

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.006

阿尔泰造山带北段晚三叠世早期岩浆作用成因及其对构造体制转换的制约

赵端昌^{1,2}, 蔺新望^{1,2}, 陈宁^{1,3*}, 王星^{1,2}, 张亚峰^{1,2}, 郭岐明^{1,2}ZHAO Duanchang^{1,2}, LIN Xinwang^{1,2}, CHEN Ning^{1,3*}, WANG Xing^{1,2}, ZHANG Yafeng^{1,2}, GUO Qiming^{1,2}

1.陕西省地质调查院, 陕西 西安 710068;

2.陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068;

3.自然资源陕西省卫星应用技术中心, 陕西 西安 710068

1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Satellite Application Technology Center for Natural Resource, Xi'an 710068, Shaanxi, China

摘要:对阿尔泰造山带北段南缘出露的塔尔萨依岩体二云母正长花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 235±2 Ma (MSWD=0.46), 表明该花岗岩为晚三叠世早期岩浆活动的产物。全岩地球化学分析结果显示, 塔尔萨依岩体的二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩均具有高硅、高钾、低镁、低钛特征, 里特曼指数(σ)和铝饱和指数(A/CNK)分别大于2和1.1, 为高钾钙碱性强过铝质花岗岩。此外, 两类花岗岩均富集轻稀土元素和 Rb、Th 等微量元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Yb 和 Y。其低的 $Mg^\#$ 值、Cr 和 Ni 含量, 以及中等的 CaO/Na₂O 和低的 Al₂O₃/TiO₂ 值, 表明研究区花岗岩形成于同碰撞构造环境。结合前人已有研究成果, 认为阿尔泰造山带三叠纪的构造体制转变在时空上存在差异, 整体表现出东—中段由挤压环境进入伸展构造背景的时间较北部早的趋势。

关键词:阿尔泰造山带北段; 同碰撞构造环境; 晚三叠世; 强过铝质花岗岩; 构造体制转变

中图分类号: P534.51; P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)09-1563-11

Zhao D C, Lin X W, Chen N, Wang X, Zhang Y F, Guo Q M. Petrogenesis and tectonic significance of the early Late Triassic magmatism of the northern Altaid orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1563–1573

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the two-mica syenogranite of Talsayi pluton in the southern margin of the northern Altaid orogenic belt yielded a ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 235±2 Ma (MSWD=0.46), which interpreted as product of the early Late-Triassic magmatic event. Whole-rock geochemical data show that two-mica syenogranite and two-mica monzogranite of the Talsayi pluton are characterized by high silicon and alkali, low titanium and magnesium, as well as large Rittmann Index and Aluminum Saturation Index (A/CNK) values. The lines of evidence indicate that the granitic rocks are classified into high potassium calc-alkaline peraluminous granitic series. In addition, the syenogranite and monzogranite are relatively enriched in light rare earth elements (LREE), as well as trace elements of Rb and Th, but depleted in high field-strength elements of Nb, Ta, Yb and Y, in addition, the granitic rocks show low values of magnesium and contents of Cr and Ni, and moderate values of CaO/Na₂O and low values of Al₂O₃/TiO₂. These suggest that

收稿日期: 2022-03-29; 修订日期: 2022-06-09

资助项目: 新疆地勘基金中心项目《新疆富蕴县阿拉—带 1:5 万 L45E003023、L45E003024、L45E004023、L45E004024、L46E004001 五幅区域地质调查》(编号: A16-1-LQ01)、陕西省地质调查规划研究中心(陕西省地质勘查基金中心)项目《陕西小秦岭成矿带石坡地区基础地质调查》(编号: 61202110379)、《陕西省南秦岭成矿带佛坪隆起南缘茅坪地区基础地质调查》(编号: 202102)

作者简介: 赵端昌(1986-), 男, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 695952286@qq.com

* 通信作者: 陈宁(1985-), 男, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 269070357@qq.com

the Talsayi pluton in the southern margin of the northern Altaid orogenic belt were formed in the syn-collision tectonic environment. Combination with the previous studies, it is proposed that the transition of tectonic regime of the Altaid orogenic belt show spatiotemporal difference with characteristic of trending from east and central to north direction during Triassic era.

Key words: northern Altaid orogenic belt; syn-collision tectonic environment; Late Triassic; strong peraluminous granite; transition of tectonic regime

中亚造山带是显生宙以来全球最大的增生型造山带和最重要的大陆地壳生长区,经历了俯冲-碰撞-增生等复杂的大地构造演化历史^[1-2],伴随有大规模的古生代、中生代花岗质岩浆活动(图 1-a)。研究这些岩浆岩的岩石成因和时空分布特征,不仅有助于深入探讨中亚造山带的动力学演化过程和陆壳生长机制,也能很好地限定其俯冲极性、后碰撞过程中构造挤压向伸展转变的时限,以及不同阶段岩浆演化过程中壳-幔物质的贡献度等。作为中亚造山带重要的组成部分——阿尔泰造山带不仅发育多期次、多成因的古生代岩浆活动^[3-20],而且记录了中生代三叠纪一期较重要的岩浆活动事件,该阶段的岩浆活动不仅伴生许多大型—超大型稀有金属成矿带的形成^[21-25],也为限定该造山带的构造体制转换时限和探讨该时期的大陆地壳生长提供了理想的研究对象。

近年来,对阿尔泰造山带三叠纪岩浆事件的报道较多,但多集中于造山带中部的可可托海、阿拉尔等地区,且形成时代多为 200~220 Ma^[26-27];南缘记录较少^[28-29],侵位年龄与中部相当,为 210~215 Ma。因此,总的来说,阿尔泰造山带岩浆岩形成时代主要集中于晚三叠世中晚期,缺乏晚三叠世早期岩浆事件的报道。最近,笔者在阿尔泰造山带北段发现了塔尔萨依岩体,锆石 U-Pb 年代学分析结果显示,其侵位时代为晚三叠世早期,为进一步限定该造山带的构造体制转换时限提供了科学依据,进而为研究阿尔泰造山带大地构造演化过程和陆壳增生提供了约束。

1 区域地质背景

研究区位于阿尔泰造山带北段南缘(图 1-b),出露地层主要为中元古代苏普特岩群的一套中深变质岩系,主要岩石类型为片岩、片麻岩、石英岩等,变质程度为角闪岩相,局部为高绿片岩相。苏普特岩群遭受构造控制显著,呈北北西向、北西向展布,岩石多呈层状、似层状产出,各类岩石之间呈

构造平行接触,且发育紧闭褶皱、不对称褶皱等构造现象。

三叠纪岩浆岩主要分布于可可托海北部的塔尔萨依一带,岩体出露面积约 55 km²,呈不规则状侵入早期形成的中元古代苏普特岩群、泥盆纪及三叠纪侵入岩中(图 1-c),且与后者呈脉动侵入接触关系(图版 I-a)。三叠纪岩体的岩性主要为中细粒二云母正长花岗岩及中细粒二云母二长花岗岩(图版 I-b),内部多呈涌动型侵入接触关系。与较早形成的斑状黑云母二长花岗岩呈脉动接触关系,且可见冷凝边结构(图版 I-c)。

2 岩相学特征

中细粒二云母二长花岗岩:呈灰白色,中细粒花岗岩结构,块状构造。岩石主要矿物有斜长石(25%~30%)、钾长石(40%~45%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~10%)和白云母(3%~6%)(图版 I-d)。斜长石呈近半自形板状,见聚片双晶和卡钠复合双晶,局部被绢云母交代。钾长石呈近半自形板状,可见格子双晶及条纹状微细脉,后者可能为固溶体出溶的产物。钾长石部分颗粒可见交代斜长石形成蠕英、净边等交代结构。石英呈他形粒状、填隙状,具波状消光。黑云母为片状,局部被绿泥石、铁质交代。白云母为片状,其集合体与黑云母交织在一起。

中细粒二云母正长花岗岩:呈灰白色,中细粒花岗岩结构,块状构造。岩石主要矿物有斜长石(10%~15%)、钾长石(50%~55%)、石英(20%)、黑云母(3%~8%)、白云母(5%~10%),以及少量的副矿物,如磁铁矿、锆石和磷灰石(图版 I-e)。斜长石呈近半自形板状,星散状,可见聚片双晶和卡钠复合双晶。钾长石呈近半自形—他形粒状,颗粒内常见半自形斜长石包体,也可观察到格子双晶和钠质条纹结构(图版 I-f)。石英呈他形粒状、填隙状,波状消光明显。黑云母呈片状、星散状,局部被少量铁质交代。岩体整体次生变化很弱,主要为斜长

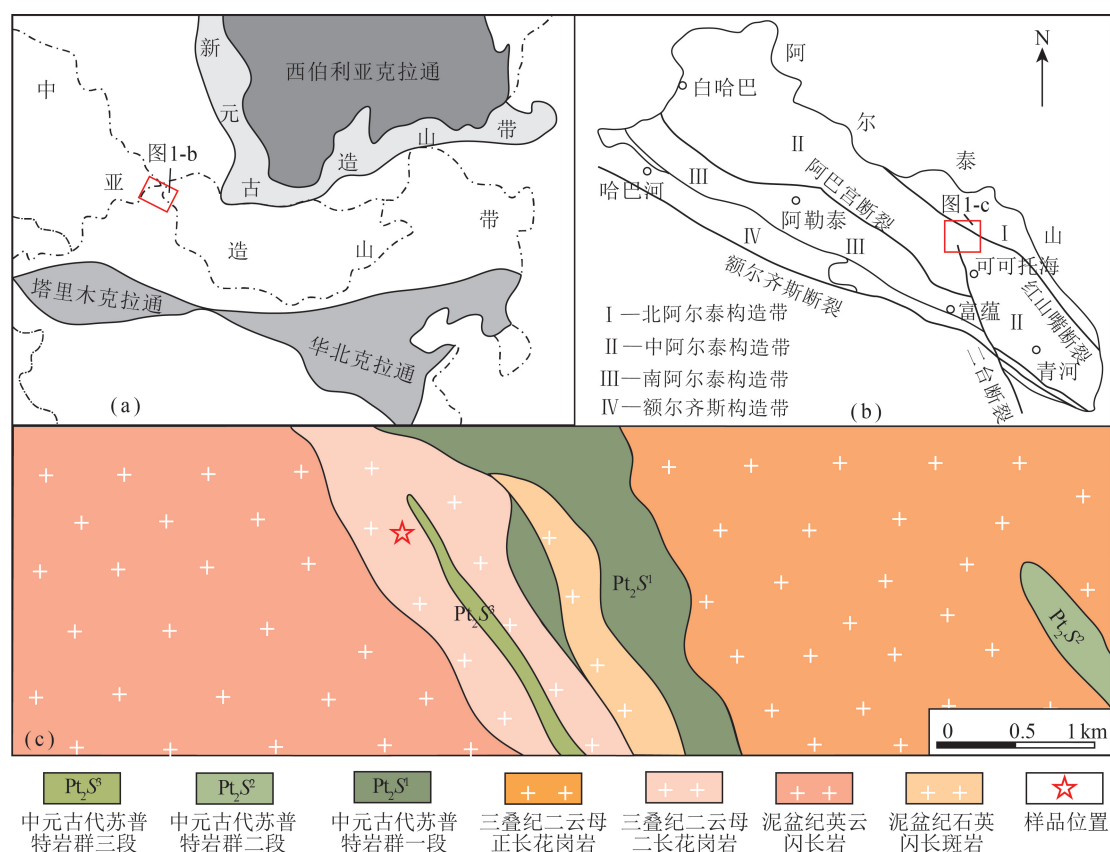


图 1 中亚造山带(a)、阿尔泰造山带构造简图(b,据参考文献[6]修改)和研究区地质略图(c)

Fig. 1 Tectonic sketch map of Central Asian orogenic belt(a) and Altaid orogenic belt(b) and geological map of the study area(c)

石的绢云母化及钾长石的粘土化。

3 测试方法和测试结果

3.1 测试方法

3.1.1 锆石 U-Pb 测年技术

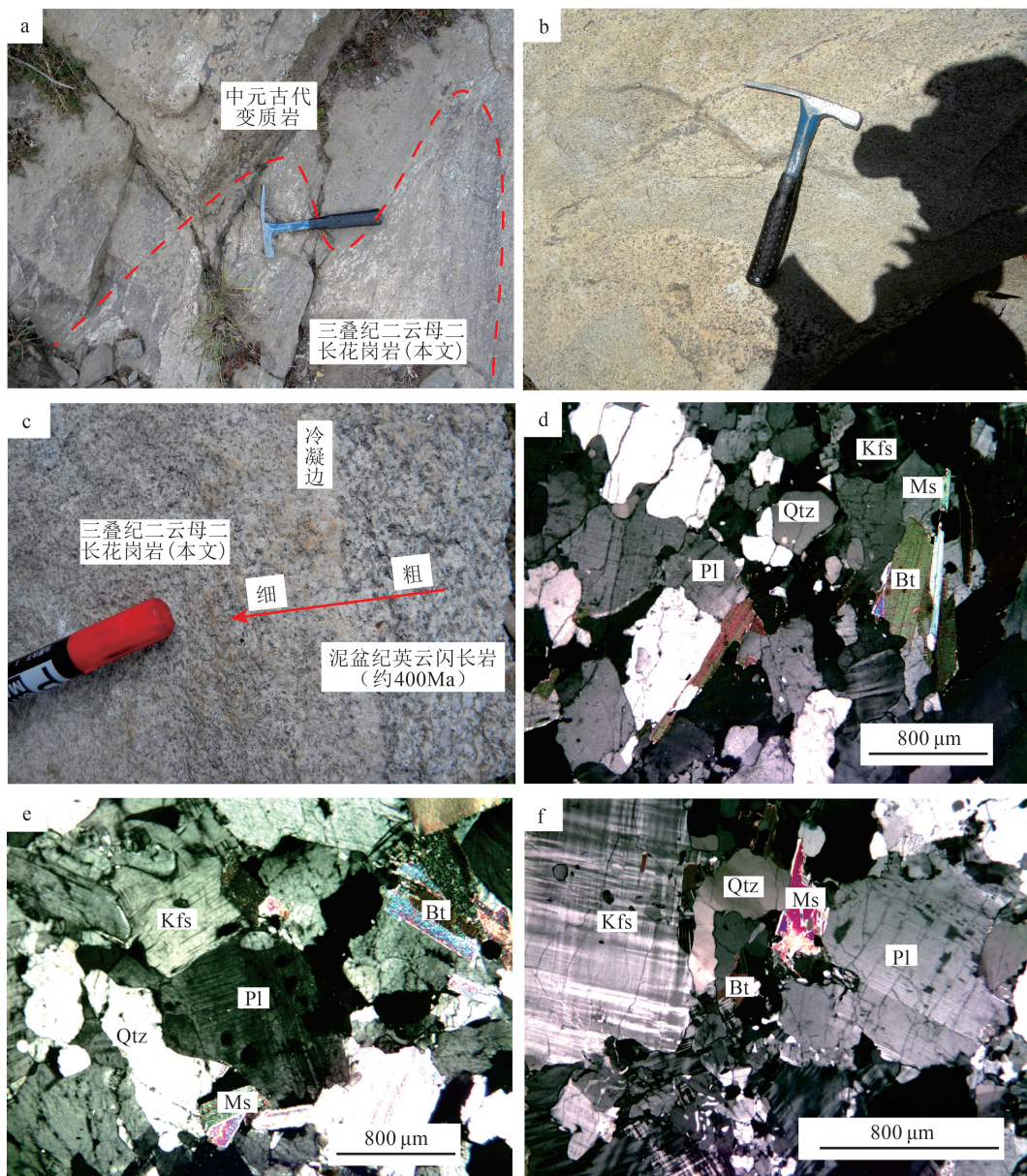
本次测试的二云母正长花岗样品(重量约 12 kg)的重砂矿物挑选和阴极发光照相工作分别在陕西地质调查院分析实验室和西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。后者使用的仪器为 Gatan 公司生产的型号为 MonoCL³⁺, 主机为 Gatan MonoCL³⁺阴极荧光光谱仪。基于锆石内部的阴极发光(CL)特征,在该实验室利用安捷伦公司型号为 Agilent7500a 的四极杆质谱仪进行微区同位素测试,锆石年龄计算采用标准锆石 91500 为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 为外标,²⁹Si 为内标元素进行校正。采用 Anderson 软件^[30]对测试数据进行普通铅校正,锆石年龄加权平均值及 U-Pb 谐和图绘制采用

Isoplot(2.49 版)软件^[31]完成。详细的实验原理、流程及仪器见参考文献[32]。

3.1.2 全岩地球化学分析技术

本次采集的二云母二长花岗岩和二云母正长花岗岩样品全岩地球化学分析在核工业二〇三研究所分析测试中心完成。FeO 采用容量法分析,依据标准 GB/T14506.14—2010,主量和微量元素 P、Ba、V、Cr、Rb、Sr、Zr、Sc 等分析通过荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪仪器并采用 XRF 法完成,依据标准 GB/T14506.28—2010;稀土和微量元素 Co、Ni、Nb、Hf、Ta、Th、U 等则使用 Thermo Fisher Scientific 公司制造的 XSERIES2 型 ICP-MS 仪器分析获得,依据标准 GB/T14506.30—2010;TF₂O₃值通过公式 $TF_2O_3 = Fe_2O_3 + FeO \times 1.1113$ 得出。主量元素分析数据中烧失量介于 0.40%~0.66%之间,总量在 99.05%~99.93%之间,满足精度标准要求;主量元素分析误差小于 1%,微量和稀土元素分析精度优于 5%。

图版 I Plate I



a. 三叠纪二云母二长花岗岩侵入至中元古代变质岩野外照片; b. 三叠纪二云母正长花岗岩野外照片; c. 三叠纪二云母二长花岗岩侵入至泥盆纪英云闪长岩时形成的冷凝边; d. 二云母二长花岗岩显微照片; e. f. 二云母正长花岗岩显微照片。Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Bt—黑云母; Ms—白云母

3.2 测试结果

3.2.1 U-Pb 定年结果

二云母正长花岗岩样品锆石的形态相对单一,绝大多数为长柱状,长度 $50 \sim 290 \mu\text{m}$,长宽比多位于 $1.5:1 \sim 4:1$ 之间。CL 图像显示,样品锆石颗粒具有典型的振荡环带结构,未见核-幔或核-边结构(图 2-a)。Th/U 值为 $0.11 \sim 0.21$ (表 1),显示岩浆成因特征^[33]。其中分析点#4 的 Th/U 值为 7.53。对 15 颗锆石颗粒进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年,

分析结果见表 1。所有锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 数据投点均落在谐和线上或其附近(图 2-a),谐和性较好。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $230 \sim 239 \text{Ma}$ 之间,年龄加权平均值为 $235 \pm 2 \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.46$),表明阿尔泰造山带塔尔萨依地区的二云母正长花岗岩形成于晚三叠世早期(图 2-b)。

3.2.2 全岩地球化学分析结果

阿尔泰造山带南缘塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩样品的全岩地球化学分析

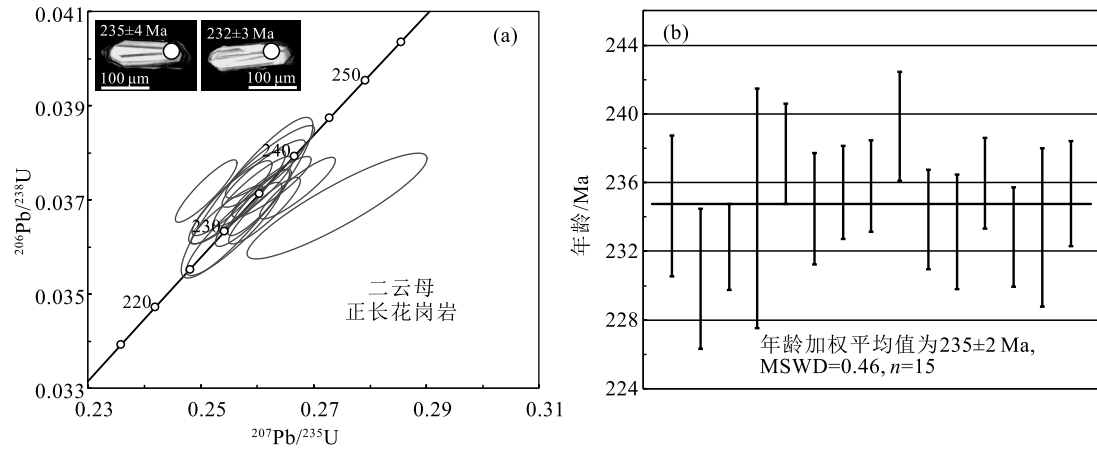


图 2 阿尔泰造山带北段塔尔萨依地区二云母正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

Fig. 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb age of tow-mica syenogranite in the Talsayi area of northern Altai orogenic belt

表 1 阿尔泰造山带北段三叠纪二云母正长花岗岩 (D1212) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical results of the Triassic two-mica syenogranite from the northern Altai orogenic belt

测点号	含量/ 10^{-6}				Th /U	同位素比值								年龄/Ma							
	Pb*	Th	U	$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}$		1σ	$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{232}\text{Th}}$	1σ	
1	99	339	2430	0.14	0.05012	0.00068	0.25644	0.00566	0.03707	0.00066	0.01188	0.00059	211	31	232	5	235	4	239	12	
2	72	301	1756	0.17	0.05095	0.00071	0.25589	0.00563	0.03639	0.00066	0.01220	0.00061	239	64	231	5	230	4	245	12	
3	59	252	1397	0.18	0.05036	0.00078	0.25466	0.00417	0.03668	0.00040	0.01118	0.00059	213	40	230	3	232	3	225	12	
4	354	23859	3168	7.53	0.05071	0.00086	0.25818	0.00768	0.03705	0.00112	0.01559	0.00175	228	39	233	6	235	7	313	35	
5	73	357	1697	0.21	0.05041	0.00080	0.26108	0.00488	0.03756	0.00047	0.01154	0.00071	213	37	236	4	238	3	232	14	
6	89	314	2176	0.14	0.04997	0.00058	0.25551	0.00464	0.03704	0.00052	0.01095	0.00060	195	28	231	4	234	3	220	12	
7	92	474	2193	0.22	0.04896	0.00062	0.25089	0.00362	0.03720	0.00044	0.01084	0.00055	146	27	227	3	235	3	218	11	
8	70	208	1678	0.12	0.05200	0.00073	0.26708	0.00444	0.03725	0.00043	0.01141	0.00057	287	31	240	4	236	3	229	11	
9	62	209	1483	0.14	0.05019	0.00066	0.26224	0.00523	0.03781	0.00051	0.01109	0.00055	211	31	236	4	239	3	223	11	
10	83	334	1996	0.17	0.05119	0.00071	0.26039	0.00369	0.03694	0.00047	0.01029	0.00058	250	31	235	3	234	3	207	12	
11	150	413	3698	0.11	0.05111	0.00069	0.25918	0.00435	0.03683	0.00053	0.01079	0.00062	256	31	234	4	233	3	217	12	
12	68	298	1636	0.18	0.05104	0.00072	0.26253	0.00465	0.03728	0.00043	0.01077	0.00057	243	33	237	4	236	3	217	11	
13	55	204	1346	0.15	0.05157	0.00069	0.26131	0.00419	0.03678	0.00046	0.01058	0.00054	265	31	236	3	233	3	213	11	
14	76	264	1938	0.14	0.05352	0.00121	0.27413	0.01053	0.03687	0.00074	0.01341	0.00098	350	84	246	8	233	5	269	20	
15	79	363	1916	0.19	0.05054	0.00064	0.25930	0.00466	0.03718	0.00049	0.01067	0.00056	220	32	234	4	235	3	214	11	

结果见表 2。二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩样品的 SiO_2 含量分别为 71.64%~74.16% 和 72.69%~73.33%,前者含量变化较大; TiO_2 含量分别为 0.08%~0.21% 和 0.13%~0.16%; 正长花岗岩的 Na_2O 含量为 3.39%~4.01%, 相较二长花岗岩高

(2.72%~2.88%), 而 K_2O 含量则相反, 正长花岗岩为 4.09%~4.7%, 二长花岗岩为 5.09%~5.11%。塔尔萨依地区正长花岗岩和二长花岗岩的 K_2O 含量均高于 Na_2O , 里特曼指数(σ)分别为 2.14~2.71 和 2.13~2.18, 表明 2 类花岗岩均具有钙碱性岩石特征。

表 2 阿尔泰造山带北段三叠纪二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩主量、微量和稀土元素地球化学分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth elements geochemical data of the Triassic two-mica syenogranite and two-mica monzogranite, northern Altaid orogenic belt

岩性	二云母正长花岗岩			二云母二长花岗岩		
样品号	D1212-1	D1212-2	D1212-3	D1212-4	D1212-5	D1212-6
GPS 坐标	93°45'32"E	93°45'35"E	93°45'51"E	93°45'25"E	93°45'18"E	93°45'39"E
	63°56'47"N	63°56'29"N	63°56'35"N	63°56'51"N	63°56'40"N	63°56'59"N
SiO ₂	71.98	74.16	71.64	73.33	72.89	72.69
TiO ₂	0.11	0.08	0.21	0.13	0.14	0.16
Al ₂ O ₃	15.46	14.94	15.77	14.27	14.65	14.19
Fe ₂ O ₃	0.24	0.19	0.33	0.50	0.54	1.09
FeO	1.17	0.94	1.47	0.96	0.97	0.92
MnO	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05
MgO	0.10	0.00	0.27	0.20	0.22	0.22
CaO	1.07	0.90	1.27	1.22	1.21	1.19
Na ₂ O	4.01	3.39	3.82	2.88	2.82	2.72
K ₂ O	4.70	4.64	4.09	5.11	5.09	5.10
P ₂ O ₅	0.06	0.04	0.12	0.12	0.13	0.15
烧失量	0.20	0.16	0.22	0.50	0.59	0.61
总量	99.12	99.46	99.24	99.25	99.28	99.09
La	16.90	15.80	46.70	30.90	33.50	36.80
Ce	30.30	28.40	81.60	54.10	57.40	64.50
Pr	3.48	3.28	9.41	6.13	6.79	7.28
Nd	11.80	11.20	32.60	21.80	23.10	25.90
Sm	2.29	2.15	4.95	4.47	4.43	4.71
Eu	0.60	0.55	0.86	0.89	0.98	0.90
Gd	1.78	1.50	3.54	3.31	3.61	3.87
Tb	0.22	0.22	0.42	0.49	0.49	0.54
Dy	0.94	0.84	1.56	1.97	2.09	2.27
Ho	0.19	0.18	0.31	0.42	0.40	0.45
Er	0.52	0.44	0.74	1.17	0.95	1.17
Tm	0.06	0.07	0.11	0.16	0.12	0.15
Yb	0.39	0.34	0.60	0.92	0.85	0.86
Lu	0.04	0.06	0.09	0.12	0.10	0.13
Y	5.51	4.97	9.08	13.6	12.9	13.7
Sr	97.8	113.5	165.1	141.1	127.3	123
Ba	229	279	506	529	538	491
Rb	175	170	185	175	175	181
Th	9.58	8.3	24.9	17	18.9	22
Pb	44.5	43.6	41.3	71.5	47.3	47.8
Zr	46.1	49.3	107.9	78.6	75.6	88.3
Nb	11.8	13.9	11	14.1	15.4	15
Ta	1.14	1.18	0.98	0.9	1.29	1.19
Cr	4.2	4.2	5.7	7.6	6.4	6.2
Ni	10.7	3.57	6.8	10.8	5.44	5.16
δEu	0.30	0.31	0.21	0.23	0.25	0.21
δCe	3.95	3.95	3.89	3.93	3.81	3.94
ΣREE	69.51	65.03	183.49	126.85	134.81	149.53

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

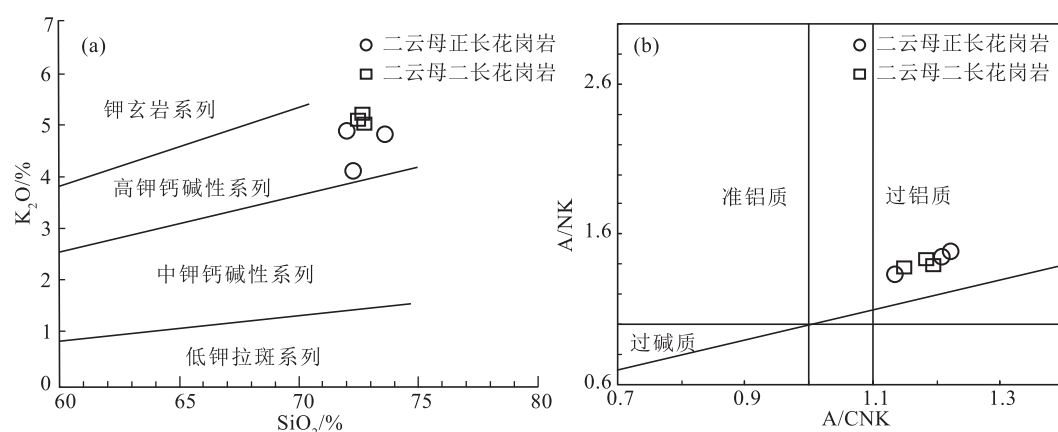


图 3 阿尔泰造山带北段塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (a) 和 A/CNK-A/NK (b) 图解 (底图据参考文献[34]) ($\text{A/CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 摩尔比; $\text{A/NK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 摩尔比)

Fig. 3 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams of the two-mica syenogranite and two-mica monzogranite samples in the Talsayi area of northern Altaid orogenic belt

在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中,二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩样品点均落在高钾钙碱性区域(图 3-a),铝饱和度指数(A/CNK)分别位于 1.13~1.22 之间和 1.14~1.19 之间,属于强过铝质花岗岩,该结果也与 A/CNK-A/NK 图解的判别结果一致(图 3-b)。

塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩样品的稀土元素含量($\sum \text{REE}$)中等,分别为 $65.03 \times 10^{-6} \sim 183.49 \times 10^{-6}$ 和 $126.85 \times 10^{-6} \sim 149.53 \times 10^{-6}$ 。二云母正长花岗岩的轻、重稀土元素含量分别为 $61.38 \times 10^{-6} \sim 176.12 \times 10^{-6}$ 和 $3.65 \times 10^{-6} \sim 7.37 \times$

10^{-6} 。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解(图 4-a)中,表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征, $(\text{La/Yb})_N$ 值为 31.08~55.83,指示轻、重稀土元素分馏程度显著。此外,正长花岗岩的 δCe 和 δEu 值分别为 0.95~0.97 和 0.63~0.94,整体显示出弱的负异常。二云母二长花岗岩的轻、重稀土元素含量分别为 $118.29 \times 10^{-6} \sim 140.09 \times 10^{-6}$ 和 $8.56 \times 10^{-6} \sim 9.44 \times 10^{-6}$,后者含量整体较正长花岗岩高。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中,二长花岗岩表现出与正长花岗岩相似的特征,富集轻稀土元素、亏

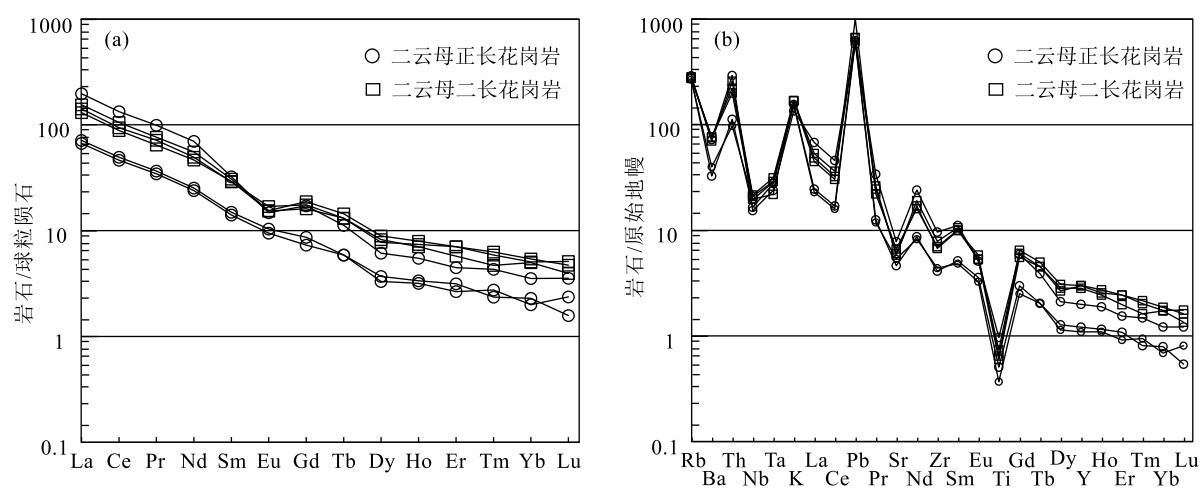


图 4 造山带北段塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准值据参考文献[35])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized diagrams (b) of the two-mica syenogranite and two-mica monzogranite samples in the Talsayi area of northern Altaid orogenic belt

损重稀土元素,但二长花岗岩的 δEu 值为 0.64~0.75,显示中等程度的负 Eu 异常,表明存在斜长石的分离结晶作用或源区有斜长石的残留。

塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩样品在微量元素原始地幔标准化蛛网图中显示出一致的特征(图 4-b),均富集不相容元素 Rb、Th、K 等,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等。此外,Ba、Ce、Sr 等元素也呈典型的“谷”状,而 Nd、Pb、Sm 等元素则呈“峰”状,形成左高右低的峰、谷相间状。

4 讨论

4.1 阿尔泰造山带北段晚三叠世早期岩浆事件

阿尔泰造山带广泛分布多期次的花岗质岩浆,这些岩浆活动多发生于古生代^[8-9,20]。近年来,越来越多的年代学数据显示,阿尔泰造山带同时出露中生代花岗岩,这些花岗岩大多分布在阿尔泰东部,其次在中阿尔泰也有少量出露,虽然这类花岗岩只占阿尔泰造山带花岗质岩石总面积的 10%^[6,8],但限定了阿尔泰造山带后碰撞到板内大地构造环境的演化时限,因此具有非常重要的意义。

位于阿尔泰造山带塔尔萨依地区的正长花岗岩锆石的 CL 图像显示出典型的振荡环带结构,且具有较高的 Th/U 值(0.11~0.21),表明其为岩浆成因特征^[33]。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果显示,正长花岗岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 235 ± 2 Ma(MSWD=0.46),代表了塔尔萨依地区二云母

正长花岗岩的锆石结晶年龄,记录了造山带北段晚三叠世早期的岩浆事件。该年龄的表明,阿尔泰造山带中生代花岗岩不仅横跨了阿尔泰的中、东部地区,甚至还延伸至北部地区。

4.2 岩石成因

塔尔萨依地区正长花岗岩和二长花岗岩均具有高硅、高钾、低镁、低钛等地球化学特征,里特曼指数(σ)分别为 2.14~2.71 和 2.13~2.18,铝饱和指数(A/CNK)分别位于 1.13~1.22 之间和 1.14~1.19 之间(图 3-b),表明两者均属于高钾钙碱性强过铝质花岗岩。此外,两类花岗岩具有低的 $\text{Mg}^\#$ 值(<25)、Cr($<8 \times 10^{-6}$)和 Ni($<11 \times 10^{-6}$)含量,表明其物源以地壳物质为主,而且正长花岗岩和二长花岗岩的 Rb/Nb 值位于 11~15 之间,高于全球上地壳的 Rb/Nb 值(4.5)^[36]。在 Nb-Nb/Ta 判别图解(图 5-a)中,两类花岗岩均落在上地壳源区附近而远离地幔源区,进一步证明塔尔萨依地区花岗质岩石形成时的物源与地壳物质具有密切的关系。

大陆地壳演化过程中,成熟沉积物由于风化、剥蚀和远距离搬运作用而表现出富含抗风化石物的特点^[39],这些矿物往往富含大离子亲石元素如 Rb,贫 Ca、Ti 等元素。前人已发表的阿尔泰造山带古生代和中生代花岗质岩石的全岩地球化学数据显示,该造山带晚石炭世的花岗质岩石表现出高 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和低 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值的特征,暗示该时期的花岗质岩石可能为新生基性地壳物质熔融形成^[40]。随着造山带大地构造环境的转变,二叠纪和

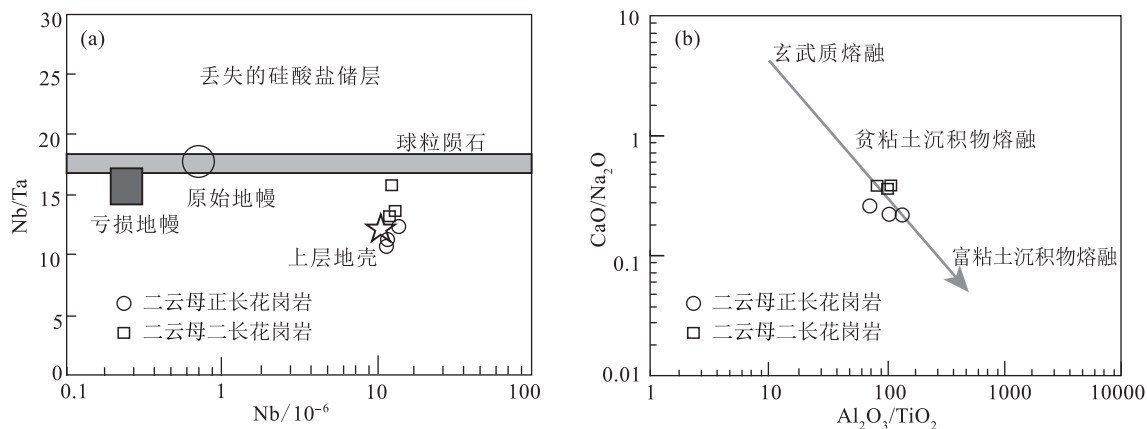


图5 阿尔泰造山带北段塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩 Nb-Nb/Ta 图解
(a,底图据参考文献[37])和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解(b,底图据参考文献[38])

Fig. 5 Nb-Nb/Ta(a) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (b) diagrams for two-mica syenogranite and two-mica monzogranite samples in the Talsayi area of northern Altaid orogenic belt

三叠纪花岗岩显示出粘土沉积物熔融特征,但两者兼具玄武质来源的性质^[40]。塔尔萨依地区花岗质岩石具有中等的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和低 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值的特征,在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 判别图解(图 5-b)中,落入贫粘土沉积物和富粘土沉积物来源区域,且表现出从贫粘土沉积物熔融向富粘土沉积物熔融逐渐过渡的变化趋势。

4.3 构造环境及意义

形成于不同构造环境的岩浆岩表现出不同的元素地球化学特征^[41-45],如板内环境的花岗岩富集 Yb、Y、Nb、Ta 等高场强元素,同碰撞构造环境的花岗岩富含 Rb 等元素,岛弧环境的花岗岩则表现出两者含量均较低的特征^[41]。塔尔萨依地区花岗岩具有较高的 Rb 含量,以及较低的高场强元素,在 $(\text{Y}+\text{Nb})$ -Rb 和 $(\text{Yb}+\text{Ta})$ -Rb 图解(图 6)中,落入同碰撞火山岩和火山弧花岗岩范围。结合阿尔泰造山带的构造演化历史和岩石成因,推测其很可能形成于同碰撞大地构造背景。与阿尔泰造山带东部和中部地区出露的花岗岩相比,研究区花岗岩表现出较大的差异性:①塔尔萨依地区花岗岩的物质来源为大陆地壳,没有或较少有新生地壳物质的加入;②塔尔萨依地区花岗岩在晚三叠世早期(约 235 Ma)仍处于同碰撞构造背景,不同于造山带其他区域的花岗岩已处于典型的板内构造环境^[40]。

阿尔泰造山带北段晚三叠世早期花岗岩的发现,表明中生代花岗岩不仅横跨阿尔泰的中、东部地区,还延伸至北部地区。本文的研究对象正长花岗岩的形成年龄为 235 ± 2 Ma,略老于造山带中部的可可托海、阿拉尔等地区的 200~220 Ma 花岗质岩石,暗示阿尔泰造山带中生代花岗岩的形成时代存在时空差异性。此外,前人研究表明,阿尔泰造山带东段和中段在 280 Ma 以后,已表现为板内环境属性,并在 250 Ma 进入典型的板内构造环境,然而本次研究表明,阿尔泰造山带南缘在 235 Ma 仍处于同碰撞环境,暗示阿尔泰造山带的构造背景转变在时空上存在差异,即造山带碰撞挤压环境向伸展裂解背景转换时显示东—中段较早而北段较晚的趋势。该研究结果对于了解阿尔泰造山带的形成演化方式和构造作用过程具有重要意义。

5 结 论

(1)阿尔泰造山带北段塔尔萨依岩体花岗质岩石的锆石 U-Pb 定年结果表明,该岩体的形成年龄为 235 ± 2 Ma(MSWD=0.46),为晚三叠世早期岩浆活动的产物。

(2)塔尔萨依岩体花岗岩表现出高钾钙碱性强过铝质属性,且具有低 $\text{Mg}^\#$ 值,低 Cr 和 Ni 含量,以及中等的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和低 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值特征,表

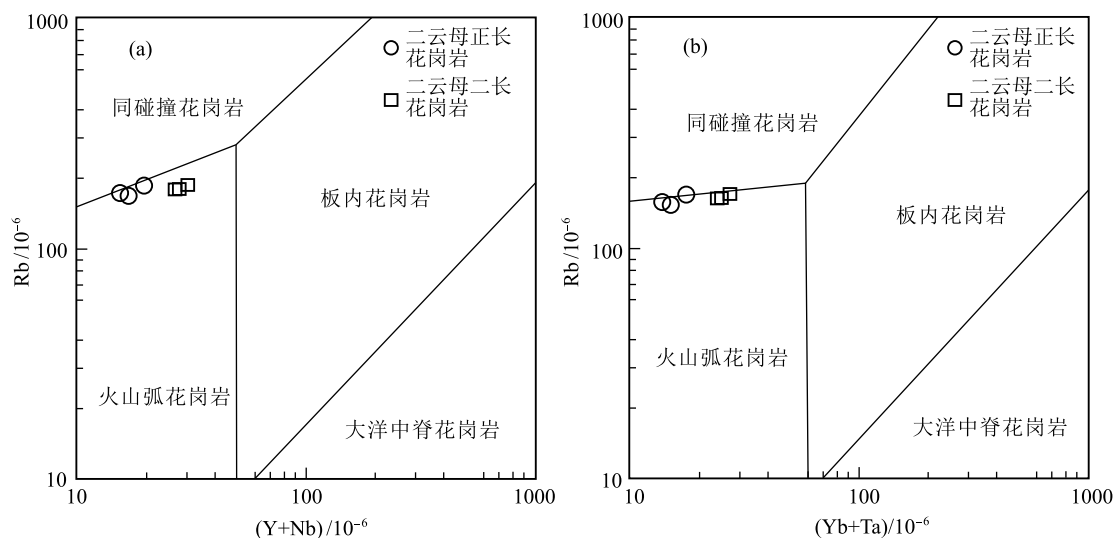


图 6 阿尔泰造山带北段塔尔萨依地区二云母正长花岗岩和二云母二长花岗岩 $(\text{Yb}+\text{Nb})$ -Rb(a) 和 $(\text{Yb}+\text{Ta})$ -Rb(b) 构造环境判别图解(据参考文献[39]修改)

Fig. 6 $(\text{Yb}+\text{Nb})$ -Rb(a) and $(\text{Yb}+\text{Ta})$ -Rb(b) diagrams for two-mica syenogranite and two-mica monzogranite samples in the Talsayi area of northern Altai orogenic belt

明其物源主要为粘土沉积物的陆壳。

(3) 塔尔萨依岩体花岗质岩石富集 Rb 而贫 Yb、Y、Nb、Ta 等高场强元素, 显示同碰撞花岗岩特征。结合前人研究成果, 认为阿尔泰山带三叠纪的构造背景转变在时空上存在差异, 整体表现出东—中部早而北部晚的趋势。

致谢: 野外工作期间, 得到中国地质调查局西安地质调查中心陈隽璐研究员和校培喜教授级高级工程师的悉心指导, 以及项目组其他成员的支持和帮助, 审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Jahn B M, Wu F Y, Hong D. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 2000, 109(1): 5–20.
- [2] Sengör A M C, Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(22): 299–307.
- [3] 王中刚, 赵振华, 邹天人, 等. 阿尔泰山花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1–152.
- [4] 袁超, 孙敏, 肖文交, 等. 阿尔泰山南缘花岗岩的锆石 U–Pb 年代学及其地球化学特征[C]//全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 2005: 418.
- [5] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 1–88.
- [6] Windley B F, Kröner A, Guo J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110: 719–737.
- [7] 王涛, 洪大卫, 童英, 等. 中国阿尔泰山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 640–650.
- [8] 王涛, 童英, 李勉, 等. 阿尔泰山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰山为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 595–618.
- [9] Wang T, Hong D W, Jahn B M, et al. Timing, Petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114: 735–751.
- [10] Zhang Z C, Yan S H, Chen B L, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(8): 952–962.
- [11] 曾乔松, 陈广浩, 王核, 等. 阿尔泰山冲乎尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1921–1932.
- [12] 刘伟, 刘丽娟, 刘秀金, 等. 阿尔泰山南缘早泥盆世康布铁堡组的 SIMS 锆石 U–Pb 年龄及其向东向北延伸的范围[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 387–400.
- [13] 付超, 李俊建, 唐文龙, 等. 蒙古戈壁阿尔泰巴音陶勒盖地区二长花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2016, 35(4): 565–571.
- [14] 赵玉梅, 彭戈, 赵得龙, 等. 中国阿尔泰克孜勒花岗岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(2): 271–282.
- [15] 张亚峰, 蔺新望, 王星, 等. 阿尔泰山带南缘昆格依特岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年代学、岩石成因及其地质意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 16–28.
- [16] 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等. 阿尔泰山南缘可可托海地区二厂房岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年代学、岩石成因及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(1): 13–28.
- [17] 田红彪, 陈有炘, 杨永强, 等. 中国阿尔泰山北部哈拉尔次花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. *地球科学*, 2017, 42(10): 1658–1672.
- [18] 黄博涛, 董增产, 潘峰, 等. 阿尔泰山带青河地区早泥盆世和寒武纪末花岗岩的年代学、岩石成因及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(4): 458–472.
- [19] 宋鹏, 童英, 王涛, 等. 阿尔泰山南缘泥盆纪花岗质岩石的锆石 U–Pb 年龄、成因演化及构造意义: 钙碱性–高钾钙碱性–碱性岩浆演化新证据[J]. *地质学报*, 2017, 91(1): 55–79.
- [20] 赵端昌, 蔺新望, 张亚峰, 等. 中阿尔泰山带北缘早泥盆世构造环境探讨: 来自托普色克他乌地区过铝质花岗岩年代学和地球化学的制约[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(1): 63–73.
- [21] 秦克章, 申茂德, 唐冬梅, 等. 阿尔泰山带伟晶岩型稀有金属矿化类型与成岩成矿时代[J]. *新疆地质*, 2013, 31(Z1): 1–7.
- [22] 张辉, 吕正航, 唐勇. 新疆阿尔泰山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 792–814.
- [23] Che X D, Wu F Y, Wang R C, et al. In situ U–Pb isotopic dating of columbite–tantalite by LA–ICP–MS[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 979–989.
- [24] 王春龙, 秦克章, 冬梅, 等. 阿尔泰山斯喀尔特 Be–Nb–Mo 矿床年代学、锆石 Hf 同位素研究及其意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(8): 2337–2352.
- [25] 杨富全, 张忠利, 王蕊, 等. 新疆阿尔泰山稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(6): 1010–1026.
- [26] Wang T, Tong Y, Jahn B M, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32: 325–336.
- [27] Wang T, Li W P, Li J B, et al. Increase of juvenile mantle-derived composition from syn-orogenic to post-orogenic granites of the east part of the east Tian Shan (China) and implications for continental vertical growth: Sr and Nd isotopic evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24: 763–772.
- [28] 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化: 以阿尔泰山南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. *地学前缘*, 2010, 17: 53–82.
- [29] Lin Z, Yuan C, Zhang Y, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of two episodes of Permian and Triassic high-silica

- granitoids in the Chinese Altai, Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 184: 103978.
- [30] Anderson T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [31] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-56.
- [32] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation - inductively coupled plasma - mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353-370.
- [33] 吴元保, 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, 16: 1589-1604.
- [34] Peccerillo R, Taylors S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [36] Taylor S R, McLennan S M. The Geochemical evolution of the continental crust [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33: 241-265.
- [37] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. Chemical Geology, 2000, 165 (3/4): 197-213.
- [38] Jung S, Pfänder J A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and accessory mineral saturation thermometry [J]. European Journal of Mineralogy, 2007, 19: 859-870.
- [39] Cox R, Lowe D R. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover [J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65: 1-12.
- [40] 林正帆. 中国阿尔泰造山带二叠纪、三叠纪岩浆活动及其构造意义 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2019.
- [41] 蒋幸福, 彭松柏, 韩庆森. 扬子克拉通黄陵背斜南部 ~860Ma 岩墙的成因及地质意义 [J]. 地球科学, 2021, 46(6): 2117-2132.
- [42] 王世成, 杨仲杰, 杨菊, 等. 辽东石庙沟岩体岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2021, 51(2): 429-441.
- [43] 王凯垒, 张学萌, 李会恺, 等. 内蒙古阿拉善地块北缘雅布赖地区埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因和构造背景 [J]. 地质通报, 2021, 40(9): 1443-1458.
- [44] Jiang X F, Peng S B, Kusky T M, et al. Petrogenesis and geotectonic significance of Early - Neoproterozoic olivine - gabbro within the Yangtze Craton: constraints from the mineral composition, U-Pb age and Hf isotopes of zircons [J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(1): 93-102.
- [45] 张山, 巫建华, 刘帅, 等. 赣南古家营盆地英安岩时代、成因及对早古生代构造演化的制约 [J]. 地质通报, 2021, 40(9): 1459-1475.
- [46] Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.