

doi: 10.12029/gc20160306

张玉清, 张婷, 陈海东, 等. 内蒙古凉城蛮汗山石榴石二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因讨论[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 768-779.

Zhang Yuqing, Zhang Ting, Chen Haidong, et al. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of garnet monzonitic granite in the Manhan Mountain of Liangcheng, Inner Mongolia, and its petrogenesis[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 768-779(in Chinese with English abstract).

内蒙古凉城蛮汗山石榴石二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因讨论

张玉清¹ 张 婷² 陈海东³ 张永清¹

(1. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 内蒙古凉城地区的石榴石二长花岗岩 20 世纪 70 年代初 1:20 万区域地质调查时归入太古代早期侵入岩($\gamma_1^{(2)}$), 岩石定名为中粗粒似斑状花岗岩, 称蛮汗山岩体。1:25 万区调将其划分为弱片麻状石榴二长花岗岩、弱片麻状变斑状含黑云石榴二长花岗岩等不同地质单元。为进一步研究该石榴石花岗岩的形成时代, 本文对弱片麻状变斑状含黑云石榴二长花岗岩中锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年研究, 获得其 U-Pb 年龄值(1933.3 ± 9.8) Ma, 为石榴石二长花岗岩原岩的形成年龄。岩石化学、地球化学分析表明该石榴石二长花岗岩为新太古界孔兹岩系部分熔融的产物, 为强过铝 S 型花岗岩。结合已有的年龄数据推断, 1900-2000 Ma(古元古代中期)华北克拉通曾发生过大规模的构造岩浆热事件。

关键词: LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 石榴石二长花岗岩; 古元古代; 重熔型; 蛮汗山; 内蒙古
中图分类号: P588.12; P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014) 01-0768-12

LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of garnet monzonitic granite in the Manhan Mountain of Liangcheng, Inner Mongolia, and its petrogenesis

ZHANG Yu-qing¹, ZHANG Ting², CHEN Hai-dong³, ZHANG Yong-qing¹

(1. Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The garnet monzonitic granite in the Liangcheng area of Inner Mongolia was classified as Early Archean intrusive rocks ($\gamma_1^{(2)}$) by the 1:200000 regional geological survey in the early 1970s. The rock was named porphyroid medium-coarse granite and called Manhanshan pluton. 1:250000 regional geological survey divided it into weakly-gneissic garnet monzonitic granite, weakly-gneissic porphyroblastic biotite-garnet monzonitic granite and other different geological units. To further study the formation age of the garnet-granite, the authors conducted zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of weakly-gneissic porphyritic biotite-garnet

收稿日期: 2015-09-13; 改回日期: 2015-11-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113013200、1212011120751)资助。

作者简介: 张玉清, 男, 1965 年生, 正高级工程师, 地质矿产专业; E-mail: zhangyqnm@163.com。

monzonitic granite, and the results yielded an age of (1933.3 ± 9.8) Ma, which represents the magmatic crystallization ages of the garnet monzonitic granites. Geochemical analyses show that the garnet monzonitic granites resulted from partial melting of the Neoproterozoic khondalite series, with the features of strongly peraluminous S-type granites. Combined with existing age data, it is held that the North China Craton occurred in large-scale tectono-magmatic thermal events during 1 900–2 000 Ma (Middle Paleoproterozoic).

Key words: LA-MC-ICP-MS U-Pb age; garnet monzonitic granite; Paleoproterozoic; remelting type; Manhan Mountain; Inner Mongolia

About the first author: ZHANG Yu-qing, male, born in 1965, engineer, long engages in the study of regional geology and synthesis; E-mail: zhangyqnm@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113013200, 1212011120751).

1 引言

随着地质工作的深入,研究水平不断提高,关于花岗岩的思考备受关注。特别是花岗岩的侵入时代、物质来源、岩浆演化及其构造环境等方面已引起广大地质学者高度重视^[1-9]。华北地台北缘分布有一套古元古代变质深成侵入体,从基性岩到碱长花岗岩均有不同程度的出露^[10],主要有变质辉长岩、变质闪长岩、弱片麻状变苏长岩(紫苏斜长麻粒岩)、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等,各岩性野外难以准确认定,之间呈过渡渐变接触,其最主要的特征是每种岩石都富含石榴子石。其中内蒙古中部的石榴石花岗岩研究程度相对较高^[10-26],通常认为,含石榴子石过铝质花岗岩属S型重熔花岗岩^[27]。

本文研究的石榴石二长花岗岩1:20万区域地质调查时归于太古代早期侵入岩($\gamma_1^{(2)}$),称蛮汗山(原报告写为“蛮汉山”)岩体,岩性为灰色中粗粒似斑状花岗岩,成因类型为半原地侵入-交代型花岗岩^[8];1:5万区域地质调查时将其北部的同类岩石称为大榆树石榴花岗岩(Ar_3)^[8],系孔兹岩系变质岩层就地深熔作用的产物,是在中太古代时期集宁岩群形成之后本区经历麻粒岩相高级变质作用改造的结果^[26]。近年来开展的1:25万区域地质调查将蛮汗山岩体厘定为弱片麻状(变斑状)石榴石黑云母二长花岗岩等多个地质单元。本文在前人研究的

基础上,进一步对石榴石(变斑状)二长花岗岩进行了LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、常量元素、微量元素(包括稀土元素)等测试,以确定石榴石二长花岗岩的形成时代,并对其成因进行了讨论。

2 地质背景

研究区位于内蒙古呼和浩特市东南、凉城县以西,基岩裸露,形成陡峭的山峰,最高峰为蛮汗山,海拔高度为2305 m。古元古代侵入岩广布,出露面积最大的是弱片麻状石榴石二长花岗岩,另外零星分布有变质基性岩(二辉斜长麻粒岩)、弱片麻状石榴石英云闪长岩、弱片麻状石榴石花岗闪长岩、弱片麻状含石榴石正长花岗岩,部分岩石可出现变斑晶及紫苏辉石。这些石榴石花岗岩具块度大、花色好、硬度大(耐磨)、易开采等特点,可作为装饰面料石材开采。凉城永兴湖周边有大面积石榴石花岗岩出露,为吸引游人,当地旅游部门在该岩石上刻下了“陨石”、“天外来石”等字样,这都是无科学依据的,在此也想呼吁相关部门要以事实为准绳,尊重科学,弘扬正能量,特别是旅游景区,更应尊重客观事实,本来是地下熔融而来,为何要写成是天上掉下来的呢?研究区出露的老地层为集宁岩群沙渠村岩组,为一套孔兹岩系^[28-35],多呈捕虏体、残留体等形式产出。下白垩统白女羊盘组火山岩分布零星;中新统汉诺坝组玄武岩组产状近于水平,多形成高平台地貌。沟壑的边缘分布有上更新统马

① 山西省地质调查院. 1:25万偏关县幅(J49C001003)区域地质调查报告(送审稿)[R]. 大同:山西省地质调查院, 2014.

② 内蒙古自治区地质调查院. 1:25万呼和浩特市幅(K49C004003)区域地质调查报告[R]. 呼和浩特:内蒙古自治区地质调查院, 2015.

③ 内蒙古自治区区域地质测量队. 1:20万区域地质测量报告K-49-35凉城幅[R]. 呼和浩特:内蒙古地质矿产勘查院, 1973.

④ 内蒙古地质调查院. 1:5万旗下营地区区域地质调查报告[R]. 呼和浩特:内蒙古地质矿产勘查院, 1999.

兰组黄土,古人类在此挖掘窑洞作为生活居所,内蒙古呼和浩特著名的“大窑文化”^[36-37]出土于此。沟谷中充填的为第四系全新统冲洪积、残坡积等沉积物。断裂构造较发育,北东向为主,其次是北西向,将原地质体切割成大小不等的菱形块体(图1)。

3 岩体特征

弱片麻状石榴石二长花岗岩体主要呈北东向带状展布,发育弱片麻理,局部呈块状产出。岩体内多见规模不等的新太古界集宁岩群沙渠村岩组矽线石榴片麻岩、石榴石变粒岩、紫苏斜长麻粒岩等包体。与古元古代变质基性岩、弱片麻状石榴石英云闪长岩、弱片麻状石榴石花岗闪长岩、弱片麻状石榴石正长花岗岩等呈侵入接触。

3.1 岩石学特征

岩石类型主要有2种,即弱片麻状石榴石二长花岗岩和弱片麻状变斑状石榴石二长花岗岩。

(1)弱片麻状石榴二长花岗岩,浅灰色,弱片麻状构造到块状构造,粒状变晶结构。主要由斜长石

(40%~50%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、石榴石(1%~10%)、黑云母(少量)等组成,副矿物有磁铁矿、磷灰石、独居石、钛铁矿、钛磁铁矿等。斜长石0.5~3.5 mm,他形粒状变晶,绢云母化;钾长石为显微条纹长石,比较干净,发育显微条纹构造,呈0.5~2 mm的他形粒状;石英0.3~3 mm,粒状或压扁状;石榴石为0.5~4 mm的粒状,部分石英等包裹体构成筛状变晶;黑云母浅黄—深棕红色,为0.3~0.5 mm的片状。变质矿物组合 $Alm+Pl+Kf+Q+Bi$,为高角闪岩相变质。

(2)弱片麻状变斑状石榴石二长花岗岩,灰色,岩石具似斑状变晶结构,基质具粒状变晶结构、变余细粒花岗结构,弱片麻状到块状构造。变斑晶由钾长石和石榴子石组成,钾长石(5%~15%)为半自形—他形粒状,弱土化,主要由条纹长石组成,粒径为10~20 mm;石榴子石(5%)为6.5 mm左右的粒状,有时成聚合斑晶。基质中钾长石(条纹长石)25%~40%,斜长石20%~30%,反条纹长石5%,石英20%~25%,蠕英石少量,石榴子石5%~20%,黑云母

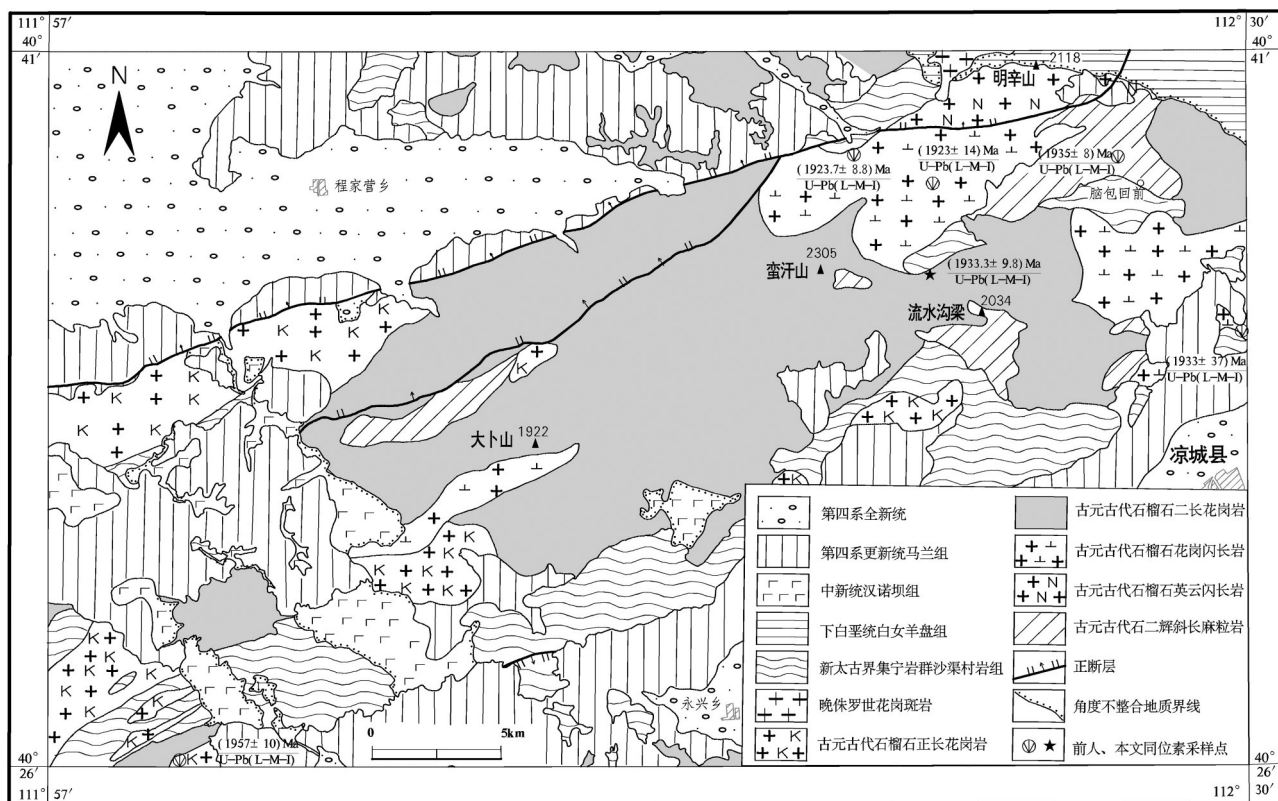


图1 内蒙古凉城地区地质略图

Fig.1 Geological sketch map of Liangcheng area, Inner Mongolia

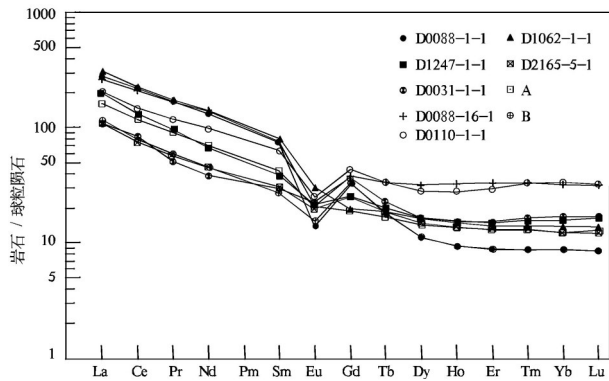


图2 凉城地区古元古代石榴石二长花岗岩球粒陨石标准化稀土模式图

Fig.2 Chondrite-normalized REE patterns for Paleoproterozoic garnet monzonitic granite in the Liangcheng area, Inner Mongolia

2%~5%,角闪石2%,磁铁矿<3%,副矿物有磷灰石、锆石、独居石、白钛矿、钛铁矿等。斜长石0.2~5 mm,粒状,具弱土化,发育聚片双晶,部分为反条纹长石;钾长石呈0.2~5 mm的粒状,主要由微斜长石和条纹长石组成;石英为0.2~5 mm的他形粒状,波状消光;石榴子石为0.5~2 mm的粒状;黑云母浅黄—深棕褐色,0.2~2 mm的片状,沿解理有少量铁质析出;角闪石以0.2~2 mm的柱粒状为主,次闪石化。

锆石(0.27 mg/g)呈粉色,次浑圆—浑圆粒状、柱粒状、断柱状,晶体裂纹较发育,表面见凹坑沟槽等溶蚀痕迹,具轻微水化现象,多有铁染。具似毛玻光泽、弱金刚光泽,呈透明—半透明状,见固相黑包体。粒径0.02~0.25 mm者为主,0.25~0.5 mm者少,个别0.8 mm。伸长系数1~2者为主,2~5者少。

3.2 岩石化学、地球化学特征

弱片麻状石榴石二长花岗岩、弱片麻状变斑状石榴石二长花岗岩的主量元素、稀土元素及微量元素分析结果列于表1(弱片麻状石榴花岗岩求平均值时,主量元素45个样、稀土元素42个样、微量元素32个样;含石榴浅粒岩、矽线石榴片麻岩、含矽线石榴变粒岩求平均值时,主量元素33个样、稀土元素20个样、微量元素13个样;主量元素中前人将H₂O⁺和烧失量均统计为烧失量,稀土元素前人的样品多数没分析Y,因此ΣREE平均值中不包括Y的含量,微量元素前人的样品多数没有分析Pb)。SiO₂含量60.32%~70.60%,在APQ图解(图解略)中

除D0088-1-1样品落入花岗闪长岩区外,其他样品均落在二长花岗岩区;Al₂O₃含量为14.29%~17.60%,A/CNK(分子摩尔比)为1.13~1.59,均大于1.1,是过铝质—强过铝质花岗岩^[3],属钙碱性系列^[10];Na₂O含量2.26%~4.02%,K₂O含量1.97%~4.39%,Na₂O+K₂O含量4.74%~7.12%,平均5.89%,富钾,多数样品K₂O/Na₂O>1,里特曼指数σ在0.81~2.56。Fe、Mg、Ca及Ti和P含量均很低。标准矿物中未出现Di(透辉石),而C(刚玉)值为1.58~5.14,均大于1%,属S型花岗岩。石榴石花岗岩的主量元素地球化学成分与含石榴浅粒岩、矽线石榴片麻岩、含矽线石榴变粒岩等变质表壳岩的主量元素成分也十分接近(表1),表现出它们的同源性。

弱片麻状(变斑状)石榴石二长花岗岩稀土总量(ΣREE)偏高,在181.7×10⁻⁶~469.5×10⁻⁶,轻重稀土分馏强烈, Eu呈明显的负异常(δEu=0.26~0.94),稀土配分曲线呈右倾“V”字型(图2)轻稀土分布曲线较陡、重稀土分布曲线较平缓。表明富集轻稀土元素、亏损重稀土元素,且与变质表壳岩(平均值)的稀土配分曲线形态一致,体现出二者的亲缘关系,反映轻重稀土分馏程度的La_N/Yb_N=6.7~33.6,反映重稀土分馏程度的Gd_N/Yb_N=1.67~9.51。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中,石榴石二长花岗岩与变质表壳岩(平均值)的分布形式也极为相似(图3)。石榴石二长花岗岩总体表现为强烈亏损Nb、Ta、P、及Ti等高场强元素(HFSE),富集Ba、K、Zr、Hf、Nd、Rb等大离子亲石元素。它们具有低的Sr含量(201×10⁻⁶~297×10⁻⁶)及低的Yb含量(1.81×10⁻⁶~6.95×10⁻⁶)(表1)。Zr、Hf与孔兹岩相比相明显增多,Zr/Hf比值均>30,平均值为37.9。Y/Ho比值较集中,在23.6~27.2。

4 样品位置及锆石分析方法

LA-MC-ICP-MS研究样品D0031-1-1,采自蛮汗山东弱片麻状变斑状含石榴黑云二长花岗岩。采样点位GPS:112°21'17"E,40°36'22"N。样品新鲜,原始样重5.84 kg,锆石黄色,干净新鲜,阴极发光图像环带较为发育(图4),显示为岩浆结晶锆石。

用于测年的锆石在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成分选,样品采用常规方法进行破

表1 凉城地区古元古代石榴石二长花岗岩主量元素(%)、稀土元素和微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 1 Content of major (%), REE and trace elements (10^{-6}) for Paleoproterozoic garnet monzonitic granite in the Liangcheng area, Inner Mongolia

样品号	D0088-1-1	D1247-1-1	D0031-1-1	D0088-16-1	D0110-1-1	D1062-1-1	D2165-5-1	A	B
岩性	弱片麻状 石榴石 二长花岗岩	弱片麻状 石榴石 二长花岗岩	弱片麻状变斑 状石榴石 二长花岗岩	弱片麻状变 斑状石榴石 二长花岗岩	弱片麻状 石榴石 二长花岗岩	弱片麻状变斑状 石榴石 二长花岗岩	弱片麻状变 斑状石榴石 二长花岗岩	弱片麻状石 榴花岗岩 (平均值)	含石榴浅粒岩、 砂线石榴片麻 岩、含砂线石榴 变粒岩(平均值)
SiO ₂	66.4	70.6	62.85	64.1	68.12	60.32	69.02	69.43	63.43
TiO ₂	0.97	0.64	1.12	1.03	0.90	1.19	0.46	0.56	0.70
Al ₂ O ₃	17.22	14.29	17.17	16.43	15.02	17.6	16.17	15.2	18.67
Fe ₂ O ₃	0.47	1.24	1.41	0.81	1.10	1.58	0.46	1.15	3.85
FeO	2.80	3.69	4.48	5.22	4.38	5.41	3.59	2.32	3.01
MnO	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.04	0.05	0.10
MgO	1.77	1.94	1.80	2.36	0.90	2.24	1.09	1.09	2.28
CaO	3.27	1.87	2.81	2.63	3.14	3.76	1.82	2.00	0.95
Na ₂ O	4.02	2.71	2.73	2.48	2.57	2.90	2.45	3.06	1.79
K ₂ O	1.97	2.03	4.39	3.50	2.66	3.65	3.58	4.03	3.67
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.17	0.09	0.22	0.28	0.08	0.12	0.07
H ₂ O ⁺	0.54	0.31	0.41	0.65	0.38	0.36	0.84	/	/
烧失量	0.92	0.77	0.78	1.12	0.76	0.77	1.10	1.00	1.50
总量	100.45	100.2	100.18	100.48	100.21	100.15	100.7	100.0	100.0
A/CNK	1.17	1.42	1.19	1.3	1.17	1.13	1.44	1.17	2.16
σ	1.53	0.81	2.56	1.69	1.09	2.47	1.39	1.90	1.46
La	84.9	60.9	32.6	80.1	63.0	95.9	33.4	49.2	35.4
Ce	174	107	67	170	118	181	60.4	93.9	62.8
Pr	20.2	11.8	6.09	20.5	14.4	21.2	6.86	10.9	7.22
Nd	78.2	39.8	22.7	82.9	58.5	83.7	26.4	41.4	26.8
Sm	14.2	7.51	5.58	14.7	12.3	15.6	5.88	8.14	5.25
Eu	1.01	1.52	1.62	1.55	1.85	2.22	1.44	1.51	1.13
Gd	8.39	6.52	9.19	9.75	11.2	5.07	6.37	4.82	8.39
Tb	0.84	0.94	1.07	1.56	1.57	0.87	0.87	0.78	0.84
Dy	3.55	5.21	5.18	10.1	8.98	5.23	4.67	4.51	3.55
Ho	0.67	1.08	1.08	2.32	1.99	1.07	0.98	0.97	0.67
Er	1.84	3.11	3.17	6.84	6.09	2.96	2.69	2.68	1.84
Tm	0.28	0.5	0.53	1.07	1.05	0.46	0.42	0.42	0.28
Yb	1.81	3.24	3.48	6.65	6.95	2.86	2.54	2.57	1.81
Lu	0.27	0.52	0.54	1.01	1.04	0.44	0.39	0.41	0.27
Y	18.3	28.1	21.9	27.3	58.9	50.9	28.7	/	/
Σ REE	408.5	277.8	181.7	436.4	365.8	465.5	182.0	222.2	156.3
δ Eu	0.26	0.65	0.94	0.38	0.5	0.49	0.79	0.619	0.677
Rb	83.5	39.3	131	90.5	63.9	97.7	107	107	141
Ba	528	478	1584	790	1069	1153	896	830	578
Sr	297	164	267	201	213	273	205	210	164
Ta	0.48	0.16	0.91	0.45	0.94	0.82	0.43	0.55	0.21
Nb	12.2	2.75	21.3	14.2	16.1	20.9	6.26	17.2	4.24
Hf	4.83	5.91	7.72	12.7	11.2	11.7	6.82	6.21	3.96
Zr	197	227	284	473	419	443	249	232	146
Th	19.2	2.6	10	29.5	10.4	9.37	6.94	8.08	3.14
U	1.09	0.47	1.06	1.36	0.63	0.54	0.64	0.88	0.64
Pb	18.8	16.6	24	23.4	15.2	18.5	20.2	/	/

注:主量、微量元素由河北省区域地质矿产调查研究所实验室采用GB/14506-28-2010等, Axios max X分析(2013); 稀土元素由北京大学稀土实验室采用ICP-MS测试(2013)。

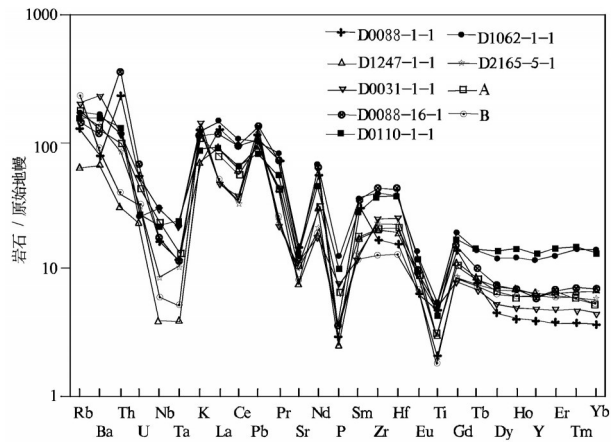


图3 凉城地区古元古代石榴石二长花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.3 Primitive mantle normalized trace element spider diagrams for Paleoproterozoic garnet monzonitic granite in the Liangcheng area, Inner Mongolia

碎,粉碎到80目,经浮选和磁选后,再在双目镜下挑选裂纹少、透明度较好、干净的锆石用以制靶。将锆石用环氧树脂制成样品靶,并抛光至锆石颗粒中心位置^[38],全部过程由天津地质矿产研究所同位素

实验室完成。

采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)进行锆石微区原位U-Pb同位素测定,由天津地质矿产研究所同位素实验室完成,分析仪器是Thermo Fisher公司生产的Neptune,其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,激光器为美国ESI公司生产的UP193-FXARF准分子激光器,详细的实验原理和操作流程参见李怀坤等^[39-40]文献。锆石U/Pb比值及年龄校准选用标准锆石91500,锆石同位素比值、元素含量以及年龄计算、谐和图等绘制采用中国地质大学刘勇胜研发的ICPMSDataCal程序和Ludwig的Isoplot程序进行数据处理,采用GJ-1作为外部锆石年龄标准进行同位素分馏校正,应用²⁰⁸Pb校正法对普通铅进行校正^[41],利用NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。误差为1σ。

5 分析结果

弱片麻状石榴石二长花岗岩中25个锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb同位素分析结果及年龄值列

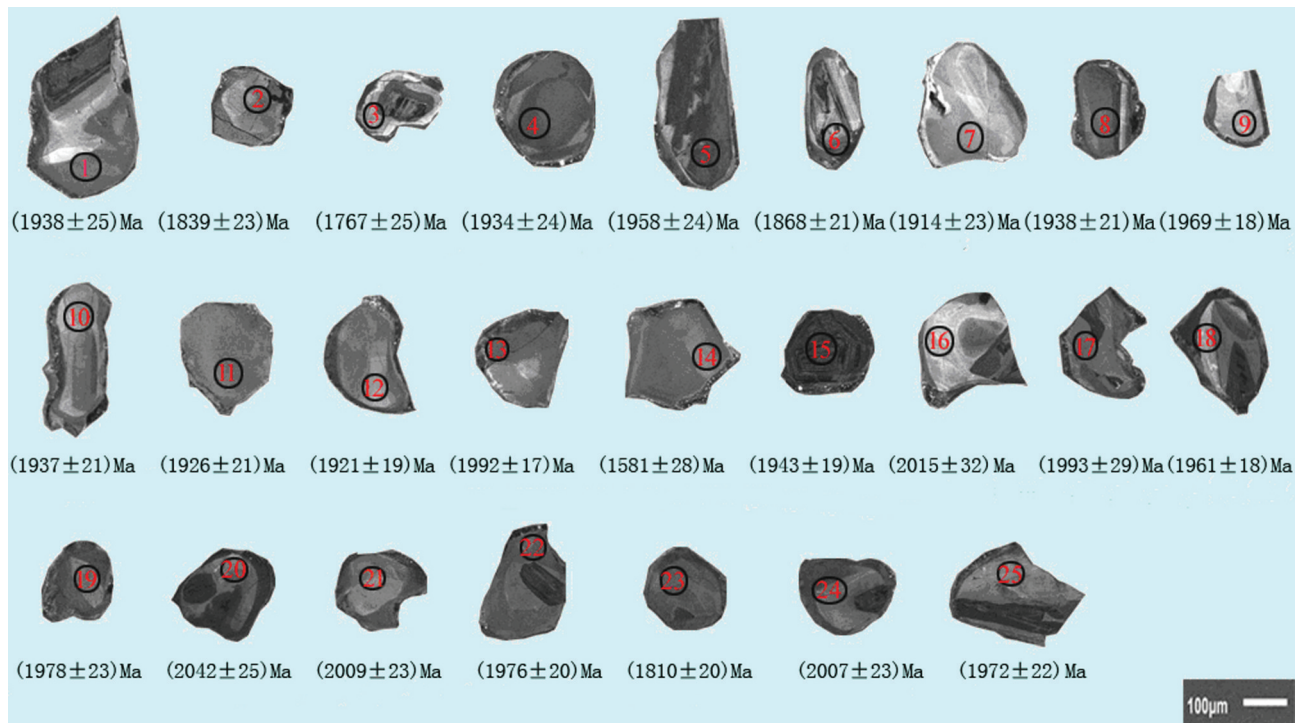


图4 古元古代石榴石二长花岗岩锆石微区阴极发光图像及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄
Fig.4 Cathodoluminescence (CL) images and ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of zircon domains from Paleoproterozoic garnet monzonitic granite samples

于表2。

样品D0031-1-1中锆石颗粒较小,所选锆石粒径100~300 μm ,晶体形态较好(图4),无磨圆,总体上结构比较均一,发育核、幔、边结构,核部与幔部界线模糊,幔部与边部界线清晰,具清晰韵律环带构造,属岩浆锆石,反映其未搬运或搬运距离极短。25个分析数据点构成一条线性很好的不一致线,绝大部分点成群分布于一致曲线上或其附近(图5)。部分分析点结果偏离一致曲线较远,可能是岩石形成后锆石发生过Pb丢失所致^[42-45]。

所测定的锆石无论是核部还是边缘,年龄均较稳定,25个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的变化范围为(1581 \pm 28)~(2042 \pm 25)Ma,18个测点的加权平均值为(1933.3 \pm 9.8)Ma(MSWD=1.5, $n=18$); $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄范围在(1746 \pm 18)~(2083 \pm 20)Ma。锆石中U含量为 48.6×10^{-6} ~ 816.1×10^{-6} ,变化较大。

(1933.3 \pm 9.8)Ma代表锆石结晶年龄,即代表了石榴石二长花岗岩的原岩成岩年龄,表明该岩浆岩形成于古元古代中期。

6 讨 论

6.1 成因讨论

该地区的石榴石花岗岩具富硅,过铝,高钾和钠,低钙、镁、铁和磷等特点,主量元素、微量元素等均表明其与新太古代变质表壳岩(集宁岩群孔兹岩系)有一定的亲缘关系^[20,21]。在野外宏观露头,变质表壳岩呈大小不等的残留体、捕掳体产于石榴石花岗岩中,二者界线或清晰或渐变过渡。弱片麻状石榴石花岗岩的A/CNK(分子比)值均大于1.1,标准矿物C(刚玉)含量也都大于1%,具S型花岗岩的特征;Na₂O除D0088-1-1外,其余均<3%;岩石中普遍含石榴子石,具地壳重熔型花岗岩特点。由此看

表2 古元古代石榴石二长花岗岩LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄分析结果
Table 2 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb data from Paleoproterozoic garnet monzonitic granite

测点号	含量/ 10^{-6}				同位素比值						表面年龄/Ma			
	Th/U			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
1	62.3	67	161.7	0.424	0.1178	0.0010	5.696	0.059	0.3507	0.0046	1931	20	1938	25
2	25.2	85	48.6	1.787	0.1260	0.0029	5.734	0.059	0.3301	0.0042	1937	20	1839	23
3	224.3	33	720.7	0.048	0.1146	0.0009	4.986	0.056	0.3154	0.0044	1817	21	1767	25
4	94.2	80	251.8	0.327	0.1174	0.0007	5.667	0.051	0.3499	0.0043	1926	17	1934	24
5	130.5	123	339.2	0.372	0.1193	0.0010	5.836	0.053	0.3549	0.0044	1952	18	1958	24
6	154.2	24	465.2	0.054	0.1162	0.0010	5.387	0.051	0.3361	0.0039	1883	18	1868	21
7	43.6	130	86.4	1.542	0.1178	0.0011	5.613	0.062	0.3456	0.0042	1918	21	1914	23
8	107.5	17	310.5	0.056	0.1185	0.0009	5.732	0.054	0.3508	0.0038	1936	18	1938	21
9	42.1	111	83.0	1.377	0.1216	0.0013	5.992	0.069	0.3573	0.0032	1975	23	1969	18
10	29.8	81	60.3	1.377	0.1182	0.0013	5.713	0.069	0.3505	0.0038	1933	23	1937	21
11	52.6	127	113.4	1.145	0.1178	0.0013	5.657	0.054	0.3482	0.0038	1925	18	1926	21
12	32.3	112	56.4	2.034	0.1179	0.0019	5.644	0.096	0.3473	0.0034	1923	33	1921	19
13	52.6	74	118.9	0.638	0.1293	0.0009	6.456	0.052	0.3621	0.0032	2040	16	1992	17
14	227.9	34	816.1	0.0421	0.1196	0.0007	4.585	0.048	0.2779	0.0049	1746	18	1581	28
15	39.4	160	62.7	2.6150	0.1186	0.0013	5.753	0.069	0.3518	0.0035	1939	23	1943	19
16	282.4	43	778.6	0.057	0.1172	0.0012	5.931	0.067	0.3670	0.0059	1966	22	2015	32
17	91.0	73	234.1	0.320	0.1189	0.0009	5.941	0.063	0.3623	0.0053	1967	21	1993	29
18	37.6	77	83.7	0.941	0.1206	0.0011	5.909	0.060	0.3555	0.0032	1963	20	1961	18
19	33.4	135	52.6	2.640	0.1183	0.0014	5.858	0.078	0.3591	0.0042	1955	26	1978	23
20	33.5	76	65.8	1.188	0.1320	0.0012	6.780	0.067	0.3727	0.0046	2083	20	2042	25
21	36.0	154	50.9	3.093	0.1334	0.0016	6.724	0.104	0.3656	0.0042	2076	32	2009	23
22	45.3	206	67.0	3.159	0.1173	0.0010	5.801	0.062	0.3586	0.0037	1947	21	1976	20
23	60.6	262	103.9	2.591	0.1186	0.0013	5.300	0.050	0.3241	0.0035	1869	18	1810	20
24	38.9	134	69.3	1.983	0.1200	0.0011	6.045	0.070	0.3652	0.0042	1982	23	2007	23
25	53.4	143	110.9	1.322	0.1199	0.0011	5.918	0.067	0.3579	0.0039	1964	22	1972	22

注:天津地质矿产研究所实验室测试(2013)。

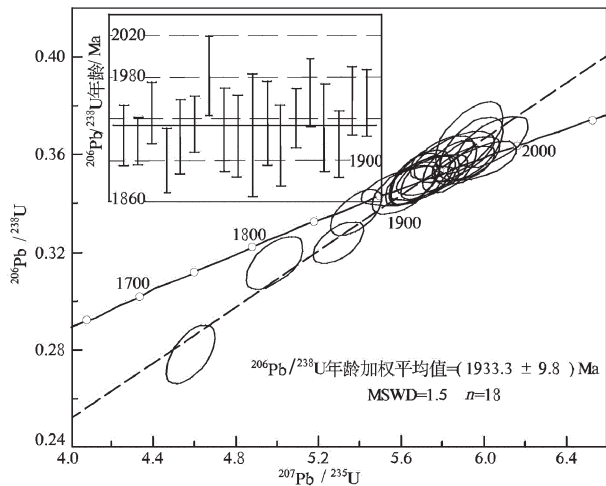


图5 古元古代石榴石二长花岗岩锆石微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram for analyses of zircon domains from Paleoproterozoic garnet monzonitic granite

来,弱片麻状石榴花岗岩的形成不是深部酸性岩浆侵位的,而是由新太古界集宁岩群一套富铝质岩石(孔兹岩系)部分熔融的产物。SiO₂、Al₂O₃等主量元素的含量变化大,可能与部分熔融程度有关,TiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO、Na₂O含量随SiO₂含量的增加而减少。轻稀土富集,轻重稀土分馏明显,重稀土元素较为平坦,具有典型强过铝花岗岩的稀土元素特征。轻稀土元素碱性较强,部分熔融时优先进入熔体中,而重稀土元素部分熔融时则易保留在残余固相中,因此造成该石榴石花岗岩中重稀土元素含量明显偏低^[26]。在露头上,弱片麻状石榴花岗岩中的成分变化较大,表现在暗色矿物石榴石和黑云母含量的变化,有些岩石暗色矿物以石榴石为主,黑云母极少,有些岩石黑云母含量多。这种矿物成分的不均匀性导致化学成分的变化,同时也与重熔后的熔体成分没有完全均匀化有关,另外也反映出重熔岩浆岩的源岩物质组成的不均匀性。

片麻状石榴石花岗岩的SiO₂、CaO和Na₂O+K₂O平均含量较变质表壳岩富集,而Al₂O₃、Fe₂O₃和FeO的平均含量较低,这是由于在熔融过程中铁镁质组份相对难熔而不易进入熔体残留下来所造成的,反映在矿物的变化是石英、长石含量多,而石榴子石、

黑云母等铁镁质矿物含量较少。石榴石花岗岩的微量元素Nb、P、Ti呈明显负异常,这是陆壳岩石熔融所产生的岩浆岩具有的共性。

本区石榴石二长花岗岩的CaO/Na₂O比值在1.0±(>0.3),Rb/Sr(<1.0)和Rb/Ba(<0.3)比值低,反映源岩为杂砂岩^[11]。Zr、Hf含量与孔兹岩相比增多,且Zr/Hf比值均大于30,平均为37.85,与球粒陨石的Zr/Hf比值(35~40)相似,暗示岩浆存在明显的锆石分异。

综上所述,研究区内石榴石花岗岩与变质表壳岩间存在一定的继承性,但岩石化学、微量元素和稀土元素含量也存在一定差异,不同地区的石榴石花岗岩也有所变化,这也说明强过铝花岗岩来自孔兹岩部分熔融重熔^[25]后,熔浆没有发生充分的流动,还未来得及均一化就开始结晶。进一步说明石榴石花岗岩为原地-半原地深熔花岗岩,除大面积二长花岗岩出露以外,与之配套的岩石还有英云闪长岩类、花岗闪长岩类等。结合岩石化学、地球化学特征及大地构造环境等综合分析,古元古代以二长花岗岩为主的变质深成岩形成于后碰撞环境^{[10-11]①②}。

6.2 地质意义

区域上,关于内蒙古中部重熔型花岗岩的年龄数据已获得了不少,均集中在古元古代,大体可划分为3个峰期:2500~2400 Ma、2000~1900 Ma、1900~1800 Ma。

2500~2400 Ma,这一区间的年龄值主要出现在大青山(呼和浩特市北)、乌拉山(包头地区),反映的是与活动大陆边缘岛弧环境有关的早期侵入年龄。钟长汀等在卓资-武川地区获SHRIMP年龄石英闪长岩(2435±12)Ma、片麻状角闪二长花岗岩(2416±8)Ma、角闪二长花岗岩(2494±16)Ma^[18],通过岩石学、地球化学研究,认为其为华北克拉通具有现代意义的俯冲作用形成的岩浆记录。在2400~2300 Ma,华北克拉通东部古陆向西部古陆发生俯冲作用,地幔楔熔融形成西北部以含辉石闪长岩、石英闪长岩为代表的岛弧花岗岩^[11]。刘建辉等在乌拉山地区获黑云二长花岗质片麻岩(2456±7.2)Ma、花岗闪长质片麻岩(2454±6.8)Ma、强糜棱岩化紫苏花岗岩(2455±15)Ma(LA-MC-ICP-MS)^[13],

①内蒙古自治区地质调查院. 1:25万呼和浩特市幅(K49C004003)区域地质调查报告[R]. 呼和浩特:内蒙古自治区地质调查院, 2015.

②山西省地质调查院. 1:25万偏关县幅(J49C001003)区域地质调查报告(送审稿)[R]. 大同:山西省地质调查院, 2014.

认为该区古元古代花岗岩的形成时代为2.45 Ga, 花岗质岩类的岩石组合及地球化学特征等暗示其可能形成于活动大陆边缘岛弧环境, 与地幔岩浆底侵有关的玄武质下地壳的部分熔融。张臣等在大青山地区料木山黑云母花岗岩获锆石 SHRIMP 年龄(2430±19) Ma^[3], 可能代表鄂尔多斯陆块与阴山微陆块碰撞造山岩浆热事件年龄。区域上埃达克质岩^[24]、赞歧岩、Colcepet 花岗岩同位素年龄均为2470~2330 Ma, 预示着这一地区在古元古代早期可能已经出现与板块消减相关的陆-陆碰撞造山带。

2000~1900 Ma, 这一年龄主要出现于内蒙古中部的集宁—凉城一带, 代表着重熔型强过铝石榴石花岗岩的形成时代, 即源岩的熔融时代, 代表了华北克拉通北缘古元古代一次造山作用的时代(为一次大规模的区域性热事件)。本文在蛮汗山石榴石二长花岗岩中获得的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄(1933.3±9.8) Ma, 区域上或相邻区域与其相吻合的年龄数据也不少。旗下营地区 1:5 万区域地质调查^①时采用单颗粒锆石 U-Pb 法获得弱片麻状石榴英云闪长岩年龄 1979 Ma、弱片麻状变斑状石榴英云闪长岩年龄值 1991.6 Ma; 钟长汀等在凉城—和林带获 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄石榴二长花岗岩(1921±16) Ma、石榴紫苏花岗岩(1908±13) Ma、石榴紫苏花岗岩(1933±7) Ma^[11]。陈海东等在凉城北脑包回前的紫苏斜长麻粒岩中获 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄(1935±9) Ma^[23]; 1:25 万呼和浩特市幅区域地质调查时在和林—凉城地区不同类型的石榴花岗岩中获得多个 LA-MC-ICP-MS 锆石同位素年龄为 1922~1933 Ma^②(部分年龄数据待发表); 张华锋等在凉城北 2 km 处石榴石花岗岩中获(1922±25) Ma^[24]; 王惠初等对华北克拉通中部地区的古元古代锆石年龄数据统计后认为 1.8~1.95 Ga 代表了古元古代末期造山事件(构造热事件), 且与全球 Columbia 超大陆汇聚事件相关^[14], 其锆石 U-Pb 年龄代表碰撞后大规模岩浆底侵时间, 碰撞峰期年龄应在 1950~1900 Ma, 同碰撞时限应在 1900 Ma 之前^[16]。

1900~1800 Ma 代表了碰撞后抬升过程中的中压麻粒岩相和角闪岩相退变作用, 关于该地区古元

古代地质构造事件演化, 诸多学者进行过不同程度的论述^[10,11,15,16]。

7 结 论

(1) 石榴石二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(1933.3±9.8) Ma, 为该区花岗岩原岩年龄, 表明该区石榴石花岗岩形成于古元古代(2000~1900 Ma)。

(2) 研究区石榴石花岗岩在空间上与孔兹岩系密切共生, 在矿物组成和地球化学特征上大体相似, 反映出它们之间的亲缘性。石榴石花岗岩为孔兹岩系的深部重熔产物, 即为重熔型石榴石花岗岩。

(3) 古元古代石榴石花岗岩形成于后碰撞环境。

致谢: 文中引用了内蒙古自治区地质调查院等多家单位的研究成果, 野外工作过程中得到内蒙古地质矿产勘查院大力支持, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 陈斌, 徐备. 内蒙古苏左旗地区古生代两类花岗岩类的基本特征和构造意义[J]. 岩石学报, 1996, 12(4): 546-561.
Chen Bin, Xu Bei. The main characteristics and tectonic implications of two kinds of Paleozoic granitoids in Sunidzuqi, central Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(4): 546-561 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张玉清. 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪埃达克质花岗岩类地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(4): 329-338.
Zhang Yuqing. Geochemical characteristics of Permian adakitic granodiorite in Bayinwula of Sonid Left Banner, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(4): 329-338 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张臣, 韩宝福, 刘树文, 等. 内蒙大青山地区黑云母花岗岩 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 561-567.
Zhang Chen, Han Baofu, Liu Shuwen, et al. SHRIMP U-Pb dating of biotite granites in Daqingshan, Inner Mongolia, and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(3): 561-567 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李大鹏, 陈岳龙, 王忠, 等. 内蒙古不同时代花岗岩类 Nd、Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 821-855.
Li Dapeng, Chen Yuelong, Wang Zhong, et al. Nd-Pb isotopic composition characteristics and geological significances of

① 内蒙古地质调查院. 1:5 万旗下营地区区域地质调查报告[R]. 呼和浩特: 内蒙古地质矿产勘查院, 1999.

② 内蒙古自治区地质调查院. 1:25 万呼和浩特市幅(K49C004003)区域地质调查报告[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区地质调查院, 2015.

- granitoids with different ages in Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 821–855 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李舫, 王涛, 童英. 中亚造山系中南段早中生代花岗岩类时空分布特征及构造环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 642–662.
Li Shan, Wang Tao, Tong Ying. Spatial – temporal distribution and tectonic settings of Early Mesozoic granitoids in the middle–south segment of the Central Asia Orogenic System[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 642–662 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周振华, 吕林素, 王挨顺. 内蒙古黄岗锡铁矿床花岗岩深部源区特征与构造岩浆演化: Sr–Nd–Pb–Hf 多元同位素制约[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(1): 1–14.
Zhou Zhenhua, Lv Linsu, Wang Aishun. Deep source characteristics and tectonic–magmatic evolution of granites in the Huanggang Sn–Fe deposit, Inner Mongolia: Constraint from Sr–Nd–Pb–Hf multiple isotopes[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张玉清, 张建, 屈强, 等. 内蒙古阿德拉嘎乌拉正长花岗岩锆石 U–Pb 年龄[J]. *地质与资源*, 2013, 22(4): 308–312.
Zhang Yuqing, Zhang Jian, Qu Qiang, et al. U–Pb age of zircon from the syenogranite in Adelagawula, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(4): 308–312 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨岳清, 吕博, 孟贵祥, 等. 内蒙古东七—山花岗岩地球化学、锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及岩体形成环境探讨[J]. *地球化学*, 2013, 34(2): 163–175.
Yang Yueqing, Lv Bo, Meng Guixiang, et al. Geochemistry, SHRIMP Zircon U–Pb dating and formation environment of Dongqiyishan granite, Inner Mongolia [J]. *Geochimica*, 2013, 34(2): 163–175 (in Chinese with English abstract).
- [9] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–294.
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. *The Ways of Investigation on Granitoids* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1–294 (in Chinese with English abstract).
- [10] 钟长汀, 邓晋福, 武永平, 等. 华北克拉通北缘中段古元古代强过铝质花岗岩地球化学特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 389–397.
Zhong Changting, Deng Jinfu, Wu Yongping, et al. Geochemical characteristics and tectonic significations of Paleoproterozoic strongly peraluminous granitoids in the central segment of the northern margin of the North China craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(3): 389–397 (in Chinese with English abstract).
- [11] 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录: S 型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄[J]. *地球化学*, 2007, 36(6): 633–637.
Zhong Changting, Deng Jinfu, Wan Yusheng, et al. Magma Recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of North China Craton: Geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S–type granitoids[J]. *Geochimica*, 2007, 36(6): 633–637 (in Chinese with English abstract).
- [12] 董春艳, 万渝生, 徐仲元, 等. 华北克拉通大青山地区古元古代晚期孔兹岩系: 锆石 SHRIMP U–Pb 定年[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(12): 1851–1862.
Dong Chunyan, Wan Yusheng, Xu Zhongyuan, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating of late Paleoproterozoic kondalites in the Daqing Mountain area on North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(12): 1851–1862 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 等. 乌拉山地区早古元古代花岗质片麻岩的锆石 U–Pb 年代学、地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 485–500.
Liu Jianhui, Liu Fulai, Ding Zhengjiang, et al. Zircon U–Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Early Paleoproterozoic granitoid gneisses in Ulashan area, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 485–500 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王惠初, 陆松年, 赵风清, 等. 华北克拉通古元古代地质记录及其构造意义[J]. *地质调查与研究*, 2005, 28(3): 129–143.
Wang Huichu, Lu Songnian, Zhao Fengqing, et al. The Paleoproterozoic geological records in North China craton and their tectonic significance [J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(3): 129–143 (in Chinese with English abstract).
- [15] 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2665–2682.
Zhai Mingguo, Peng Peng. Paleoproterozoic events in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2665–2682 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张华锋, 罗志波, 周志广, 等. 华北克拉通中北部古元古代碰撞造山时限: 来自强过铝花岗岩和韧性剪切时代的制约[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(1): 60–67.
Zhang Huafeng, Luo Zhibo, Zhou Zhiguang, et al. Paleoproterozoic collisional time in the sanggan area of the North China Craton: Constraints from age of regional ductile shearing and postcollisional super peraluminous granites [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29(1): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张旗. 华北克拉通中部在古元古代时是一个造山带吗?[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1029–1036.
Zhang Qi. The central belt of the North China Craton during Paleoproterozoic is an orogenic belt?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1029–1036 (in Chinese with English abstract).
- [18] 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 内蒙古大青山地区古元古代花岗岩: 地球化学、锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3172–3188.

- Zhong Changting, Deng Jinfu, Wan Yusheng, et al. Paleoproterozoic granitoids in the Daqingshan Mountain area, Inner Mongolia: Geochemistry, SHRIMP zircon dating and geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3172–3188 (in Chinese with English abstract).
- [19] 马铭株,董春艳,徐仲元,等. 内蒙古大青山地区古元古代早期榴云片麻岩(大青山表壳岩)深熔作用:地质、锆石年代学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1535–1548.
- Ma Mingzhu, Dong Chunyan, Xu Zhongyuan, et al. Anatexis of Early Paleoproterozoic garnet–biotite gneisses (Daqingshan supracrustal rocks) in Daqingshan, Inner Mongolia: Geology, zircon geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1535–1548 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴新伟,徐仲元,刘正宏,等. 内蒙古大青山地区石榴花岗岩的地质特征和岩相学特征[J]. *地质与资源*, 2013, 22(5): 347–359.
- Wu Xinwei, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, et al. Geology and petrography of the garnet granite in Daqingshan area, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(5): 347–359 (in Chinese with English abstract).
- [21] 宋海峰,徐仲元,刘正宏. 内蒙古大青山地区石榴混合花岗岩石地球化学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(5): 489–495.
- Song Haifeng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong. Geochemical characteristics and origin of garnet migmatitic granites in Daqingshan area, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(5): 489–495 (in Chinese with English abstract).
- [22] 董春艳,刘敦一,万渝生,等. 内蒙古大青山地区早前寒武纪变质岩的锆石 Hf 同位素组成和稀土模式[J]. *地质论评*, 2009, 55(4): 509–520.
- Dong Chunyan, Liu Dunyi, Wan Yusheng, et al. Hf isotope composition and REE pattern of zircons from Early Precambrian metamorphic rocks in the Daqing Mountains, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 2009, 55(4): 509–520 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈海东,黎娇,景耀祖,等. 内蒙古中部凉城地区紫苏斜长麻粒岩锆石年龄及地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1136–1142.
- Chen Haidong, Li Jiao, Jing Yaozu, et al. Zircon U–Pb dating of the hypersthene–plagioclase granulite in Liangcheng area of central Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1136–1142 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张华锋,罗志波,王浩铮. 内蒙凉城 2.0 Ga 变质花岗岩对超高温变质作用的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2391–2404.
- Zhang Huafeng, Luo Zhibo, Wang Haozheng. Paleoproterozoic 2.0 Ga meta–granite in the Liangcheng area, Inner Mongolia: Constraint on regional ultra–high temperature metamorphism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2391–2404 (in Chinese with English abstract).
- [25] 罗志波,张华锋,张若愚,等. 内蒙卓资—凉城地区古元古代变质过铝/强过铝花岗岩的形成温度:区域高温/超高温变质作用证据[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(2): 20–30.
- Luo Zhibo, Zhang Huafeng, Zhang Ruoyu, et al. Forming temperatures of paleoproterozoic metamorphic peraluminous–strong peraluminous granites in Zhuozi Liangcheng, Inner Mongolia: Evidence for regional high–ultra–high temperature metamorphism[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(2): 20–30 (in Chinese with English abstract).
- [26] 陶继雄,胡凤翔. 内蒙卓资山地区深熔作用形成的石榴混合花岗岩[J]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25(1): 59–64.
- Tao Jixiong, Hu Fengxiang. The formation of the garnet–bearing migmatitic granite in Zhuozishan Area, Inner Mongolia, China[J]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25(1): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张青伟,刘正宏,柴社立,等. 内蒙古乌拉特中旗乌兰地区含石榴石花岗岩锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(3): 745–752.
- Zhang Qingwei, Liu Zhenghong, Chai Sheli, et al. Zircon U–Pb dating of the garnet–bearing granite from Wulan area of Urud Zhongqi in Inner Mongolia and its geological Significance [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011, 41(3): 745–752 (in Chinese with English abstract).
- [28] 阎月华,刘文军. 关于内蒙与晋冀交界地区早前寒武纪灰片麻岩和孔兹岩的讨论[J]. *岩石学报*, 1996, 12(2): 329–342.
- Yan Yuehua, Liu Wenjun. Discussion on the Early Precambrian grey gneiss and khondalite in Nei Mongol–Shanxi–Hebei junction region, North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(2): 329–342 (in Chinese with English abstract).
- [29] 万渝生,耿元生,刘福来,等. 华北克拉通及邻区孔兹岩系的时代及对太古宙基底组成的制约[J]. *前寒武纪研究进展*, 2000, 23(4): 221–237.
- Wan Yusheng, Geng Yuansheng, Liu Fulai, et al. Age and composition of the khondalite series of the North China Craton and its adjacent area[J]. *Progress in Precambrian Research*, 2000, 23(4): 221–237 (in Chinese with English abstract).
- [30] 侯克斌,吴家富,马闯,等. 集宁岩群孔兹岩系的变质岩石学特征和沉积环境浅析[J]. *安徽地质*, 2013, 23(1): 7–12.
- Hou Kebing, Wu Jiafu, Ma Chuang, et al. Petrological features of metamorphic rocks in the Khondalite series of the Jining Rock Group and the sedimentary environment analysis[J]. *Geology of Anhui*, 2013, 23(1): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- [31] 吴昌华,钟长汀,陈强安. 晋蒙高级地体孔兹岩系的时代[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 289–302.
- Wu Changhua, Zhong Changting, Chen Qiang'an. Discussion on the age of Khondalite in Jin–Meng (Shanxi–Nei Mongol) high–grade Terrain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(3): 289–302 (in Chinese with English abstract).

- [32] 姜继圣. 孔兹岩系及其研究概况[J]. 长春地质学院学报, 1990, 20(2): 167-175.
Jiang Jisheng. A Review of Researches in Khondalite series[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1990, 20(2): 167-175 (in Chinese with English abstract).
- [33] 杨振升, 徐仲元, 刘正宏. 孔兹岩系事件与太古宙地壳构造演化[J]. 前寒武纪研究进展, 2000, 23(4): 206-212.
Yang Zhenshen, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong. Khondalite event and Archean crust structure evolution[J]. Progress in Precambrian Research, 2000, 23(4): 206-212 (in Chinese with English abstract).
- [34] 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等. 乌拉山-集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄-孔兹岩沉积时限的年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2639-2654.
Wu Changhua, Sun Min, Li Huimin, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Khondalites from the Wulashan and Jining high-grade terrain in northern margin of the North China Craton: Constraints on sedimentary age of the Khondalite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(11): 2639-2654 (in Chinese with English abstract).
- [35] 刘福来. 卓资孔兹岩系成因矿物学研究[J]. 矿物岩石, 1992, 12(4): 36-43.
Liu Fulai. The genetic mineralogy of the rocks of Khondalite series in Zuozhi, Nei Menggu, North China [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1992, 12(4): 36-43 (in Chinese with English abstract).
- [36] 孙黎明, 刘金峰, 张文山. 内蒙大窑文化遗址第四纪地层及古气候环境[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(2): 185-188.
Sun Liming, Liu Jinfeng, Zhang Wenshan. The Quaternary Layer and palaeoclimate environment in Dayao culture relics of Inner Mongolia[J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19(2): 185-188 (in Chinese with English abstract).
- [37] 魏永明. 内蒙古呼和浩特市大窑文化遗址旅游资源及其开发利用[J]. 干旱区资源与环境, 1997, 11(3): 94-99.
Wei Yongming. Tourism resources of dayao cultural remains in Hohhot and exploitation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1997, 11(3): 94-99 (in Chinese with English abstract).
- [38] 魏然, 王建国, 王义天, 等. 河北省撒岱沟门斑岩型铝矿床二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1736-1748.
Wei Ran, Wang Jianguo, Wang Yitian, et al. Zircon U-Pb dating of adamellite from the Sadaigoumen porphyry molybdenum deposit in Fengning, Hebei Province, and its significance[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1736-1748 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接受器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(增刊): 77.
Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, et al. Research on the dating zircon U-Pb age by LA-MC-ICPMS[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(Supp.): 77 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈丽丽, 程志国. 内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩岩石学[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 891-908.
Chen Lili, Cheng Zhiguo. Petrology and zircon chronology of the Dorolj granite in Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 891-908 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李承东, 冉焱, 赵利刚, 等. 温都尔庙群锆石的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3705-3714.
Li Chengdong, Ran Hao, Zhao Ligang, et al. LA-MC-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Wenduermiao Group and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3705-3714 (in Chinese with English abstract).
- [42] 张臣, 刘树文, 韩宝福, 等. 内蒙古商都大石沟花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 591-596.
Zhang Chen, Liu Shuwen, Han Baofu, et al. SHRIMP U-Pb dating of Dashigou biotite-K-felspar granites in Shangdu, Inner Mongolia, and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 591-596 (in Chinese with English abstract).
- [43] 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2007, 52(5): 591-601.
Miao Laicheng, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Hanjiayuanzi and Xinlin area Xinghuadukou Group and Zalantun Group in the Daxinling, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(5): 591-601 (in Chinese).
- [44] 李俊建, 翟裕生, 杨永强, 等. 再论内蒙古阿拉完善朱拉扎嘎金矿的成矿时代: 来自锆石 SHRIMP U-P 年龄的新证据[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 178-184.
Li Junjian, Zhai Yusheng, Yang Yongqiang, et al. Re-discussion on the metallogenic age of Zhulazaga gold deposit in Alashan area, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb SHRIMP age[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 178-184 (in Chinese with English abstract).
- [45] 邹光富, 林仕良, 李再会, 等. 滇西潞西邦木二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 中国地质, 2011, 38(1): 77-85.
Zou Guangfu, Lin Shiliang, Li Zaihui, et al. SHRIMP Zircon U-Pb dating of Bangmu admellite in Luxi, western Yunnan, and its tectonic implications[J]. Geology in China, 2011, 38(1): 77-85 (in Chinese with English abstract).