东准噶尔卡姆斯特岩体地球化学特征及构造意义*

张博文，展新忠，端木常青

(新疆大学 地质与矿业工程学院，新疆 乌鲁木齐 830049)

摘　要： 侵位于东准噶尔卡拉麦里构造带内的卡姆斯特岩体是该花岗岩带内最西侧的小型岩体，岩石类型为中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩，为同源岩浆演化的不同产物. 该岩体主量、微量及稀土元素地球化学特征表明，其富集SiO_2、K_2O+Na_2O，强烈亏损Ba、Sr、Ti、P，轻重稀土分异不明显，具强烈的负Eu异常，Rb/Sr、K/Rb比值明显偏低，暗示岩浆强烈的分异演化作用，Fe_2O_3/FeO为0.11～1.23，FeO^*为0.86～1.39，显示岩体中度还原环境，与锡成矿作用关系密切. 岩石地球化学特征指示其为高硅富碱弱过铝质的A_2型花岗岩. 结合区域构造背景，指示其形成于卡拉麦里造山带晚石炭世后碰撞造山阶段的伸展拉张环境.

关键词： 东准噶尔；卡姆斯特岩体；A型花岗岩；后碰撞

DOI： 10.13568/j.cnki.651094.2018.04.017

中图分类号： P595　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1000-2839(2018)04-0502-011

The Study on Petrogeochemistry of Kamusite Granites in Eastern Junggar and its Tectonic Significance

ZHANG Bowen, ZHAN Xinzhong, DUANMU Changqing

(*College Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830049, China*)

Abstract: Emplacing along the Kalamaili structural belt of Eastern Junggar, the Kamusite granite is a small rock mass locating in the west end of the granite rock belt. The Kamusite granite mainly consists of mid-grained biotite granite and fine-grained granite, two different but co-magmatic rocks. The major element, trace element and REE compositions contained within the Kamusite granite suggest a high concentration of SiO_2, K_2O+Na_2O and a low content of Ba, Sr, Ti and P. There is no obvious differentiation between LREE and HREE, but Eu negative anomaly is obvious. Meanwhile, the significantly low Rb/Sr and K/Rb ratios suggest intensive magmatic differentiation and evolution. The values of Fe_2O_3/FeO and FeO^* are 0.11-1.23 and 0.86-1.39 respectively, suggesting that the medium reductive environment of rock mass is closely related to tin mineralization. The geochemical features show that the Kamusite granite is a weakly peraluminous A_2-type granite rich in silicon and alkali. Its structural geological background suggests that the formation of the granite takes place in the stretching environment of post-collision stage in the Kalamali orogenic belt during the Late Carboniferous epoch.

Key words: Eastern Junggar; Kamusite granites; A-type granite; post-collision

0　引言

中国新疆北部东准噶尔区域沿着卡拉麦里蛇绿岩带大面积分布着高硅、富碱、含锡的花岗岩杂岩体. 前人针对该带内的老鸦泉岩体、贝勒库都克岩体、黄羊山岩体、苏吉泉岩体、喀拉萨依岩体及卡姆斯特岩体的岩相学、岩石地球化学、形成构造背景及锡矿化等方面进行了一定的研究，大多数学者认为该带内岩体是后碰撞阶段拉张构造环境下形成的富碱花岗岩系列，并厘定为典型的A型花岗岩[1-5]，锡矿化与岩浆向酸性演化密切相关[6]，由晚期分异出的富锡热液造成[7]；少数学者则认为是S型的地壳重熔花岗岩体[8]. 另有学者认为该区域花岗岩虽不属于非造山的板内环境，却有明显的板内非造山特征[7]. 随着近期卡姆

* 收稿日期：2018-06-25
基金项目：新疆大学博士科研启动基金（201604371083）.
作者简介：张博文(1984-)，男，博士，讲师，主要从事中亚地质矿产方面的研究，E-mail:54392171@qq.com.

斯特锡矿田的找矿突破，使该区域此类花岗岩与锡矿化的成因研究再次成为热点，其中卡姆斯特小岩体内发育代表性的卡姆斯特锡矿，更成为“小岩体成大矿”成矿理论研究的理想区域，故对其岩浆演化机制、形成环境及锡成矿作用的系统研究迫在眉睫．本文选取卡姆斯特岩体作为研究对象，开展岩相学及岩石地球化学工作，探讨岩石成因、构造意义及锡成矿作用，以期为东准噶尔区域该类大面积出露较为特殊的含锡花岗岩体深入厘定提供科学依据．

1　地质背景及岩相学特征

准噶尔盆地东缘古生代造山带位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块—准噶尔板块的接合部位[9]，该造山带内发育一条显著的构造带—卡拉麦里蛇绿岩带[6]，沿着该古缝合带的东北侧区域，大面积出露花岗岩类岩石，构成一条沿总面积约1 100 Km²的富碱花岗岩带[10]，这些带状分布的岩体构成了新疆北部最大的含Sn花岗岩带，其中卡姆斯特岩体、老鸦泉岩体、贝勒库都克岩体是位于该岩带中西部呈NW向展布的富碱岩体[1].卡姆斯特岩体出露于带内最西端，与区内规模最大的老鸦泉岩体侵入接触关系相连，大部分侵位于凝灰质粉砂岩为主的下石炭统卡姆斯特下亚组（C_1k^a）中，南端侵位于基性凝灰岩为主的中泥盆统平顶山下亚组（D_2p^a）中，接触带常可见热烘烤碎裂现象（图1）．该岩体与锡成矿作用关系密切，发育大量的锡矿化带，如卡姆斯特锡矿床便产于其中，岩体边部发育一系列晚期贯入的花岗斑岩脉（图2a），且南部区域出露一定规模不同期次的超基性岩脉与其侵位接触（图1）．

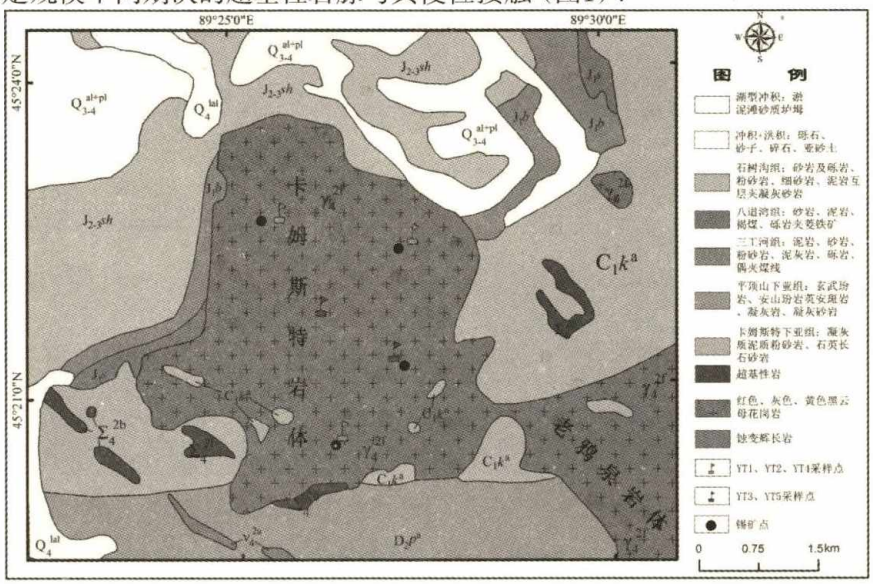
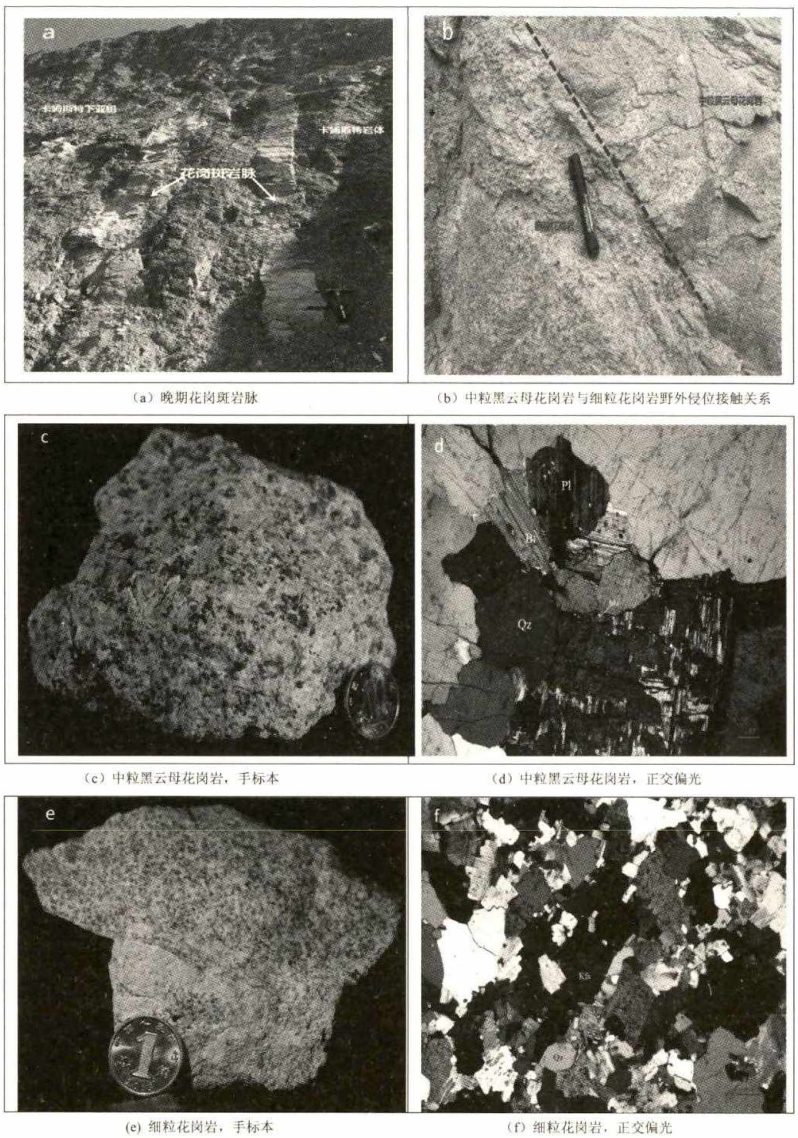


图 1　东准噶尔卡姆斯特岩体地质简图

卡姆斯特岩体主要岩石类型为中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩，呈多期次脉动侵位接触关系（图2b），在两类岩石的断裂破碎带内发育云英岩化、钾化及显著的黄色高岭土化，裂隙带内石英脉里发育星点状的黑色锡石，后期有少量花岗斑岩脉切插岩体．中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩的岩相学特征如下：

中粒黑云母花岗岩，主要由碱性长石、石英、斜长石及黑云母组成，含有极少量的白云母（<3%）．其中碱性长石主要为钾长石，半自形宽板状，含量35%左右，高岭土化较为发育，常有黄褐色残余粘土充填在残留晶格内（图2c）；斜长石，呈半自形板状，含量约25%左右，聚片双晶较为发育（图2d）；石英，手标本发烟灰色、它形、粒状，含量约为30%；黑云母，黑色、片状、星点状分布花岗岩内，含量约7%左右；白云母为细鳞片状集合体产出，呈热液蚀变交代矿物产出的次生白云母（图2d），副矿物主要为锆石．

细粒花岗岩，半自形粒状结构、块状构造，岩石表面发育大量呈土状的高岭石化及褐铁矿化（图2e）．主要由碱性长石、石英、斜长石组成，除有极少量的黑云母（<3%）出现，几乎不含任何暗色矿物．其中碱性长石含量40%左右，斜长石含量约25%左右，石英含量约35%（图2f），手标本呈无色，透明状，与中粒黑云母花岗岩相区别．副矿物主要为锆石．



(a) 晚期花岗斑岩脉 (b) 中粒黑云母花岗岩与细粒花岗岩野外侵位接触关系

(c) 中粒黑云母花岗岩，手标本 (d) 中粒黑云母花岗岩，正交偏光

(e) 细粒花岗岩，手标本 (f) 细粒花岗岩，正交偏光

图 2 卡姆斯特岩体样品野外及显微照片

Qz-石英；Pl-斜长石；Kfs-碱性长石；Bt-黑云母；Ms-白云母.

2 地球化学特征

本文共测试卡姆斯特岩体的两类花岗岩地球化学样品22件，测试样品分别取自5个分开的露头位置（YT1、YT2、YT3、YT4、YT5），采样位置见图1，其中中粒黑云母花岗岩类（YT1、YT2、YT4）为13件，细粒花岗岩类（YT3、YT5）为9件. 样品经过野外及镜下观察，挑选无表生氧化作用及蚀变作用的样品进行测试.全岩主微量元素分析均由广州澳实分析测试实验室完成，分析方法代码分别为ME-MS61、ME-MS81及ME-XRF26d.

2.1 主量元素

由表1可知，中粒黑云母花岗岩中SiO_2含量变化为76.09～77.74%，Al_2O_3在11.83～12.81%之间，K_2O和Na_2O的含量分别为3.46～4.99%和3.46～4.96%，CaO为0.09～0.32%，TFe_2O_3含量在0.95～1.19%之间，MgO、Ti_2O及P_2O_5含量极低；细粒花岗岩中SiO_2含量变化为76.32～77.85%，Al_2O_3在11.78～12.38%之间，K_2O和Na_2O的含量分别为4.62～5.41%和3.22～3.75%，CaO为0.07～0.21%，TFe_2O_3含量在1.14～1.53%之间，MgO、Ti_2O含量较中粒黑云母花岗岩稍有偏高，P_2O_5含量同样极低，显示两类岩石的化学成分总体变化不大，均为高硅、富碱的铁质花岗岩类. 据两者脉动侵位接触特征（图2a），表明两类花岗岩应是同源岩浆分异演化的不同岩相.

表 1　卡姆斯特岩体主量元素（wt%）、微量元素(10^{-6})、稀土元素(10^{-6})测试结果及其相关参数

样品号	YT1-H1	YT1-H2	YT1-H3	YT1-H4	YT2-H1	YT2-H2	YT2-H3	YT2-H4	YT3-H1	YT3-H2	YT3-H3
岩石名称	中粒黑云母花岗岩								细粒花岗岩		
SiO_2	76.83	77.14	76.46	76.70	77.22	77.22	77.74	77.37	76.32	77.35	76.58
TiO_2	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.11	0.13
Al_2O_3	12.22	12.18	12.23	12.42	11.83	12.18	11.90	12.10	12.38	11.78	12.34
TFe_2O_3	1.16	1.11	1.18	1.13	1.19	1.08	1.14	1.14	1.51	1.41	1.49
MnO	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02
MgO	0.05	0.05	0.04	0.03	0.06	0.03	0.02	0.04	0.05	0.12	0.14
CaO	0.19	0.11	0.32	0.27	0.10	0.11	0.11	0.11	0.09	0.07	0.08
Na_2O	3.65	3.64	3.59	3.78	3.46	3.55	3.76	3.67	3.75	3.22	3.32
K_2O	4.90	4.71	4.93	4.75	4.76	4.99	4.61	4.93	4.86	5.18	5.41
P_2O_5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	0.76	0.59	0.86	0.71	0.51	0.63	0.70	0.65	1.12	1.05	1.10
LOI	0.38	0.39	0.47	0.42	0.43	0.33	0.36	0.33	0.20	0.30	0.38
Total	100.01	100.03	100.01	100.01	100	100.02	100.01	100.01	100	100	100.01
AR	3.86	3.91	3.67	3.95	3.76	3.74	4.35	4.01	4.02	3.38	3.3
A/CNK	1.049	1.079	1.034	1.048	1.073	1.065	1.046	1.045	1.068	1.068	1.076
样品号	YT3-H4	YT5-H1	YT5-H2	YT5-H3	YT5-H4	YT5-H5	YT4-H1	YT4-H2	YT4-H3	YT4-H4	YT4-H5
岩石名称	细粒花岗岩							中粒黑云母花岗岩			
SiO_2	77.28	77.49	76.96	76.72	77.48	77.85	77.21	76.48	76.30	76.99	76.09
TiO_2	0.13	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
Al_2O_3	11.90	12.10	11.96	12.20	11.95	11.78	12.67	12.54	12.74	12.80	12.81
TFe_2O_3	1.53	1.16	1.25	1.18	1.39	1.14	0.99	0.96	0.95	1.02	1.03
MnO	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	0.14	0.07	0.08	0.08	0.09	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
CaO	0.07	0.21	0.13	0.16	0.19	0.10	0.14	0.09	0.10	0.12	0.10
Na_2O	3.23	3.43	3.49	3.44	3.46	3.46	4.96	4.22	4.31	4.89	4.31
K_2O	5.24	4.89	4.75	4.91	4.62	4.71	3.46	4.47	4.49	3.68	4.54
P_2O_5	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01
FeO	1.18	0.82	0.98	0.87	0.95	0.94	0.79	0.79	0.76	0.78	0.82
LOI	0.41	0.51	0.49	0.42	0.68	0.47	0.19	0.28	0.35	0.36	0.42
Total	100.03	100	99.99	99.99	100	100	100	100	99.99	99.99	100
AR	3.34	3.52	3.73	3.51	3.65	3.79	4.84	5.03	5.09	4.94	5.02
A/CNK	1.071	1.069	1.076	1.083	1.083	1.074	1.042	1.05	1.05	1.045	1.051
样品号	YT1-H1	YT1-H2	YT1-H3	YT1-H4	YT2-H1	YT2-H2	YT2-H3	YT2-H4	YT3-H1	YT3-H2	YT3-H3
岩性	中粒黑云母花岗岩								细粒花岗岩		
Cr	12	11	13	17	16	19	12	15	17	17	18
Co	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7
Ni	0.7	0.7	0.5	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	2.5	2.6
Rb	491	450	519	496	476	490	475	493	692	587	608
Sr	8.1	10.6	12.1	10.9	8.4	7.8	7.4	8.1	11.2	19.5	20.6
Ga	29.3	29.3	30.1	30.5	30.4	30.0	29.6	29.7	27.2	22.4	23.7
V	9	12	7	9	10	8	8	8	16	10	13
Zr	142	153	136	156	154	145	151	142	129	131	155
Nb	15.9	15.1	17.5	16.4	18.5	17.0	17.7	17.1	15.6	7.3	8.3
Ba	10	20	20	10	30	20	20	20	30	100	120
La	7.7	6.2	7.9	8.3	12.7	14.6	18.5	15.7	28.1	35	39.2

表 1续 卡姆斯特岩体主量元素（wt%）、微量元素(10^{-6})、稀土元素(10^{-6})测试结果及其相关参数

Ce	30.1	23.1	26.7	33.5	32.9	30.4	36.2	33.1	75.9	81.9	91.3
Pr	3.02	3.06	3.24	3.98	4.54	4.35	5.49	4.65	8.64	9.52	10.4
Nd	13.2	12.8	12.3	15.2	16.8	17	21.3	18.5	29.8	35.7	40
Sm	4.85	4.38	4.45	5.54	5.61	5.48	7.2	6.65	6.84	8.19	9.54
Eu	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.13	0.12
Gd	5.46	5.19	4.66	6.08	5.92	7.46	8.69	8.02	6.81	7.63	8.49
Tb	1.14	1.14	.97	1.36	1.45	1.62	1.89	1.72	1.35	1.31	1.54
Dy	8.95	9.08	7.75	10.7	12	13.4	15.85	14.3	9.09	9.82	10.2
Ho	1.89	2.16	1.75	2.59	2.71	3.09	3.64	3.39	1.86	2.03	2.19
Er	7.36	7.65	6.46	9.09	9.99	11.8	13.15	12.9	6.02	6.13	7.17
Tm	1.23	1.38	1.12	1.69	1.76	2.1	2.49	2.27	1.09	0.98	1.04
Yb	10.1	11.55	9.06	13.25	14.7	16.35	18.1	18.55	8.38	6.94	7.62
Lu	1.43	1.74	1.34	1.95	2.25	2.41	2.71	2.64	1.21	0.98	1.13
Y	69.5	72.6	58.5	90.6	108	133.5	151.5	142	49.9	54	46.2
Hf	8.7	9.0	8.8	9.8	11.3	10.8	11.7	11.3	7.1	5.8	6.8
Ta	4.8	4.0	6.2	5.8	3.8	3.2	3.5	3.2	4.4	1.4	1.5
Th	55.2	55.1	53.5	59.1	52.0	46.0	49.3	45.9	47.5	42.9	28.7
U	4.59	6.92	4.30	4.83	4.99	5.76	5.14	5.38	5.95	3.88	3.83
∑REE	96.46	89.46	87.73	113.26	123.36	130.09	155.24	142.42	185.12	206.26	229.94
LREE/HREE	1.57	1.24	1.65	1.42	1.43	1.23	1.33	1.23	4.17	4.76	4.84
La_N/Yb_N	0.72	0.51	0.82	0.59	0.81	0.84	0.96	0.80	3.16	4.75	4.85
δEu	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04
样品号	YT3-H4	YT5-H1	YT5-H2	YT5-H3	YT5-H4	YT5-H5	YT4-H1	YT4-H2	YT4-H3	YT4-H4	YT4-H5
岩性	细粒花岗岩							中粒黑云母花岗岩			
Cr	18	16	15	21	20	17	26	23	28	27	26
Co	0.7	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Ni	2.8	0.8	0.7	0.6	0.9	0.9	0.8	0.5	0.7	0.6	0.6
Rb	594	432	419	434	432	437	504	688	665	601	722
Sr	18.8	11.0	14.3	16.7	16.4	11.5	16.2	9.6	8.7	16.2	12.9
Ga	22.8	24.8	23.9	24.8	24.0	24.6	33.1	32.6	32.7	32.6	32.1
V	12	7	4	5	7	5	21	25	19	16	13
Zr	153	123	116	122	140	101	192	152	160	137	116
Nb	7.7	10.6	10.3	10.7	11.4	10.9	23.6	23.9	22.4	22.7	23.7
Ba	110	30	40	30	40	110	10	10	30	10	20
La	34.5	23.3	28.6	22.3	24.1	28.1	24.6	24.8	28.9	24	24.7
Ce	83.2	57.5	62.2	56.9	59.6	58.2	72.7	71.8	79.8	60.9	61.7
Pr	9.15	6.97	8.35	6.93	6.86	8.4	8.47	8.15	9.14	7.29	7.36
Nd	35.2	25.6	30.3	28.7	26.5	31.2	27	27.4	28.5	23.9	24.8
Sm	8.13	5.79	6.94	9.89	6.88	7.24	7.26	8.08	8.07	5.62	5.51
Eu	0.21	0.03	0.06	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Gd	8.07	5.42	6.38	11.75	7.28	7.01	6.32	7.05	6.37	4.41	4.25
Tb	1.49	1.06	1.19	2.43	1.5	1.22	1.41	1.99	1.66	0.96	1
Dy	10.35	7.63	7.8	16.55	10.85	8.49	12.25	16.6	13.2	7.83	7.47
Ho	2.03	1.54	1.77	3.54	2.36	1.78	2.67	3.68	2.86	1.82	1.74
Er	6.47	6.04	6.18	11.15	7.73	6.31	10	14.6	11.5	7.35	6.9
Tm	0.98	1	0.94	1.76	1.31	0.95	2	2.66	2.25	1.41	1.38
Yb	7.17	7.23	6.94	11.8	10.45	7.61	17.6	23	19.4	12.3	11.7
Lu	1.05	0.96	1.05	1.68	1.45	1.03	2.56	3.23	2.88	1.95	1.73
Y	50.9	46.9	47.2	110.5	68.9	55.5	63.3	103	84.8	53.7	52
Hf	6.4	6.3	6.2	6.1	7.0	6.5	15.7	11.8	12.9	11.8	9.7
Ta	1.4	1.9	1.8	2.2	1.8	3.0	7.8	6.4	7.3	6.4	6.4
Th	27.0	41.9	37.7	35.8	38.0	41.7	48.5	44.5	44.8	41.2	38.3
U	3.57	3.19	3.86	3.95	4.61	4.56	6.06	5.83	5.95	5.17	3.78
∑REE	208	150.07	168.7	185.41	166.92	167.57	194.87	213.07	214.56	159.77	160.27
LREE/HREE	4.53	3.86	4.23	2.06	2.89	3.87	2.56	1.93	2.57	3.20	3.43
La_N/Yb_N	4.53	3.04	3.88	1.78	2.17	3.48	1.32	1.02	1.40	1.84	1.99
δEu	0.08	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

数据由澳实矿物实验室（广州）采用ICP-MS测试.

根据SiO_2-AR图解显示（图3a），卡姆斯特岩体样品都投点于碱性系列，碱度率AR介于3.3~5.09，中粒黑云母花岗岩较细粒花岗岩具有碱性向过碱性系列过渡的趋势，总体显示碱性系列的特征．从A/NK-A/CNK图解（图3b）可以看出，卡姆斯特岩体样品均落在过铝质区域，且铝饱和指数A/CNK=1.034~1.083，介于1~1.1之间（表1），显示弱过铝质的岩石特征．

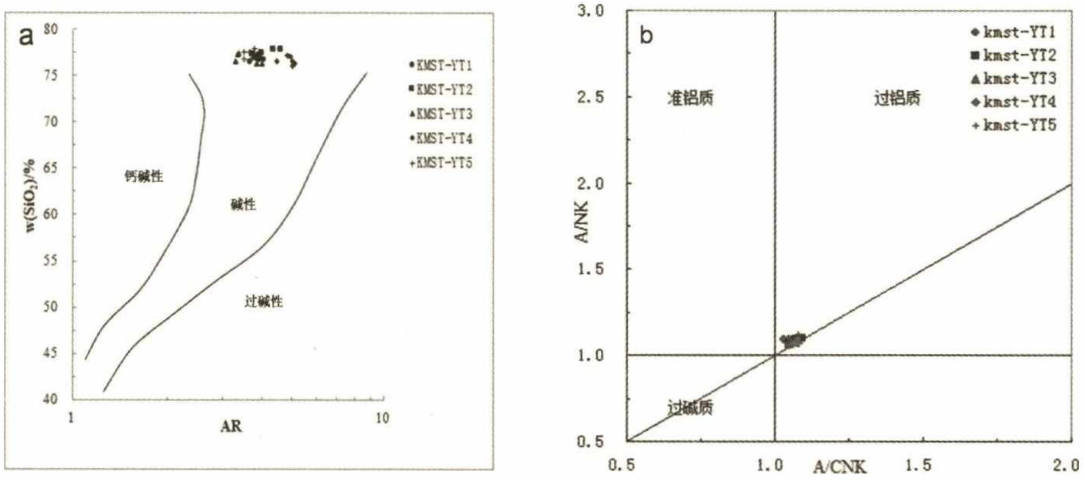


图 3　岩石系列划分Si_2O-AR图解和A/NK-A/CNK图解（底图据参考文献[11,12]）

YT1、YT2、YT4-中粒黑云母花岗岩；YT3、YT5-细粒花岗岩.

2.2　微量元素

卡姆斯特岩体主微量元素分析结果显示（表1），中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩共同强烈亏损Ba、Sr、Ti、P、Eu等元素，富集Hf、Y、Ce等元素，其中Rb/Sr分别为31.1 ~ 76.4和26 ~ 61.8，K/Rb分别为50.9 ~ 87.3和59.1 ~ 93.8，均低于140，表明该套花岗岩的形成经历了较为强烈的结晶分异作用[13]，且Zr的含量较低，分别为116 ~ 192×10^{-6}和101 ~ 155×10^{-6}，基本在100×10^{-6}左右，也指示卡姆斯特岩体经历了强烈的结晶分异作用[14].

由表1可知，中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩的稀土总量、轻重稀土比值及Eu异常总体上一致，几乎无太大差异，显示了同源性．稀土总含量（∑REE）分别为87.73 ~ 214.56×10^{-6}和150.07 ~ 229.94 ×10^{-6}；LREE/HREE分别为1.23 ~ 3.43和2.06 ~ 4.84；La_N/Yb_N分别为0.51 ~ 1.99和1.78 ~ 4.85，轻重稀土元素分异极不明显；Eu异常（δEu）分别为0.01 ~ 0.08和0.01 ~ 0.05，其δEu值远小于0.3，极低值达0.01，显示具强烈负铕异常[15]．球粒陨石标准化配分模式图显示，中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩的配分曲线基本近似，均呈明显海鸥型（图4），与典型的A型花岗岩一致[16].

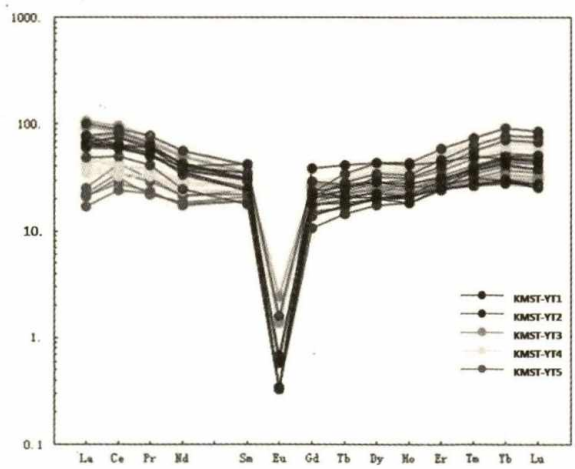


图 4　稀土元素球粒陨石标准化配分曲线（球粒陨石数据引自[17]）

YT1、YT2、YT4-中粒黑云母花岗岩；YT3、YT5 -细粒花岗岩.

3　讨 论

3.1　岩体成因

由上述可知，该岩体岩相学观察发现两类花岗岩几乎不含钠铁闪石等富碱暗色矿物，仅有中粒黑云母花岗岩含极少量热液蚀变交代形成的次生白云母，斜长石主要为酸性斜长石，与邻近老鸦泉岩体的富碱花岗岩类稍有区别．根据岩石地球化学测试，结合该套岩石富碱、弱过铝的基本特征，在FeO/MgO、10 000Ga/Al及（K_2O+Na_2O）/CaO等比值灵敏适用的前提下，利用以上比值进行A型花岗岩与其他类型

花岗岩有效辨别[18]. 从判别图可知(图5a、5b),本区花岗质岩石全部落在A型花岗岩的区域内,与I型、S型花岗岩存在区别;且从Zr+Nb+Ce+Y—(K_2O+Na_2O)/CaO的图解投点显示,该区花岗岩未投点于FG区域(高分异的I型、S型花岗岩),区别于高分异的长英质花岗岩,显示为A型花岗岩(图5c);另从R1因子-10 000Ga/Al图可知(图5d),本区两类花岗岩的投点均落在PA区域内[19],属后造山花岗岩类,区别于非造山A型花岗岩,即A_2型花岗岩[20]. 总体上可看出,卡姆斯特岩体的高硅弱过铝质花岗岩类属于碰撞造山旋回的最后"松弛阶段"侵入的A_2型花岗岩[21].

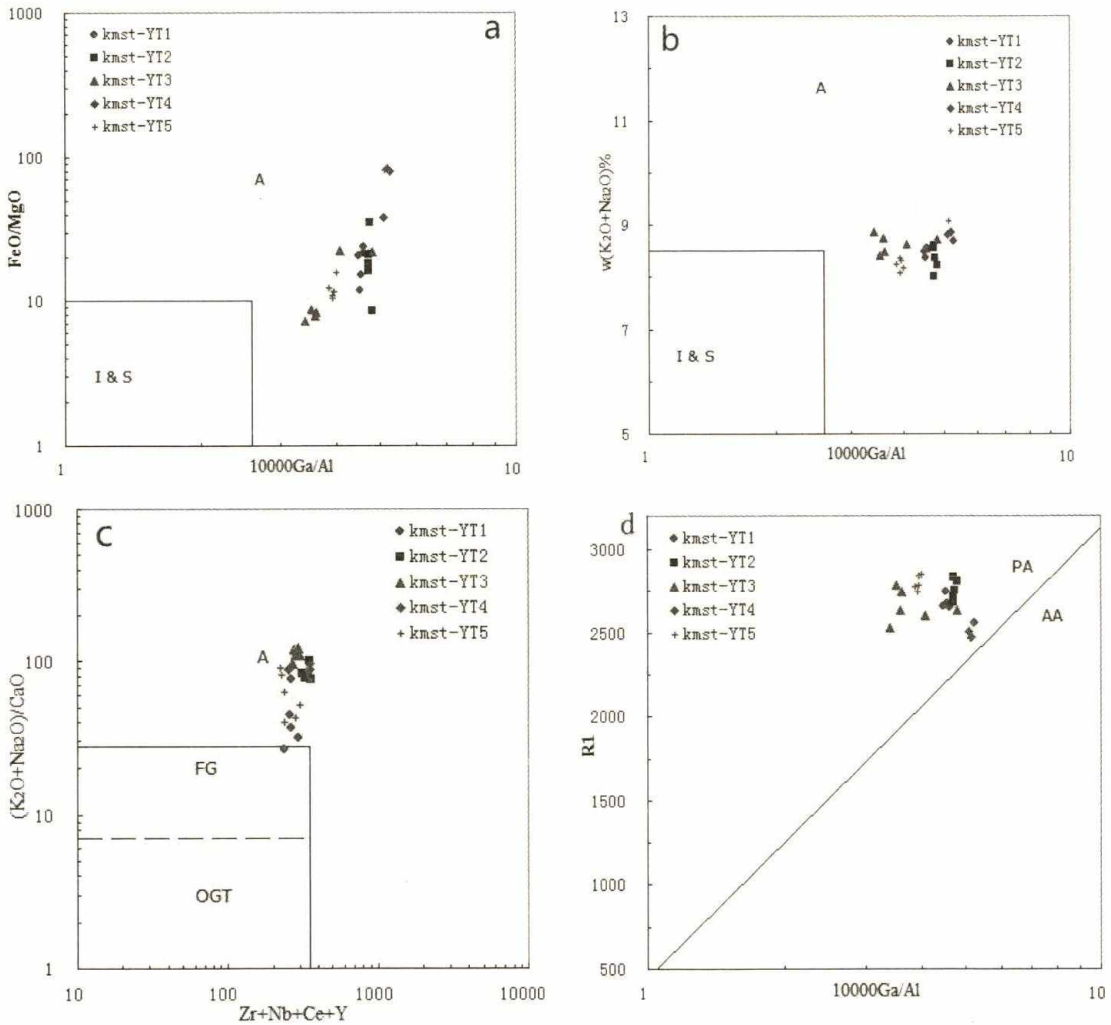


图 5 A型花岗岩及构造辨别图解(底图据参考文献[18,19])

YT1、YT2、YT4-中粒黑云母花岗岩;YT3、YT5-细粒花岗岩;FG-分异的长英质花岗岩;OGT-未分异的M型、S型、I型花岗岩;PA-后造山花岗岩;AA-非造山花岗岩.

3.2 构造背景

按照花岗岩成因分类,卡姆斯特岩体的两类花岗岩类具有明显A型花岗岩特征. 现根据岩体岩石SiO_2含量大于76%,石英含量大于30%的岩相学特征,结合准东大面积花岗岩体形成于晚泥盆世的时限[22],进行花岗岩类主量元素构造环境判定[23,24]. 从主要元素构造环境判别图可知(图6a、图6b),本区中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩基本全部落在造山后花岗岩类(POG)区域内或其周围,与IAG+CAG+CCG(岛弧花岗岩类+大陆弧花岗岩类+大陆碰撞花岗岩类)、RRG+CEUG(与裂谷有关的花岗岩+大陆造陆抬升有关的花岗岩类)存在明显差异. 通过Hf-Rb/3-Ta/3的微量元素三角图解可以明确的区分出同碰撞及后碰撞花岗岩类[25],根据图6c可知,两类岩石的投点大多数都在造山后花岗岩类(POG)区域内,只有少量的细粒花岗岩(YT3、YT5)样品漂移在同碰撞及边界附近. 另从火成岩类R1-R2因子辨别图可知(图6d),花岗质岩石完全落在造山期后A型花岗岩区域内,属于后碰撞的拉张伸展环境. 总体来看,东准噶尔地区的

卡姆斯特岩体应是后碰撞拉张伸展环境下岩浆上涌形成的产物.

根据新疆卡拉麦里一带A型花岗岩年代学研究表明[1,2,26,27]，中石炭世早期，有限洋盆闭合消亡，准噶尔地块拼贴西伯利亚古板块南缘[28]，在卡拉麦里古缝合带发生强烈的造山运动[27]，至晚石炭世，卡拉麦里造山带进入后碰撞造山阶段，应力场逐渐转换为伸展拉张环境，岩石圈减薄，相继发生大规模的岩浆侵入活动，沿着卡拉麦里构造带侵位形成一系列与锡成矿作用密切的高硅富碱弱过铝质的A_2型花岗岩，同样也伴随产出一系列的超基性岩及辉长辉绿岩脉.

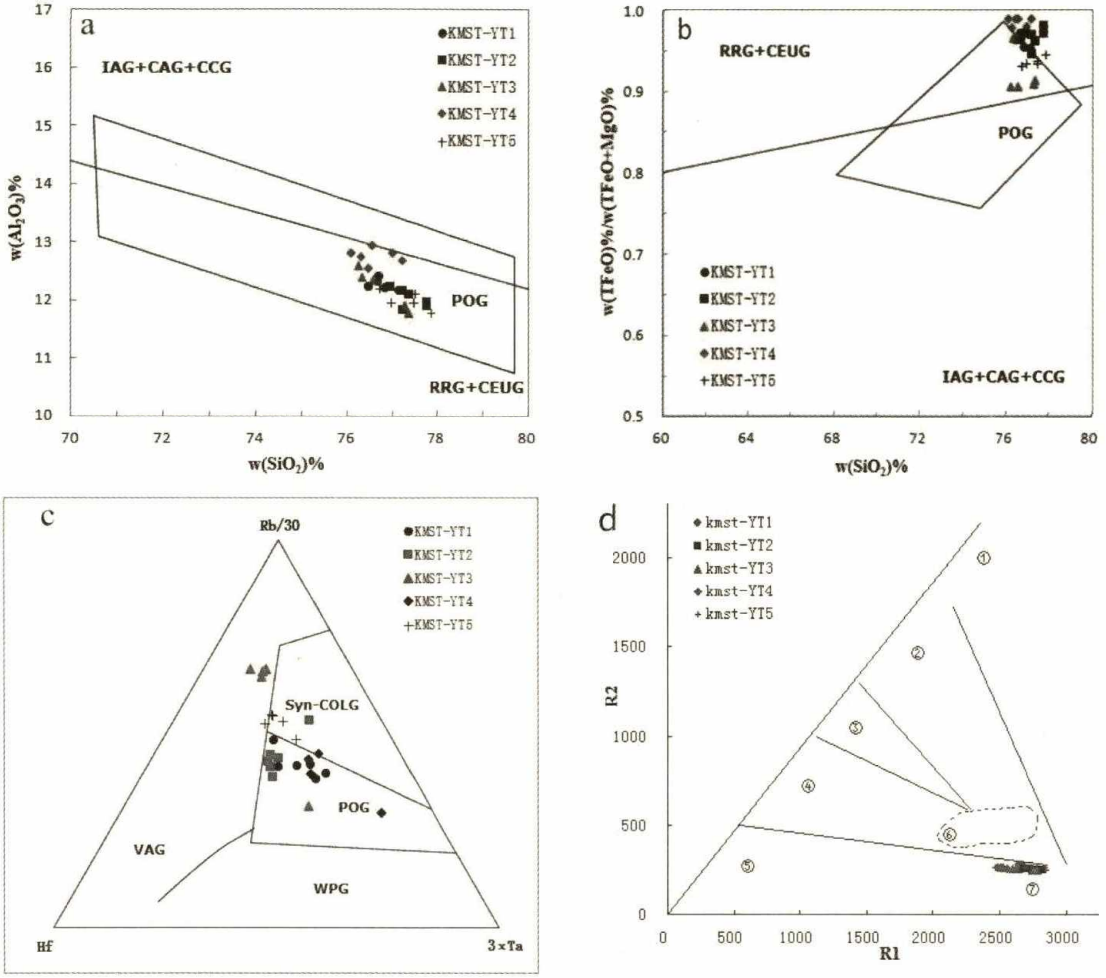


图 6　花岗岩类主量元素、Rb/30-Hf-3×Ta及R1-R2辨别图解（底图据参考文献[23,25,29]）

YT1、YT2、YT4-中粒黑云母花岗岩；YT3、YT5 -细粒花岗岩；IAG-岛弧花岗岩类；CAG-大陆弧花岗岩类；CCG-大陆碰撞花岗岩类；RRG-与裂谷有关的花岗岩类；CEUG-大陆造陆隆起花岗岩类；POG-造山后花岗岩类；VAG-火山弧花岗岩；Syn-COLG-同碰撞花岗岩；WPG-板内花岗岩；ORG-洋脊花岗岩；①地幔斜长花岗岩；②破坏性活动陆块边缘（板块碰撞前）花岗岩；③板块碰撞后隆起期花岗岩；④晚造山期花岗岩；⑤非造山区A型花岗岩；⑥同碰撞（S型）花岗岩；⑦造山期后A型花岗岩.

3.3　卡姆斯特岩体与Sn成矿作用

近年来，与A型花岗岩有关的锡矿床相继发现，如尼日利亚Jos高原的锡多金属矿床[30]、巴西Pitinga锡矿[31]及湖南芙蓉超大型锡矿田等[32]. 前人认为，中亚造山带内的A型花岗岩很少与钨锡成矿有关系[15]，但东准噶尔区域内出露的富碱弱过铝质A型花岗岩常常伴随强烈的Sn成矿作用. 鉴于此，学者们对卡姆斯特锡矿、干梁子锡矿、贝勒库都克锡矿及萨惹什克锡矿内含矿岩体进行了相应研究，认为锡矿化是岩浆晚期经过强烈分异演化的直接产物[7]，且锡矿化与整体演化分异程度高的花岗质岩石有着密切的成因关系[9]. 卡姆斯特岩体的K/Rb比值均小于140，且样品全部投点于强分异作用（SE）区域内（图7a），表明这类低K/Rb比值的长英质花岗岩经历了岩浆高分异作用[13]. 另从Rb/Sr-SiO_2图解可知，卡姆斯特岩体样品

全部投点于锡矿及斑岩型钼矿的重合区域内，显示此类高分异的岩体具有形成岩浆热液型锡矿床的有利性（图7b）.

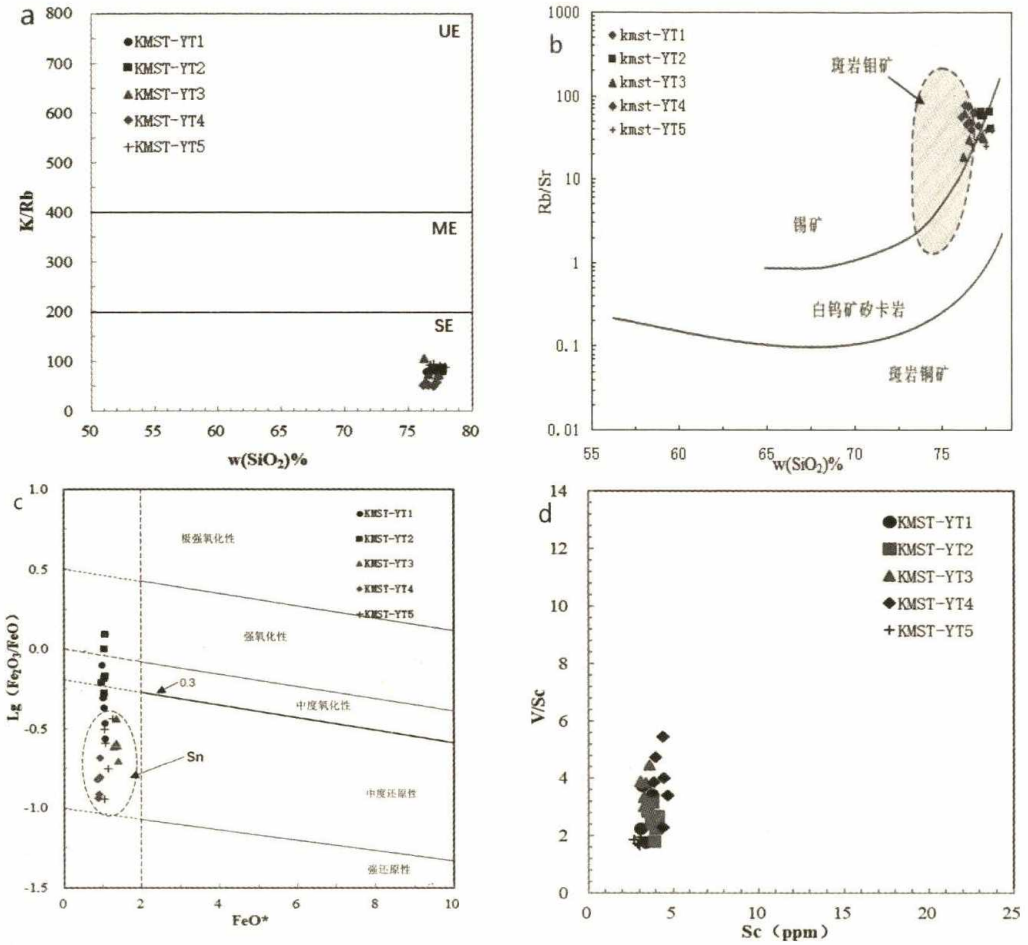


图 7 卡姆斯特岩体氧化还原环境分类及Rb/Sr-SiO_2辨别图解（底图据参考文献[13,34,36,37]）

YT1、YT2、YT4-中粒黑云母花岗岩；YT3、YT5 -细粒花岗岩；UE-不分异；ME-中等分异；SE-强分异；FeO^*=0.9×Fe_2O_3+FeO.

国外学者通过实验得出，岩浆氧化还原环境对能否形成一定规模岩浆热液矿床起至关重要的作用[33]. 而Fe的氧化价态是表征岩浆氧化还原态的最直接的表达形式，通过Fe_2O_3/FeO及FeO^*值能大致区分出还原性岩体还是氧化性岩体[13]. 卡姆斯特岩体的Fe_2O_3/FeO比值为0.11～1.23，FeO^*值为0.86～1.39，由图7c可知，该岩体细粒花岗岩全部落在中度还原性区域内，而中粒黑云母花岗岩投点较为分散，主要介于中度还原性—中度氧化性区域. 一般认为，V元素相对于其他过渡元素的比值高低直接反映岩浆氧逸度的高低[34]，因此样品较低的V/Sc比值显示卡姆斯特岩体为还原性岩体(图7d). 结合野外及岩相学观察，YT3、YT4、YT5岩体均有云英岩化的含锡石英脉展布，表明了卡姆斯特岩体在中度还原性环境下形成的花岗岩与锡成矿作用关系密切.

综上所述，中度还原性岩浆体系下发生过强烈分异作用形成的细粒花岗岩是卡姆斯特岩体内发生锡矿化的重要岩石属性. 与前人厘定的W、Sn矿化对应于花岗岩-碱性花岗岩有关的还原性、过铝质云英岩成矿体系的认知相吻合[35].

4 结 论

（1）卡姆斯特岩体岩石类型包括中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩，两者为脉动侵位关系，且岩石地球化学特征相似，具强烈的分异演化作用，属于同源岩浆分异的不同产物；

（2）卡姆斯特岩体具高硅、富碱、弱过铝质的主量元素特征，其微量元素强烈亏损Ba、Sr、Ti、P、Eu等，

为典型的A_2型花岗岩，形成于后碰撞造山阶段的拉张伸展环境；

（3）卡姆斯特岩体内的锡成矿作用与中度还原性高分异作用下形成的花岗岩密切相关.

参考文献：

[1] 韩宇捷，唐红峰，甘林. 新疆东准噶尔老鸦泉岩体的锆石U-Pb年龄和地球化学组成[J]. 矿物学报，2012，32（2）：193-199.

[2] 苏玉平，唐红峰，刘丛强，等. 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，2006，25（3）：175-183.

[3] 郭芳放，姜常义，卢荣辉，等. 新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因[J]. 岩石学报，2010,26（8）：2357-2383.

[4] 杨高学，李永军，司国辉，等. 东准噶尔贝勒库都克铝质A型花岗岩地球化学特征及锡矿化[J]. 地质与勘探，2009,45（5）：530-538.

[5] 吴魏伟，廖群安，陈帅，等. 东准噶尔喀拉萨依高分异A型花岗岩岩石成因及其地质意义[J]. 地质通报，2015,34（2-3）：385-398.

[6] 王莉娟，王京彬，王玉往，等. 新疆东准噶尔老鸦泉富碱花岗岩型锡矿床地质及成矿流体[J]. 岩石学报，2011，27（5）:1483-1492.

[7] 王莉娟，王京彬，王玉往，等. 新疆东准噶尔老鸦泉碱性岩及相关锡矿的岩石地球化学特征[J]. 矿床地质，2012,31（3）：438-448.

[8] 赵东林，杨家喜，胡能高，等.新疆东准噶尔老鸦泉含锡花岗岩体同位素年代学特征[J]. 西安工程学院学报，2000,22（2）：15-17.

[9] 陈岩飞. 新疆卡拉麦里与A型花岗岩有关锡矿的地质特征和围岩蚀变[D]. 北京：中国地质大学（北京），1-67.

[10] 刘家远，袁奎荣，吴郭泉，等. 新疆东准噶尔富碱花岗岩类及其成矿作用[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1996.

[11] Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 1969,106(4):370-384.

[12] Maniar P D,Piccoli P M.Tectonic discrimination of granitoids[J].Geological Society of America Bulletin,1989,10:635-643.

[13] Blevin P L.Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia:Implications for gold-rich ore systems[J].Resource Geology,2004,54(3):241-252.

[14] King P L，Chappell B W，Allen C M, *et al.* Are A-type granites the high-temperature felsic granites Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J].Journal of the Geological Society of Australia,2001,48:501-514.

[15] 张旗，冉皞，李承东. A型花岗岩的实质是什么[J].岩石矿物学杂志，2012，31（4）：621-626.

[16] 张旗. A型花岗岩的标志和判别[J].岩石矿物学杂志，2013，32（2）：267-274.

[17] Foley S F,Peccerillo A.Potassic and ultrapotassic magmas and their origin[J].Lithos,1992,28:181-185.

[18] Whalen J B,Currie K L, Chappell B W.A-type granites:geochemical characteristics,discriminations and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,1987,95:407-419.

[19] 洪大卫，王式洸，韩宝福，等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其辨别标志[J]. 中国科学（B辑），1995，25（4）:418-426.

[20] Eby G N.Chemical subdivision of the A-type granitoids:Petrogenetic and tectonic implications[J].Geology,1990,20（7）：641-644.

[21] 肖庆辉，邓晋福，马大铨，等. 花岗岩研究思维与方法[M].北京：地质出版社，2002：1-68.

[22] 韩宝福，季建清，宋彪，等. 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时限[J]. 岩石学报，2006,22（5）：1077-1086.

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

[24] 张博文，展新忠，陈川，等. 新疆西天山喇嘛苏外围铜矿床岩石地球化学及成矿背景研究[J]. 新疆大学学报（自然科学版），2018,35（1）：86-95.

[25] Harris NBW,Pearce J A,Tindle A G.Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. Collision Tectonics, 1986, 19(5):67-81.

[26] 杨高学，李永军，司国辉，等. 新疆贝勒库都克铝质A型花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地球化学及其成因[J]. 地质学报，2010,84（12）：1759-1768.

[27] 王一剑，刘洪军，周娟萍，等. 东准噶尔卡姆斯特北海相火山沉积岩碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄及地质意义[J].现代地质，2011,25（6）：1047-1057.

[28] 展新忠，岳建华，陈川，等. 新疆西天山喇嘛苏外围铜矿床花岗质岩锆石LA-ICP-MS U-Pb测年及地质意义[J].新疆大学学报（自然科学版），2018,35(3):272-280.

[29] Maniar P D,Piccoli P M.Tectonic discrimination of granitoids[J].Geological Society of America Bulletin,1989,10:635-643.

[30] Sawkins F J.Metal deposits in relation to plate tectonics[M]. Berlin-Heidelberg: Springer-Veriay,1984:315.

[31] Lenharo SLR,Pollard P J, Born H.Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals ineralization at the Pitinga mine,Amazonas Brazil[J].Lithos,2003,66:37-61.

[32] Zhao ZH,Bao ZW,Zhang BY,*et al*.Crust-mantle interaction and its contribution to the Shizhuyan superlarge tungsten polymetallic minralization[J].Science in China(Series D),2001,44(3):265-276.

[33] Candela P A.Controls on ore metal ratios in granitoid-related ore systems:an experimental and computational approach[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh:Earth Science,1992,83:317-326.

[34] Lee T A,Leeman W P,Canil D,*et al*.Similar V/Sc systematics in MORB and arc basalts:implications for the oxygen fugacities of their mantle source regions[J].Journal of Petrology,2005,46:2313-2336.

[35] 赵博，张德会，石成龙，等. 对与氧逸度有关的花岗岩类成矿专属性含矿性问题的再思考[J]. 岩石矿物学杂志，2014,33(5):955-964.

[36] Peccerillo R，Taylor S R.Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area,Northern Turkey[J]. Contrib Mineral Petrol,1976,58(1):68-81.

[37] Zhu KongYang,Li ZhengXiang,Xu XiSheng,*et al*.Wilde and Han-Lin Chen.Early Mesozoic ferroan(A-type) and magnesian granitoids in eastern South China:Tracing the influence of flat-slab subduction at the western Pacific margin[J].Lithos,2016,240-243:371-381.

责任编辑： 赵新科

(上接第501页)

[16] 张盛霖, 邓高燕, 黄勇奇. Mann-Kendall检验法在Excel中的实现与应用[EB/OL]. 北京：中国科技论文在线. [2014-06-27]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201406-448.

[17] 冯慧敏, 张光辉, 王电龙. 近40年山西参考作物蒸散量时空变化及原因分析[J]. 山西水土保持科技, 2016(2): 8-11.

[18] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378-387.

[19] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 155-159.

[20] 单鱼洋, 张新民, 陈丽娟. 彭曼公式在参考作物需水量中的应用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(10): 4196-4197.

[21] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 72-82.

[22] 庞艳梅, 陈超, 潘学标. 1961-2010年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(s1): 133-141.

[23] 罗那那, 巴特尔·巴克. 北疆地区棉花作物需水量时空演变及其气象影响因子[J]. 应用生态学报, 2017,28(10): 3305-3313.

[24] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.

[25] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 175-183.

[26] 王静, 张晓煜, 马国飞, 等. 1961—2010年宁夏灌区主要作物需水量时空分布特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(26): 161-169.

责任编辑： 赵新科