

内蒙古大青山地区新太古代晚期岩浆作用:来自锆石 SHRIMP U-Pb 定年的证据*

徐仲元¹ 万渝生² 董春艳² 马铭株² 刘敦一²

XU ZhongYuan¹, WAN YuSheng², DONG ChunYan², MA MingZhu² and LIU DunYi²

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2014-08-27 收稿, 2015-05-04 改回.

Xu ZY, Wan YS, Dong CY, Ma MZ and Liu DY. 2015. Late Neoproterozoic magmatism identified in Daqingshan, Inner Mongolia: SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6):1509–1517

Abstract This paper reports SHRIMP zircon U-Pb dating results of Late Neoproterozoic granitoids in Daqingshan, western North China Craton. Three samples dated in this study are taken from the south of Shiguai, include biotite monzogranitic gneiss, hypersthene quartz dioritic gneiss and dioritic gneiss. Based on mineral association, the biotite monzogranitic gneiss and hypersthene quartz dioritic gneiss underwent upper amphibolite-granulite facies metamorphism whereas the dioritic gneiss underwent amphibolite facies metamorphism. The zircon grains commonly show core-mantle-rim or core-rim textures. Dating on magmatic zircon domains yielded ages of $2484 \pm 7\text{Ma}$, $2494 \pm 12\text{Ma}$ and $2495 \pm 10\text{Ma}$, which is younger than real ages of the magmatic zircon because of later metamorphic recrystallization, and may be formed at Late Neoproterozoic. The rocks also recorded metamorphic zircon ages at $2441 \pm 7\text{Ma}$ to $2481 \pm 10\text{Ma}$ and $1847 \pm 35\text{Ma}$ to $1919 \pm 73\text{Ma}$, respectively. Combined early work, main conclusions can be drawn as follows: 1) There are different types of Neoproterozoic magmatic rocks, including monzogranite, quartz diorite and diorite, in the south of Shiguai, Late Neoproterozoic magmatism may extensively occur in the entire Daqingshan area. Late Paleoproterozoic khondalite Belt was developed on Archean basement or its adjacent area. 2) Similar to other geological bodies of the Early Paleoproterozoic in the Daqingshan area, the Late Neoproterozoic intrusive rocks commonly underwent tectono-thermal events at the early and late Paleoproterozoic, respectively.

Key words Neoproterozoic; Magmatism; Metamorphism; SHRIMP zircon dating; Daqingshan

摘要 本文报道了华北克拉通西部大青山地区新太古代晚期变质深成侵入岩的锆石 SHRIMP 年龄。本文涉及的 3 个样品取自大青山的石拐南部, 岩性为黑云母二长花岗质片麻岩、紫苏石英闪长质片麻岩和闪长质片麻岩。根据矿物组合, 黑云母二长花岗质片麻岩和紫苏石英闪长质片麻岩遭受高角闪岩相-麻粒岩相变质, 闪长质片麻岩遭受角闪岩相变质。锆石具核-幔-边或核-边结构。岩浆锆石年龄为 $2484 \pm 7\text{Ma}$ 、 $2494 \pm 12\text{Ma}$ 和 $2495 \pm 10\text{Ma}$, 考虑到岩石遭受后期构造热事件强烈改造, 岩浆锆石发生不同程度变质重结晶, 振荡环带变得模糊, 年龄很可能偏年轻, 岩浆锆石真实的形成年龄应更大一些, 形成于新太古代晚期。2 个样品记录早期变质锆石年龄为 $2441 \pm 7\text{Ma}$ 和 $2481 \pm 10\text{Ma}$; 2 个样品记录晚期变质锆石年龄为 $1847 \pm 35\text{Ma}$ 和 $1919 \pm 73\text{Ma}$ 。结合前人工作, 可得出如下结论: 1) 石拐地区存在新太古代晚期二长花岗岩、石英闪长岩和闪长岩等不同类型变质深成侵入岩。新太古代晚期岩浆作用在整个大青山地区很可能广泛发育, 古元古代晚期孔兹岩带是在太古宙基底之上或其邻区发展起来的。2) 与大青山地区其它古元古代早期以前的地质体类似, 新太古代晚期变质深成侵入岩普遍遭受古元古代早期和晚期构造热事件叠加改造。

关键词 新太古代; 岩浆作用; 变质作用; 锆石 SHRIMP 定年; 大青山

中图法分类号 P597.3

* 本文受国家“973”项目(2012CB416600)、国家自然科学基金项目(41472167)和中国地质调查局项目(12120114021301、1212011220465、1212010811033、1212011120142)联合资助。

第一作者简介: 徐仲元, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事前寒武纪地质研究, E-mail: xuzhy@jlu.edu.cn

1 引言

华北克拉通新太古代晚期构造岩浆热事件十分发育而不同于全球许多其它克拉通(Wan *et al.*, 2011; Zhai and Santosh, 2011)。在华北克拉通西部的阴山地块,新太古代晚期不同类型变质深成侵入岩广泛分布(Jian *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2014)。但是,在其南部古元古代晚期孔兹岩十分发育的大青山地区,存在新太古代晚期表壳岩系(桑干岩群),却未见可靠的新太古代晚期深成侵入岩的年龄报道。不但影响了大青山与华北克拉通其它地区早前寒武纪地质历史的对比研究,也制约了古元古代晚期孔兹岩系形成环境的了解。本文报道了大青山地区新太古代晚期变质深成侵入岩的锆石 SHRIMP 年龄,指出新太古代晚期岩浆作用在整个大青山地区很可能广泛存在。该研究还获得了古元古代早期和晚期两期变质锆石年龄。

2 地质背景

大青山是华北克拉通早前寒武纪变质基底典型出露区之一,由早前寒武纪表壳岩系和不同类型变质深成侵入岩组成。表壳岩系被划分为新太古代晚期桑干岩群、新太古代晚期-古元古代早期下乌拉山岩群、古元古代晚地上乌拉山岩群和古元古代早期大青山表壳岩,后者以变质碎屑沉积岩为主,含 BIF。桑干岩群普遍遭受麻粒岩相-高角闪岩相变质,局部发生角闪岩相退变,其变质原岩可能为中基性和中酸性变质火山沉积岩,被划分为中色麻粒岩岩组和浅色麻粒岩岩组。下乌拉山岩群变质原岩与桑干岩群类似,也遭受高角闪岩相-麻粒岩相变质,被划分为深色片麻岩岩组和浅色片麻岩岩组。根据野外观察,一些浅色片麻岩岩组的岩石为遭受强烈变质变形和深熔作用改造的 TTG 岩石。上乌拉山岩群主要由变泥质砂岩、大理岩、钙硅酸盐岩和少量变质基性岩组成。遭受高角闪岩相-麻粒岩相变质。岩石组合与印度南部孔兹岩系类似。按岩石组合,上乌拉山岩群被划分为榴云片麻岩岩组、透辉片麻岩岩组和大理岩岩组等三个岩石地层单位。大青山表壳岩是从古元古代晚地上乌拉山岩群中解体出来的一套变质表壳岩,主要由变质碎屑沉积岩组成,还包括 BIF 等,变质作用特征与上乌拉山岩群无明显区别,但岩石组合和含矿性两者不同。作为古元古代晚期的上乌拉山岩群与古元古代早期-新太古代晚期地质体之间现所见到的都为构造关系。

经过长期,特别是近十余年来工作,大青山地区早前寒武纪地质研究取得了重要进展(杨振升等, 2000, 2003; 徐仲元等, 2002, 2005, 2007; Wan *et al.*, 2009, 2013; Ma *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2013, 2014; Liu *et al.*, 2013, 2014)。可简要概括如下:1)大青山地区存在新太古代晚期、古元古代早期和古元古代晚期三个不同时代的表壳岩系;2)

大青山地区遭受新太古代晚期、古元古代早期和古元古代晚期三期高角闪岩相-麻粒岩相变质作用改造,普遍遭受深熔作用,识别出古元古代晚期超高温变质作用;3)大青山地区存在早前寒武纪多期($\sim 2.50\text{Ga}$, $\sim 2.45\text{Ga}$, $2.0 \sim 2.30\text{Ga}$, $\sim 1.95\text{Ga}$, $\sim 1.85\text{Ga}$)基性岩浆作用;4)大青山地区存在早前寒武纪多期($\sim 2.5\text{Ga}$, $2.00 \sim 2.30\text{Ga}$, $1.94 \sim 1.96\text{Ga}$, $1.82 \sim 1.85\text{Ga}$)酸性岩浆作用。大青山地区早前寒武纪地质演化历史比以往认识到的要更为复杂。

本文涉及地区(研究区)地处大青山南麓,包头东侧的石拐南部(图 1a)。区内早前寒武纪变质杂岩作为大青山逆冲推覆构造的上盘岩片推覆到北侧的古生代-中生代地层之上。与北侧大青山主体中大量发育孔兹岩系等变质表壳岩的早前寒武纪变质杂岩不同,区内以大面积分布变质深成岩为特征。根据岩性、包体及所在位置,将这些变质深成岩分别划分为山和原片麻岩、枣儿沟片麻岩和立甲子片麻岩。变质表壳岩出露较少,仅有新太古代晚期桑干岩群和古元古代早期大青山表壳岩分布。桑干岩群变质表壳岩主要在山和原片麻岩中成规模不等的包体存在,主要由条带状基性石榴二辉麻粒岩、中性麻粒岩和含榴二辉磁铁石英岩、磁铁石英岩组成,尤其是磁铁石英岩,在区内的山和原片麻岩中形成多个小型铁矿。大青山表壳岩主要由条带状石榴黑云片麻岩、砂线石榴黑云片麻岩组成,其在区内呈条带状、不规则残片状产出。与山和原片麻岩呈构造接触,而与立甲子片麻岩成侵入接触(刘正宏等, 2006^①)。

山和原片麻岩主要分布在研究区西部,以紫苏黑云斜长花岗质片麻岩、紫苏黑云花岗闪长质片麻岩和紫苏黑云二长花岗质片麻岩为主,这些岩石普遍以中细粒鳞片状粒状变晶结构为特征,主要由紫苏辉石、黑云母、斜长石、条纹长石和石英组成,条纹长石和斜长石含量变化的差异造成岩石类型的多样性,之外还少量存在紫苏辉石、透辉石和角闪石等暗色矿物含量较高、石英含量较少的紫苏花岗质岩石,如角闪紫苏石英闪长质片麻岩、黑云角闪紫苏斜长花岗质片麻岩。该片麻岩体中,还大量散布着规模不等的各种麻粒岩和磁铁石英岩包体,片麻岩与其中的基性麻粒岩和磁铁石英岩截然接触,但与中酸性麻粒岩渐变过渡,有些岩石中还保留有深熔结构。各种特征均表明该类片麻岩遭受变质深熔作用的改造。

枣儿沟片麻岩分布于研究区东部,岩性相对均匀,主要为石英闪长质-花岗闪长质片麻岩。主要由斜长石、角闪石、黑云母和石英组成,存在少量微斜长石,斜长石和角闪石均有残斑和基质两个粒级,残斑多成透镜状,内部应变较强,少数斜长石残斑保留有卡钠复合双晶,反映了侵入岩的性质;基质则呈它形粒状或它形柱状,石英多呈扁豆状或拉长的单晶石英条带,内部应变较弱,显示岩石遭受了强烈变形后的

① 刘正宏,徐仲元,杨振升等. 2006. 1:25 万包头幅区域地质调查报告

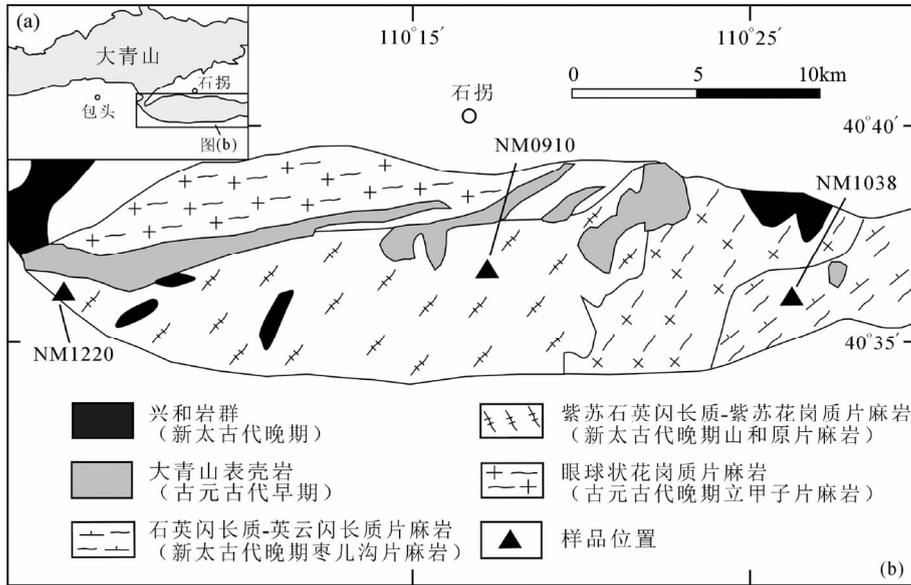


图1 大青山石拐地区地质图(据杨振升等, 2006), 图中给出了样品位置

Fig.1 Geological map of the Shiguai area, Daqingshan (Yang *et al.*, 2006), showing the locations of samples in this study

重结晶。弱变形岩石中发育片麻状构造, 岩石变形较强时, 显示条纹-条带状构造。

眼球状花岗质片麻岩分布于山和原片麻岩和枣儿沟片麻岩之间和石拐南部的立甲子-腮忽洞一带, 也称为立甲子片麻岩。见山和原片麻岩包体。岩石以肉红色的岩石外貌、含有大量微斜长石斑晶并发育较强的片麻理为特征。微斜长石斑晶大部分呈透镜状, 少量呈半自形或自形, 基质为中粒-中细粒花岗变晶结构。主要由微斜长石、斜长石、石英和黑云母组成。

本文涉及到的锆石定年样品的野外和岩相学特征如下。采样位置见图1。

2.1 黑云二长花岗质片麻岩 (NM1220)

样品采自石拐西南约16km的壕赖沟一采坑处(N40°35'56", E110°04'25"), 属山和原片麻岩。岩石遭受深熔作用改造, 并强烈变形, 但露头尺度仍显示均匀的特征(图2a, b)。片麻理走向近南北, 附近有浅色脉体存在, 可能为深熔作用产物。岩石主要由石英、斜长石、钾长石(条纹长石)、黑云母组成。显示出强烈糜棱岩化变形特征, 不仅石英呈条带状分布, 一些具聚片双晶的斜长石也成长条状分布(图3a, b); 斜长石、钾长石和石英呈细粒集合体定向分布, 深棕色黑云母和不透明矿物(铁钛氧化物?)与之伴生(图3c)。见斜长石碎斑呈透镜状产出, 两端具压力影结构(图3d)。

2.2 紫苏石英闪长质片麻岩 (NM0910)

样品采自石拐南的沙明线公路里程碑7km处的路边, 一收费站南不远处(N40°36'42", E110°16'11")。属山和原片麻岩。岩体性质清楚, 但遭受深熔作用改造, 形成浅色脉体,

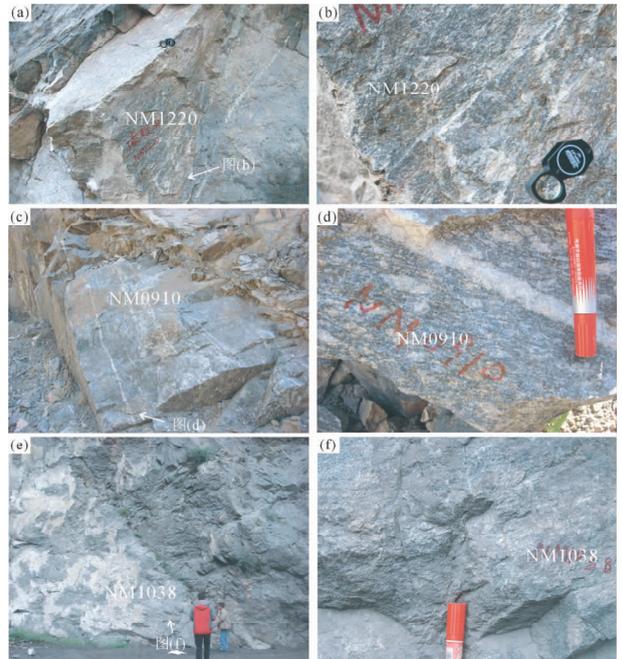


图2 大青山石拐地区新太古代闪长质-花岗质岩石的野外照片

(a, b) 黑云二长花岗质片麻岩 (NM1220); (c, d) 紫苏石英闪长质片麻岩 (NM0910); (e, f) 闪长质片麻岩 (NM1038)

Fig.2 Field photos of Neoproterozoic diorite-granitoid rocks in the Shiguai area, Daqingshan

(a, b) biotite monzogranitic gneiss (NM1220); (c, d) hypersthene quartz dioritic gneiss (NM0910); (e, f) dioritic gneiss (NM1038)

岩石中还有长石斑晶存在(图2c, d)。锆石分选样品不含浅色脉体。岩石由斜长石、钾长石、石英、紫苏辉石、透辉石、角

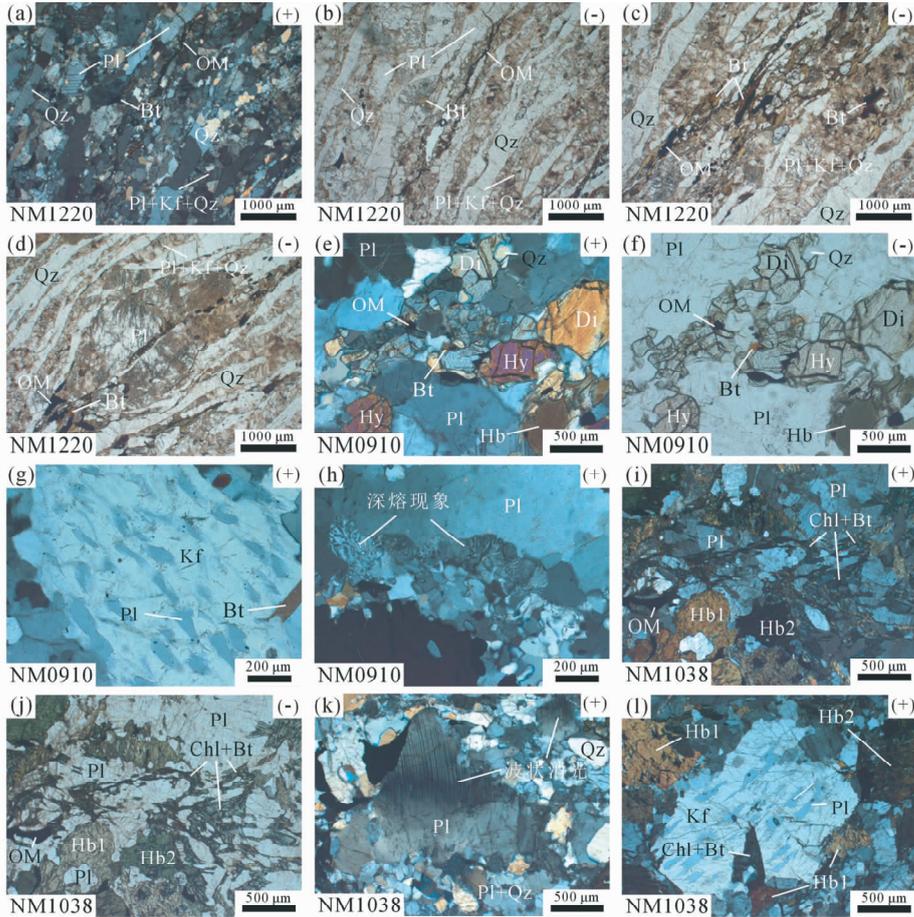


图3 大青山石拐地区新太古代闪长质-花岗质岩石的岩相学照片

(a-d)黑云二长花岗质片麻岩(NM1220);(e-h)紫苏石英闪长质片麻岩(NM0910);(i-l)闪长质片麻岩(NM1038)。(+)和(-)分别代表正交偏光和单偏光。Hy-紫苏辉石;Di-透辉石;Hb-角闪石;Bt-黑云母;Chl-绿泥石;Pl-斜长石;Qz-石英;Kf-钾长石;OM-不透明矿物

Fig. 3 Petrographic photographs of Neoproterozoic diorite-granitoids in the Shiguai area, Daqingshan

(a-d) biotite monzogranitic gneiss (NM1220); (e-h) hypersthene quartz dioritic gneiss (NM0910); (i-l) dioritic gneiss (NM1038). (+) and (-) mean cross and plane polarized light, respectively. Hy-hypersthene; Di-diopside; Hb-hornblende; Bt-biotite; Chl-chlorite; Pl-plagioclase; Qz-quartz; Kf-K-feldspar; OM-opaque mineral

闪石和黑云母组成(图3e, f)。绿色角闪石置换透辉石,部分斜长石具聚片双晶。见存在补丁状斜长石的钾长石斑晶(图3g)。局部存在长石、石英细粒集合体,一些呈蠕虫状产出(图3h),显示深熔成因。组成矿物和结构特征表明岩石遭受麻粒岩相变质和深熔作用改造。

2.3 闪长质片麻岩(NM1038)

样品采自石拐东南约13km的阿刀亥沟公路边(N40°36'1", E110°26'17"),属石英闪长质-花岗质片麻岩单元,但所采集岩石样品组成上为闪长岩。岩石组成均匀,具片麻理(图2e, f),附近见晚期断层擦痕。岩石主要由斜长石和角闪石组成。存在两种类型角闪石。早期角闪石为黄色-黄绿色多色性,晚期角闪石为黄绿色-绿色多色性(图3i, j)。少量绿泥石和黑云母呈集合体存在,可能为角闪石退变产物。斜长石多为细粒集合体,也有斜长石以碎斑产出,出现波状消光,

聚片双晶消失(图3k)。与二辉石英闪长质片麻岩(NM0910)一样,见具补丁状斜长石的钾长石斑晶,并包裹绿泥石+黑云母集合体(图3l)。

3 分析方法

锆石定年在北京离子探针中心SHRIMP A上完成。分析流程与Williams(1998)描述的类似。一次离子流 O^{2-} 强度为 $\sim 5\mu m$,束斑大小为 $25\sim 30\mu m$ 。标准锆石TEM和M257分别用于 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄和U、Th含量校正。标准锆石(TEM)和待测样之比为1:3,每个数据点测年采用5组扫描。使用实测 ^{204}Pb 进行普通铅年龄校正。采用SQUID和ISOPLOT程序(Ludwig, 2001a, b)进行数据处理。单个数据误差为 1σ ,加权平均年龄误差为95%置信度。

表 1 大青山石拐地区新太古代晚期闪长质-花岗质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircon from Neoproterozoic diorite-granitoids in the Shiguai area, Daqingshan

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{207}\text{Pb}^*$ $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*$ ^{235}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*$ ^{238}U	$\pm\%$	误差 相关系数	^{206}Pb ^{238}U 年龄 (Ma)	误差	^{207}Pb ^{206}Pb 年龄 (Ma)	误差	不谐 和度 (%)
黑云二长花岗质片麻岩(NM1220)																
1. 1ME2	79	65	0.85	23	0.1119	1.3	5.19	2.5	0.3365	2.1	0.86	1870	34	1830	23	-2
2. 1ME1	528	51	0.1	207	0.1584	0.38	9.98	1.4	0.4568	1.3	0.96	2426	26	2439	7	1
3. 1MA	511	369	0.75	211	0.1617	0.51	10.7	1.5	0.4802	1.4	0.94	2528	30	2473	9	-2
4. 1ME1	1117	182	0.17	422	0.1591	0.28	9.65	1.3	0.4397	1.3	0.98	2349	25	2446	5	4
5. 1MA	264	118	0.46	108	0.1631	0.51	10.73	1.7	0.4773	1.6	0.96	2515	34	2488	9	-1
6. 1ME1	781	74	0.1	310	0.1569	0.56	10.01	1.8	0.4625	1.7	0.95	2451	34	2423	10	-1
7. 1MA	180	99	0.57	74	0.1607	0.75	10.58	1.6	0.4777	1.4	0.88	2517	30	2463	13	-2
8. 1MA	337	302	0.93	133	0.1617	0.59	10.22	1.5	0.4585	1.3	0.91	2433	27	2473	10	2
9. 1MA	611	234	0.4	237	0.1639	0.33	10.21	1.4	0.4518	1.3	0.97	2403	26	2496	6	4
10. 1ME1	905	57	0.06	326	0.146	0.31	8.45	1.3	0.4195	1.3	0.97	2258	25	2300	5	2
11. 1MA	467	58	0.13	188	0.1625	0.55	10.51	1.4	0.469	1.3	0.92	2479	27	2482	9	0
12. 1ME2	58	119	2.11	17	0.1144	1.5	5.3	2.3	0.3358	1.8	0.77	1866	29	1871	27	0
紫苏石英闪长质片麻岩(NM0910)																
1. 1ME2	17	22	1.36	5	0.1164	4.4	5.57	5.4	0.347	3.2	0.59	1920	52	1901	79	-1
1. 2MA	142	117	0.85	55	0.1597	0.88	9.98	1.8	0.453	1.6	0.87	2409	32	2453	15	2
2. 1MA	136	113	0.86	49	0.1447	0.8	8.42	1.8	0.4218	1.6	0.9	2268	31	2285	14	1
3. 1MA	108	78	0.75	46	0.1644	1.2	11.16	2.1	0.4926	1.7	0.81	2582	36	2501	21	-3
4. 1ME2	28	26	0.96	8	0.1179	2.4	5.54	3.5	0.3407	2.6	0.74	1890	43	1924	42	2
5. 1ME1	188	100	0.55	77	0.1659	0.6	10.95	1.7	0.4788	1.5	0.93	2522	32	2517	10	0
6. 1ME1	178	75	0.44	68	0.1517	0.66	9.24	1.7	0.4418	1.6	0.92	2359	31	2365	11	0
7. 1MA	237	265	1.15	95	0.1646	0.57	10.57	1.6	0.4657	1.5	0.93	2465	30	2504	10	2
8. 1MA	326	397	1.26	126	0.1594	0.73	9.93	2.8	0.452	2.7	0.97	2404	55	2449	12	2
10. 1MA	168	118	0.73	69	0.1621	0.72	10.7	1.7	0.4788	1.6	0.91	2522	33	2478	12	-2
11. 1ME1	260	121	0.48	104	0.1611	0.55	10.29	1.6	0.4634	1.5	0.94	2455	30	2468	9	1
11. 2MA	164	162	1.02	57	0.1417	0.81	7.95	2.1	0.4066	2	0.92	2199	37	2249	14	2
12. 1ME1	224	93	0.43	86	0.1571	0.79	9.67	1.7	0.4464	1.5	0.88	2379	30	2425	13	2
12. 2MA	132	91	0.71	45	0.14	0.93	7.69	1.9	0.398	1.6	0.87	2160	30	2228	16	3
13. 1MA	201	228	1.17	79	0.1627	0.61	10.29	1.6	0.4588	1.5	0.93	2434	31	2483	10	2
14. 1MA	151	127	0.87	63	0.163	0.83	10.84	1.8	0.4822	1.6	0.89	2537	33	2487	14	-2
15. 1MA	177	181	1.05	71	0.1606	0.64	10.25	1.7	0.4631	1.5	0.92	2453	31	2462	11	0
闪长质片麻岩(NM1038)																
1. 1 MA	80	43	0.56	30	0.1593	1.7	9.47	2.1	0.4311	1.3	0.6	2311	24	2448	28	6
2. 1 ME	113	67	0.61	45	0.1626	0.66	10.32	1.1	0.4601	0.8	0.78	2440	17	2483	11	2
3. 1 MA	139	71	0.53	52	0.1648	0.6	9.848	0.9	0.4334	0.7	0.77	2321	14	2505	10	7
4. 1 MA	102	78	0.79	37	0.1625	0.71	9.5	1.1	0.4242	0.9	0.79	2279	17	2482	12	8
5. 1 MA	112	104	0.96	44	0.1627	0.56	10.269	0.9	0.4578	0.8	0.81	2430	16	2484	10	2
6. 1 ME	116	68	0.6	45	0.162	0.56	10.15	1.2	0.4548	1	0.88	2416	21	2476	10	2
7. 1 MA	141	78	0.57	52	0.1639	0.74	9.656	1	0.4274	0.7	0.68	2294	13	2496	13	8
8. 1 ME	21	1	0.03	8	0.1577	2.1	9.21	2.8	0.4235	1.9	0.68	2277	36	2431	35	6
9. 1 MA	171	158	0.95	70	0.1643	0.45	10.76	1.1	0.4749	1	0.92	2505	22	2500	8	0
9. 2 ME	359	14	0.04	48	0.1116	1.1	2.359	1.4	0.1533	0.9	0.63	919	8	1826	20	50
10. 1 ME	118	55	0.48	47	0.1621	0.6	10.34	1.2	0.4624	1.1	0.87	2450	22	2478	10	1
11. 1 MA	226	236	1.08	87	0.1623	0.39	10.011	0.7	0.4475	0.5	0.81	2384	11	2479	7	4
12. 1 MA	223	250	1.16	80	0.1603	0.44	9.196	0.9	0.4162	0.7	0.86	2243	14	2458	7	9
13. 1 ME	98	63	0.66	39	0.1633	0.62	10.46	1.1	0.4646	0.9	0.83	2460	18	2490	10	1
14. 1 MA	131	81	0.64	51	0.1612	0.98	10.07	1.5	0.453	1.1	0.74	2408	22	2468	17	2
15. 1 ME	86	44	0.53	35	0.1609	1.7	10.3	2	0.4642	1.2	0.58	2458	24	2465	28	0
16. 1 ME	91	23	0.26	245	0.1498	1.6	6.4	2.1	0.3101	1.5	0.68	1741	22	2343	27	26
17. 1 ME	137	39	0.3	545	0.15593	0.58	9.952	0.9	0.4629	0.6	0.74	2452	13	2412	10	-2

注: * 代表放射性成因 Pb; MA 和 ME 分别代表岩浆锆石和变质锆石

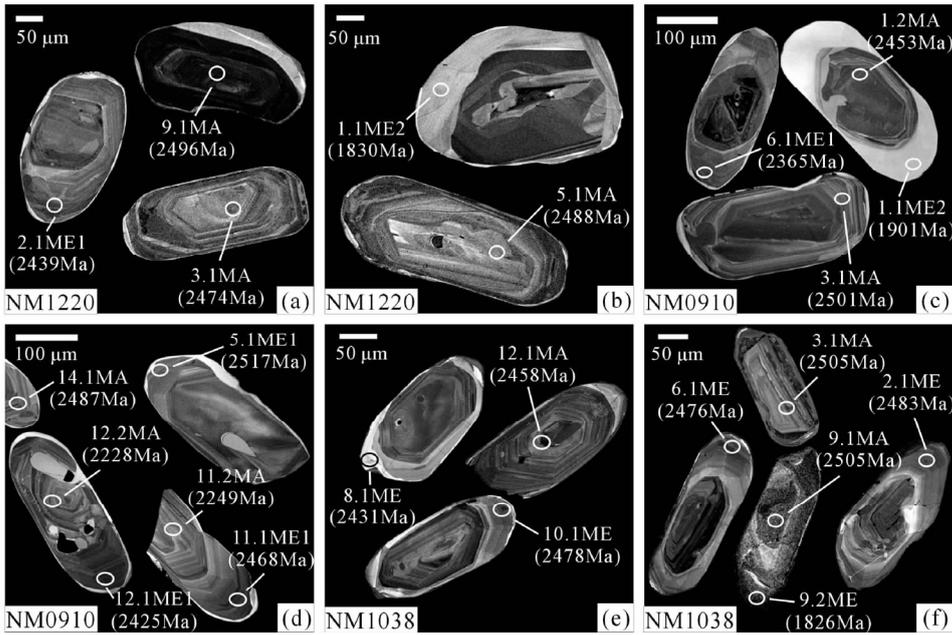


图4 大青山石拐地区新太古代闪长质-花岗质岩石的锆石阴极发光图像

(a, b) 黑云二长花岗质片麻岩 (NM1220); (c, d) 紫苏石英闪长质片麻岩 (NM0910); (e, f) 闪长质片麻岩 (NM1038)

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircon from Neoproterozoic diorite-granitoids in the Shiguai area, Daqingshan

(a, b) biotite monzogranitic gneiss (NM1220); (c, d) hypersthene quartz dioritic gneiss (NM0910); (e, f) dioritic gneiss (NM1038)

4 锆石定年

4.1 黑云二长花岗质片麻岩 (NM1220)

锆石呈柱状或等轴状。阴极发光下, 锆石具核-幔-边结构(图4a, b)。核部锆石呈灰色或深灰色, 具振荡环带, 多遭受不同程度重结晶而使环带模糊。幔部锆石也呈灰色或深灰色, 组成均匀, 部分环带依稀可见, 为核部锆石强烈重结晶改造的结果。边部锆石呈浅灰色, 组成均匀或具扇形结构, 通常较窄。根据结构、组成和年龄, 把锆石划分为岩浆锆石(MA)、早期变质锆石(ME1)和晚期变质锆石(ME2)。我们把虽遭受重结晶作用影响, 但岩浆环带结构仍有一定保留的核部锆石划归为岩浆锆石, ME1和ME2大致与幔部和边部相当。共在12颗锆石上进行了12个数据点分析(表1)。6个核部岩浆锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $180 \times 10^{-6} \sim 611 \times 10^{-6}$ 和0.13~0.93, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2484 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD=2.1)(图5a)。4个ME1变质锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $528 \times 10^{-6} \sim 1117 \times 10^{-6}$ 和0.06~0.17, 与岩浆锆石相比, Th/U比值明显变小。其中3个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2441 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD=2.5)(图5a)。数据点10.1ME1年龄明显变小, 应与古元古代晚期构造热事件影响有关。2个ME2变质锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $58 \times 10^{-6} \sim 79 \times 10^{-6}$ 和0.85~2.11, 具有高的Th/U比值。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1847 \pm 35\text{Ma}$ (MSWD=1.3)(图5a)。

4.2 紫苏石英闪长质片麻岩 (NM0910)

锆石形态、结构、组成和年龄分布与黑云二长花岗质片麻岩(NM1220)的类似, 也划分为岩浆锆石(MA)、早期变质锆石(ME1)和晚期变质锆石(ME2)(图4c, d)。共在15颗锆石上进行了17个数据点分析(表1)。11个核部岩浆锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $108 \times 10^{-6} \sim 326 \times 10^{-6}$ 和0.71~1.26, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围为2228~2504Ma。其中4个年龄最大数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2494 \pm 12\text{Ma}$ (MSWD=0.79)(图5b)。4个ME1变质锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $178 \times 10^{-6} \sim 260 \times 10^{-6}$ 和0.43~0.55, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值范围为2365~2517Ma(图5b)。2个ME2变质锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $17 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$ 和0.96~1.36, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1919 \pm 73\text{Ma}$ (MSWD=0.1)(图2b)。与样品NM1220不同的是, 岩浆锆石和ME1变质锆石的数据点虽沿谱和线分布, 年龄变化更大。

4.3 闪长质片麻岩 (NM1038)

锆石呈长柱状, 阴极发光下具有核-边结构(图4e, f)。核部锆石具振荡环带, 为岩浆成因(MA), 重结晶作用使环带变得模糊。边部锆石呈灰色或灰白色, 组成均匀, 一些具微弱环带, 显示核部锆石强烈重结晶的结构特征, 为变质成因(ME)。共在17颗锆石上进行了18个数据点分析(表1)。9个核部岩浆锆石数据点的U含量和Th/U比值分别为 $80 \times$

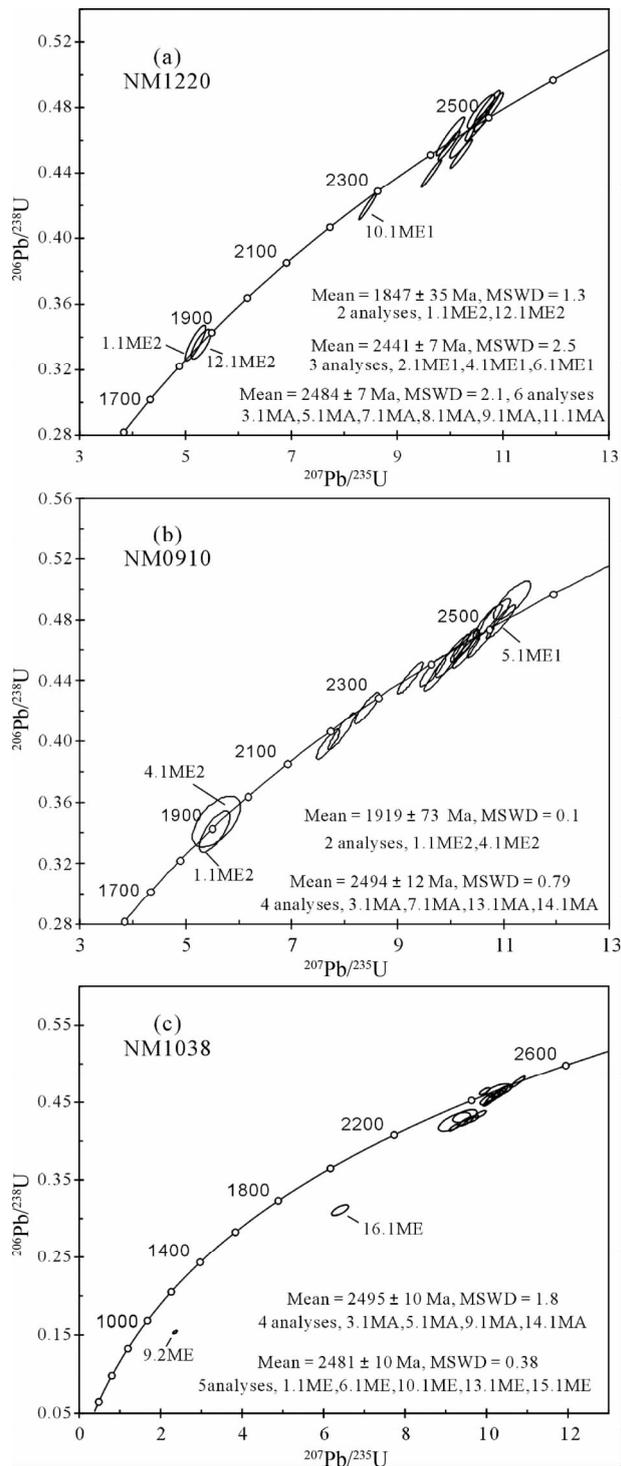


图5 大青山石拐地区新太古代闪长质-花岗质岩石的锆石年龄

(a) 黑云二长花岗质片麻岩 (NM1220); (b) 紫苏石英闪长质片麻岩 (NM0910); (c) 闪长质片麻岩 (NM1038)

Fig. 5 Concordia diagram of SHRIMP U-Pb data of zircon from Neoproterozoic diorite-granitoids in the Shiguai area, Daqingshan

(a) biotite monzogranitic gneiss (NM1220); (b) hypersthene quartz dioritic gneiss (NM0910); (c) dioritic gneiss (NM1038)

$10^{-6} \sim 226 \times 10^{-6}$ 和 $0.53 \sim 1.16$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围为 $2448 \sim 2505$ Ma。其中 4 个位于谐和线上年龄集中的数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2495 ± 10 Ma (MSWD = 1.8) (图 5c)。9 个边部变质锆石数据点的 U 含量和 Th/U 比值分别为 $21 \times 10^{-6} \sim 359 \times 10^{-6}$ 和 $0.03 \sim 0.66$ 。5 个位于谐和线上的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2481 ± 10 Ma (MSWD = 0.38) (图 5c)。由于强烈铅丢失, 9.2ME 和 16.1ME 年龄明显偏小。

5 讨论

本文获得 3 个样品的岩浆锆石年龄分别为 2484 ± 7 Ma、 2494 ± 12 Ma 和 2495 ± 10 Ma。考虑到岩石遭受后期构造热事件强烈改造, 岩浆锆石发生不同程度变质重结晶, 震荡环带变得模糊, 年龄很可能偏年轻, 岩浆锆石真实的形成年龄应更大一些, 形成于新太古代晚期。新太古代晚期岩浆岩在大青山地区可能有更广泛的分布。刘建辉等 (2013) 获得该区多个花岗质片麻岩样品的岩浆锆石年龄为 ~ 2.45 Ga。锆石结构复杂, 岩浆锆石遭受变质重结晶强烈改造, 环带模糊。也获得古元古代早期和晚期变质锆石年龄。LA-ICP-MS 技术对高级变质岩中结构和成因复杂的锆石定年有一定局限性, 由于激光剥蚀程度较深 (通常 $30 \sim 50 \mu\text{m}$), 尽管在所观察的面上定年位置具有岩浆锆石的结构特征, 但其下部很短距离可能就进入变质锆石域, 所获得的年龄为混合年龄 (Kröner *et al.*, 2014) (这一点对于剥蚀深度较浅 (通常 $\sim 1 \mu\text{m}$) 的 SHRIMP 技术来说也并非总能避免)。我们推测至少部分刘建辉等 (2013) 定年的花岗质片麻岩的原岩形成时代为新太古代晚期。表壳岩系和岩群形成于新太古代晚期 (Ma *et al.*, 2012), 它们与深成侵入岩一道构成大青山地区新太古代晚期火山沉积-深成岩浆作用的完整记录。新太古代晚期岩浆岩包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、TTG 和二长花岗岩等不同岩石类型 (刘建辉等, 2013; Ma *et al.*, 2012; 本文), 为该区这一时期构造环境研究提供了物质基础。新太古代晚期变质深成侵入岩在大青山以北的阴山地块广泛分布 (张维杰等, 2000; 张玉清和刘俊杰, 2004; 王惠初等, 2001; 简平等, 2005; 张臣等, 2009; 董晓杰等, 2012; 马铭株等, 2013; Jian *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2012, 2014)。大青山地区新太古代晚期变质深成侵入岩的发现, 不但表明大青山与包括阴山地块在内的华北克拉通其它地区具有类似的早期地质演化历史, 为华北克拉通新太古代构造岩浆作用研究增添新的内容, 还进一步表明古元古代孔兹岩带是在太古宙基底之上或其邻区发展起来的。

根据锆石结构和组成, 本文定年的 3 个样品都记录了古元古代早期构造热事件年龄。对于山和原片麻岩, 2 个样品的锆石阴极发光图像显示部分 ME1 变质锆石仍有岩浆环带依稀存在, 显示不完全重结晶的结构特征, 这可能导致计算年龄偏大; 另一方面, 岩石遭受古元古代晚期构造热事件强

烈改造,对早期锆石 U-Pb 同位素体系无疑也会产生影响,导致计算年龄偏小,这从紫苏石英闪长质片麻岩样品(NM0910)不但 ME1 变质锆石而且岩浆锆石数据点沿谐和线分布但年龄呈大的变化(图 5b)、同一锆石中岩浆锆石比 ME1 变质锆石年龄还要小(图 4d)的现象就可看出。这两个相反的因素使得古元古代早期变质锆石年龄计算的意义受到限制。黑云二长花岗质片麻岩(NM1220)和紫苏石英闪长质片麻岩(NM0910)同为山和原片麻岩,但遭受不同程度古元古代晚期变质作用改造。黑云二长花岗质片麻岩(NM1220)虽有深棕色黑云母存在,遭受深熔作用改造,但无辉石存在;二辉石英闪长质片麻岩(NM0910)具二辉石变质矿物组合,遭受麻粒岩相变质。这可能是岩浆锆石和 ME1 变质锆石年龄在前者中相对集中而在后者中分散分布的重要原因。黑云二长花岗质片麻岩(NM1220)的 ME1 变质锆石年龄数据点相对集中,Th/U 比值明显小于岩浆锆石,2441 ± 7Ma 变质年龄仍有重要参考价值。闪长质片麻岩(NM1038)无古元古代晚期变质锆石年龄记录,古元古代早期变质锆石年龄 2481 ± 10Ma 更为可信。新太古代晚期和古元古代早期构造热事件在大青山地区广泛存在(Ma *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2009, 2013; Dong *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013, 2014)。根据现有资料,不能确定本文涉及的 3 个样品是否存在新太古代晚期变质锆石年龄记录,它们所代表的地质体是否曾遭受新太古代晚期构造热事件影响,仍需进一步研究。

山和原片麻岩 2 个样品 ME2 变质锆石年龄尽管误差很大(1919 ± 73Ma, 1847 ± 35Ma),却表明古元古代晚期构造热事件的存在。年龄误差很大与锆石 U 含量低有关。ME2 变质锆石不发育,与阴极发光图像中具扇形结构一样,高的 Th/U 比值显示了高级变质作用成因的锆石特点。推测山和原片麻岩在古元古代晚期发生了麻粒岩相变质和深熔作用改造,与大青山地区广泛发育的古元古代晚期构造热事件相一致(Wan *et al.*, 2009, 2013; Dong *et al.*, 2012, 2013; Liu *et al.*, 2014)。值得注意的是,闪长质片麻岩(NM1038)与山和原片麻岩相距不远,之间被古元古代晚期眼球状花岗质片麻岩相隔,却无古元古代晚期变质锆石年龄记录。其原因有待进一步确定。

6 结论

(1)在大青山的石拐地区发现新太古代晚期二长花岗岩、石英闪长岩和闪长岩等不同类型变质深成侵入岩。新太古代晚期岩浆作用在整个大青山地区很可能广泛发育,孔兹岩带是在太古宙基底之上或其邻区发展起来的。

(2)与大青山地区其它古元古代以前地质体类似,新太古代晚期变质深成侵入岩普遍遭受古元古代早期构造热事件改造,山和原片麻岩还遭受了古元古代晚期高级变质作用叠加改造。

致谢 杨淳和甘伟林制作样品靶,周丽芹和李宁完成锆石阴极发光照相,张玉海和刘建辉保障 SHRIMP 仪器正常工作;锆石标准由 Ian Williams 和 Lance Black 博士提供;研究过程中得到赵子然、颀颀强、刘守偈、任鹏的帮助;在此一并深表谢意。

References

- Dong CY, Wan YS, Xu ZY, Liu DY, Yang ZS, Ma MZ and Xie HQ. 2013. SHRIMP zircon U-Pb dating of Late Paleoproterozoic kondalites in the Daqing Mountains area on the North China Craton. *Science China (Earth Science)*, 56(1): 115 - 125
- Dong CY, Wan YS, Wilde SA, Xu ZY, Ma MZ, Xie HQ and Liu DY. 2014. Earliest Paleoproterozoic supracrustal rocks in the North China Craton recognized from the Daqingshan area of the Khondalite Belt: Constraints on craton evolution. *Gondwana Research*, 25(4): 1535 - 1553
- Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. 2.7Ga granitic gneiss in the northern foot of Daqingshan Mountain, central Inner Mongolia, and its geological implications. *Earth Science*, 37(S1): 45 - 52 (in Chinese with English abstract)
- Jian P, Zhang Q, Liu DY, Jin WJ, Jia XQ and Qian Q. 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Achaean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 151 - 157 (in Chinese with English abstract)
- Jian P, Kröner A, Windley BF, Zhang Q, Zhang W and Zhang LQ. 2012. Episodic mantle melting-crustal reworking in the Late Neoproterozoic of the northwestern North China Craton: Zircon ages of magmatic and metamorphic rocks from the Yinshan Block. *Precambrian Research*, 22 - 223: 230 - 254
- Kröner A, Wan YS, Liu XM and Liu DY. 2014. Dating of zircon from high-grade rocks: Which is the most reliable method? *Geoscience Frontiers*, 5(4): 515 - 523
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Chen JQ, Liu PH, Shi JR, Cai J and Wang F. 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Early Paleoproterozoic granitoid gneisses in Ula Shan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 485 - 500 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Liu CH, Liu JH, Wang F, Xiao LL, Cai J and Shi JR. 2014. Multiple mafic magmatic and high-grade metamorphic events revealed by zircons from meta-mafic rocks in the Daqingshan-Wulashan Complex of the Khondalite Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 246: 334 - 357
- Liu SJ, Dong CY, Xu ZY, Santosh M, Ma MZ, Xie HQ, Liu DY and Wan YS. 2013. Palaeoproterozoic episodic magmatism and high-grade metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating of magmatic suites in the Daqingshan area. *Geological Journal*, 48(5): 429 - 455
- Ludwig KR. 2001a. *Squid 1.02, A User's Manual*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2: 1 - 19
- Ludwig KR. 2001b. *User's Manual for Isoplot/Ex rev. 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1: 1 - 58
- Ma MZ, Wan YS, Santosh M, Xu ZY, Xie HQ, Dong CY, Liu DY and Guo CL. 2012. Decoding multiple tectonothermal events in zircons from single rock samples: SHRIMP zircon U-Pb data from the late Neoproterozoic rocks of Daqingshan, North China Craton. *Gondwana Research*, 22(3-4): 810 - 827
- Ma MZ, Xu ZY, Zhang LC, Dong CY, Dong XJ, Liu SJ, Liu DY and Wan YS. 2013. SHRIMP dating and Hf isotope analysis of zircons from the Early Precambrian basement in the Xi Ulanbulang area,

- Wuchuan, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 501 – 516 (in Chinese with English abstract)
- Ma XD, Fan HR, Santosh M, Liu X and Guo JH. 2014. Origin of sanukitoid and hornblende enclaves in the Dajitu pluton from the Yinshan Block, North China Craton: Product of Neoproterozoic ridge subduction? *International Geology Review*, 56(10): 1197 – 1212
- Wan YS, Liu DY, Dong CY, Xu ZY, Wang ZJ, Wilde SA, Yang YH, Liu ZH and Zhou HY. 2009. The Precambrian khondalite Belt in the Daqingshan area, North China Craton: Evidence for multiple metamorphic events in the Palaeoproterozoic era. *Geological Society, London, Special Publications*, 323(1): 73 – 97
- Wan YS, Liu DY, Wang W, Song TR, Kröner A, Dong CY, Zhou HY and Yin XY. 2011. Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20(1): 219 – 242
- Wan YS, Xu ZY, Dong CY, Nutman A, Ma MZ, Xie HQ, Liu SJ, Liu DY, Wang HC and Cu H. 2013. Episodic Paleoproterozoic (~2.45, ~1.95 and ~1.85Ga) mafic magmatism and associated high temperature metamorphism in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 224: 71 – 93
- Wang HC, Yuan GB and Xin HT. 2001. U-Pb single zircon ages for granulites in Cunkongshan area, Guyang, Inner Mongolia and enlightenment for its geological signification, China. *Progress in Precambrian Research*, 24(1): 28 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC III and Riddle WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, Society of Economic Geologists, 7: 1 – 35
- Xu ZY, Liu ZH and Yang ZS. 2002. The strata texture of khondalite in Daqingshan area, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 32(4): 313 – 318 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZY, Liu ZH, Hu FX and Yang ZS. 2005. Geochemical characteristics of the calc-silicate rocks in khondalite series in Daqingshan area, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(6): 681 – 689 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZY, Liu ZH, Yang ZS, Wu XW and Chen XF. 2007. Structure of metamorphic strata of the khondalite series in the Daqingshan-Wulashan area, central Inner Mongolia, China, and their geodynamic implications. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 526 – 536 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZS, Xu ZY and Liu ZH. 2000. Khondalite event and Archean structure evolution. *Progress in Precambrian Research*, 23(4): 206 – 212 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZS, Xu ZY, Liu ZH and Peng XD. 2003. Consideration and practice of the construction of litho stratigraphic systems in high-grade metamorphic terrains: A case study in the Daqingshan-Wulashan area. *Geology in China*, 30(4): 343 – 351 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6 – 25
- Zhang C, Han BF, Liu SW, Ji JQ, Zhao L and Zhang L. 2009. SHRIMP U-Pb dating of biotite granites in Daqingshan, Inner Mongolia, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 561 – 567 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WJ, Li L and Geng MS. 2000. Petrology and dating of Neo-Archean intrusive rocks from Guyang area, Inner Mongolia. *Earth Science*, 25(3): 221 – 226 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ and Liu JJ. 2004. Zircon U-Pb age of the quartz diorite in North Daqing Mountains, central Inner Mongolia. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 22 – 27 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 沙茜. 2012. 内蒙古大青山北麓 2.7Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义. *地球科学*, 37(增刊): 45 – 52
- 简平, 张旗, 刘敦一, 金维浚, 贾秀勤, 钱青. 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩 (sanukite)-角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 21(1): 151 – 157
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 陈军强, 刘平华, 施建荣, 蔡佳, 王舫. 2013. 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. *岩石学报*, 29(2): 485 – 500
- 马铭株, 徐仲元, 张连昌, 董春艳, 董晓杰, 刘守偈, 刘敦一, 万渝生. 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 29(2): 501 – 516
- 王惠初, 袁桂邦, 辛后田. 2001. 内蒙古固阳村空山地区麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄及其对年龄解释的启示. *前寒武纪研究进展*, 24(1): 28 – 34
- 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 2002. 内蒙古大青山地区孔兹岩系的地层结构. *吉林大学学报(地球科学版)*, 32(4): 313 – 318
- 徐仲元, 刘正宏, 胡凤翔, 杨振升. 2005. 内蒙古大青山地区孔兹岩系中钙硅酸盐岩的组成和地球化学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(6): 681 – 689
- 徐仲元, 刘正宏, 杨振升, 吴新伟, 陈晓峰. 2007. 内蒙古中部大青山-乌拉山地区孔兹岩系的变质地层结构及动力学意义. *地质通报*, 26(5): 526 – 536
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏. 2000. 孔兹岩系事件与太古宙地壳构造演化. *前寒武纪研究进展*, 23(4): 206 – 212
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏. 2003. 高级变质区岩石地层系统建立的思考与实践——以内蒙古大青山-乌拉山地区为例. *中国地质*, 30(4): 343 – 351
- 张臣, 韩宝福, 刘树文, 季建清, 赵磊, 张磊. 2009. 内蒙古大青山地区黑云母花岗岩 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *岩石学报*, 25(3): 561 – 567
- 张维杰, 李龙, 耿明山. 2000. 内蒙古固阳地区新太古代侵入岩的岩石特征及时代. *地球科学*, 25(3): 221 – 226
- 张玉清, 刘俊杰. 2004. 内蒙古大青山北前壕石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *华南地质与矿产*, (4): 22 – 27