

doi:10.3799/dqkx.2017.040

# 吉林省塔东群锆石 U-Pb 定年、微量元素研究及其地质意义

孟杰<sup>1,2</sup>, 刘晓旻<sup>1</sup>, 梁一鸿<sup>1</sup>, 秦亚<sup>3</sup>, 句高<sup>1</sup>, 李本仙<sup>1\*</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江哈尔滨 150025
3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004

**摘要:** 吉林省塔东群以含大型磁铁矿床而著称, 塔东铁矿是吉黑成矿省内最大的火山喷流沉积-变质改造型铁矿。由于塔东群地质特征复杂, 多种地质作用复合叠加, 使其形成时代归属一直存在争议。通过 LA-ICP-MS 锆石定年, 确定了吉林省塔东群黑云斜长片麻岩和磁铁透辉斜长变粒岩中锆石年代。黑云斜长片麻岩中锆石呈长柱状, Th/U 值为 0.17~0.65, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 517.6±2.7 Ma, 代表了其原岩火山岩形成的年龄。磁铁透辉斜长变粒岩中共有两组锆石年龄, 其中一组短柱状, Th/U 值介于 0.78~1.00, 加权平均年龄为 249.8±4.0 Ma, 代表后期热事件年龄; 另一组锆石半自形短柱状晶形, 异常高的 U、Th, Th 最高含量可达 17 422 μg/g, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 518.3±3.8 Ma, 表示热液活动年龄, 显示该区 518.3 Ma 左右经历了一次热液作用, 可能与该区的岩浆作用以及塔东铁矿的成矿有关。据此, 塔东群内塔东铁矿可能存在一期早寒武世(±520 Ma)的成矿作用。

**关键词:** 塔东群; 岩浆锆石; 热液锆石; U-Pb 年龄; 塔东铁矿; 地球化学。

**中图分类号:** P597

**文章编号:** 1000-2383(2017)04-0502-09

**收稿日期:** 2016-09-12

## U-Pb Dating and Trace Elements Composition of Tadong Group from Jilin Province and Their Geological Implications

Meng Jie<sup>1,2</sup>, Liu Xiaoyang<sup>1</sup>, Liang Yihong<sup>1</sup>, Qin Ya<sup>3</sup>, Ju Gao<sup>1</sup>, Li Benxian<sup>1\*</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China
3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

**Abstract:** Tadong Group of Jilin Province is known for large-scale magnetite ore deposit, and Tadong iron deposit is the largest submarine volcano plume-metamorphic-reformation iron deposit in the Jilin-Heilongjiang metallogenic province. Complicated of geological characteristics and geological processes made the ownership of Tadong Group long been controversial. In this paper, the U-Pb zircon ages of the biotite plagioclase gneiss and magnetite diopside plagioclase leptynite are obtained by LA-ICP-MS. Zircons that obtained from biotite plagioclase gneiss are prismatic, and Th/U range between 0.17 and 0.65. U-Pb dating of these zircons record <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U weighted mean age of 517.6±2.7 Ma, indicating the formation age of the volcanic. In the magnetite diopside plagioclase leptynite, there are two kinds of zircons with two age groups, respectively. The first kind of zircons are short columns, and Th/U range between 0.78 and 1.00. U-Pb dating of these zircons record <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U weighted mean age of 249.8±4.0 Ma, indicating the age of thermal disturbance. Another kind of zircons are subhedral short prismatic, and have extremely high U, Th contents, the highest Th contents is 17 422 μg/g, respectively. U-Pb dating of these zircons record <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U weighted mean age of 518.3±3.8 Ma, attributing to the age of hydrothermal event. It is indicated that there is a hydrothermal process at 518.3 Ma or so, which might be related to magmatism. Iron mineralization of Tadong iron deposit of Jilin Province is most likely related with this hydrothermal event. Therefore, one of mineralizations happened in the Early Cam-

**基金项目:** 中国地质调查局项目(No. 1212011120329).

**作者简介:** 孟杰(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事矿物学、地球化学研究, ORCID:0000-0002-3312-0987. E-mail: mengjie26@126.com

\* **通讯作者:** 李本仙, ORCID:0000-0002-6995-4879. E-mail: lbxian@jlu.edu.cn

**引用格式:** 孟杰, 刘晓旻, 梁一鸿, 等, 2017. 吉林省塔东群锆石 U-Pb 定年、微量元素研究及其地质意义. 地球科学, 42(4): 502-510.

brian Period ( $\pm 520$  Ma) in Tadong iron deposit.

**Key words:** Tadong Group; magmatic zircons; hydrothermal zircons; U-Pb dating; Tadong iron deposit; geochemistry.

塔东群分布于吉林省敦化市塔东、东石河以及汪清县张家店等地,呈孤岛状残存于张广才岭花岗岩带中,是一套含铁变质岩系。塔东群是由李东津等(1997)创名的。在李东津等将其命名为“塔东群”之前,该套地层曾被冠以不同的名称,从而也被赋予不同的年代学意义。从沈阳地质局大黑山队(1957)将这套变质岩系划归为太古界五台系丰材统开始,先后被划入五台系(Ar)、太古界(Ar)、寒武系—奥陶系(O- $\epsilon$ )、志留系(S)以及志留系—泥盆系(S-D)等(表1)。

表1 塔东群沿革

Table 1 The evolution of Tadong group

地调单位	时间	地点	地层
沈阳局大黑山队	1957	敦化	Ar 五台系
吉林区调队三分队	1960	敦化	太古界
延边地质综合队	1974	塔东	志留系—泥盆系 二合营群(S)
黑龙江局一队	1977	镜泊湖	红光组
吉林区调队一分队	1978	塔东	S-D 青龙村群
吉林局六所一分队	1988	塔东	二合营群(S) 红光组
吉林省区调六所	1988	塔东	O- $\epsilon$ 黄莺屯组 西保安组
李东津等	1997	塔东	塔东(岩)群 朱敦店组 拉拉沟组

前人对塔东群的时代归属研究多无准确的同位素证据,仅依据区域地层对比等手段对塔东群进行研究,造成了对该区的地质年代一直存有不同的认识。早期所获少量的K-Ar年龄数据多小于350 Ma,被视为后期构造热事件的年龄。彭玉鲸和王占福(1995)、彭玉鲸和赵成弼(2001)获得鳌龙背变粒岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄值, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  为  $781.2 \pm 2.5$  Ma,  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  为  $946.9 \pm 5.0$  Ma,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  为  $354.8 \pm 1.4$  Ma,因此将其定为新元古代,这是目前较普遍接受的塔东群的年龄。新近报道的该区黄铁矿 Re-Os 同位素定年揭示铁矿的成矿期为古生代,使得人们对塔东群的归属又有新的认识。可见关于塔东群的归属时代问题仍需大量深入开展工作。该群时代的确定,有助于确定塔东铁矿成矿时代,对于揭示该矿床成矿过程,科学认识该区的含矿潜力以及区域成矿规律具有重要意义。

本文作者在从事中国地质调查局项目:“锡霍特成矿带内生矿产成矿模式和成矿系列境内外对比研究”(No. 1212011120329)工作中,对塔东铁矿区黑云斜长片麻岩和磁铁透辉斜长变粒岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和微量元素分析,获得了一组早寒武世( $\pm 520$  Ma)的年龄值,该年龄值与前人报道的塔东群年龄有差距,丰富了该区域铁矿成矿的同位素年代学证据。研究并查清该套变质岩的时代,将提升该区基础地质研究程度,为重建该区地质历史提供基础地质资料。

## 1 地质背景与地质特征

研究区位于吉林省敦化市北东与黑龙江省接壤处的塔东铁矿区(图1),张广才岭构造带南端。大地构造位置上位于兴蒙造山带东段,敦化—密山断裂与西拉木伦长春缝合带交汇处。该区广泛发育晚古生代和中生代花岗岩,岩性主要为花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和二长花岗岩等。塔东群呈南北向条带状分布于晚古生代和中生代花岗岩中,如同花岗岩海洋中的一叶小舟。

塔东群被分为两个组:拉拉沟组和朱敦店组。拉拉沟组位于塔东群下部,为一套含铁变质岩系,岩性主要为斜长角闪岩、角闪岩、磁铁透辉斜长变粒岩、磁铁角闪石英(变粒岩)等,赋存有大型磁铁矿床,厚度大于866 m(李东津等,1997)。原岩主要为一套中基性凝灰岩—凝灰质粉砂岩—钙质页岩建造(李庆武等,2010;邵建波等,2014),底部被花岗岩侵入,上部与朱敦店组整合接触。朱敦店组位于塔东群上部,为一套沉积变质岩系夹变质基性火山岩,岩性为片岩、片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩和数层大理岩,厚度大于1073 m。

## 2 样品岩石学特征

样品 TD11 采自朱敦店组,为黑云斜长片麻岩,风化面黑褐色,新鲜面黑色,片麻状构造,鳞片粒状变晶结构。黑云母含量约占20%,片状,具明显定向,粒度为0.2~0.5 mm;浅色矿物主要为斜长石和石英,含量占岩石的75%,其中斜长石占岩石的50%左右,粒度为0.2~0.4 mm,可见聚片双晶,定

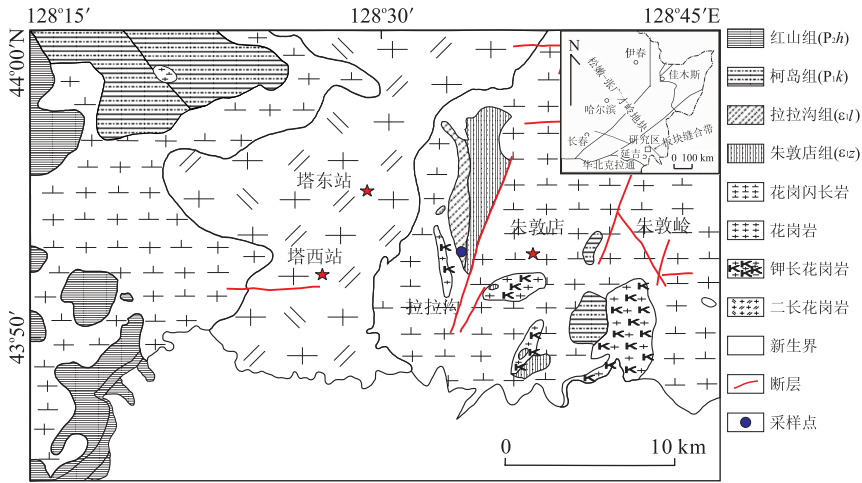


图 1 吉林塔东群地质

Fig. 1 Geological sketch of Jilin Tadong Group

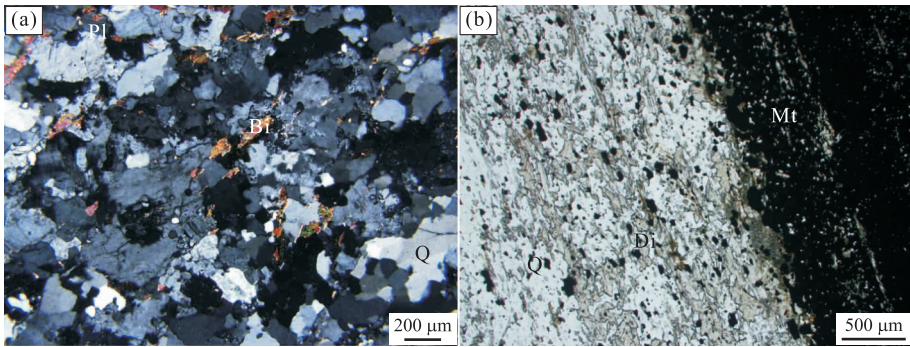


图 2 岩石薄片显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of the samples

a. TD11; b. TDFE; Bi. 黑云母; Pl. 斜长石; Q. 石英; Di. 透辉石; Mt. 磁铁矿

向排列(图 2a).

TDFE 采自拉拉沟组, 岩性为磁铁透辉斜长变粒岩. 浅绿色, 条带状构造, 粒状变晶结构. 透辉石含量约占岩石的 20% 左右, 短柱状, 粒度为 0.2~0.3 mm, 具明显定向; 斜长石和石英含量约占 70%, 粒度为 0.1~0.2 mm; 其余为浸染状或条带状磁铁矿(图 2b).

### 3 分析方法

锆石样品利用标准重矿物分离技术分选, 然后在双目镜下, 挑选出晶形相对较好、无明显裂痕和包体的颗粒, 将其用环氧树脂固定在玻璃板上, 打磨抛光至锆石中心, 然后对其进行透射光、反射光和阴极发光(CL)图像的采集. 样品由廊坊市科大岩石矿物分选技术股份有限公司完成锆石的挑选. 锆石阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成.

锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 方法测定. 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a. 激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合. 在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气, 以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精度. 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号(Hu *et al.*, 2008; 张延军等, 2016). 对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu *et al.*, 2008, 2010). 并采用 Isoplot 3.0 程序进行锆石加权平均年龄的计算及谐和图绘制(Ludwig, 2003).

锆石微量元素含量利用多个 USGS 参考玻璃

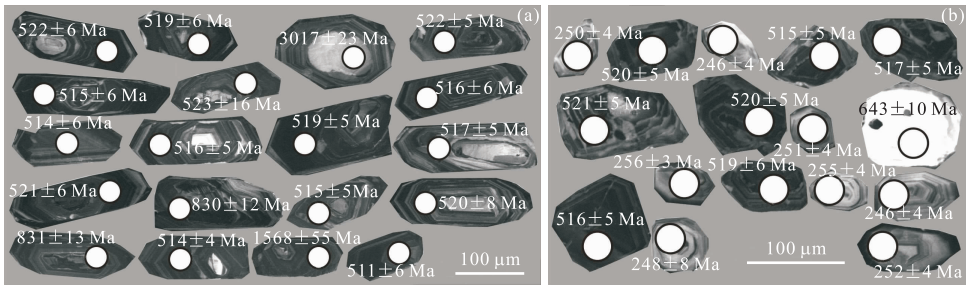


图 3 锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons and their test locations

a. TD11 锆石 CL 图像及测试位置; b. TDFE 锆石 CL 图像及测试位置

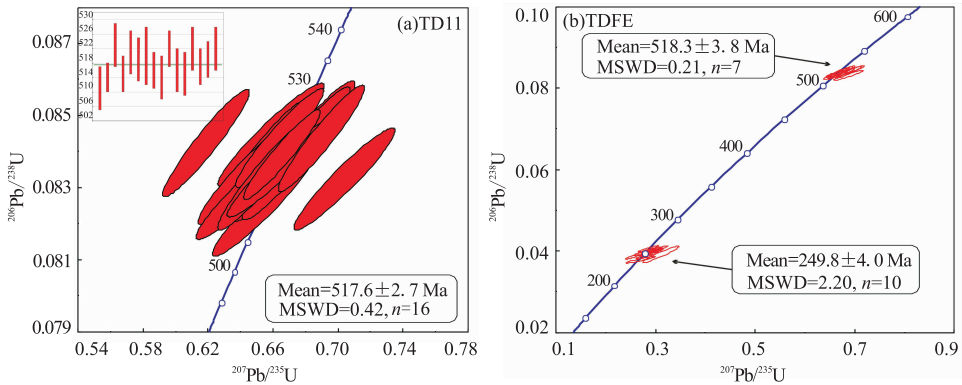


图 4 吉林塔东群锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of zircon U-Pb date from Jilin Tadong Group

a. 样品 TD11 中锆石 U-Pb 谐和图; b. 样品 TDFE 中锆石 U-Pb 谐和图

作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算(Liu *et al.*, 2010)。这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 19500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck *et al.* (1995)。

### 4 锆石 U-Pb 定年及微量元素

#### 4.1 锆石特征

样品 TD11 黑云斜长片麻岩,共选择 19 粒锆石,多为长柱状自形晶,柱面发育,长宽比多数在 3 : 1 左右,长轴长为 100~200 μm,包裹体少,晶形好,柱面和双锥面均发育(图 3a)。阴极发光(CL)较强,具有总体平行晶界的岩浆震荡环带,锆石内部环带宽缓,边缘细密,为典型的岩浆锆石(Corfu *et al.*, 2003; Wu and Zheng, 2004)。Th 和 U 含量较高,Th/U 比值为 0.17~0.65,少量锆石具有残留

核。锆石稀土元素(REE)含量适中,LREE 含量较低,具明显的 Ce 正异常(图 4,图 5,表 2),与典型的岩浆锆石特征相符。

样品 TDFE 磁铁透辉斜长变粒岩,共选择 16 粒锆石,该组锆石按照颗粒大小和阴极发光特征可分为明显的两组,其中一组颗粒较大,粒径为 50~100 μm,呈短柱状;具有锯齿状/不规则的环带,在阴极发光下颜色呈灰黑色,Th、U 含量较高,Th/U 比值为 1.46~4.18。第二组颗粒细小,粒径为 50 μm 左右,呈粒状或短柱状,环带特征比较明显,阴极发光下呈淡黑灰色,较强,Th、U 含量较低,Th/U 比值为 0.78~1.00。

样品 TD11 与 TDFE 中大多数锆石的内部结构和结晶习性并未表现出变质锆石的典型特征,推测该锆石可能受后期变质作用改造很小。

#### 4.2 锆石 U-Pb 年龄结果

利用 LA-ICP-MS 对 TD11 样品中的 19 粒锆石进行分析,除去谐和线以外的 4 粒锆石(单颗粒锆石年龄分别为 3 017 ± 23 Ma, 1 568 ± 55 Ma, 830 ± 12 Ma 和 8 31 ± 13 Ma),其余 15 粒锆石分布集

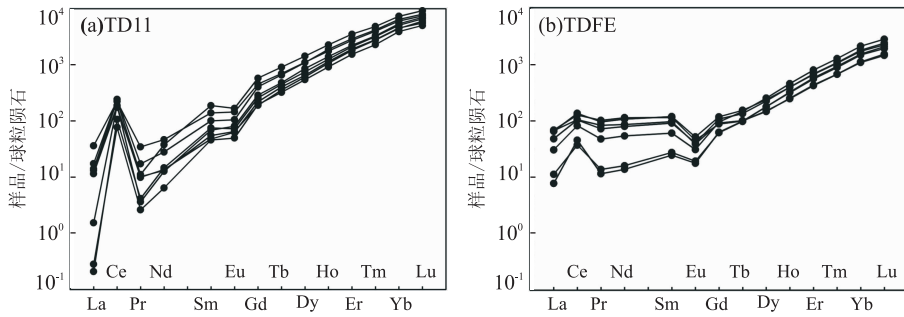


图 5 吉林塔东群锆石 REE 球粒陨石标准化分配模式

Fig. 5 Chondrite normalized REE patterns of zircon grains from Tadong Group, Jilin Province  
a. TD11 中锆石 REE 球粒陨石标准化分配模式; b. TDFE 518.3±3.8 Ma 锆石 REE 球粒陨石标准化分配模式

表 2 吉林塔东群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 Zircon U-Pb isotopic date obtained by LA-ICP-MS for Tadong Group, Jilin Province

样号	<sup>232</sup> Th (10 <sup>-6</sup> )	<sup>238</sup> U (10 <sup>-6</sup> )	Th/U	Pb (10 <sup>-6</sup> )	同位素比值						年龄(Ma)			
					<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb ±σ%	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±σ%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±σ%	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ			
TD11														
TD1101	386	2 211	0.17	286	0.057 5	0.19	0.654 4	2.05	0.082 5	0.09	512	75	513	6
TD1103	1 851	4 581	0.40	941	0.057 1	0.13	0.660 6	1.57	0.083 0	0.06	496	39	514	4
TD1105	327	1 806	0.18	229	0.056 1	0.19	0.659 5	2.17	0.084 5	0.10	456	53	523	6
TD1106	691	3 630	0.26	401	0.056 3	0.18	0.654 5	2.04	0.083 2	0.08	463	51	515	5
TD1108	1 063	2 146	0.50	515	0.052 8	0.15	0.619 6	1.76	0.084 2	0.10	320	43	521	6
TD1109	1 004	3 499	0.29	598	0.055 8	0.15	0.653 7	1.75	0.083 9	0.10	445	39	519	6
TD1110	378	1 828	0.21	270	0.057 6	0.19	0.676 3	2.30	0.084 0	0.13	516	48	520	8
TD1111	2 686	4 793	0.56	1 211	0.055 2	0.16	0.641 5	1.78	0.083 3	0.09	419	43	516	5
TD1112	464	1 851	0.25	282	0.056 0	0.19	0.646 6	2.21	0.083 0	0.10	450	55	514	6
TD1113	614	2 860	0.21	397	0.056 6	0.16	0.664 8	1.79	0.084 4	0.09	477	40	522	5
TD1114	743	2 782	0.27	449	0.056 6	0.16	0.655 2	1.89	0.083 3	0.10	475	42	516	6
TD1115	2 096	4 752	0.44	1 075	0.060 9	0.18	0.704 5	2.06	0.083 2	0.09	637	43	515	6
TD1116	4 482	7 407	0.61	1 985	0.058 1	0.16	0.679 8	1.86	0.084 3	0.10	534	39	522	6
TD1117	1 036	2 274	0.46	473	0.057 3	0.18	0.663 0	2.02	0.083 5	0.09	502	49	517	5
TD1118	5 701	8 827	0.65	2 558	0.057 1	0.13	0.666 1	1.56	0.083 9	0.08	495	34	519	5
TDFE														
TDFE01	557	711	0.78	103	0.053 1	0.29	0.283 7	1.51	0.039 0	0.06	333	93	246	4
TDFE02	889	921	0.96	162	0.051 4	0.25	0.285 3	1.34	0.040 5	0.05	260	84	256	3
TDFE03	461	554	0.83	92	0.058 1	0.46	0.310 7	2.42	0.039 2	0.14	533	110	248	8
TDFE04	446	544	0.82	85	0.053 8	0.31	0.299 2	1.70	0.040 3	0.07	364	99	255	4
TDFE05	739	888	0.83	138	0.051 1	0.27	0.277 8	1.38	0.039 8	0.06	246	85	252	4
TDFE06	6 290	3 038	2.07	2 073	0.057 4	0.16	0.663 9	1.77	0.083 4	0.08	507	41	516	5
TDFE10	3 597	2 455	1.46	1 293	0.057 6	0.16	0.671 5	1.94	0.084 0	0.09	513	45	520	5
TDFE11	10 971	3 418	3.21	2 537	0.059 6	0.17	0.688 0	1.96	0.083 2	0.08	590	45	515	5
TDFE12	4 999	2 550	1.96	1 749	0.059 2	0.16	0.691 2	1.82	0.084 2	0.08	575	41	521	5
TDFE13	9 863	3 662	2.69	2 164	0.059 0	0.13	0.687 5	1.72	0.083 9	0.10	565	34	519	6
TDFE15	17 422	4 169	4.18	3 254	0.057 9	0.15	0.672 8	1.81	0.083 6	0.09	527	40	517	5
TDFE16	929	933	1.00	173	0.052 6	0.26	0.288 5	1.46	0.039 6	0.06	310	88	251	4
TDFE17	909	1 040	0.87	164	0.049 2	0.27	0.261 1	1.42	0.038 9	0.06	157	95	246	4
TDFE18	16 206	3 989	4.06	2 389	0.057 8	0.14	0.673 2	1.58	0.084 0	0.08	523	34	520	5

中(图 4a), <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的表面年龄值为 511 ± 6 Ma~523±6 Ma, 加权平均年龄为 517.6±2.7 Ma (MSWD=0.42). 在锆石核部区域获得了 3 017 ± 23 Ma 和 1 568 ± 55 Ma 的谐和年龄, 应为残留锆石,

剩余其他几个明显偏大的年龄值可能也与残留锆石有关.

样品 TDFE 选出的 16 粒锆石年龄可以分为两组, 第一组有 8 粒锆石, 除去 1 个点年龄明显偏大

外,其余7个点的年龄比较集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $515\pm 5\text{ Ma}\sim 521\pm 5\text{ Ma}$ ,加权平均年龄 $518.3\pm 3.8\text{ Ma}$ (MSWD=0.21)(图4b);第二组有8粒锆石,所有锆石均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中分布为 $240\pm 3\text{ Ma}\sim 256\pm 3\text{ Ma}$ ,加权平均值为 $249.8\pm 4.0\text{ Ma}$ (MSWD=2.20)(图4b)。

## 5 讨论

吉林省塔东群两件样品给出3组锆石 U-Pb 年龄:TD11(朱敦店组黑云片麻岩), $517.6\pm 2.7\text{ Ma}$ ;TDFE(拉拉沟组磁铁透辉斜长变粒岩) $249.8\pm 4.0\text{ Ma}$ 和 $518.3\pm 3.8\text{ Ma}$ 。其中两组锆石的年龄数值非常接近(TD11的 $517.6\pm 2.7\text{ Ma}$ 和TDFE的 $518.3\pm 3.8\text{ Ma}$ ),两者差值是在误差范围内。但是从两组锆石的结晶形态、内部结构、Th和U含量、Th/U值、锆石/球粒陨石稀土元素配分的模式以及微量元素含量等方面分析,两者具有显著区别(图5a,5c,表3),应该是代表不同成因的锆石(张永清,2012)。

拉拉沟组样品 TDFE 磁铁透辉斜长变粒岩中 $249.8\pm 4.0\text{ Ma}$ 年龄值与塔东群附近三叠纪花岗岩年龄值( $244.5\pm 1.9\text{ Ma}$ ,即将发表)和最近报道的近东北向展布于松嫩一张广才岭地块东南缘、敦一密断裂以西地区的花岗岩质岩石的形成时代(Yu *et al.*, 2013)非常接近,考虑塔东铁矿体和围岩强烈蚀变的特点,笔者将该年龄视为后期岩浆热事件年龄。

### 5.1 岩浆锆石与岩浆作用

朱敦店组样品 TD11 黑云斜长片麻岩,原岩为厚100余米的中酸性火山岩。本文研究表明,该样品中的岩浆锆石多为长柱状自形晶,柱面发育,长宽比多数在3:1左右,阴极发光(CL)较强(图3a)。典型的未蚀变岩浆锆石的稀土配分模式表现为:亏损轻稀土元素逐步富集重稀土元素,即从Sm到Lu逐渐增高,同时显示Ce正异常和Eu的负异常,同时 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 比值高。该样品中的锆石稀土元素球粒陨石标准化配分形式(图5a)也与标准岩浆锆石一致(吴元保和郑永飞,2004)。锆石颗粒的Th/U值为0.17~0.65,也指示了该组锆石为岩浆成因的(Koschek, 1993; Rubatto and Gebauer, 2000; Belousova *et al.*, 2002; Rubatto, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。

综上所述, $517.6\text{ Ma}$ 左右的锆石是从岩浆中直接结晶的岩浆锆石,其年龄代表了岩浆活动的时间,说明该区在 $517.6\text{ Ma}$ 左右存在一次岩浆活动。近期,从事该区域研究的学者得出的英云闪长岩中锆

石的U-Pb定年为 $516\pm 4\text{ Ma}$ (Wang *et al.*, 2014),与本文得出的岩浆活动年龄在误差范围内一致。这都说明在早寒武世,该区发育大规模岩浆活动。

### 5.2 热水喷流成因热液锆石及作用年代

近年的研究表明,Zr在热液体系中的活动性较强(Sinha *et al.*, 1992; Rubatto, 2002; Rubatto and Hermann, 2003)。从Zr饱和热液流体中直接结晶的锆石,晶形通常较自形,在相同的岩石中,热液锆石比岩浆锆石更富集微量元素(Hoskin, 2005)。本文的研究表明拉拉沟组TDFE样品中热液锆石均为半自形—他形短柱状,双锥发育,长短轴之比在1.5:1.0左右,CL发光性不好(图3b)。由热液改造过的岩浆锆石应是长柱状的自形锆石,因此,本文所研究的热液锆石可能是从Zr饱和热液中直接结晶而成的,而不是热液对岩浆锆石蚀变改造的结果。

Hoskin and Ireland(2000)和Rubatto(2002)的研究表明:几乎所有岩浆锆石和非热液成因变质锆石都具有低的LREE和强烈的Ce正异常,同时 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 比值高。而热液成因锆石的一个显著特征为富集LREE,如La、Ce、Pr和Nd, $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 比值明显较岩浆锆石低,La含量较岩浆锆石高,Ce正异常弱,其稀土分配模式比较平坦,同时从热液中直接结晶的热液锆石通常异常富集U、Th,含量可高达 $30\,000\ \mu\text{g}/\text{g}$ (Geisler *et al.*, 2003)。吉林省塔东群拉拉沟组具有的 $518.3\pm 3.8\text{ Ma}$ 的一组热液锆石具有异常高的稀土含量,轻稀土含量较高,Ce正异常较弱(图5b),且具有较低的 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 比值(图6),较岩浆锆石具有较高的U、Th含量(表2),其中Th最高含量达 $17\,422\ \mu\text{g}/\text{g}$ ,与典型的热液锆石特征一致。

热液锆石的其他特征还包括高普通Pb含量(Watson *et al.*, 1997)。Hoskin and Schaltegger(2003)也认为普通铅含量高是判别锆石热液成因的主要特征之一。样品TDFE中的热液锆石普遍具有较高的普通铅含量(表2),与热液锆石特征一致。

综上所述, $518.3\text{ Ma}$ 左右的锆石是从热液流体中直接结晶的热液锆石,其年龄代表了热液活动的时间,说明该地区在 $518.3\text{ Ma}$ 左右存在一次强烈的热液活动。同时得到的该区朱敦店组TD11的黑云斜长片麻岩中的岩浆锆石年龄为 $517.6\text{ Ma}$ 左右,与该热液年龄非常接近。同时从事该区工作的学者亦得到了侵入岩英云闪长岩中锆石年龄为 $516\pm 4\text{ Ma}$ (Wang *et al.*, 2014),这与本文得出的早寒武世热水喷流沉积成因热液活动年龄一致。这些都说明了在早寒武世,该区不但发育岩浆活动,而且可能

表 3 锆石微量元素分析结果(μg/g)

Table 3 Trace elements analyses of zircon (μg/g)

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
TD11														
TD1101	1.720	44.9	0.810	7.14	11.20	2.21	68.3	31.9	503	212	1063	254	2692	460
TD1103	1.310	103.0	0.910	7.50	14.50	4.60	117.0	49.0	659	259	1256	276	2833	457
TD1105	0.190	35.1	0.052	2.11	5.67	2.29	56.5	28.4	422	182	916	216	2364	385
TD1106	0.030	53.7	0.078	1.03	6.73	3.23	70.3	29.4	442	180	884	202	2147	355
TD1107	3.820	97.1	2.290	20.50	38.80	5.20	217.0	77.8	998	385	1748	386	4123	651
TD1108	1.360	54.7	0.810	8.07	11.50	4.67	85.0	34.1	463	176	830	187	1974	305
TD1109	0.078	67.6	0.089	2.03	12.20	3.32	90.4	38.4	566	224	1132	259	2860	441
TD11010	0.011	41.2	0.037	1.92	5.84	2.31	56.4	27.2	398	163	838	2029	2216	348
TD11011	1.460	127.0	0.750	8.04	19.90	7.03	161.0	60.9	832	319	1478	328	3376	525
TD11012	0.026	39.1	0.097	2.74	8.18	3.25	92.0	39.4	583	244	1247	286	3082	501
TD11013	0.023	67.4	0.098	3.25	9.28	3.88	107.0	49.1	736	299	1477	340	3618	564
TD11014	0.023	74.1	0.054	2.47	9.63	3.88	101.0	44.1	662	275	1395	327	3507	552
TD11015	10.200	113.0	5.580	39.40	32.70	7.47	140.0	48.5	630	231	1087	241	2538	399
TD11016	1.230	166.0	1.030	11.90	29.10	8.63	194.0	71.7	943	344	1597	346	3507	529
TD11017	0.086	69.3	0.190	3.89	15.40	4.79	116.0	45.3	624	236	1121	253	2638	410
TD11018	6.030	226.0	3.810	26.10	43.00	13.20	245.0	85.9	1120	405	1817	396	3998	593
TDFE														
TDFE01	3.140	112.0	0.94	6.39	7.31	3.65	45.0	15.1	165	64.8	313	71.4	770	140
TDFE02	3.330	138.0	1.06	17.60	28.70	9.73	118.0	33.8	362	128.0	579	122.0	1244	233
TDFE03	0.067	47.3	0.25	3.01	7.03	2.88	40.3	12.1	138	51.8	254	58.1	663	127
TDFE04	0.050	65.4	0.40	6.87	11.50	4.22	52.8	16.8	189	71.2	347	80.7	854	167
TDFE05	2.720	107.0	0.97	6.14	8.44	3.77	39.0	13.3	155	60.5	298	69.9	749	152
TDFE06	4.370	93.8	2.82	17.20	11.20	2.87	46.6	14.6	200	88.7	507	136.0	1673	343
TDFE10	6.810	73.6	3.49	20.50	12.80	3.18	45.4	14.3	199	91.1	531	144.0	1756	376
TDFE11	59.400	321.0	38.30	215.00	71.10	8.83	69.6	14.7	162	65.5	365	97.7	1163	245
TDFE12	57.400	254.0	30.30	154.00	58.20	7.39	72.9	14.9	158	67.5	376	98.4	1197	261
TDFE13	22.600	190.0	15.40	88.30	33.10	5.60	76.3	23.5	303	138.0	784	210.0	2578	541
TDFE15	56.100	347.0	35.60	200.00	74.60	10.40	98.6	24.7	281	115.00	631	168.0	2004	412
TDFE16	4.130	149.0	1.64	13.10	15.40	6.11	83.0	24.6	278	106.0	481	107.0	1092	202
TDFE17	0.370	115.0	0.34	5.93	10.50	4.69	59.1	17.9	217	79.0	367	83.6	911	177
TDFE18	38.850	251.0	25.30	139.00	53.90	7.78	89.2	20.9	263	116.0	648	173.0	2110	447
TDFE19	8.560	136.0	3.28	21.70	21.30	8.40	92.8	26.0	281	99.3	449	100.0	1024	189

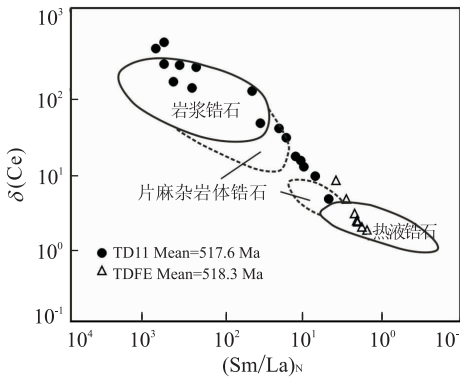


图 6 样品 TD11 和 TDFE 中锆石  $\delta(\text{Ce})/[\omega(\text{Sm})/\omega(\text{La})]_N$  图解

Fig. 6 Pattern of  $\delta(\text{Ce})/[\omega(\text{Sm})/\omega(\text{La})]_N$  of zircon grains in sample TD11 and TDFE

岩以及该区地层以下未被剥露,该期岩浆活动为同期的热液喷流沉积成因的热液活动提供了热源。

### 5.3 热液活动与成矿关系

前人普遍认为塔东铁矿为大型火山喷流沉积—变质改造型铁矿床(李庆武等,2010;寇林林等,2013;邵建波等,2014),对于成矿年龄,最早认为为新元古代,但缺乏相应的同位素定年依据,近期邵建波等利用黄铁矿 Re-Os 同位素定年得到塔东铁矿年龄为  $401 \pm 41 \text{ Ma}$ ,揭示塔东铁矿的主要成矿为古生代(邵建波等,2014)。但笔者在进行该区域磁铁透辉变粒岩锆石的 U-Pb 定年过程中发现了一组  $518.3 \pm 3.8 \text{ Ma}$  的热液锆石的年龄,且该采样点位于拉拉沟组,样品与条带状磁铁石英岩成渐变过渡关系。但需指出的是,该热液锆石的形成是热液喷流沉积形成的。热液喷流作用虽然温度低,但发育范围

还有大量该时期的岩体埋藏在朱敦店组中酸性火山

广,持续时间长,有利于形成大型的铁、锰矿床。综上,518.3 Ma 该区发生过强烈的热液活动,塔东铁矿的形成很可能与这期热液活动有关。当然塔东铁矿所处的特殊大地构造位置,岩浆活动广泛而且频繁,是否具有多阶段成矿还有待深入研究。

## 6 结论

吉林塔东群朱敦店组和拉拉沟组中的锆石得到了两组相似的年龄值,即  $517.6 \pm 2.7$  Ma 和  $518.3 \pm 3.8$  Ma,两组锆石分别属于岩浆锆石和热液锆石。黑云斜长片麻岩中的岩浆锆石为自形长柱, Th/U 值为  $0.17 \sim 0.65$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $517.6 \pm 2.7$  Ma,代表了黑云斜长片麻岩的原岩中酸性火山岩的结晶年龄。磁铁透辉斜长变粒岩中的热液锆石半自形短柱状晶形,异常高的 U、Th 含量,可高达  $17\,422 \mu\text{g/g}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $518.3 \pm 3.8$  Ma,代表了热液作用的年龄,表明该区在 518.3 Ma 左右经历了一次强烈的热液作用,该期热液作用可能与该区  $517.6 \pm 2.7$  Ma 的岩浆作用有关,塔东铁矿的形成很可能与这期热液活动密切相关,由此本文得出塔东群内塔东铁矿于早寒武世(520 Ma $\pm$ )可能存在一期成矿作用。该年龄的得出丰富了该区域铁矿的同位素年代学证据,鉴于前人报道,该区可能存在多阶段成矿,仔细研究成矿的时代与地址背景,对于厘清塔东铁矿的形成时代和找矿方向具有举足轻重的作用。文中在磁铁透辉斜长变粒岩中得到的  $249.8 \pm 4.0$  Ma 的锆石年龄与塔东群附近三叠纪花岗岩年龄值非常接近,考虑塔东铁矿体和围岩强烈蚀变的特点,将该年龄视为后期岩浆热事件年龄。

综上,本文得出塔东群及塔东铁矿成矿为  $518.3 \pm 3.8$  Ma 热水喷流沉积成因的,  $517.6 \pm 2.7$  Ma 的岩浆作用可能为该期热液活动提供热源,同时伴随有  $249.8 \pm 4.0$  Ma 岩浆活动的改造,使现在的塔东铁矿体与围岩表现出强烈蚀变的特点。

致谢:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室在年龄测试工作中给予了支持与帮助,在此表示衷心的感谢!

## References

Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Miner-*

*alogy and Petrology*, 143: 602—622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7

Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469—500. doi: 10.2113/0530469

Geisler, T., Rashwan, A. A., Rahn, M. K. W., et al., 2003. Low-Temperature Hydrothermal Alteration of Natural Metamict Zircons from the Eastern Desert, Egypt. *Mineralogical Magazine*, 67(3): 485—508. doi: 10.1180/0026461036730112

Hoskin, P. W. O., 2005. Trace-Element Composition of Hydrothermal Zircon and the Alteration of Hadean Zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637—648. doi: 10.1016/j.gca.2004.07.006

Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27—62. doi: 10.2113/0530027

Hoskin, P. W. O., Ireland, T. R., 2000. Rare Earth Element Chemistry of Zircon and Its Use as a Provenance Indicator. *Geology*, 28(7): 627—630. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<627:REECOZ>2.0.CO;2

Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093—1101. doi: 10.1039/b804760j

Koschek G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Microscopy*, 171: 223—232. doi: 10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x

Kou, L. L., Zhang, S., Lü, J. C., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Tectonic Implication of the Iron Ore Formation in Tadong Area, Jilin Province. *Geology and Resources*, 22(4): 289—295 (in Chinese with English abstract).

Li, Q. W., Zhang, B., Zhang, H. H., et al., 2010. A New Understanding of Metallogenic Regularity of the Tadong Iron Deposit. *Jilin Geology*, 29(4): 59—61 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004

Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle



- Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. doi: 10. 1093/petrology/egp082
- Ludwig, K. R. , 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Li, D. J. , Wan, Q. H. , Xu, L. J. , et al. , 1997. Petrology and Stratum of Jilin Province. China University of Geoscience Press, Wuhan, 10-11 (in Chinese).
- Peng, Y. J. , Wang, Z. F. , 1995. Determination of A-type Granite Zone in the Central Part of Jilin Province and Its Significance in Tectonics. *Jilin Geology*, 14(3): 31-43 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. J. , Zhao, C. B. , 2001. The Evolution of the Paleo Jihei Orogenic Belt and Accretion of Continental Crust. *Jilin Geology*, 20(2): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Rubatto, D. , Gebauer, D. , 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by ION Microprobe; Some Examples from the Western Alps. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 373-400.
- Rubatto, D. , Hermann, J. , 2003. Zircon Formation During Fluid Circulation in Eclogites (Monviso, Western Alps); Implications for Zr and Hf Budget in Subduction Zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (12): 2173-2187. doi: 10. 1016/S0016-7037(02)01321-2
- Rubatto, D. , 2002. Zircon Trace Element Geochemistry; Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chemical Geology*, 84 (1-2): 123-138. doi: 10. 1016/S0009-2541(01)00355-2
- Shao, J. B. , Zhang, X. Y. , Wang, H. T. , et al. , 2014. Geochemistry and Pyrite Re-Os Dating of the Tadong Iron Deposit in Jilin Province. *Acta Geologica Sinica*, 88 (1): 83-98 (in Chinese with English abstract).
- Sinha, A. K. , Wayne, D. M. , Hewitt, D. A. , 1992. The Hydrothermal Stability of Zircon; Preliminary Experimental and Isotopic Studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (9): 3551-3560. doi: 10. 1016/0016-7037(92)90398-3
- Wang, F. , Xu, W. L. , Gao, F. H. , et al. , 2014. Precambrian Terrane within the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China; Evidence from U-Pb Ages of Detrital Zircons from the Dongfengshan and Tadong Groups. *Gondwana Research*, 26(1): 402-413. doi: 10. 1016/j. gr. 2013. 06017
- Watson, E. B. , Cherniak, D. J. , Hanchar, J. M. , et al. , 1997. The Incorporation of Pb into Zircon. *Chemical Geology*, 141: 19-31. doi: 10. 1016/S0009-2541(97)00054-5
- Wiedenbeck, M. , Alle, P. , Corfu, F. , et al. , 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19 (1): 1-23. doi: 10. 1111/j. 1751-908X. 1995. tb00147. x
- Wu, Y. B. , Zheng, Y. F. , 2004. Genesis of Zircons and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569 (in Chinese).
- Yu, J. J. , Hou, X. G. , Ge, W. C. , et al. , 2013. Magma Mixing Genesis of the Early Permian Liulian Pluton at the Northeastern Margin of the Jiamusi Massif in NE China; Evidences from Petrography, Geochronology and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2971-2986 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J. , Sun, F. Y. , Xu, C. H. , et al. , 2016. Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotopes of the Tanjianshan Granite Porphyry Intrusion in Dachaidan Area of the North Margin of Qaidam Basin, NW China. *Earth Science*, 41 (11): 1830-1844 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q. , 2012. Study on the Laser-Raman Spectroscopy Analysis and CL Images; Implications for Metamictized Zircons and U-Pb Ages. *Geological Survey and Research*, 35(3): 224-228 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 寇林林, 张森, 吕俊超, 等, 2013. 吉林塔东铁矿赋矿建造地球化学特征及其地质构造意义. *地质与资源*, 22(4): 289-295.
- 李东津, 万清海, 许良久等, 1997. 吉林省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 10-11.
- 李庆武, 张斌, 张红红, 等, 2010. 塔东铁矿床成矿规律新认识. *吉林地质*, 29(4): 59-61.
- 彭玉鲸, 王占福, 1995. 吉林省中部 A 型花岗岩带的确定及其构造意义. *吉林地质*, 14(3): 31-43.
- 彭玉鲸, 赵成弼, 2001. 古吉黑造山带的演化与陆壳的增生. *吉林地质*, 20(2): 1-9.
- 邵建波, 张希友, 王洪涛, 等, 2014. 吉林省塔东大型铁矿地球化学特征及黄铁矿 Re-Os 同位素定年. *地质学报*, 88(1): 83-98.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.
- 张延军, 孙丰月, 许成瀚, 等, 2016. 柴北缘大柴旦滩间山花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素. *地球科学*, 41(11): 1830-1844.
- 张永清, 2012. 激光拉曼、阴极荧光研究对蛻晶化锆石及其 U-Pb 年龄解释的指示意义. *地质调查与研究*, 35(3): 224-228.