.79%,里特曼指数变化于 2.60～3.29,SiO_2-K_2O 图解反映岩石主体属于高钾钙碱性系列(图 5b)。岩石样品 CaO 质量分数变化于 1.51%～2.96%,P_2O_5 含量为 0.12～0.14%,P_2O_5 与 SiO_2 之间呈负相关(图 5c),表现出 I 型花岗岩的某些特征;事实上,在卡特巴阿苏以西的中天山内,穹库什台二长花岗岩也具有相似的岩石地球化学特征[9-10]。

卡特巴阿苏矿区二长花岗岩 ∑REE=(190.44～212.48)×10^{-6},LREE/HREE=8.17～10.71(表 1),轻重稀土分馏作用中等(图 6a),表明该岩石经历了一定程度的分异[21];全岩样品 δEu=0.55～0.66,Eu 负异常明显,与斜长石的分离结晶作用有关[22];δCe=0.88～0.93,负异常不明显。在洋脊花岗岩标准化蛛网图中,卡特巴阿苏二长花岗岩明显富集大离子亲石元素 Rb、Th、K 和 Ba,而其中 Ba 出现相对亏损;具有高场强元素、尤其 Nb、Ta 相对亏损和 Ce 相对富集的特征(图 6b),这与智利、牙买加岛弧花岗岩[23]十分相似。卡特巴阿苏 7 件二长花岗岩原始地幔标准化蛛网图显示 Rb、Ba 等大离子亲石元素和 Zr、Hf 等高场强元素富集,而 Nb、Ta、Ti、P 等元素亏损(图 6c),表现岛弧花岗岩特征[24]。在 Rb-(Y+Nb)、Nb-Y、Ta-Yb 和 Rb-(Yb+Ta)构造环境判别图上,卡特巴阿苏二长花岗岩样品均处在火山弧花岗岩区内,说明其可能形成于岛弧或活动大陆边缘构造背景(图 7)。

卡特巴阿苏二长花岗岩中锆石呈柱状,粒径为 80～230 μm,其长宽比为 2∶1～3∶1,在透射光和反射光下均为无色、透明-半透明,锆石均具有较典型

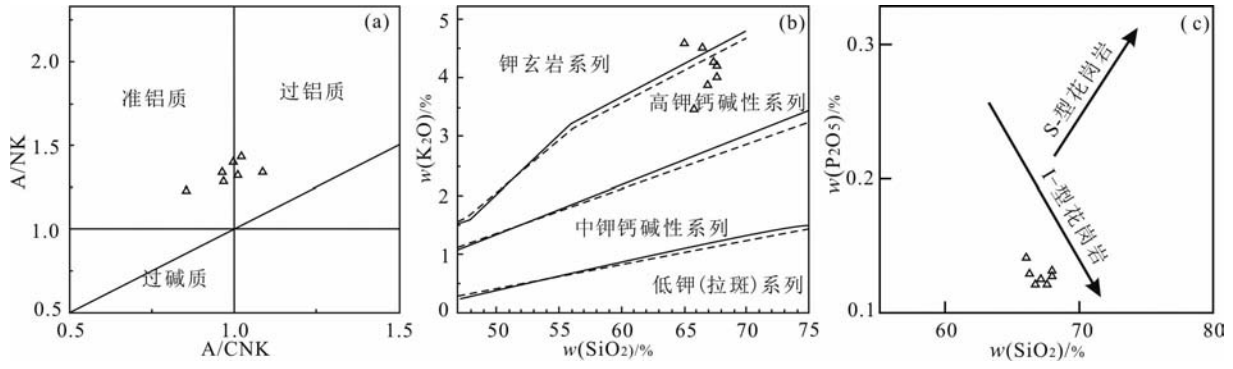

图 5 西天山卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩主量元素特征
(据文献[16-18])

Fig. 5 Major element characteristics of monzogranite in Katbasu, Western Tianshan

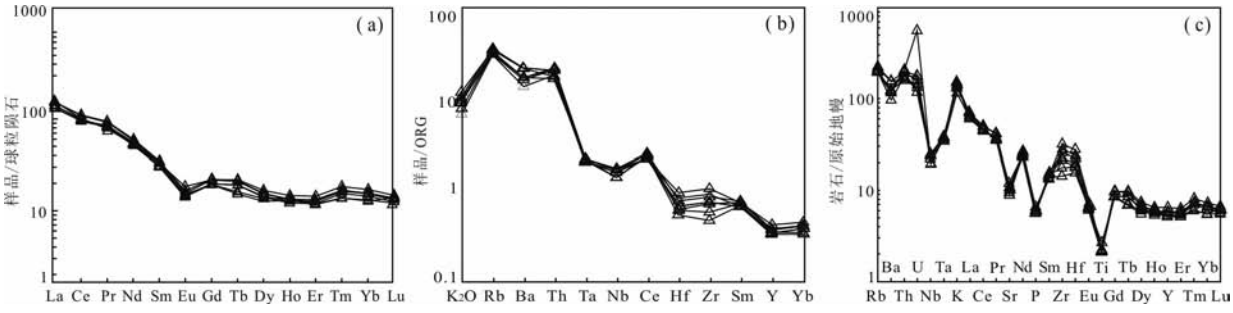

图 6 卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩稀土、微量元素地球化学图解

Fig. 6 Geochemical patterns of REE and trace elements of the monzogranite from the Katbasu Au-Cu deposit

(a)—稀土配分球粒陨石标准化图[19];(b)—洋脊花岗岩标准化图[20];(c)—微量元素原始地幔标准化蛛网图[19]。

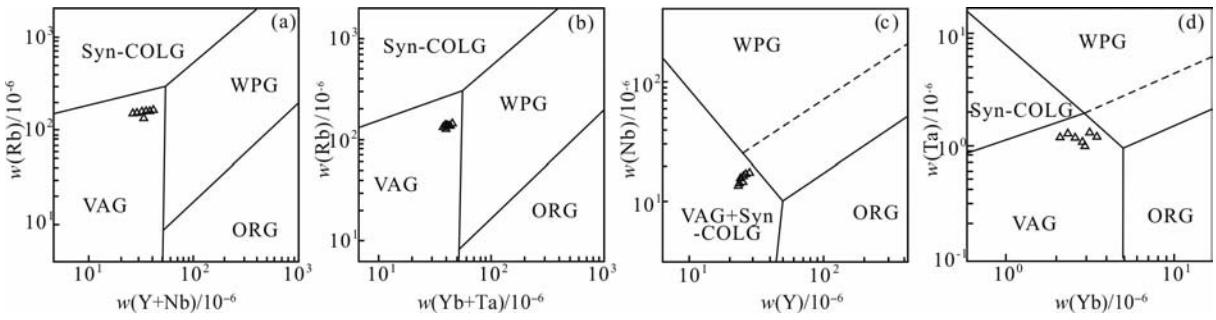

图 7　西天山卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩构造环境判别图[20,25]

Fig. 7　Tectonic discrimination diagrams for monzogranite in Katbasu, Western Tianshan[20,25]

ORG—洋中脊花岗岩；VAG—火山弧花岗岩；WPG—板内花岗岩；Syn-COLG—同碰撞花岗岩。

的振荡环带结构(图 3)，岩浆成因特征明显；所测锆石 Th 含量为(158.27～2 474.41)×10⁻⁶，U 含量为(178.88～2 393.49)×10⁻⁶(表 2)，Th/U 介于 0.51～1.03，均大于 0.4，岩浆成因特点显著[26-28]。24 粒锆石样品 U-Pb 法测年结果(表 2)显示，$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄与其对应的 $^{207}Pb/^{235}U$ 表面年龄具有很好的谐和性(图 4a)，加权平均年龄为(345.5±2.6) Ma (N=24，MSWD=1.19)(图 4b)，反映了卡特巴阿苏二长花岗岩于早石炭世侵位；同时期侵入体在卡特巴阿苏以西 40 km 处有穹库什台二长花岗岩，锆石 U-Pb 年龄为(336.9±1.1) Ma[9-10]。

卡特巴阿苏金铜矿区所在中天山北缘的 Nikolaev—那拉提北缘断裂代表了 Terskey 洋关闭之后的缝合带，Terskey 洋关闭的时代为早奥陶世末期[29-31]；中天山南缘的那拉提南缘断裂为南天山洋闭合后的缝合带，南天山洋的闭合时代为晚石炭世末期[6-7,32]。卡特巴阿苏二长花岗岩锆石 U-Pb 法测年结果为(345.5±2.6) Ma，早石炭世的侵位时代，加之高钾钙碱性和 I 型特征的岛弧花岗岩属性，可能指示它是南天山洋向北俯冲在中天山南缘活动

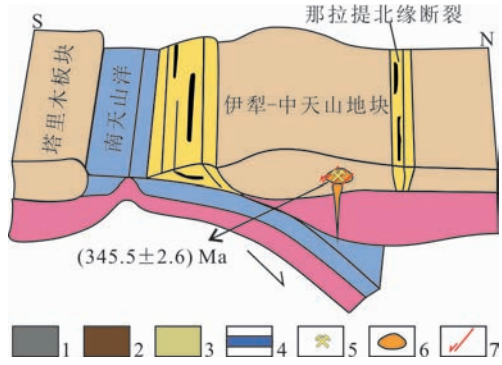

图 8　卡特巴阿苏二长花岗岩的形成背景示意图[6-8,33]

Fig. 8　A model for the tectonic setting of the monzogranite from the Katbasu, Western Tianshan[6-8,33]

1—大陆地壳；2—岩石圈地幔；3—增生楔；4—洋壳；5—卡特巴阿苏金铜矿床；6—二长花岗岩；7—脆性断裂。

大陆边缘的岛弧岩浆侵入体(图 8)。卡特巴阿苏二长花岗岩具有较高的 Th/Nb、Ce/Nd 比值，在 Th/Nb-Ce/Nd 图解上(图 9a)，数据点接近岛弧及俯冲沉积物组分特征，并且沿再循环俯冲洋壳组分趋势线分布，指示岩体可能源于俯冲洋壳的部分熔融，同时在 La-La/Yb 图解中(图 9b)也显示二长花岗岩为部分熔融作用的产物。

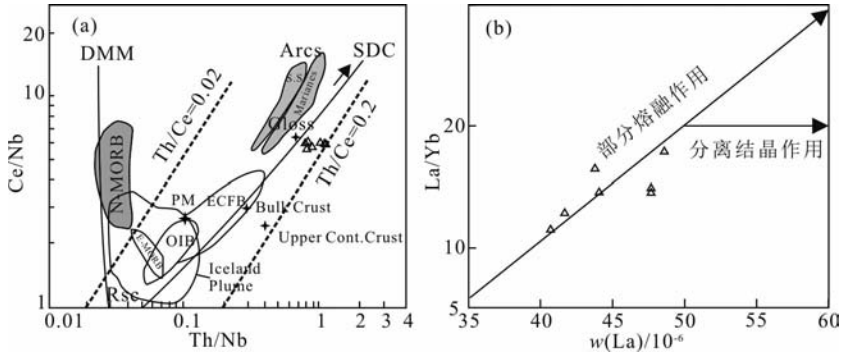

图 9　西天山卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩 Ce/Nb-Th/Nb(a)[34]和 La-La/Yb(b)[35-38]图解

Fig. 9　Diagrams of Ce/Nb－Th/Nb(a)[34] and La－La/Yb(b)[35-38] for the monzogranite from the Katbasu, Western Tianshan

5 结论

卡特巴阿苏金铜矿区赋矿二长花岗岩形成于伊犁—中天山地块南缘中天山隆起带,主要由钾长石、斜长石(An=20)、石英和少量黑云母组成,中粗粒花岗结构,主体属于高钾钙碱性系列,具有I型花岗岩特征,岛弧岩浆性质明显。

二长花岗岩锆石U-Pb年龄为(345.5±2.6) Ma,应是早石炭世南天山洋向北向伊犁—中天山地块之下俯冲在活动大陆边缘形成的岛弧岩浆侵入体,原始岩浆起源于南天山洋俯冲洋壳部分熔融。

野外工作得到美盛矿业公司支持,中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室侯正辉老师和核工业北京地质研究院分析测试研究中心给予诸多帮助,审稿人提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 薛春纪,赵晓波,莫宣学,等. 西天山"亚洲金腰带"及其成矿控制与找矿[J]. 地学前缘,2014,21(5):128-155.

[2] Seltmann R, Porter T M, Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79: 810-841. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseces.2013.03.030.

[3] Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. Gondwana Research, 2014, 25: 48-102.

[4] 杨维忠,薛春纪,赵晓波,等. 新疆西天山新发现新源县卡特巴阿苏大型金铜矿床[J]. 地质通报,2013,32(10):1613-1620.

[5] Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, et al. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism[J]. Tectonophysics, 2003, 366(1): 113-141.

[6] Gao J, Long L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1221-1238.

[7] Wang B, Shu L S, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China)[J]. Tectonophysics, 2011, 497: 85-104.

[8] Qian Q, Gao J, Klemd R, et al. 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[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 551-569.

[9] 徐学义,王洪亮,马国林,等. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石Hf同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志,2010,29(6):691-706.

[10] Xu X Y, Wang H L, Ping L, et al. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in western Tianshan, Xinjiang, China: Implications for Paleozoic tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72: 33-62.

[11] 吴淦国,董连慧,薛春纪. 新疆北部主要斑岩铜矿带[M]. 北京:地质出版社,2008.

[12] Wiedenbeck P, Alle F, Corfu W L. Three natural zircon standards for Y-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. The Journal of Geostandards and Geoanalysis, 1995, 19: 1-23.

[13] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1): 59-79.

[14] Ludwig K R. Isoplot/Ex Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 1a, 2001: 1-56.

[15] 葛文春,林强,孙德有,等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2000,25(2):172-178.

[16] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.

[17] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.

[18] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83(1/2): 1-26.

[19] McDonough W F, Sun S, Ringwood A F, et al. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 56(3): 1001-1012.

[20] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.

[21] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992:94-123.

[22] 孙鼐,彭亚鸣. 火成岩石学[M]. 北京:地质出版社,1985:23-24.

[23] Perce J A, Harris N B W, Wang Z L, et al. Metallogenic Studies and Ore Prospecting Orientation in Central Tien Shan

and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-35.

[24] 张喜, 高俊, 董连慧, 等. 新疆中天山乔霍特铜矿区Ⅰ型花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1637-1648.

[25] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43-55.

[26] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184(1): 123-138.

[27] 吴元宝, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49: 1589-1604.

[28] Schulz B, Klemd R, Brätz H. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(3): 697-710.

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

[30] 朱宝清, 冯益民, 杨军录, 等. 新疆中天山干沟一带蛇绿混杂岩和志留纪前陆盆地的发现及其意义[J]. 新疆地质, 2002 (4): 326-330.

[31] Mikolaichuk A V, Mambetov A M, Misyus P P. On the volume and age of the Kapkatas Group of Northern Tien Shan[J]. Stratigraphy and Geological Correlation, 1997, 5(1): 73-78.

[32] Li Q, Lin W, Su W, et al. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China[J]. Lithos, 2011, 122(1): 76-86.

[33] Long L, Gao J, Klemd R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2011, 126 (3): 321-340.

[34] 褚少雄, 刘建明, 徐九华. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 433-450.

[35] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: Trace element constraints[J]. Journal of Petrology, 1988(1): 415-445.

[36] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences, 1991, 335: 377-392.

[37] Hemond C, Arndt N T, Lichtenstein U, et al. The heterogeneous Iceland plume: Nd-Sr-O isotopes and trace element constraints[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1993, 98(B9): 15833-15850.

[38] Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 1998, 145(3): 325-394.