

古亚洲洋东段洋盆闭合与后造山伸展

——来自内蒙古苏尼特右旗中三叠世A型花岗岩的证据

王 帅¹, 李英杰^{1,2}, 孔星蕊¹, 许 展³, 王金芳¹, 董培培¹, 鞠文信³, 王晓东¹

(1. 河北地质大学 地球科学学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 内蒙古苏尼特右旗查干楚鲁A型二长花岗岩位于索伦-林西缝合带内, 侵位于早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(带)中。本文对其进行系统的野外地质特征、岩石学、地球化学和锆石U-Pb年代学研究, 旨在厘定岩体成因和形成的构造背景, 为古亚洲洋东段洋盆闭合时限提供证据。LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果显示查干楚鲁二长花岗岩侵位于中三叠世(245.9 ± 1.3 Ma);岩体含较多碱性长石, 暗色矿物以黑云母为主, 见晶洞构造;地球化学研究显示, 该岩体高硅($\text{SiO}_2 = 76.75\% \sim 77.18\%$)、富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.19\% \sim 8.62\%$)、贫钙($\text{CaO} = 0.40\% \sim 0.44\%$)和镁($\text{MgO} = 0.03\% \sim 0.05\%$);负Eu异常显著($\delta\text{Eu} = 0.03 \sim 0.09$), Rb、Th、U、K、Ga元素较富集, 而Ba、Sr、P、Ti元素相对亏损, 且 $10\,000\,\text{Ga}/\text{Al}(2.72 \sim 3.52)$ 、 $^{\text{T}}\text{FeO}/\text{MgO}(29.16 \sim 57.82)$ 、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}(15.08 \sim 21.39)$ 值较高, 其岩石学、矿物学和地球化学特征具有A型花岗岩的特点。结合区域中生代A型花岗岩具有正 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值和年轻的Nd模式年龄, 推测岩体可能为低压高温下新增生中基性地壳部分熔融成因。新获得的查干楚鲁A型二长花岗岩的锆石U-Pb年龄约束了古亚洲洋东段闭合时间在中三叠世之前。

关键词: A型花岗岩; 中三叠世; 后造山伸展; 内蒙古苏尼特右旗

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)03-0555-14

Ocean basin closure and post orogenic extension in the eastern Paleo-Asian Ocean: Evidence from Middle Triassic A-type granite in Sonid Youqi, Inner Mongolia

WANG Shuai¹, LI Ying-jie^{1,2}, KONG Xing-rui¹, XU Zhan³, WANG Jin-fang¹, DONG Pei-pei¹, JU Wen-xin³ and WANG Xiao-dong¹

(1. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. Geological Survey of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

Abstract: Lying along the Solonker-Linxi collisional orogenic suture zone in Sonid Youqi of Inner Mongolia, the Chaganchulu A-type monzogranite intruded into the Early Permian Halengling SSZ type ophiolitic tectonic melange belt. Based on the systematic field geological characteristics, petrology, geochemistry, zircon U-Pb chronology, the purpose of this study is to determine the genetic type of pluton, tectonic setting, and provide evidence for the closing time of the ocean basin in the eastern part of the Paleo-Asian Ocean. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that

收稿日期: 2021-09-26; 接受日期: 2022-03-28; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972061); 中国地质调查局项目(12120114083201; DD20190004); 河北地质大学科技创新团队项目(KJCTD-2021-07); 河北地质大学学生科技基金科研项目(KAY202102, KAY202121)

作者简介: 王 帅(1993-), 男, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: 1184386545@qq.com; 通讯作者: 李英杰(1976-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩浆岩与大地构造研究工作, E-mail: liyingjie820@126.com。

the age of the granite is 245.9 ± 1.3 Ma, indicating that the formation age is Middle Triassic. The granite contains more alkaline feldspars, and the dark mineral is mainly biotite, with cave structure. The granite is geochemically characterized by high SiO_2 (76.75%~77.18%) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.19\% \sim 8.62\%$), but low CaO (0.40%~0.44%) and MgO (0.03%~0.05%). The granite has obvious negative Eu anomaly ($\text{Eu} = 0.03 \sim 0.09$), relative enrichment of Rb, Th, U, K and Ga, depletion of Ba, Sr, P and Ti, as well as high $10\,000 \text{ Ga/Al}$ (2.72~3.52), $^{17}\text{FeO}/\text{MgO}$ (29.16~57.82), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ (15.08~21.39). The petrological, mineralogical and geochemical characteristics of the granite show the characteristics of A-type granite. According to the regional, Mesozoic A-type granites have positive correlation $\varepsilon\text{Nd}(t)$ value and young Nd age suggest that the granite may be caused by partial melting of intermediate basic crust in neoaccretion under low pressure and high temperature. The zircon U-Pb age of the newly obtained Chaganchulu A-type monzogranite restricts the closing time of the eastern part of the Paleo-Asian Ocean before the Middle Triassic.

Key words: A-type granite; Middle Triassic; post orogenic extension; Sonid Youqi of Inner Mongolia

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41972061); Project of China Geological Survey (12120114083201, DD20190004); Science and Technology Innovation Team Project of Hebei GEO University (KJCXTD-2021-07); Scientific Research Project of Student Science and Technology Foundation of Hebei GEO University (KAY202102, KAY202121)

华北板块与西伯利亚板块之间古亚洲洋东段洋盆最终闭合的时间与位置，一直是中亚造山带东段研究与争论的热点。其中，古亚洲洋东段洋盆最终闭合时间主要有泥盆纪(唐克东等, 1991; 徐备等, 2014)、石炭纪早期(邵济安, 1991)和早三叠世(陈斌等, 2001; Jian et al., 2010; 李英杰等, 2012; 肖庆辉等, 2016; Li et al., 2018a, 2020a; 王帅等, 2021)3种观点。古亚洲洋东段洋盆最终闭合位置也存在诸多争议，主要有二连-贺根山缝合带(Miao et al., 2008; Jian et al., 2010; Li et al., 2018b, 2020b; 董培培等, 2020)、索伦-林西缝合带(陈斌等, 2001)和索伦-西拉木伦缝合带(孙德有等, 2004; 刘建峰等, 2016)。导致对古亚洲洋在中亚造山带东段闭合时间以及闭合位置争议的关键是缺乏关键的地质证据，很多证据是建立在地球化学数据的解释不同引起的。近年，笔者通过中国地质调查局1:5万地质填图，在苏尼特右旗早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(带)中新发现了三叠纪A型花岗岩体，该岩体直接侵位于苏尼特右旗早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(带)(Xu et al., 2019)中，为约束古亚洲洋在该地区的闭合时间提供了直接的地质证据。本文通过对其开展系统的地质特征、岩石学、地球化学分析以及LA-ICP-MS锆石U-Pb测年，进一步探讨其成因类型及构造环境，以期为古亚洲洋东段晚古生代洋盆闭合时限和位置以及后造山伸展拉张构造演化提供进一步的证据和

约束。

1 地质背景和岩体特征

查干楚鲁二长花岗岩体位于内蒙古中部苏尼特右旗东北部查干楚鲁一带，区域构造位置属于索伦-林西缝合带(图1a)，侵位于早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(带)中(Xu et al., 2019)，围岩主体为下二叠统寿山沟组复理石，接触带附近的寿山沟组复理石砂板岩普遍角岩化，其它部位被中新统通古尔组砂砾岩、砂质泥岩角度不整合覆盖(图1b)。苏尼特右旗哈冷岭蛇绿构造混杂岩(带)中的蛇绿岩套组合较为完整，主要包括蛇纹石化方辉橄榄岩、层状辉长岩、辉绿岩、枕状玄武岩、细碧岩及硅质岩(Xu et al., 2019)，蛇绿岩岩块之间多为断层接触，基质主要为下二叠统寿山沟组复理石。蛇绿构造混杂岩(带)内和两侧普遍糜棱岩化和碎裂岩化。

查干楚鲁二长花岗岩体大体呈东西向，长约9 km，宽约5 km，出露面积约 30 km^2 ，西北部侵位到下二叠统寿山沟组糜棱岩化带中(图2a)，主要岩石类型为中细粒二长花岗岩，岩体中部为中粒二长花岗岩，向边部过渡为细粒，未见明显糜棱岩化现象。岩石呈浅肉红色，中细粒自形-半自形粒状结构，块状构造(图2b)，偶见晶洞构造。主要矿物由碱性长石(35%~40%，体积分数)、斜长石(30%~

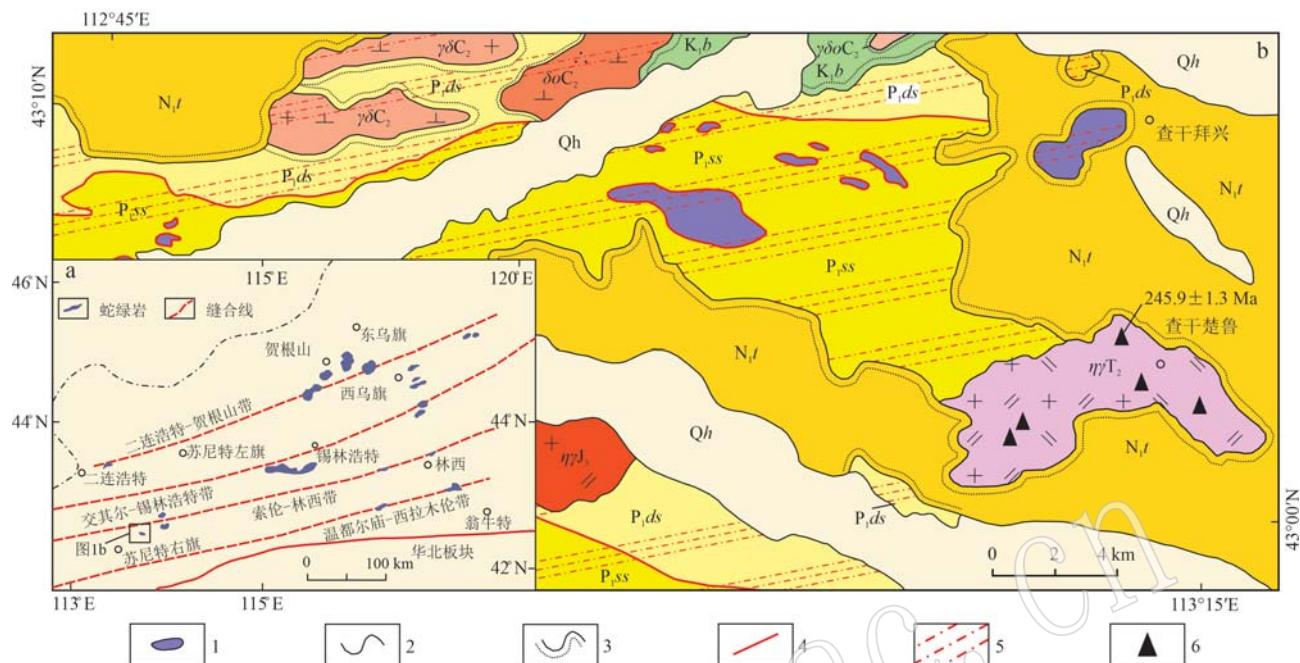


图1 内蒙古苏尼特右旗查干楚鲁地区大地构造位置示意图(a, 据 Miao et al., 2008)和地质简图(b)

Fig. 1 Sketch tectonic map (a, after Miao et al., 2008) and simplified geological map (b) of the Chaganchulu region in Sonid Youqi, Inner Mongolia

Qh—全新统; N₁t—中新统通古尔组; K₁b—下白垩统白音高老组; P₁ds—下二叠统大石寨组; P₁ss—下二叠统寿山沟组; ηγJ₃—晚侏罗世

二长花岗岩; ηγT₂—中三叠世二长花岗岩; γδC₂—晚石炭世花岗闪长岩; δoC₂—晚石炭世石英闪长岩; γδoC₂—晚石炭世英云闪长岩;

1—早二叠世蛇绿岩; 2—整合界线; 3—角度不整合界线; 4—断层; 5—糜棱岩化带; 6—采样位置

Qh—Holocene; N₁t—Miocene Tongguer Formation; K₁b—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; P₁ds—Lower Permian Dashizhai Formation;

P₁ss—Lower Permian Shoushangou Formation; ηγJ₃—Late Jurassic monzogranite; ηγT₂—Middle Triassic monzogranite; γδC₂—Late Carboniferous granodiorite; δoC₂—Late Carboniferous quartz diorite; γδoC₂—Late Carboniferous tonalite; 1—Early Permian ophiolite; 2—integration boundary;

3—angular unconformity boundary; 4—fault; 5—mylonitization zone; 6—sampling location

35%)、石英(~30%)和黑云母(~5%)组成。碱性长石呈半自形-他形板状, 主要为正条纹长石、正长石和微斜长石, 发育条纹结构和简单双晶, 轻微高岭土化; 斜长石呈自形-半自形板状, 聚片双晶发育, 部分颗粒具环带构造, 均发育绢云母化和高岭土化; 石英呈他形粒状充填于碱性长石和斜长石颗粒间, 具波状消光, 局部可见裂纹; 黑云母为黄褐色-暗绿色, 他形片状, 弱铁质化和弱绿帘石化; 副矿物主要为锆石和磁铁矿(图2c、2d)。

2 样品特征与测试方法

在详细的野外地质观察基础上, 于查干楚鲁二长花岗岩体不同部位共采集了5件(XT01~XT05)风化程度较低、新鲜且无氧化、无污染、无明显蚀变的岩石样品用于地球化学分析, 并对其中1件弱变

形的二长花岗岩岩石样品(XT03)进行LA-ICP-MS锆石U-Pb测年, 采样点地理位置为北纬43°04'13"、东经113°11'15"(图1b)。

锆石制靶、阴极发光(CL)照相由北京锆年领航科技有限公司完成, 具体流程参照宋彪等(2002)。LA-ICP-MS锆石U-Pb测年在中国地质调查局天津地质调查中心完成, 所用测年仪器为Neptune型MC-ICP-MS及Newwave UP 193激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为35 μm, 剥蚀深度为20~40 μm。锆石年龄计算选用标准锆石GJ-1作为外标, ²⁹Si作为内标, 详细的实验流程见Yuan等(2008)。数据处理采用ICPMsDataCal 8.4程序(Liu et al., 2008), 并进行普通铅校正(Anderson, 2002), 最终采用ISO-PLOT(3.0版)完成年龄计算及谐和图绘制。

主量、微量元素及稀土元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素测定采用PW440



图2 查干楚鲁二长花岗岩野外和显微照片

Fig. 2 Outcrop photos and photomicrographs of the Chaganchulu monzogranite

a—二长花岗岩侵入砂质板岩；b—二长花岗岩野外露头；c—二长花岗岩显微照片(−)；d—二长花岗岩显微照片(+)；
Pl—斜长石；Pth—条纹长石；Q—石英；Bi—黑云母
a—photo of monzogranite intrusive sandy slate; b—field outcrop photo of monzogranite; c—micrographs of monzogranite (−);
d—micrographs of monzogranite (+); Pl—plagioclase; Pth—perthite; Q—quartz; Bi—biotite

型X射线荧光光谱仪(XRF)分析 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、 TiO_2 等，重铬酸钾滴定法分析 FeO ，高温加热-浓硫酸吸收-重量法分析 H_2O^+ ，非水滴定容量法分析 CO_2 ，高温加热-重量法分析烧失量(LOI)，分析误差小于2%，微量及稀土元素测定采用X-Series p型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)，分析误差小于5%。

3 结果与分析

3.1 锆石U-Pb年龄

查干楚鲁二长花岗岩样品(XT03)的锆石大多数晶形完好，形态多为长柱状自形-半自形晶体，长宽比为1:1~2:1。阴极发光(CL)图像显示，大部分锆石内部结构清晰，发育较好的结晶环带，属岩浆锆石(图3)。本次对样品中的20颗锆石进行了20个点的U-Pb测试，分析结果见表1。从表1可以看出，Th/U值较高，为0.25~0.69(平均0.42>0.4)，

同样表明锆石为岩浆成因(Corfu *et al.*, 2003)。在年龄谐和图上(图4a)，20个测点的数据都集中在谐和线上及附近。从 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄直方图(图4b)中同样可以看出，全部锆石测点年龄都集中在246 Ma，加权平均值为 245.9 ± 1.3 Ma，MSWD = 0.98，属中三叠世，代表了查干楚鲁二长花岗岩的侵位年龄。

3.2 地球化学特征

从表2可以看出，查干楚鲁二长花岗岩样品显示高硅($\text{SiO}_2 = 76.75\% \sim 77.18\%$)、富钾($\text{K}_2\text{O} = 3.95\% \sim 4.32\%$)的特征，在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图(图5)中，样品点均落入高钾钙碱性系列，进一步揭示该岩体钾含量较高。同时，样品具有较高的钠含量($\text{Na}_2\text{O} = 3.94\% \sim 4.55\%$)，整体显示出富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 8.19\% \sim 8.62\%$)，以及低钙($\text{CaO} = 0.40\% \sim 0.55\%$)、镁($\text{MgO} = 0.03\% \sim 0.05\%$)、磷($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.011\% \sim 0.012\%$)和钛($\text{TiO}_2 = 0.014\% \sim 0.024\%$)的特点。样品样品的 Al_2O_3 含量较高($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.86\% \sim 13.45\%$)，

表1 查干楚鲁二长花岗岩(XT03)LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic analysis of zircons from the Chaganchulu monzogranite (XT03)

$w_{\text{B}}/10^{-6}$	同位素比值						$4\text{Fe}/\text{Mn}$														
	Pb	U	Th	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	
1	18	440	168	0.38	0.0393	3	0.0005	0.2809	0.0049	0.0518	0.0007	0.0125	0.0002	0.3829	0.0030	249	3	251	4	276	29
2	18	469	119	0.25	0.0383	3	0.0004	0.2899	0.0053	0.0549	0.0008	0.0134	0.0002	0.2544	0.0016	242	3	258	5	410	32
3	12	307	132	0.43	0.0388	8	0.0004	0.2779	0.0052	0.0520	0.0008	0.0124	0.0002	0.4310	0.0039	245	3	249	5	286	35
4	32	797	393	0.49	0.0386	6	0.0004	0.2760	0.0041	0.0518	0.0006	0.0120	0.0001	0.4930	0.0022	244	2	248	4	277	25
5	26	669	218	0.33	0.0387	7	0.0004	0.2778	0.0047	0.0520	0.0007	0.0122	0.0002	0.3257	0.0026	245	3	249	4	286	31
6	53	1374	474	0.34	0.0387	7	0.0004	0.2869	0.0050	0.0538	0.0008	0.0100	0.0001	0.3449	0.0021	245	2	256	4	363	33
7	19	494	175	0.35	0.0386	6	0.0004	0.2921	0.0047	0.0549	0.0007	0.0110	0.0002	0.3541	0.0030	244	2	260	4	410	29
8	28	710	344	0.48	0.0381	1	0.0004	0.2769	0.0044	0.0528	0.0006	0.0121	0.0001	0.4849	0.0034	241	3	248	4	319	28
9	35	901	232	0.25	0.0392	0.0004	0.2794	0.0046	0.0517	0.0007	0.0118	0.0002	0.2574	0.0016	248	3	250	4	273	30	
10	18	437	167	0.38	0.0398	8	0.0008	0.2870	0.0074	0.0523	0.0009	0.0125	0.0002	0.3814	0.0075	252	5	256	7	299	40
11	8	211	64	0.30	0.0395	5	0.0008	0.2753	0.0081	0.0505	0.0012	0.0121	0.0002	0.3028	0.0043	250	5	247	7	220	54
12	15	367	233	0.63	0.0391	1	0.0006	0.2875	0.0071	0.0533	0.0009	0.0107	0.0002	0.6343	0.0096	247	4	257	6	343	40
13	22	539	183	0.34	0.0400	0	0.0009	0.2767	0.0091	0.0502	0.0013	0.0124	0.0002	0.3397	0.0069	253	5	248	8	204	62
14	30	768	315	0.41	0.0384	4	0.0006	0.2690	0.0054	0.0508	0.0007	0.0114	0.0001	0.4098	0.0042	243	3	242	5	233	34
15	16	377	190	0.50	0.0396	7	0.0007	0.2750	0.0067	0.0503	0.0009	0.0120	0.0002	0.5029	0.0065	250	4	247	6	210	40
16	21	500	346	0.69	0.0394	4	0.0006	0.2744	0.0089	0.0505	0.0016	0.0101	0.0002	0.6914	0.0056	249	4	246	8	220	75
17	36	887	397	0.45	0.0395	5	0.0006	0.2803	0.0055	0.0514	0.0009	0.0113	0.0002	0.4471	0.0032	250	4	251	5	261	41
18	18	446	268	0.60	0.0385	7	0.0007	0.2816	0.0119	0.0531	0.0024	0.0096	0.0004	0.6020	0.0125	243	4	252	11	334	102
19	30	732	348	0.48	0.0394	5	0.0005	0.2778	0.0049	0.0511	0.0007	0.0123	0.0002	0.4757	0.0028	249	3	249	4	245	30
20	33	842	244	0.29	0.0393	3	0.0005	0.2858	0.0050	0.0527	0.0007	0.0135	0.0002	0.2903	0.0032	249	3	255	4	317	30



图3 查干楚鲁二长花岗岩(XT03)锆石阴极发光(CL)图像及年龄图

Fig. 3 CL images and ages of zircons from the Chaganchulu monzogranite (XT03)

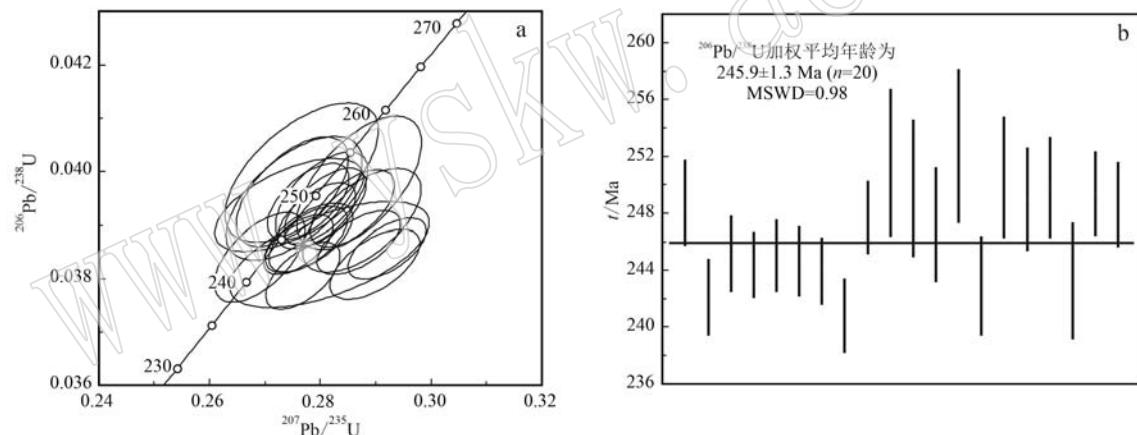


图4 查干楚鲁二长花岗岩(XT03)锆石LA-ICP-MS U-Pb谐和图(a)以及加权年龄平均值(b)

Fig. 4 The LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram (a) and weighed average age (b) of zircons from the Chaganchulu monzogranite (XT03)

在A/NK-A/CNK图(图6)中,样品点均落入过铝质区域内,其A/CNK=1.04~1.10、A/NK=1.11~1.20,显示弱过铝质特征。

查干楚鲁二长花岗岩样品稀土元素总量较低($\sum \text{REE} = 45.57 \times 10^{-6} \sim 80.33 \times 10^{-6}$),轻、重稀土元素分馏不明显[(La/Yb)_N=0.45~2.77],曲线总体均较平坦。样品负Eu异常显著(8Eu=0.03~0.09)(图7a),暗示岩体可能受斜长石分离结晶作用影响或与源区残留斜长石有关(王金芳等,2020)。在微量元素方面,样品均富集Rb、Th、U、K、Ga,亏损Ba、Sr、P、Ti等元素(图7b),表现出A型花岗岩特有的

组分特征(Eby, 1992)。

4 讨论

4.1 岩石成因和源区分析

查干楚鲁二长花岗岩体的主要矿物为碱性长石(正条纹长石和正长石)、斜长石、石英和他形黑云母,发育晶洞构造。另外,地球化学分析结果显示,岩体高硅、富碱,贫钙、镁、磷、钛,负Eu异常显著,微量元素Rb、Th、K、Ta和Hf相对富集,而Ba、Sr、P、Ti元素相对亏损,且都具有较高的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\sum \text{碱金属}$

表 2 查干楚鲁二长花岗岩主量($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major elements ($w_B/\%$), trace and REE elements ($w_B/10^{-6}$) analyses of the Chaganchulu mozogranite

样号	XT01	XT02	XT03	XT04	XT05
SiO ₂	77.03	76.75	77.18	77.12	77.06
TiO ₂	0.014	0.015	0.024	0.021	0.023
Al ₂ O ₃	13.10	13.18	13.09	12.86	13.45
Fe ₂ O ₃	1.30	1.24	1.84	1.58	0.96
FeO	0.43	0.47	0.30	0.37	0.47
MnO	0.090	0.111	0.033	0.059	0.014
MgO	0.050	0.038	0.034	0.047	0.046
CaO	0.44	0.40	0.53	0.53	0.55
Na ₂ O	4.55	4.44	4.00	3.94	4.05
K ₂ O	3.95	4.18	4.32	4.25	4.23
P ₂ O ₅	0.012	0.011	0.011	0.012	0.012
烧失量	0.50	0.39	0.52	0.51	0.56
总计	100.07	99.83	100.17	99.82	100.31
Mg [#]	5.25	4.08	2.99	4.45	5.76
A/CNK	1.04	1.05	1.07	1.07	1.10
A/NK	1.11	1.11	1.16	1.16	1.20
Ba	13.28	11.39	42.45	45.02	45.10
Rb	248.47	292.54	206.56	203.10	207.64
Sr	8.33	3.75	15.78	15.91	16.84
Zr	108.77	135.30	145.33	144.54	120.39
Pb	35.19	33.63	34.48	33.72	34.93
Zn	7.42	6.46	13.81	13.81	11.14
Cu	3.40	1.74	3.26	2.99	1.98
Ni	1.27	0.90	1.23	1.12	1.24
V	3.22	2.01	1.95	2.14	2.16
Cr	1.17	1.53	1.00	1.17	1.62
Hf	5.60	5.37	3.14	3.14	3.44
Sc	4.35	4.93	2.28	2.35	1.92
Ta	3.12	3.27	1.37	1.33	1.49
Nb	14.74	12.72	7.50	7.11	7.60
U	5.97	4.43	2.99	2.98	2.70
Th	22.45	19.55	14.20	14.71	16.31
Ga	24.22	24.58	18.87	18.95	19.70
Y	79.12	82.52	28.58	40.62	23.90
Rb/Sr	29.83	78.01	12.90	12.77	12.33
K/Rb	131.94	118.56	173.73	173.67	168.99
1 000 Ga/Al	3.49	3.52	2.72	2.78	2.76
La	5.20	5.14	4.94	4.93	6.55
Ce	13.98	13.75	12.40	12.32	16.59
Pr	2.37	2.43	1.78	1.77	2.36
Nd	11.09	11.71	7.53	7.79	10.09
Sm	5.32	5.53	2.84	3.13	3.52
Eu	0.060	0.056	0.091	0.074	0.063
Gd	7.62	7.41	3.71	4.37	4.02
Tb	1.70	1.70	0.73	0.93	0.71
Dy	11.36	11.96	4.56	6.15	4.04
Ho	2.44	2.59	0.90	1.32	0.74
Er	6.96	7.46	2.62	3.73	1.89
Tm	1.09	1.19	0.40	0.61	0.27
Yb	7.70	8.21	2.67	4.26	1.70
Lu	1.09	1.19	0.38	0.62	0.23
Σ REE	77.99	80.33	45.57	52.01	52.75
δ Eu	0.03	0.03	0.09	0.06	0.05
(La/Yb) _N	0.48	0.45	1.33	0.83	2.77

注: Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺) ; δEu = Eu_N / (Sm_N × Gd_N)_{1/2} ; N 为球粒陨石标准化值(据 Sun and McDonough, 1989)。

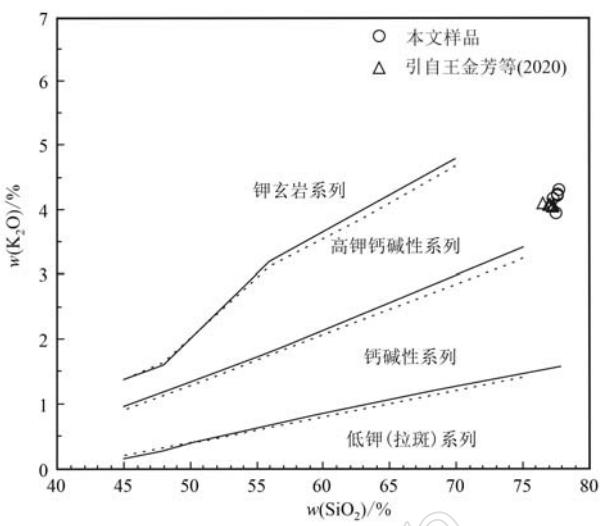


图 5 查干楚鲁二长花岗岩 K_2O - SiO_2 分类图解
(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 5 K_2O - SiO_2 classification diagram of the Chaganchulu mozogranite (after Peccerillo and Taylor, 1976)

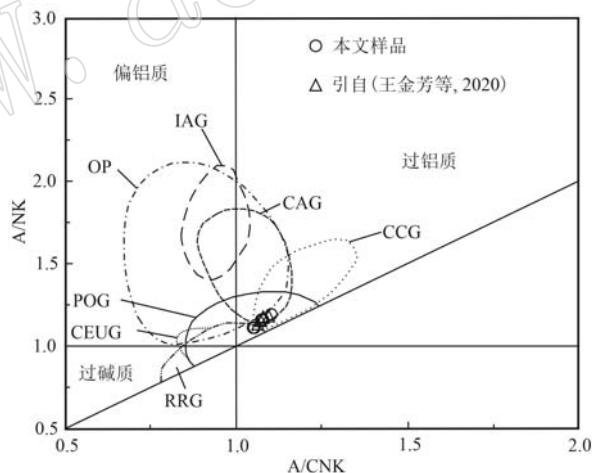


图 6 查干楚鲁二长花岗岩 A/NK-A/CNK 图解
(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 A/NK-A/CNK diagram of the Chaganchulu mozogranite (after Maniar and Piccoli, 1989)

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类; OP—大洋斜长花岗岩类

IAG—island arc granitoids; CAG—continental arc granitoids; CCG—continental collision granitoids; POG—post-orogenic granitoids; RRG—rift-related granitoids; CEUG—continental epeirogenic uplift granitoids; OP—oceanic plagiogranites

CaO (15.08 ~ 21.39) 和 $^{T}FeO/MgO$ (29.16 ~ 57.82) 值。与此同时, 岩体微量元素 Ga (18.87×10^{-6} ~ 24.58×10^{-6}) 含量较高, 其 10 000 Ga/Al 值为 2.72 ~

3.52, 均大于 A 型花岗岩的下限值 2.6。以上结果显示, 岩石样品的岩石类型、矿物成分、岩石组构和地球化学特征都具有 A 型花岗岩的特点。在花岗岩类判别图(图 8)中, 样品点均落入 A 型花岗岩区, 而在 A/NK-A/CNK 图(图 6)中, 样品点均落入过铝质区域内, 且 $A/CNK = 1.04 \sim 1.10$ 、 $A/NK = 1.11 \sim 1.20$, 表明岩体应属弱过铝质 A 型花岗岩, 与中亚造山带东段 A 型花岗岩的岩石学和地球化学特征一致(Liu et al., 2005; 石玉若等, 2007, 2014; 周振华等, 2010; 张旗等, 2012; 王金芳等, 2020)。

随着 A 型花岗岩成因研究的不断深入, 越来越多的地质工作者认为, 低压高温下新增生中基性地壳部分熔融可能为其成因(张维等, 2010; 李红英等, 2015; 王金芳等, 2020)。Nd 同位素的性质与特征能较好地反映岩体源区特点, 一直是岩石学家研究岩浆源区的重要途径。在中亚造山带东段, 中生代铝质 A 型花岗岩普遍具有正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的 Nd 年龄, 暗示其源区可能为新增生中基性地壳。同时, 大量实验研究表明, 源岩为泥质岩石的熔融, 不论水是否饱和, 其形成的花岗质岩浆铝总是过饱和的, 其 $A/CNK > 1.1$ (Rapp and Watson, 1995)。硬砂岩熔融产生的岩浆也均形成铝饱和-过饱和的花岗闪长岩-花岗岩(Skjerlie, 1992; Stevens et al., 1997)。然而, 查干楚鲁二长花岗岩体的 A/CNK 值均 < 1.1 (图 6, 表 2), 所以不可能是由泥质岩或硬砂岩部分熔融而成。同样, 绿岩和角闪岩在水饱和条件下熔融形成的岩浆也是过铝质的(Beard and Lofgren, 1991)。但是角闪岩在水不饱和条件下, 随着水压降低, 脱水熔融形成岩浆的 A/CNK 值逐渐从大于 1 变为小于 1, 同时 Al 含量随着熔融压力增加而增加, 因为斜长石的 An 组分在高压下变得不稳定(基性斜长石比酸性斜长石 Al 高)。因此, 查干楚鲁二长花岗岩体的源岩为角闪石质岩石的可能性较大, 即相当于基性岩石, 其可能是在水压不高条件下通过角闪石脱水作用导致的熔融形成的。另外, 实验研究还表明, 在压力 $\geq 15 \times 10^5$ kPa 时, 其形成岩浆 Na_2O 的含量为 4.5% ~ 6.5% (Rapp and Watson, 1995), 因此富钠的花岗质岩浆通常被解释为镁铁质岩石源区在高压下脱水熔融形成的。

由表 2 可知, 大部分样品(除样品 XT01) Na_2O 含量 $< 4.5\%$, 表明贫 Na 的查干楚鲁二长花岗岩体其形成压力 $< 15 \times 10^5$ kPa(相当于 50 km)。另外, 样品中较高的 Y 和 Yb 含量、较平坦的稀土元素配分曲

线以及 Eu 的强烈亏损特征说明源区斜长石稳定存在而无石榴子石残留, 这一点也揭示其压力不高(没有达到高压榴辉岩相)。

4.2 岩浆起源及温压条件

通常认为 A 型花岗岩是在高温低压环境下形成的, 一般为浅部中上地壳(Clemens et al., 1986), 因而对查干楚鲁二长花岗岩体形成温压条件的计算, 可以从侧面佐证其为 A 型花岗岩。同时利用岩浆形成的温压条件, 可推测其源区深度, 进而为岩浆起源和演化机制提供制约。

4.2.1 Q-Ab-Or-H₂O 平衡压力计算

前人根据大量岩石学实验数据, 总结出 Q-Ab-Or-H₂O 平衡相图, 利用此相图可以求算出岩浆形成时的温度和压力(谌宏伟等, 2005)。

Q、Ab、Or 这 3 个端员数据为 CIPW 标准矿物含量, 从岩石 Q-Ab-Or-H₂O 平衡相图(图 9)中可以看出, 岩石样品形成压力约为 0.2 GPa, 相当于 7~8 km 的深度, 属浅部地壳。而形成温度约为 700℃, 略低于 A 型花岗岩平均水平(800~900℃), 分析可能是由于流体和氟的解聚作用, 使岩石近固相线温度降低, 而 Q-Ab-Or-H₂O 平衡相图温度值为共结温度, 所以可能受到上述因素影响(刘昌实等, 2003)。

4.2.2 锆石饱和温度计

由于花岗岩大多是绝热式上升就位的, 那么岩浆早期结晶温度就可以近似代表岩浆形成时的温度(吴福元等, 2007), 因为锆石在酸性岩浆中一般较早晶出, 所以锆石饱和温度就可以近似认为是岩浆形成的温度。本文采用 Watson(1979)得出的锆石溶解度-饱和温度模拟公式: $t_{\text{Zr}}(\text{℃}) = 12900 / [2.95 + 0.85 M + \ln D_{\text{zr}}(\text{锆石}/\text{熔体})] - 273$, 其中 D 为分配系数。设全岩 $\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Na} + \text{K} + \text{P} = 1$ (原子分数), 则全岩岩石化学参数 $M = (2 \text{ Ca} + \text{Na} + \text{K}) / (\text{Si} \times \text{Al})$ 。在没有进行全岩锆石矿物 Zr、Hf 校正时, 纯锆石中 $\text{Zr} = 497.626 \times 10^{-6}$, 同时用全岩的 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。据此计算出的样品形成温度基本集中在 758~783℃ 之间, 较为接近 A 型花岗岩形成的平均温度。

在岩相学方面, 样品局部见条纹长石(图 2c、2d)、晶洞构造, 未见 S 型花岗岩中常见的继承性锆石, 同样揭示了早期岩浆结晶处于低压高温和贫水环境。

对于浅部低压环境下壳源物质部分熔融所需的热量, 普遍认为与后造山阶段的先前俯冲板块板片

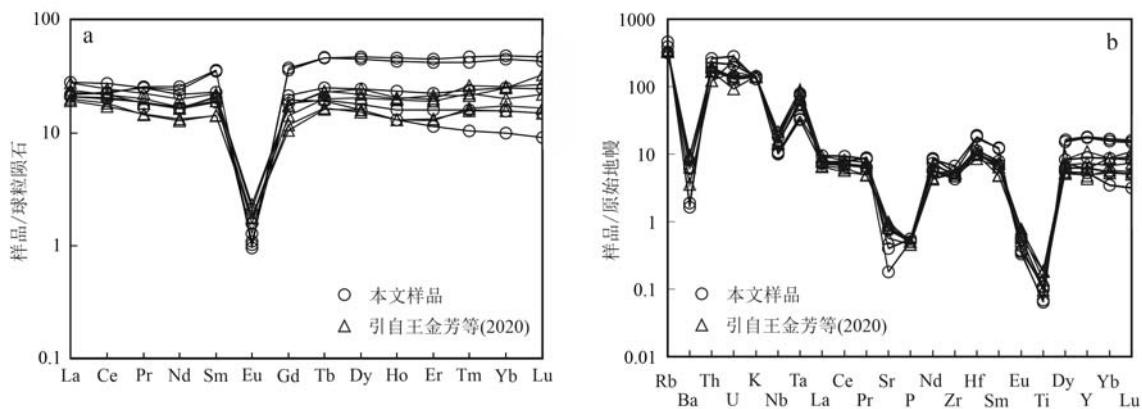


图 7 查干楚鲁二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔标准数据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the Chaganchulu mozogranite (chondritic and primitive mantle normalization values from Sun and McDonough, 1989)

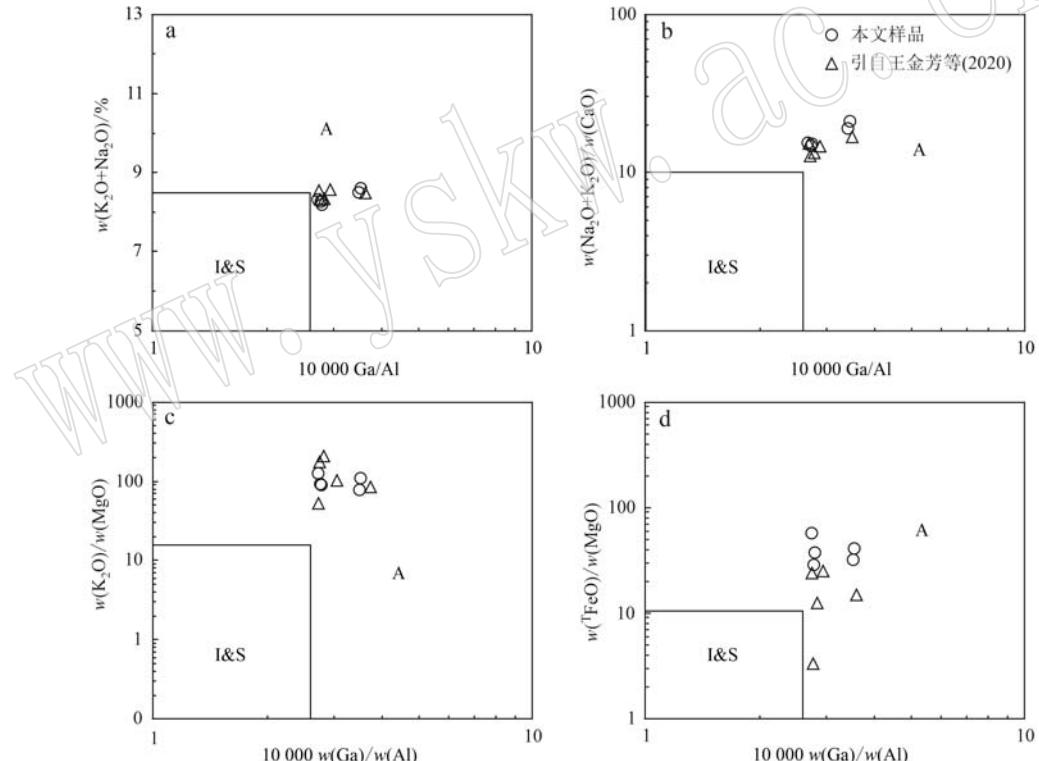


图 8 查干楚鲁 A 型花岗岩岩石类型判别图(据 Whalen et al., 1987)
Fig. 8 Rock type discrimination diagrams of the Chaganchulu A-type granite (after Whalen et al., 1987)

断离而引发的幔源玄武质岩浆底侵作用有关 (Whalen et al., 1987; Jahn et al., 2000; Bonin, 2007; 张旗等, 2012; Huang et al., 2012, 2014)。在内蒙古中东部地区, 中生代铝质 A 型花岗岩普遍具有正 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄(王金芳等, 2017), 暗示与后造山阶段板片断离有关的幔源岩

浆底侵作用对内蒙古中东部中生代铝质 A 型花岗岩浆的形成具有重要作用。综上所述, 索伦-林西缝合带后造山板片断离作用诱发软流圈地幔物质上涌, 产生幔源玄武质岩浆底侵作用, 以及伸展拉张减压作用造成新增生中基性地壳低压高温部分熔融, 可能为查干楚鲁 A 型花岗岩的成因机制。

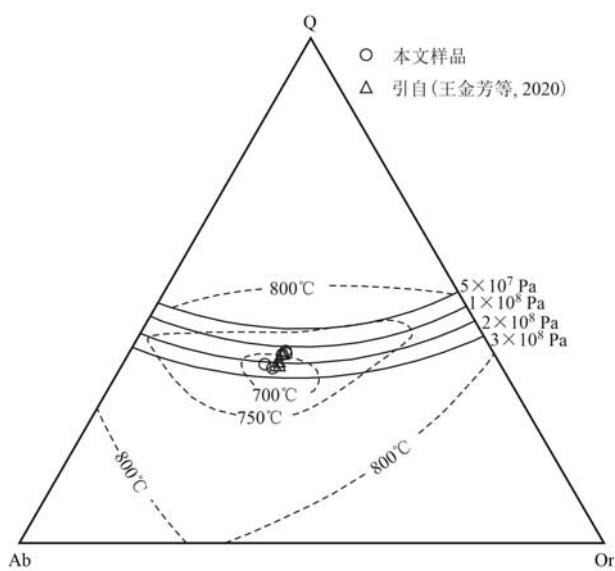


图9 查干楚鲁A型花岗岩Q-Ab-Or-H₂O平衡相图
(据谌宏伟等, 2005)

Fig. 9 Triangle diagram of Q-Ab-Or-H₂O of the Chaganchulu A-type granite (after Chen Hongwei *et al.*, 2005)

4.3 对内蒙古中东部地区三叠纪构造环境的约束

近年来, 内蒙古中东部地区相关的地质工作成果丰硕, 为古亚洲洋东段洋盆洋陆转换和闭合过程提供了大量的岩石学和年代学证据(Sengor *et al.*, 1993; 王惠等, 2005; 李锦轶等, 2007; 李英杰等, 2013, 2015, 2018c; Cheng *et al.*, 2014a, 2020; 刘建峰等, 2014; 程银行等, 2014b; 薛富红等, 2015; Liu *et al.*, 2021; 董培培等, 2021)。Xu等(2019)在索伦-林西缝合带内的苏尼特右旗发现早二叠世哈冷岭蛇绿岩(297 Ma); 王金芳等(2018a, 2018b, 2020)在西乌旗一带先后获得早二叠世巴嘎哈尔高镁闪长岩(282 Ma)、乌兰沟埃达克岩(279.3 Ma)以及中三叠世阿尔塔拉A型二长花岗岩(242.9 Ma)年龄; 笔者在苏尼特右旗地区新发现中三叠世查干楚鲁A型二长花岗岩(245.9 Ma)。

综上所述, 在中晚二叠世之前, 古亚洲洋东段洋盆并未闭合, 可能正处在洋内多期次俯冲消减过程中。本次获得的苏尼特右旗查干楚鲁A型二长花岗岩分布于古亚洲洋东段索伦-林西缝合带典型发育区, 其直接侵位于苏尼特右旗早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(297 Ma)带中, 这种岩体称为“钉合岩体”, 代表了碰撞后的产物(韩宝福等, 2010)。因此新获得的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄245.9±1.3 Ma约束了古亚洲洋闭合时间在中三叠世之前。结合国际洋内初始俯冲作用岩石组合研究

成果以及区域同时期蛇绿岩、洋内弧岩石组合和A型花岗岩资料, 可初步建立起早二叠世-中三叠世古亚洲洋东段洋内俯冲-闭合的岩石组合序列: 早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿岩(蛇纹石化方辉橄榄岩、层状辉长岩)(297 Ma)(Xu *et al.*, 2019)、前弧拉斑枕状玄武岩、玻安岩、早二叠世高镁安山岩(282 Ma)(王金芳等, 2018a)、埃达克岩(279.3 Ma)(王金芳等, 2018b)、中晚二叠世岛弧岩浆岩(278.2 Ma、254.4 Ma)(李英雷等, 2021; 范玉须等, 2019)、早中三叠世A型花岗岩(245 Ma、242.9 Ma)(张晓晖等, 2006; 王金芳等, 2020), 表明二叠纪末期古亚洲洋东段洋盆已经闭合, 并在三叠纪进入造山带后造山伸展拉张阶段。

5 结论

(1) 查干楚鲁二长花岗岩侵位于苏尼特右旗早二叠世哈冷岭SSZ型蛇绿构造混杂岩(带)中, LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为245.9±1.3 Ma, 揭示其侵位时代为中三叠世。

(2) 查干楚鲁二长花岗岩含较多碱性长石, 暗色矿物以黑云母为主, 见晶洞构造; 地球化学特征具高硅、富碱, 贫钙、镁, $A/CNK=1.04\sim1.10$ 、 $A/NK=1.11\sim1.20$, 负Eu异常显著, Rb、Th、U、K、Ga元素较富集, 而Ba、Sr、P、Ti元素相对亏损的特征, 且 $10\,000\text{ Ga/Al}$ 、 $^{T}\text{FeO/MgO}$ 、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 值较高, 岩石学、矿物学和地球化学特征显示其属弱过铝质A型花岗岩。

(3) 查干楚鲁二长花岗岩为索伦-林西缝合带闭合后伸展拉张作用下的产物, 为古亚洲洋东段洋盆在二叠纪末闭合并在三叠纪进入后造山伸展拉张阶段提供了岩石学依据, 低压高温下新增生中基性地壳部分熔融可能为其成因, 约束了古亚洲洋东段闭合时间在中三叠世之前。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见, 感谢中国地质大学(北京)王根厚教授、河北地质大学李红阳教授在野外及写作过程中给予的指导!

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192(1~2): 59~79.

- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphiboles at 1, 3 and 6. 9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 465~501.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1~2): 1~29.
- Chen Hongwei, Luo Zhaohua and Mo Xuanxue. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 32(3): 386~395 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Duan Lianfeng, Wang Shaoyi, et al. 2020. Termination of the Hegenshan Orogen in the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt, North China: Geochemical and zircon U-Pb geochronological constraints from Early Permian mafic dykes[J]. *Geological Journal*, 55(5): 845~861.
- Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Li Min, et al. 2014b. Geochronology and petrogenesis of the alkaline pluton in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2 086~2 096 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, et al. 2014a. Early Permian East6-Ujimqin mafic-ultramafic and granitic rocks from the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt, North China: Origin, chronology, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96(15): 361~373.
- Chen Bin, Zhao Guochun and Wilde S. 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuocqi Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications[J]. *Geological Review*, 47(4): 361~367 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D, Holloway J R and White J A R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 71(3): 317~324.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469~500.
- Dong Peipei, Li Yingjie, Wang Genhou, et al. 2021. Geological and chronological characteristics of the Baiyin'gaolao Formation in Gaoyaowula, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 135~152 (in Chinese with English abstract).
- Dong Peipei, Li Yingjie, Wang Jinfang, et al. 2020. The Early Permian adakite in the Meilaotewula ophiolite, Inner Mongolia and intra-oceanic subduction in the eastern Palaeo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(9): 1 474~1 487 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641.
- Fan Yuxu, Li Tinglong, Xiao Qinghui, et al. 2019. Zircon U-Pb ages geochemical characteristics of Late Permian granite in West Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and tectonic significance[J]. *Geological Review*, 65(1): 248~266 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 233~2 246 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Zhang Zhaochong, Santosh M, et al. 2014. Geochronology, geochemistry and metallogenetic implications of the Boziquo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 157~174.
- Huang He, Zhang Zhaochong, Timothy K, et al. 2012. Continental vertical growth in the transitional zone between South Tianshan and Tarim, western Xinjiang, NW China: Insight from the Permian Halajun A1-type granitic magmatism[J]. *Lithos*, 155: 49~66.
- Jahn B M, Griffin W L and Windley B F. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 1~227.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, et al. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker Suture Zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 118(1): 169~190.
- Li Hongying, Zhou Zhiguang, Zhang Da, et al. 2015. Geochronology, geochemistry and geological significance of Late Triassic rhyolites in Geerchulu, Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 546~555 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, et al. 2012. Recognition of Diyanmia ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 282~1 290 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, et al. 2013. Geochemical characteristics of Baiyinbulage ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2 719~2 730 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, et al. 2015. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1 461~1 470 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, et al. 2018a. Supra-subduction zone ophiolites from Inner Mongolia, North China: Implications for

- the tectonic history of the southeastern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 59: 126~143.
- Li Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, et al. 2020a. Subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: Evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in Central Inner Mongolia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116087.
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Wang Genhou, et al. 2018b. Discovery of the plagiogranites in the Diyanmiao ophiolite, southeastern Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China and its tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 568~585.
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Wang Genhou, et al. 2018c. Discovery and significance of the Dahate fore-arc basalts from the Diyanmiao ophiolite in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 469~482(in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Xin Houtian, et al. 2020b. Subduction initiation in the southeastern Palaeo-Asian Ocean: Constraints from early Permian adakites in suprasubduction zone ophiolites, central Inner Mongolia, North China[J]. *Geological Journal*, 55(3): 2 044~2 061.
- Li Yinglei, Wu Guang, He Hongyun, et al. 2021. The discovery and tectonic implications of Middle Permian ophiolite melange and coeval granitic complex in the Shabaetu area, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 217~235(in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, et al. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573~591(in Chinese with English abstract).
- Liu Haidong, Cheng Yinhang, Santosh M, et al. 2021. Magmatism associated with lithospheric thinning, mantle upwelling, and extensional tectonics: Evidence from Carboniferous-Permian dyke swarms and granitoids from Inner Mongolia, Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 386~387.
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Chi Xiaoguo, et al. 2014. Petrological and geochemical characteristics of the Early Triassic granite belt in southeastern Inner Mongolia and its tectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1 677~1 690(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Sun Lixin, et al. 2016. Zircon U-Pb dating of the Jujingzi ophiolite in Bairin Left Banner, Inner Mongolia: Constraints on the formation and evolution of the Xar Moron River Suture Zone [J]. *Geology in China*, 43(6): 1 947 ~ 1 962 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Siebel W, Li Xinjun, et al. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating[J]. *Chemical Geology*, 219(1~4): 5~35.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, 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): 34~43.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(4): 404~415.
- Pecceirillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- 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.
- Sengor A M C, Natalin B A and Burtman U A. 1993. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Shao Ji'an. 1991. Crustal Evolution in the Middle Section of the Northern Margin of the Sino Korean Plate [M]. Beijing: Peking University Press, 1~136(in Chinese with English abstract).
- Shi Yuruo, Liu Cui, Deng Jinfu, et al. 2014. Geochronological frame of granitoids from Central Inner Mongolia and its tectonomagmatic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3 155~3 171 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, et al. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuqi, Central Inner Mongolia, China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183~189(in Chinese with English abstract).
- Skjerlie K P. 1992. Petrogenesis and significance of Late Caledonian granitoid magmatism in western Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(4): 473~487.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Stevens G, Clemens J D and Droop G T R. 1997. Melt production during granulite-facies anatexis: Experimental data from primitive[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(4): 352~370.
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, et al. 2004. The final closing time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone—Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2: 174~181(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of

- oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Sauders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. London: Geological Society of London, Special Publication, 42: 313~345.
- Tang Kedong and Zhang Yunping. 1991. Tectonic evolution of suture zone in Inner Mongolia [A]. Xiao Xuchang and Tang Yaoqing. *Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo Central Asia Composite Giant Suture Zone* [C]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 30~54 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Wang Yujing, Chen Zhiyong, et al. 2005. Discovery of the Permian radiolarians from the Bayanaobao area Inner Mongolia [J]. *Journal of Stratigraphy*, 29(4): 368~372 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, et al. 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Nuhete Early Cretaceous A-type granite in Xi Ujimqin Banner of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(8): 1 343~1 358 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, et al. 2018a. The discovery of the Early Permian high-Mg diorite in Meilaotewula SSZ ophiolite of Inner Mongolia and its intra-oceanic subduction [J]. *Geology in China*, 45(4): 706~719 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, et al. 2018b. Zircon U-Pb dating and tectonic setting of the Wulan'gou adakite in Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 37(10): 1 933~1 943 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, et al. 2020. Zircon U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Artala Middle Triassic A-type granite in Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 39(1): 51~61 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuai, Li Yingjie, Wang Jinfang, et al. 2021. Discovery of Late Carboniferous adakite in Manita, Inner Mongolia and its constraints on intra-oceanic subduction in eastern Paleo-Asian Ocean [J]. *Geological Bulletin of China*, 40(1): 82~94 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B. 1979. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental results and applications to trace element geochemistry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(4): 407~419.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granite: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, et al. 2016. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction [J]. *Geology in China*, 43(3): 721~737 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, et al. 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1 841~1 857 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guo, Liu Huichuan, Li Yinglei, et al. 2019. Early Permian Sunidyouqi suprasubduction-zone ophiolites in the central Solonker Suture Zone (Inner Mongolia, China) [J]. *Geoscience Frontiers*, 10(3): 1 101~1 111.
- Xue Fuhong, Zhang Xiaohui, Deng Jiangxia, et al. 2015. Late Jurassic A-type granite from the Dalai region of Central Inner Mongolia: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 774~1 788 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, et al. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 247(1~2): 100~118.
- Zhang Qi, Ran Hao and Li Chengdong. 2012. A-type granite: What is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621~626 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Jian Ping, Liu Dunyi, et al. 2010. Geochemistry, geochronology and Hf isotopic compositions of Triassic granodiorite-diorite and shoshonite from the Damaoqi area, Central Inner Mongolia, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 821~832 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, et al. 2006. Early Triassic A-type felsic volcanism in the Xilinhaote-Xiwuqi, Central Inner Mongolia: Age, geochemistry and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2 769~2 780 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Lü Linsu, Yang Yongjun, et al. 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granite in the Huanggang Sn-Fe deposit, Inner Mongolia: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 521~3 537 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈斌, 赵国春, Wilde S. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义 [J]. 地质论评, 47(4): 361~367.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制 [J]. 中国地质, 32(3): 386~395.

- 程银行, 李艳峰, 李敏, 等. 2014b. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时
代、成因及地质意义[J]. 地质学报, 88(11): 2 086~2 096.
- 董培培, 李英杰, 王根厚, 等. 2021. 内蒙古高尧乌拉白音高老组地
质及年代学特征[J]. 地质力学学报, 27(1): 135~152.
- 董培培, 李英杰, 王金芳, 等. 2020. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中早
二叠世埃达克岩与古亚洲洋东段洋内俯冲[J]. 地质通报, 39
(9): 1 474~1 487.
- 范玉须, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 2019. 内蒙古西乌珠穆沁旗晚二叠世
花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地
质论评, 65(1): 248~266.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带
的形成时限[J]. 岩石学报, 26(8): 2 233~2 246.
- 李红英, 周志广, 张达, 等. 2015. 内蒙古西乌旗格尔楚鲁晚三叠
世流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地
球化学通报, 34(3): 546~555.
- 李锦铁, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同
碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限
的约束[J]. 岩石学报, 23(3): 565~582.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2012. 内蒙古西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇
绿岩的识别[J]. 岩石学报, 28(4): 1 282~1 290.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2013. 内蒙西乌旗白音布拉格蛇绿岩
地球化学特征[J]. 岩石学报, 29(8): 2 719~2 730.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2015. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿
岩的识别[J]. 岩石学报, 31(5): 1 461~1 470.
- 李英杰, 王金芳, 王根厚, 等. 2018c. 内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特
前弧玄武岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(2): 469~
482.
- 李英雷, 武广, 贺宏云, 等. 2021. 内蒙古沙巴尔吐地区中二叠世
蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩的发现及地质意义[J]. 岩
石矿物学杂志, 40(2): 217~235.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003. A型岩套的分类、判别标志和成
因[J]. 高校地质学报, 9(4): 573~591.
- 刘建峰, 李锦铁, 迟效国, 等. 2014. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩
带岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 88(9):
1 677~1 690.
- 刘建峰, 李锦铁, 孙立新, 等. 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩
锆石 U-Pb 定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束[J]. 中
国地质, 43(6): 1 947~1 962.
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化[M]. 北京: 北京大学出
版社, 1~136.
- 石玉若, 刘翠, 邓晋福, 等. 2014. 内蒙古中部花岗质岩类年代学
格架及该区构造岩浆演化探讨[J]. 岩石学报, 30(11): 3 155~
3 171.
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三
叠纪 A型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义
[J]. 地质通报, 26(2): 183~189.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品制备、年龄
测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(S1): 26~30.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝
合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J].
吉林大学学报(地球科学版), 2: 174~181.
- 唐克东, 张允平. 1991. 内蒙古缝合带的构造演化[A]. 肖序常, 汤
耀庆. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[C]. 北京: 北京科
学技术出版社, 30~54.
- 王惠, 王玉净, 陈志勇, 等. 2005. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫
化石的发现[J]. 地层学杂志, 29(4): 368~372.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2017. 内蒙古西乌旗努和特早白垩世
A型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质
通报, 36(8): 1 346~1 358.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018a. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中早
二叠世高镁闪长岩的发现及洋内俯冲作用[J]. 中国地质, 45
(4): 706~719.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018b. 内蒙古乌兰沟埃达克岩锆石
U-Pb 年龄及构造环境[J]. 地质通报, 37(10): 1 933~1 943.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2020. 内蒙古阿尔塔拉中三叠世 A型
花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质通
报, 39(1): 51~61.
- 王帅, 李英杰, 王金芳, 等. 2021. 内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔
埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J]. 地
质通报, 40(1): 82~94.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题
[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋
内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 43(3): 721~737.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元
划分初探[J]. 岩石学报, 30(7): 1 841~1 857.
- 薛富红, 张晓晖, 邓江夏, 等. 2015. 内蒙古中部达来地区晚侏罗世
A型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. 岩石学
报, 31(6): 1 774~1 788.
- 张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩
石矿物学杂志, 31(4): 621~626.
- 张维, 简平, 刘敦一, 等. 2010. 内蒙古中部达茂旗地区三叠纪
花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征[J]. 地质
通报, 29(7): 821~832.
- 张晓晖, 张宏福, 汤艳杰, 等. 2006. 内蒙古中部锡林浩特-西乌旗
早三叠世 A型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J].
岩石学报, 22(11): 2 769~2 780.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世
A型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J].
岩石学报, 26(12): 3 521~3 537.