

内蒙古苏尼特左旗东苏 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

俞初安, 胡 鹏, 曾 威, 李志丹, 刘晓雪, 张 超, 郭 虎

(天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘 要: 位于苏尼特左旗东部的东苏二长花岗岩是索伦缝合带重要组成部分, 具有高硅($\text{SiO}_2 = 69.76\% \sim 75.58\%$)、高碱且相对富钾($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.99\% \sim 9.16\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.70 \sim 1.69$)、相对富铝(铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 1.04 \sim 1.13$)、高 TFeO/MgO 值($3.43 \sim 11.26$)、贫镁($\text{MgO} = 0.08\% \sim 0.50\%$)的特征; 微量元素地球化学性质表现出相对富集轻稀土, Ba、Sr、Nb、Eu 强烈负异常, Rb、Th、Ta 等不相容元素富集的特征。主量和微量元素均表现出铝质 A 型花岗岩的特征。采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值的加权平均年龄为 221.5 ± 0.81 Ma (MSWD 值为 0.57), 表明该岩体为晚三叠世岩浆活动的产物。结合区域地质资料及地球化学信息可以判断该东苏花岗岩为后造山伸展阶段长英质地壳物质(变杂砂岩)部分熔融的产物。它的出现, 标志着古亚洲洋演化的结束, 索伦缝合带在晚三叠世的碰撞已达末期。

关键词: A 型花岗岩; 后造山伸展; 晚三叠世; 索伦缝合带; 东苏岩体

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0229-13

Geochronology, geochemistry and geological significance of Dongsu A-type granites in Sonid Left Banner, Inner Mongolia

YU Reng-an, HU Peng, ZENG Wei, LI Zhi-dan, LIU Xiao-xue, ZHANG Chao and GUO Hu

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Dongsu granites from the Solonker suture zone are characterized by relatively high silicon ($\text{SiO}_2 = 69.76\% \sim 75.58\%$), high alkali and potassium ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.99\% \sim 9.16\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.70 \sim 1.69$), high TFeO/MgO ($3.43 \sim 11.26$), and low MgO ($0.08\% \sim 0.50\%$). Geochemical analyses show that the granites have relatively high LREE, obvious negative anomalies of Ba, Sr, Nb, Eu, and concentration of incompatible elements (Rb, Th, Ta). Major and trace elements indicate that the Dongsu pluton is of aluminous A-type granite. By LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 221.5 ± 0.81 Ma (MSWD=0.57) is considered to be the formation age of the Dongsu granites which are the products of Late Triassic magmatic activities. Combined with geochemical information and regional geological data, it is concluded that the Dongsu granites were formed by partial melting of crust materials (meta-greywacke) at the stage of post-orogenic extension. Its intrusion marked the end of the evolution of the Paleo-Asian Ocean and the terminal of the collision of the Solonker suture zone in the Late Triassic.

Key words: A-type granite; post-orogenic extension; Late Triassic; Solonker suture zone; Dongsu pluton

Fund support: China Geological Survey Project(1212011120720)

收稿日期: 2015-02-26; 接受日期: 2016-01-25

基金项目: 中国地质大调查资助项目(1212011120720)

作者简介: 俞初安(1981-), 男, 工程师, 地质学专业, 从事矿产地质调查与研究工作, E-mail: 121181748@qq.com; 通讯作者: 胡鹏(1989-), 男, 助理工程师, 地质学专业, 从事矿产地质调查与研究工作, E-mail: 824901364@qq.com。

A 型花岗岩作为深源岩石之一,其成因机制还存在较大争议,但它们均形成于拉张或非挤压的构造环境这点已成共识(Whalen *et al.*, 1987; Sylvester, 1989; Rogers and Greenberg, 1990; Eby, 1990, 1992; 王强等, 2000; 吴锁平等, 2007; 贾小辉等, 2009)。拉张地壳的减薄在时空上往往与深部热活动有密切关系。A 型花岗岩的形成多归因于热的软流圈地幔向上运动,为 A 型花岗岩的形成提供了必须的热和物源,且会引起大范围的地壳物质熔融。因此 A 型花岗岩一定程度上可以指示岩石圈减薄、软流圈地幔上涌的时间过程及其动力学机制(薛怀民等, 2009; 张旗, 2013)。

兴蒙造山带是中亚造山带在中国境内的部分,其形成与古亚洲洋的演化关系密切,索伦-苏尼特左旗-林西一带(简称索伦缝合带)为中亚造山带东段最终缝合带(Tang, 1990; Xiao *et al.*, 2003; 李益龙等, 2012),对研究古亚洲洋的演化和兴蒙造山带的形成意义重大。东苏岩体位于苏尼特左旗东侧,即兴蒙造山带核心部位,二连-贺根山缝合线南侧,是索伦缝合带的一部分。在海西期到印支期,该地区经历了古亚洲洋板块与西伯利亚板块的俯冲碰撞(童英等, 2010),而对于古亚洲洋闭合的时限存在不同认识,包括:晚志留世-泥盆纪(Sengör and Natal'in, 1996)、中晚泥盆世(Tang, 1990; 徐备等, 1997)、晚泥盆世-早石炭世(洪大卫等, 1994)、二叠纪(Windley *et al.*, 2007)、晚二叠世(Ruzhentsev, 2001)、二叠纪-三叠纪(李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2009),有待进一步证据加以限定探讨。本文对东苏花岗岩的分析表明其具有典型的 A 型花岗岩特征,应用 LA-ICP-MS 技术测定了东苏花岗岩的锆石 U-Pb 年龄,结合主量、微量元素地球化学探讨其成因及构造背景,并结合区域地质成果约束古亚洲洋的闭合时间。

1 区域地质概况及岩石学特征

东苏岩体位于内蒙古锡林郭勒盟西部阿巴嘎旗-苏尼特左旗一带,苏尼特左旗东侧,出露面积约 230 km²,构造上位于索伦-贺根山构造带内。带内的花岗岩主要有 3 类:与岛弧相关的石英闪长岩、角闪闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩;与碰撞有关的二长花岗岩、黑云母花岗岩等以及与伸展相关的二长花岗岩等,东苏花岗岩与周围的加里东期石英闪长岩、

二叠系地层呈侵入接触关系(陈斌等, 2001; 石玉若等, 2007; 童英等, 2010)。该带南部和北部分别发育二道井、温都尔庙俯冲增生杂岩带和贺根山蛇绿岩混杂岩带(图 1)。研究区经历了微陆块形成、古亚洲洋陆缘增生、滨太平洋大陆边缘活动等 3 个阶段,以古亚洲洋陆缘增生为演化主体阶段,其基本演化格局受南部中朝古陆与北部西伯利亚古陆之间古亚洲洋的成生、演化和消亡过程所控制(Khain *et al.*, 2002)。

研究区出露地层主要由上二叠统下部包尔敖包组-海陆交互相类复理石建造和上部岩组-海陆交互相磨拉石-中酸性火山岩建造共同组成。前者主要包括细砂岩、粉砂岩、含砾砂岩夹碳质板岩、灰岩等;后者英安岩,安山质砾岩、流纹岩,含砾粗砂岩等组成,以安山岩和英安岩为主。受强烈构造变形影响,区内岩石普遍具有较强的动力变质及轻度的区域变质,即花岗岩碎裂化、砂岩片理化、火山岩角砾化等。

本文报道的东苏花岗岩岩性较为均一,主要为黑云母二长花岗岩,岩石主要矿物组成为碱性长石(25%~30%)、斜长石(35%~40%)、石英(25%~35%)和黑云母(5%~10%),副矿物有锆石、磷灰石、不透明矿物等,其中碱性长石主要为条纹长石和微斜长石,多为半自形-他形,发育卡斯巴双晶和格子双晶(图 2b);斜长石多为自形-半自形的板状,具有明显的聚片双晶和卡钠复合双晶,具有绢云母化和钾化现象(图 2a);石英以他形为主,少量半自形;黑云母为深褐色-棕红色,为铁质黑云母(罗照华等, 2002)部分绿泥石化呈浅绿色,具有典型的鱼子状消光,多色性明显,多充填于长石石英的空隙间。

2 测试方法

锆石靶清洗、喷碳,进行阴极发光(CL)照相和透射光反射光照相,初步选点,然后进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组成分析。阴极发光照相在天津地质研究所实验测试室扫描电镜(ss550)加载阴极发光仪(monocl4)上完成。锆石 U-Pb 同位素组成分析在天津地质矿产研究所实验测试室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成。分析仪器为配备有美国 ESI 公司生产的 JUP193-FX ArF 准分子激光器的激光剥蚀系统和 Neptune 质谱仪。利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀,通常采用的激光剥蚀的斑束为 35 μm 或 50 μm,激光能量密度为 13~

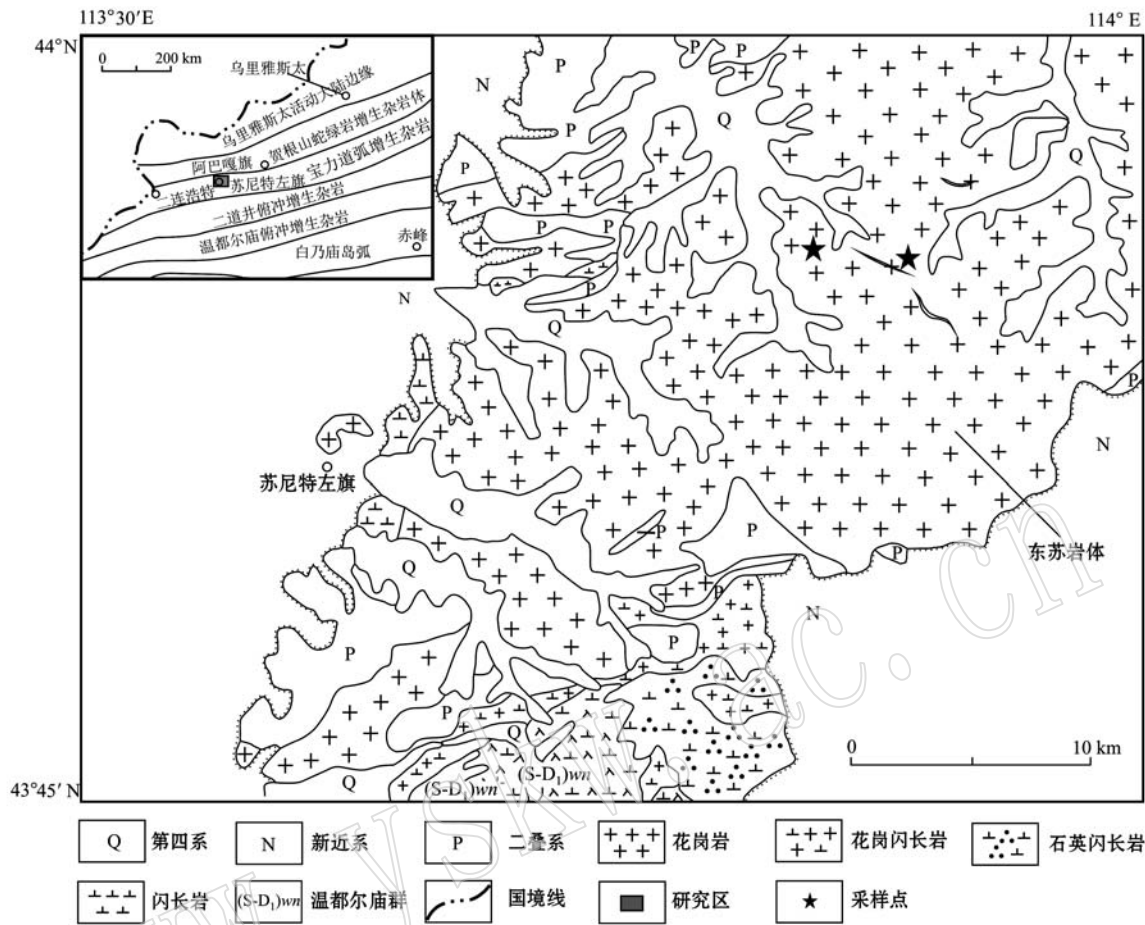


图 1 苏尼特左旗地区地质简图(据地质部内蒙古自治区地质局第一区域地质测量队,1965^①改绘)

Fig. 1 Simplified geological map of Sonid Left Banner(modified after No. 1 Regional Geological Surveying Party, Inner Mongolia Bureau of Geology, 1965)^①

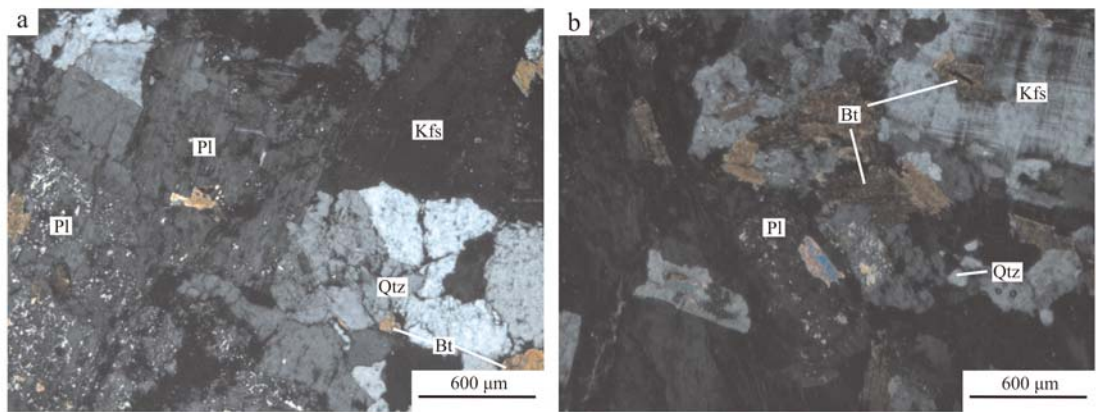


图 2 东苏二长花岗岩显微镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of the typical textures of the Dongshu monzogranite

Bt—黑云母; Kfs—碱性长石; Pl—斜长石; Qtz—石英

Bt—biotite; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

① 地质部内蒙古自治区地质局第一区域地质测量队. 1965. 1:20 万苏尼特左旗幅地质图说明书.

14 J/cm², 频率为 8~10 Hz, 激光剥蚀物质以 He 为载体气送入 Neptune, 利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素从而进行锆石 U-Pb 同位素原位测定。测试中用人工合成的硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化。锆石年龄计算采用标准锆石 GJ-1 作为外标校正, 每测定 8 个分析点后插入一次标样测定, 以确保标样和样品的仪器条件完全一致。在所测锆石样品分析前后各测一次 NIST610。用中国地质大学刘勇胜教授研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010)和 Kenneth R. Ludwig 的 Isoplot 程序进行数据处理(Ludwig, 2003), 采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正。

主、微量元素测定在天津地质矿产研究所实验室测定。测试选取地表新鲜的岩石样品。经室内岩石薄片观察鉴定, 再综合选取新鲜样品供岩石化学分析用, 粗碎和磨样在中国地质大学(北京)国家重点实验室完成。样品研磨至 200 目以下, 加工过程中无设备和人工污染。

主量元素分析先采用熔片法制备成玻璃片, 然后采用 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪测定; 微量元素(含稀土元素)测试采用 X Series 等离子体质谱仪, 并经 GB/T 14506.28-2010、GB/T 14506.1-2010、GHJZ003-2009、GHJZ002-2009 监控校准。主、微量元素测量误差 < 5%~10%。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

东苏二长花岗岩的锆石以长柱状为主, 晶形完

整, 发育典型的振荡环带, 环带较窄(图 3a), 指示锆石的岩浆成因特点(Belousova *et al.*, 2002; Rubatto, 2002)。岩体锆石年龄谐和度并不高, 数据点都在谐和线附近, 略偏向谐和线右侧, 表现为²⁰⁷Pb/²³⁵U 比值偏大, 与²⁰⁷Pb 丢失或难以测准有关(Kröner *et al.*, 1994; 刘新秒, 1998)。而²⁰⁶Pb/²³⁸U 数据比值基本相同且相对集中,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄是准确可信的。13 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布在 221~225 Ma 之间, 作加权平均计算结果为 221.5 ± 0.81 Ma, MSWD = 0.57。年龄结果与其中谐和度最高的 11 号测点的谐和²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄(221 ± 1 Ma)相一致(表 1)。因此, ~221 Ma 的年龄值具有地质意义的, 可以代表东苏二长花岗岩的结晶年龄(图 3b)。

3.2 地球化学

东苏二长花岗岩的主量元素组成特征(表 2)如下: ① 富硅: SiO₂ = 69.76%~75.58%, 平均为 73.93%, 很接近世界典型 A 型花岗岩 SiO₂ 含量的平均值 73.81%(Whalen *et al.*, 1987); ② 富铁贫镁, TFeO 含量为 0.77%~2.05%, MgO 含量为 0.08%~0.50%, TFeO/MgO 值为 3.43~11.26, TFeO/(TFeO+MgO) 值为 0.77~0.92, 在 TFeO/(TFeO+MgO)-SiO₂ 图解(4a)中大部分落入铁质区域, 同时, 其成分点完全分布在 486 个世界典型的 A 型花岗岩样品所勾勒的成分区内。另外在 Dall'Agno 等(2007)提出的氧化型 A 型和还原型 A 型花岗岩的判别图解中投影, 均落在氧化型 A 型的区域或氧化型 A 型与还原型 A 型的交界处(图 4c, 4d), 表明其形成环境复杂。③ 富碱且相对富钾, K₂O + Na₂O = 6.99%~9.16%, K₂O/Na₂O = 0.70~1.69,

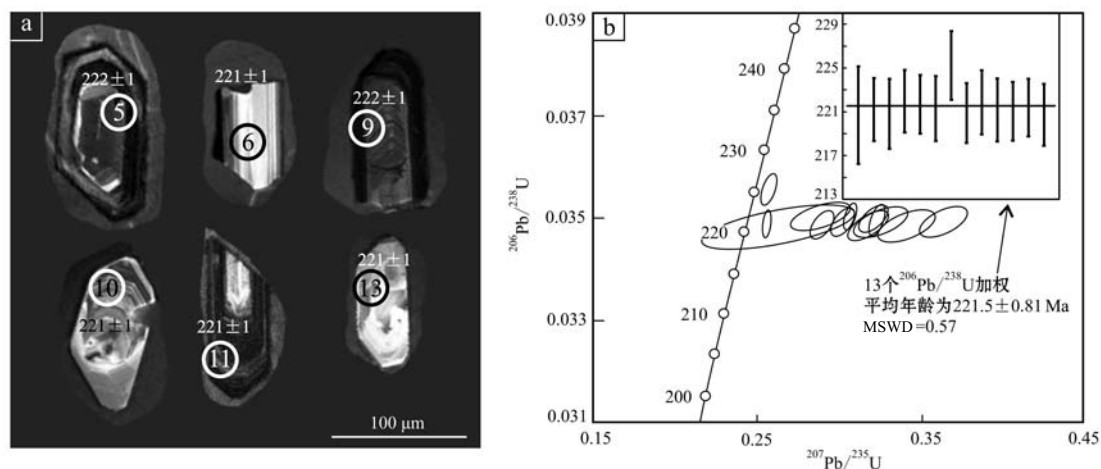


图 3 东苏二长花岗岩样品典型锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 谐和图(b)

Fig. 3 CL images(a) and the U-Pb zircon concordia diagram(b) of representative zircons from the Dongsu monzogranite

表 1 东苏岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of Dongsu granites

测定 点号	浓度/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	2.09	60.6	0.054 6	0.008 0	0.262 1	0.038 0	0.034 8	0.038 0	395	329	236	34	221	2
2	13.8	371	0.062 6	0.001 1	0.301 5	0.005 3	0.034 9	0.005 3	696	38	268	5	221	1
3	6.54	175	0.070 9	0.002 9	0.340 4	0.014 6	0.034 8	0.014 6	953	85	297	13	221	2
4	3.85	98.8	0.059 7	0.003 1	0.288 3	0.015 0	0.035 0	0.015 0	592	113	257	13	222	1
5	9.25	238	0.066 4	0.001 5	0.320 5	0.007 3	0.035 0	0.007 3	820	47	282	6	222	1
6	5.20	127	0.075 4	0.002 5	0.363 0	0.012 4	0.034 9	0.012 4	1 078	66	314	11	221	1
7	7.65	180	0.052 4	0.000 9	0.256 7	0.004 0	0.035 6	0.004 0	301	39	232	4	225	2
8	6.70	178	0.060 1	0.001 3	0.288 8	0.006 1	0.034 9	0.006 1	606	46	258	5	221	1
9	16.2	435	0.063 4	0.000 7	0.306 2	0.003 1	0.035 0	0.003 1	722	25	271	3	222	1
10	5.00	134	0.067 4	0.002 7	0.324 4	0.013 4	0.034 9	0.013 4	850	85	285	12	221	1
11	24.8	692	0.053 1	0.000 5	0.255 4	0.001 9	0.034 9	0.001 9	333	20	231	2	221	1
12	11.6	313	0.067 0	0.000 9	0.322 7	0.004 1	0.034 9	0.004 1	837	28	284	4	221	1
13	4.20	112	0.066 0	0.002 0	0.316 9	0.009 7	0.034 8	0.009 7	806	64	280	9	221	1

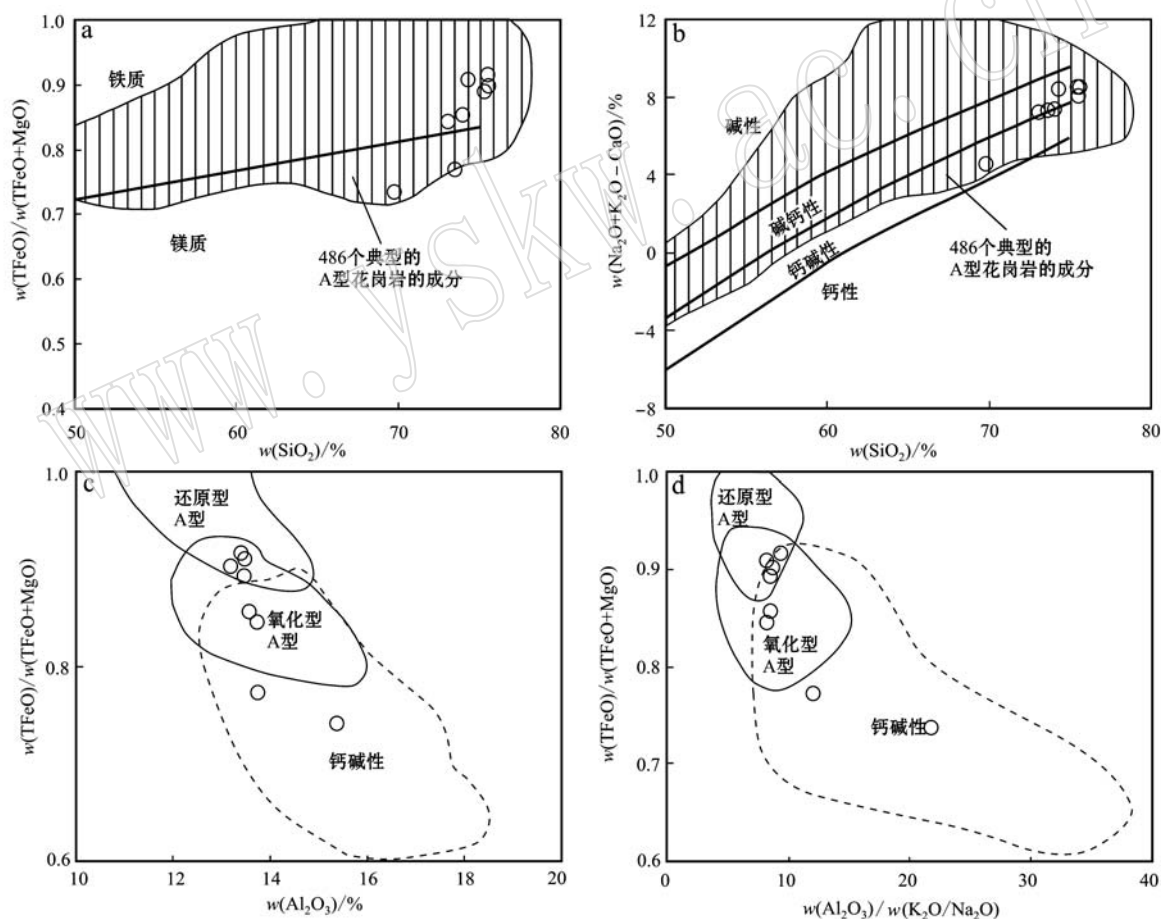


图 4 东苏二长花岗岩 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ (a), $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ (b), $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})-\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) 和 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (d)图[其中图 a 和 b 底图据 Frost 等(2001), 图 c 和 d 底图据 Dall'Agno 和 de Oliveria(2007)]

Fig. 4 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ versus SiO_2 (a), $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ versus SiO_2 (b), $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ versus Al_2O_3 (c) and $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ versus $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (d) diagrams for the Dongsu monzogranite (a, b after Frost *et al.*, 2001; c, d after Dall'Agno and de Oliveria, 2007)

表 2 东苏二长花岗岩主量($w_B/\%$),微量($w_B/10^{-6}$)元素分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) elements and trace elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of Dongsu monzogranite

样品号	SZGS01-1	SZGS01-2	SZGS02-1	SZGS02-2	SZGS03	SZGS05	SZGS08	SZGS10
SiO ₂	75.58	75.56	75.44	74.37	73.15	74.01	69.76	73.57
TiO ₂	0.16	0.17	0.13	0.13	0.27	0.20	0.34	0.20
Al ₂ O ₃	13.20	13.42	13.44	13.47	13.71	13.55	15.38	13.75
FeO	0.67	0.55	0.52	0.65	1.86	1.35	1.30	1.53
Fe ₂ O ₃	0.62	0.39	0.28	0.64	0.21	0.38	1.46	0.20
TFe ₂ O ₃	1.37	1.00	0.86	1.36	2.28	1.88	2.91	1.90
TFeO	1.23	0.90	0.77	1.23	2.05	1.69	2.61	1.71
MnO	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.06	0.10	0.08
MgO	0.13	0.08	0.09	0.12	0.37	0.28	0.92	0.50
CaO	0.31	0.26	0.32	0.60	1.09	0.94	2.28	0.68
Na ₂ O	3.36	3.62	3.44	3.45	3.14	3.26	4.10	3.83
K ₂ O	5.15	5.19	5.46	5.71	5.31	5.22	2.89	4.38
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.03	0.03	0.07	0.04	0.11	0.05
灼失	0.50	0.46	0.58	0.55	0.40	0.41	1.07	0.92
A/CNK	1.13	1.11	1.11	1.04	1.06	1.07	1.10	1.12
A/NK	1.19	1.16	1.16	1.14	1.26	1.23	1.56	1.25
TFeO/MgO	9.45	11.26	8.58	10.22	5.54	6.04	2.84	3.42
Be	3.33	3.74	3.38	4.19	4.10	4.85	1.60	4.68
Sc	1.89	2.9	3.32	4.44	4.65	5.08	5.52	5.88
V	13.8	12.3	8.66	10	18.3	12.8	35.7	15.5
Pb	21.0	15.9	20.2	32.8	26.3	26.4	11.8	22.0
Li	26.2	42.1	17.2	13.9	62.7	88.3	10.6	23.1
Rb	296	278	345	316	283	300	85.2	187
Cs	15.2	12.7	15.2	25.3	15	16.8	2.18	5.69
Sr	101	72.6	67.2	37.6	95.1	71.4	267	99.8
Ba	369	326	182	250	325	212	519	208
U	1.79	1.60	1.76	5.66	1.47	2.22	0.94	1.12
Th	23.5	18.9	19.5	26.8	35.1	27.7	9.86	17.4
Nb	13.6	14.3	14.4	12.9	14.9	12.9	8.4	10.7
Ta	2.04	2.12	1.82	2.2	1.89	1.68	0.98	1.73
Zr	119	130	97.3	98.1	212	162	132	108
Hf	4.41	4.81	4.12	4.00	7.37	5.99	4.3.0	4.28
Y	10.9	9.05	16.0	20.0	27.0	25.7	16.0	15.6
La	17.0	15.8	13.4	17.9	27.0	25.1	15.5	5.99
Ce	31.3	26.7	23.2	35.4	57.9	48.7	28.8	11.2
Pr	3.83	3.55	3.13	4.26	7.18	6.49	3.42	1.74
Nd	13.4	12.5	11.2	15.3	26.4	24.0	12.0	7.00
Sm	2.57	2.44	2.4	3.26	5.61	5.17	2.36	2.07
Eu	0.29	0.26	0.2	0.3	0.55	0.46	0.68	0.28
Gd	2.4	2.23	2.29	3.01	4.94	4.67	2.31	1.94
Tb	0.39	0.34	0.46	0.55	0.88	0.87	0.4	0.44
Dy	2.28	1.87	2.94	3.32	5.1	4.95	2.52	2.82
Ho	0.45	0.37	0.6	0.68	0.98	0.98	0.52	0.56
Er	1.33	1.06	1.76	2.00	2.9.0	2.85	1.56	1.64
Tm	0.21	0.15	0.28	0.3	0.43	0.43	0.24	0.26
Yb	1.42	1.04	2.02	2.11	3.02	3.12	1.81	1.86
Lu	0.23	0.17	0.32	0.35	0.48	0.48	0.29	0.29
ΣREE	77.1	68.48	64.2	88.74	143.37	128.27	72.41	38.09
LREE	68.39	61.25	53.53	76.42	124.64	109.92	62.76	28.28
HREE	8.71	7.23	10.67	12.32	18.73	18.35	9.65	9.81
LREE/HREE	7.85	8.47	5.02	6.20	6.65	5.99	6.50	2.88
La _N /Yb _N	8.59	10.90	4.76	6.09	6.41	5.77	6.14	2.31
δEu	0.36	0.34	0.26	0.29	0.32	0.29	0.89	0.43
δCe	0.95	0.87	0.88	0.99	1.02	0.94	0.97	0.85

在 $(K_2O + Na_2O - CaO) - SiO_2$ 图解上,均落入碱性区域(图4b),且同样分布在由486个世界典型A型花岗岩样品所勾勒的区域内;④富铝, Al_2O_3 的含量在13.20%~13.75%之间,铝饱和指数 $A/CNK = 1.04 \sim 1.13$,表现出铝质-过铝质特征。

稀土元素总量偏低(表2)。 $\Sigma REE = 38.09 \times 10^{-6} \sim 143.37 \times 10^{-6}$ 。其中轻稀土LREE为 $28.28 \times 10^{-6} \sim 124.64 \times 10^{-6}$;HREE为 $9.65 \times 10^{-6} \sim 18.73 \times 10^{-6}$ 。东苏二长花岗岩球粒陨石标准化曲线中,表现出相同的趋势:LREE与HREE均表现出

平缓的右倾趋势,强烈的Eu负异常,呈现出经典右倾“V”字形。东苏二长花岗岩的 $(La/Yb)_N$ 为2.31~10.90(平均6.37),轻重稀土分馏不明显。Eu的强烈负异常表明源区大量斜长石残留或在结晶过程中分离结晶。东苏二长花岗岩的Rb为 $85.2 \times 10^{-6} \sim 345 \times 10^{-6}$,Ba为 $182 \times 10^{-6} \sim 519 \times 10^{-6}$,Sr为 $37.6 \times 10^{-6} \sim 101 \times 10^{-6}$ 。东苏二长花岗岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5,6b),表现出Rb、Th、Ta等不相容元素富集,Zr轻微亏损,Ba、Sr、Nb、Eu强烈负异常。

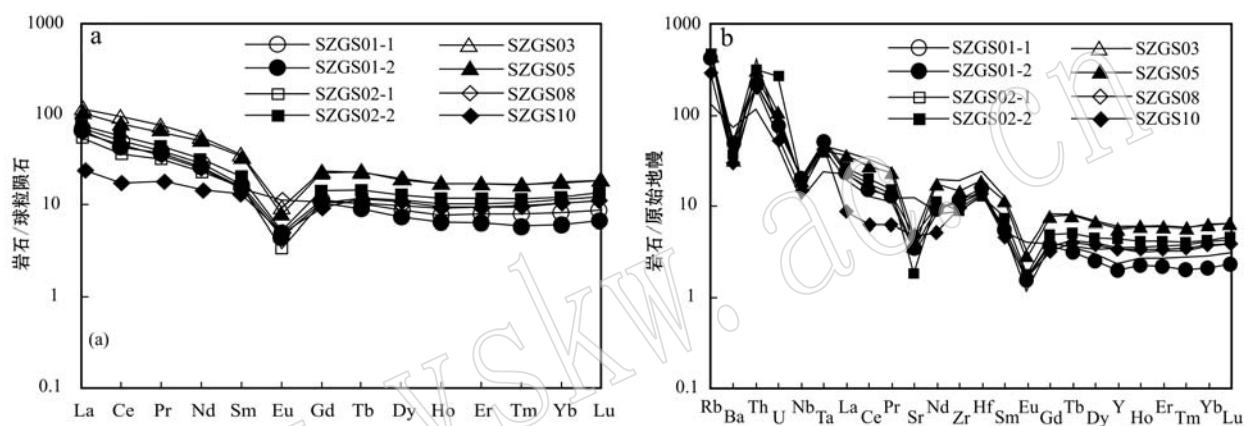


图5 东苏二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

[球粒陨石和原始地幔标准化值数值据 Sun and McDonough(1989)]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Dongsu monzogranite (chondrite and N-MORB values after Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 A型花岗岩的厘定

A型花岗岩不仅包含了碱性岩类,还包括碱性,弱碱-准铝,过铝质甚至强过铝质岩石(吴锁平等,2007;贾小辉等,2009),本文研究的苏尼特左旗地区东苏花岗岩矿物组合以石英、碱性长石为主,富Si、富K、贫Ca、贫Mg特征,这与典型国内外A型花岗岩的主量元素特征基本一致,即富 SiO_2 (平均73.35%~73.81%),富碱(平均8.42%~8.72%)和贫CaO(平均0.75%~0.82%)(吴锁平等,2007),具有高的FeO/MgO比值,富集HFSE和Y(Ce),亏损Ba、Sr、Eu、P、Ti,具有典型的右倾海鸥型稀土元素分配模式,符合A型花岗岩的特征。

东苏二长花岗岩的分异指数(DI)为89.16~

95.84,且 Al_2O_3 、CaO、TFE、MnO、 TiO_2 、 P_2O_5 、 K_2O 、 Na_2O 与 SiO_2 无明显相关性,表明岩浆演化较彻底,而高分异的S型和I型花岗岩与A型花岗岩具有相似的地球化学和矿物组成特征,需要加以区分。

对于A型花岗岩与高分异S型花岗岩的区分相对简单,高分异S型花岗岩具有更高的 P_2O_5 (均值为0.14%)和 Na_2O 含量(均值为2.81%),且 P_2O_5 的含量随着分异程度的增加而增加(Chappell and White, 1992),而A型花岗岩相反。另外,高分异S型花岗岩通常落入同碰撞区域,所以相对容易区分(King *et al.*, 1997)。然而对高分异的A型花岗岩和I型花岗岩的区分至今仍是难题,如:①若 $10000 \times Ga/Al > 2.6$ 为A型花岗岩,则很多高分异I型、S型可能属于A型花岗岩,②若以 $Zr > 250 \times 10^{-6}$, $Zr + Nb + Ce + Y > 350 \times 10^{-6}$ 比值为判别标准,强分异的A型花岗岩则不再属于A型。国内外

学者针对这一问题作了大量研究(King *et al.*, 1997; 王强等, 2000; Frost and Frost, 2011), A 型花岗岩的全铁含量(TFeO)高, 一般大于 1%, 而高分异 I 型花岗岩一般小于 1%。本文的东苏二长花岗岩低 P_2O_5 (0.03% ~ 0.11%), 高 Na_2O (3.14% ~ 4.10%), 也未见 S 型花岗岩的特征矿物(如原生白云母、堇青石等), 故其不可能为高分异的 S 型花岗岩, 岩石中 TFeO (0.77% ~ 2.05%, 平均 1.52%) 含量较高, 具有较高的 TFeO/(TFeO + MgO) 值 (0.74 ~ 0.92)。综上, 可以确定东苏二长花岗岩属于 A 型花岗岩。

4.2 岩石成因

Eby (1992) 与洪大卫等 (1995) 都曾提出须将 A 型花岗岩进一步分为 A_1 和 A_2 这两个亚类。其中, A_1 亚类[非造山环境, 洪大卫等 (1995) 称为 AA 亚型], 常与基性岩甚至斜长岩和正长岩密切共生, 并随时间演化, SiO_2 不饱和的正长岩愈来愈发育, 主要由上地幔热柱、裂谷作用形成, 在造山作用岩浆活动时间序列中是最晚的一次; 而 A_2 亚类[后造山环境, 洪大卫等 (1995) 称为 PA 亚型]以碱性花岗岩和铝质 A 型花岗岩为主, 主要跟大陆边缘地壳伸展作用以及陆内剪切作用产生的拉张环境有关。近年来, 刘昌实等 (2005)、付建明等 (2005)、孙德有等 (2005)、李永军等 (2009) 先后报道了他们对铝质 A 型花岗岩及其构造环境的研究成果, 其中包括准铝质、铝质、过铝质花岗岩, 它们属于 A_2 亚类, 苏尼特左旗 A 型花岗岩属于过铝质 (铝饱和指数 $A/CNK = 1.04 \sim 1.13$), 为铝质 A 型花岗岩, 可能为 A_2 亚类。

据刘昌实等 (2003) 统计, A_2 亚类中的铝质 A 型花岗岩 SiO_2 含量最高 (73.55% ~ 77.21%), 碱质 A 型花岗岩次之 (71.93% ~ 76.28%), A_1 亚类贫 SiO_2 (54.13% ~ 61.20%)。东苏二长铝质 A 型花岗岩的 $SiO_2 = 69.76\% \sim 75.58\%$, 平均为 73.93%。显然属于 A_2 亚类。 R_1 、 R_2 两个因子用来区分 A_1 和 A_2 亚类岩石也极为有效。 A_1 亚类由于贫 SiO_2 、富全碱 ($Na_2O + K_2O$), 故 R_1 普遍较低, 一般在 1 349 ~ 888 之间, R_2 一般在 433 ~ 932; 与其相反, A_2 亚类 R_1 较高 (一般在 2 130 ~ 2 958 之间) 而 R_2 较低 (一般在 244 ~ 496 之间)。东苏二长岩体 R_1 为 2 375 ~ 2 617, 平均 2 498, R_2 为 297 ~ 600, 平均 375, 进一步说明东苏二长花岗岩体为 A_2 亚类花岗岩。

最近 Frost 等 (2011) 通过总结前人研究成果 (包括实验岩石学成果), 认为 A 型花岗岩的成因归纳为

3 种成因模式: ① 长英质地壳的部分熔融; ② 玄武质岩浆分异; ③ 玄武质岩浆同化地壳物质并发生分异。东苏二长花岗岩为铝质-强过铝质, Sylvester (1989) 研究表明这类岩石的原岩主要为地壳变沉积岩。Green (1995) 提出 Nb/Ta 比值可作为指示壳幔体系地球化学作用的指标。东苏二长花岗岩的 Nb/Ta = 5.86 ~ 8.57, 位于 A_2 亚类花岗岩的 Nb/Ta 比值范围。由微量元素蛛网图可知, 东苏二长花岗岩在 (岩石/原始地幔) Nb 约 $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 处形成一个低谷, 说明有陆壳组分 (Barth *et al.*, 2000), 导致 Nb 和 Ta 相对亏损。在 A/MF - C/MF 图解 (Altherr *et al.*, 2000) (图 6a) 中落入变砂岩或变砂岩与变泥质岩交界区域, 野外也缺少与其同时代的基性岩发育, 明显不同于变玄武岩部分熔融的产物。Eu、Sr 负异常, 表明源区可能有斜长石残留, 可能形成于低压环境, 地壳浅部, 也与 Dall'Agnol 等 (2007) 提出的判别图解中均落入氧化型 A 型或氧化与还原的交界区域相符合。综合来看, 东苏二长花岗岩应源自长英质地壳的部分熔融。

4.3 构造背景

A 型花岗岩形成的构造背景最初被认为是板内裂谷的非造山环境 (Loiselle and Wones, 1979), 而随后大量研究表明 A 型花岗岩可形成于多种构造环境中, 如 King 等 (1997) 认为澳大利亚 Lachalen 褶皱带 A 型花岗岩可以形成于造山期的各个环境; Bonin (2007) 明确指出, A 型花岗岩与造山时间在空间上并无联系, 仅在时间上关系密切, 同时指出其并非形成于传统认为的板内环境, 可以是板块汇聚的活动边缘背景, 然后其形成无不与拉张构造背景有关 (Whalen *et al.*, 1987; 吴锁平等, 2007; 贾小辉等, 2009), 因此, A 型花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志, 而 A_2 型花岗岩, 一般认为代表后造山伸展环境的产物 (吴福元等, 2007)。

本文研究的苏尼特左旗二长花岗岩为 A_2 型花岗岩在 R_1 - R_2 构造判别图解 (图 6b) (Batchelor and Bowden, 1985) 和 TFeO/(TFeO + MgO) - SiO_2 图解 (图 6c) (Maniar and Picoli, 1989) 中大部分落入后造山区域, 结合 A 型花岗岩成因特点及区域地质资料, 东苏花岗岩体为后造山伸展阶段长英质地壳物质部分熔融的产物。

已有的研究为苏尼特左旗地区古亚洲洋盆俯冲消减及中亚造山带的形成提供了重要资料。索伦缝合带记录了古亚洲洋闭合的构造演化过程。然而,

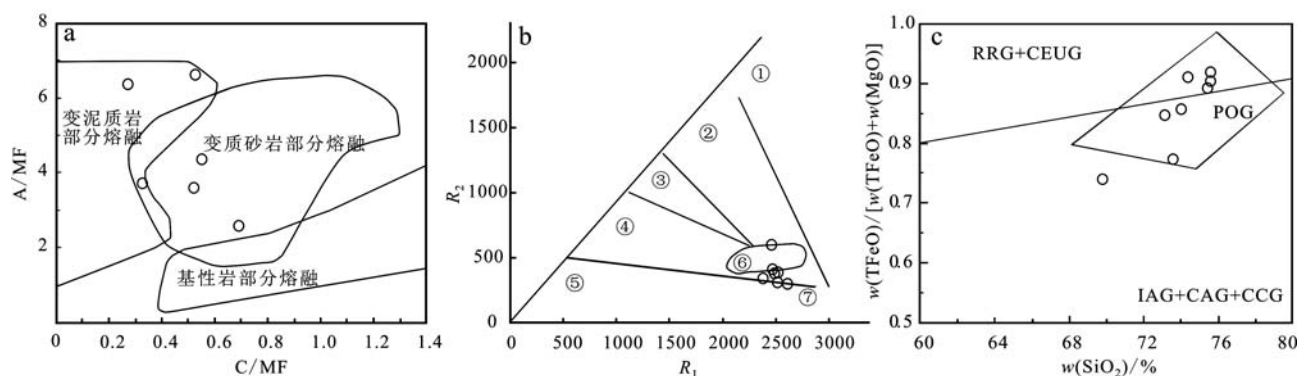


图6 $A/MF - C/MF$ (Altherr *et al.*, 2000)、 $R_1 - R_2$ (Batchelor and Bowden, 1985) 和 $TFeO/(TFeO + MgO) - SiO_2$ 图解 (Maniar and Picoli, 1989)

Fig. 6 $A/MF - C/MF$ (after Altherr *et al.*, 2000), $R_1 - R_2$ (after Batchelor and Bowden, 1985) and $TFeO/(TFeO + MgO) - SiO_2$ (after Maniar and Picoli, 1989) diagrams for the Dongsu monzogranite

图6b: ①—地幔分异产物; ②—板块碰撞前; ③—板块碰撞后隆起; ④—晚造山期; ⑤—非造山区; ⑥—同碰撞; ⑦—造山期后

Fig. 6b: ①—mantle fractionates; ②—pre-plate collision; ③—post collision uplift; ④—late-orogenic period; ⑤—anorogenic area; ⑥—syn-collision; ⑦—post-orogenic period

对最终碰撞缝合的时间尚有争议。

Zhang 等(2009a)指出华北板块北缘存在两条侵入岩带: 包括晚石炭世(324~300 Ma)的闪长-花岗闪长岩带以及晚二叠世-中三叠世(254~237 Ma)花岗岩带。前者属于安第斯型大陆边缘, 源于古亚洲洋俯冲华北板块, 是地壳熔融交代富集地幔的产物; 后者形成于后碰撞环境, 源自壳幔混源富流体岩浆分离结晶, 指示蒙古岛弧地体与华北板块碰撞缝合; 陈斌等(2001)通过 SHRIMP U-Pb 锆石测年得到苏尼特左旗南部弧岩浆岩年龄: 490 ± 8 Ma 和 309 ± 8 Ma 和碰撞花岗岩 254 ± 4 Ma, 得到碰撞花岗岩的 Rb-Sr 等时线年龄 $\sim 228 \pm 21$ Ma; 近期, 汤文豪等(2011)指出查干诺尔双峰式火山岩形成于晚石炭世, 介于 313~308 Ma 之间, 查干诺尔双峰式火山岩可能形成于碰撞后的伸展环境, 种种证据表明, 索伦缝合带在晚石炭纪(~ 310 Ma)之前就已经闭合过。

李益龙等(2012)获得的林西县西拉木伦断裂变形闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 286 ± 1 Ma, 岩浆来源于俯冲流体/熔体交代作用形成的富集地幔; 陈彦等(2014)对西乌旗地区过双峰式火山岩作了一些研究工作, 得到流纹岩的 SHRIMP 279 ± 4.3 Ma, 指示晚石炭世-早二叠世(310~280 Ma)的后碰撞伸展环境。尚庆华(2004)在内蒙古中部哲斯地区和东部锡林浩特地区二叠纪哲斯组泥岩中发现的放射虫化石等证据表明, 该区中二叠统主体应为深水海相沉积。北方造山带内蒙古中、东部地区中二叠世深水海相地层的确定, 进一步证实华北板

块与西伯利亚板块的最终拼合至少发生在瓜德鲁普世(~ 265 Ma)末之后, 表明 ~ 265 Ma 前有洋盆的存在, 可能是晚石炭-早二叠世长时间伸展扩张情况下产生的新生洋盆(Tang, 1990; 唐克东, 1992), 也有可能是古亚洲洋的残余(张永焕等, 2000; Li, 2006)。综合看来, 这个残余洋盆或新生洋盆可能的存在时带为二叠世($\sim 280 \sim 265$ Ma, 即乌拉尔世晚期-瓜德鲁普世)。晚二叠世大量碰撞的证据也较好的约束了这个时代, 如: 孟庆鹏等(2013)在四子王旗地区识别出一条近 EW 向碰撞花岗岩带(强过铝质 S 型花岗岩), 时代为二叠纪晚期(270~260 Ma), 限定华北板块与南蒙古微大陆沿索伦缝合带闭合的时间为二叠纪晚期; 李大鹏等(2012)指出兴蒙造山带沉积环境在二叠纪发生变化, 从岛弧过渡为造山带, 并于早三叠世之前完成碰撞; 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪花岗闪长岩和石英闪长岩(华力西期晚期)为典型埃达克质岩(256.1 ± 0.9 Ma), 指示早二叠洋壳向北俯冲至 75~85 km 部分熔融形成埃达克质熔体, 再侵入地壳形成埃达克质岩(张玉清, 2009), 因此推断二叠纪晚期(265~250 Ma)属于一个碰撞造山阶段。

随后索伦缝合带最终碰撞缝合并导致大量同碰撞与后碰撞花岗岩共存, 如前面提到的(陈斌等, 2001)在苏尼特左旗南部研究的 250~230 Ma 的碰撞花岗岩; Zhang 等(2009)提到二叠纪晚期-中三叠世(254~237 Ma)的后碰撞花岗岩带; 叶栩松等(2011)在锡林浩特、林西地区两条近东西展布的同

碰撞构造背景的过铝质 S 型花岗岩带, 单颗粒锆石年龄($248.3 \pm 7.1 \text{ Ma} \sim 238.1 \pm 7.4 \text{ Ma}$); 张玉清等(2009)报道的内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩的 TIMS 锆石 U-Pb 年龄 $284.8 \pm 1.1 \text{ Ma}$, 指示后造山伸展; Gregory 等(2004)在索伦缝合带发现伸展作用, 指出交其尔断层为拆离断层, 得到 $\sim 252 \text{ Ma}$ 的糜棱岩化哈拉图岩体中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄 224 Ma 和 208 Ma ; 李锦轶等(2007)获得的侵位于房框子单元南部的双井子单元 S 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $229.2 \pm 4.1 \text{ Ma}$ 和 $237.5 \pm 2.7 \text{ Ma}$, 大量同碰撞与后碰撞花岗岩共存预示古亚洲洋的演化到达末期, 而本文研究的东苏 A 型花岗岩为后造山伸展背景下, 长英质地壳部分熔融的产物, 侵位时间为 $221.5 \pm 0.81 \text{ Ma}$, 是目前索伦缝合带报道的时代最晚的三叠纪 A 型花岗岩, 它的出现, 标志着古亚洲洋演化的结束, 反映索伦缝合带在晚三叠世的碰撞已达末期。

5 结论

(1) 东苏二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果为 $221.5 \pm 0.81 \text{ Ma}$, 代表岩体的结晶年龄;

(2) 东苏二长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 69.76\% \sim 75.58\%$)和高碱且相对富钾($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.99\% \sim 9.16\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.70 \sim 1.69$)、相对富铝(铝饱和指数 $\text{A}/\text{CNK} = 1.04 \sim 1.13$)、高 TFEO/MgO 值($3.43 \sim 11.26$)、贫镁($\text{MgO} = 0.08\% \sim 0.50\%$)、富集轻稀土、Ba、Sr、Nb、Eu 强烈负异常, Rb、Th、Ta 等不相容元素富集。主量和微量元素均表现出铝质 A 型花岗岩的特征;

(3) 东苏二长花岗岩为后造山伸展下长英质地壳物质部分熔融的产物;

(4) 东苏二长花岗岩是目前索伦缝合带地区报道的时代最晚的三叠纪 A 型花岗岩, 它的出现, 标志着古亚洲洋演化的结束、索伦缝合带在晚三叠世的碰撞已达末期。

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 50 (1): 51~73.
- Barth M G, McDonough W F and Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165(3): 197~213.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43~55.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace-element composition as indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602~622.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1~2): 1~29.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1~2): 1~26.
- Chen Bin, Zhao Guochun, Wilde S, *et al.* 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implications[J]. *Geological Review*, 47 (4): 361~367(in Chinese with English abstract).
- Chen Yan, Zhang Zhicheng, Li Ke, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Permian bimodal volcanic rocks in Xi Ujimqin banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50(5): 843~858(in Chinese with English abstract).
- Dall'Agnol R and de Oliveira D C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type Granites[J]. *Lithos*, 93(3~4): 215~233.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrologic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641~644.
- Frost C D and Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 52(1): 39~53.
- Frost B R, Arculus R J, Barnes C G, *et al.* 2001. A geochemical classification of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 033~2 048.
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2005. Ascertainment of Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. *Geochemistry*, 34(3): 215~226(in Chinese with English abstract).
- Gregory A D, Xu Bei, Zheng Yadong, *et al.* 2004. Indosinian extension in the Solonker suture zone: The Sonid Zuoqi metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 135~144.

- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120(3): 347~359.
- Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, *et al.* 1994. The Permian alkaline granites in Central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 10(3): 169~176(in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, *et al.* 1995. Tectonic environment classification and identification marks of the alkali granite [J]. *Science in China (Series B)*, 39(7): 979~993(in Chinese with English abstract).
- Jia Xiaohui, Wang Qiang and Tang Gongjian. 2009. A-type granites: Research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465~485(in Chinese with English abstract).
- Khain E V, Bibikova E V, Kroner A, *et al.* 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3~4): 311~325.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Kröner A, Jaeckel P and Williams I S. 1994. Pb-loss patterns in zircons from a high-grade metamorphic terrain as revealed by different dating methods: U-Pb and Pb-Pb ages for igneous and metamorphic zircons from northern Sri Lanka[J]. *Precambrian Research*, 66: 151~181.
- Li Dapeng, Chen Yuelong, Wang Zhong, *et al.* 2012. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57: 776~785(in Chinese with English abstract).
- Li Jingyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3~4): 207~224.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east 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 Yilong, Zhou Hanwen, Xiao Wenjiao, *et al.* 2012. Superposition of Paleo-Asian and West-Pacific Tectonic Domains in Eastern Section of the Solonker Suture Zone: Insights from Petrology, Geochemistry and Geochronology of Deformed Diorite in Xar Moron Fault Zone, Inner Mongolia[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 433~450(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Yang Gaoxue, Wu Hongen, *et al.* 2009. The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in east Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 17~25(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 Changshi, Chen Xiaoming, Wang Yucheng, *et al.* 2005. Isotopic dating and origin of complexly zoned micas for A-type Nankunshan aluminous granite[J]. *Geological Review*, 51(2): 193~201 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinmiao. 1998. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages[J]. *Progress in Precambrian Research*, 21(3): 51~56(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Kejing, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites[J]. *Geological of Society of America*, 11(7): 468.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1~70.
- Luo Zhaohua, Chen Hongwei, Ke Shan, *et al.* 2002. Petrogenesis and evolution of the Dongsu granite series in Sonid Zuoqi, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 29(3): 291~296(in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C and Natal'in B A. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1): 263~337.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635~643.
- Meng Qingpeng, He Yuankai, Zhang Wen, *et al.* 2013. Time constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean on the northern margin of North China Craton: Evidence from Xihouhaozi syn-collisional granites in Siziwang Qi area[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(11): 1 749~1 759(in Chinese with English abstract).
- 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(5~6): 348~370.
- Rogers J J W and Greenberg J E. 1990. Late-orogenic, post-orogenic, and anorogenic granites: distinction by major-element and trace-ele-

- ment chemistry and possible origins[J]. *Journal of Geology*, 98: 291~310.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184: 123~138.
- Ruzhentsev S V. 2001. The Indo-Sinides of Inner Mongolia, in *Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Mongolia*[M]. Edited by A. B. Dergunov, Routledge, London, 129~141.
- Shang Qinhua. 2004. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the north China orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2 613~2 619.
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183~189(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2005. Confirmation of the two episodes of A-type granite emplacement during late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263~275(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*[C]. Geological Society Special publications, London, 42: 313~346.
- Sylvester. 1989. Post-Collisional Alkaline Granites[J]. *Journal of Geology*, 97: 261~280.
- Tang Kedong. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton[J]. *Tectonics*, 9(2): 249~260.
- Tang Kedong. 1992. Tectonic Evolution of Minerogenetic Regularities of the Fold Belt Along the North Margins of Sino-Korean Plate[M]. Beijing University Press, Beijing, 1~305(in Chinese).
- Tang Wenhao, Zhang Zhicheng, Li Jianfeng, *et al.* 2011. Geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks of Benbatu formation in Sonid Youqi, Inner Mongolia and its geochemistry significance[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 47(2): 321~330(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 395~412(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaoling. 2000. The ascertainment of late Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie orogenic belt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(12): 31~47.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2008. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese as with English abstract).
- Wu Suoping, Wang Meiyong and Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites: a review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57~66(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, *et al.* 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 189~1 217.
- Xu Bei and Chen Bin. 1997. Framework and evolution of the middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in northern Inner Mongolia[J]. *Science in China*, 40(5): 463~469.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to the collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1 069.
- Xue Huaiming, Wang Yinggeng, Ma Fang, *et al.* 2009. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)-Huangshan (alkaline) composite intrusive: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton, China[J]. *Science in China (Series D)*, 39(7): 979~993(in Chinese with English abstract).
- Ye Xusong, Liao Qunan and Ge Mengchun. 2011. Petrogenesis and Tectonics Significance of Triassic Peraluminous Granitoids in Xilinhaote and Linxi area, Inner Mongolia[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(3): 57~64(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for "A-type granite: what is the essence?"[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 267~274(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, *et al.* 2009. Contrasting late Carboniferous and late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1~2): 181~200.
- Zhang Yonghuan, Peng Yujing and Ou Yangxi. 2000. Some issues on the Permian strata in the yanbin area, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 19(1): 1~12(in Chinese with English abstract).

- Zhang Yuqing. 2009. Geochemical characteristics of Permian adakitic granodiorite in Bayinwula of Sonid Left banner, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(4): 329~338(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Xu Liquan, Kang Xiaolong, *et al.* 2009. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujimqin banner, Inner Mongolia, and its significance[J]. Geology in China, 36(5): 988~995 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈斌, 赵国春, Wilde S, 等. 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.
- 陈彦, 张志诚, 李可, 等. 2014. 内蒙古西乌旗地区二叠纪双峰式火山岩的年代学、地球化学特征和地质意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 50(5): 843~858.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学, 34(3): 215~226.
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 68(3): 219~230.
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B辑), 25(4): 418~426.
- 贾小辉, 王强, 唐工建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 33(3): 465~480.
- 李大鹏, 陈岳龙, 王忠, 等. 2012. 内蒙古中-东部兴蒙造山带古生代沉积记录: 对物源特征及中亚造山带构造演化的指示[J]. 科学通报, 57(7): 550~559.
- 李锦轶, 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.
- 李益龙, 周汉文, 肖文交, 等. 2012. 古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加: 来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(3): 433~450.
- 李永军, 杨高学, 吴宏恩, 等. 2009. 东准噶尔贝勒都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(1): 17~25.
- 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.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2005. 广东南昆山 A 型花岗岩定年和环带云母研究[J]. 地质论评, 51(2): 193~201.
- 刘新秒. 1998. 锆石中放射成因铅的丢失及对锆石测年的影响[J]. 前寒武纪研究进展, 21(3): 51~56.
- 罗照华, 谌宏伟, 柯珊, 等. 2002. 内蒙古苏尼特左旗东苏岩石系列的成因与演化[J]. 中国地质, 29(3): 291~296.
- 孟庆鹏, 贺元凯, 张文, 等. 2013. 华北板块北缘古大洋闭合时间的限定——来自四子王旗西后壕子同碰撞花岗岩的证据[J]. 地质通报, 32(11): 1749~1759.
- 尚庆华. 2004. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. 科学通报, 49(24): 2613~2619.
- 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.
- 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地质前缘, 12(2): 263~275.
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1~305.
- 汤文豪, 张志诚, 李建峰, 等. 2011. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 47(2): 321~330.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报, 31(3): 395~412.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297~306.
- 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): 1217~1238.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其评述[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57~66.
- 徐备, 陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. 中国科学, 27(3): 227~232.
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 等. 2009. 皖南太平-黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束[J]. 中国科学: D 辑, 39(7): 979~993.
- 叶栩松, 廖群安, 葛梦春. 2011. 内蒙古锡林浩特、林西地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及构造意义[J]. 地质科技情报, 30(3): 57~64.
- 张旗. 2013. A 型花岗岩的标志和判别-兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 267~274.
- 张永焕, 彭玉鲸, 欧祥喜. 2000. 关于吉林省延边地区二叠纪地层的思考[J]. 吉林地质, 19(1): 1~12.
- 张玉清, 许立权, 康小龙, 等. 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩的年龄及意义[J]. 中国地质, 36(5): 988~995.
- 张玉清. 2009. 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪埃达克质花岗岩闪长岩类地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(4): 329~338.