

江思宏, 梁清玲, 聂凤军, 等. 内蒙古林西双井子杂岩锆石 LA-MC-ICP-MS 测年初步研究[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1108-1123.  
Jiang Sihong, Liang Qingling, Nie Fengjun, et al. A preliminary study of zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb ages of the Shuangjingzi complex in Linxi, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1108-1123(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古林西双井子杂岩锆石 LA-MC-ICP-MS 测年初步研究

江思宏 梁清玲 聂凤军 刘翼飞

(中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

**摘要:** 双井子杂岩产出在内蒙古东部林西县西拉木伦河的南北两侧, 由片岩、片麻岩和片麻状花岗岩组成。前人对其形成时代认识不一, 一种观点认为属于前寒武纪变质岩, 另外一种观点认为属于早中生代构造强烈变形产物。本文通过对双井子杂岩开展较为系统的 LA-MC-ICP-MS 锆石年代学研究, 来限定这套杂岩的形成年代。锆石测年结果表明, 绿泥片岩的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1970 Ma, 年龄比较分散, 没有获得一个比较可靠的加权平均年龄。黑云斜长片麻岩的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1736 Ma, 获得 2 组比较可靠的年龄: 一组由 10 个点组成, 加权平均年龄值为  $(290.5 \pm 2.1)$  Ma, MSWD = 0.36, 为早二叠世; 另一组由 5 个点组成, 加权平均年龄值为  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma, MSWD = 0.12, 为早三叠世, 可能分别代表原岩中两期岩浆的侵位时间。侵位于杂岩中的花岗伟晶岩的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 206.9~2122 Ma, 年龄比较分散, 也没有获得一个比较可靠的加权平均年龄。片麻状花岗岩的锆石加权平均年龄值为  $(278.4 \pm 1.4)$  Ma, MSWD=1.9, 可以代表原岩岩体的侵位年龄, 为早二叠世。岩石地球化学分析结果表明, 双井子杂岩岩石(包括绿泥片岩、黑云斜长片麻岩和片麻状黑云母花岗岩)成分复杂, 其主量元素含量变化较大,  $\text{SiO}_2$  含量变化于 61.97%~77.18%, 但是所有的岩石样品均具有轻稀土分异明显、富集大离子亲石元素(LILE)的特征, 都是 U、Nb、Sr、P、Ti 相对亏损, 而 Th、K、Ce、Nd、Hf、Sm、Y 和 Yb 相对富集。与杂岩中的岩石相比, 花岗伟晶岩显示明显不同的 Ba 亏损和 Ta 富集, 而其他元素的富集和亏损趋势则与其几乎一致。因此, 总的来说, 双井子杂岩是由不同成分和时代的岩石(包括地层和岩浆岩)混合组成。根据前人研究成果和上述锆石年龄数据, 推测双井子杂岩的形成年龄在 230~206 Ma。因此, 笔者认为本区可能并不存在前寒武纪基底, 双井子杂岩可能是在华北板块和西伯利亚板块碰撞过程中沿西拉木伦河深断裂形成的一套变形程度较高的中浅变质岩系, 并有可能遭受了燕山中晚期的再次改造。

**关键词:** 锆石 LA-MC-ICP-MS 测年; 杂岩; 双井子; 西拉木伦河; 内蒙古

**中图分类号:** P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)04-1108-16

位于内蒙古林西县的双井子杂岩, 近年来受到广大地质工作者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>, 主要有两个方面的原因, 一方面是前人将其划归前寒武纪变质岩<sup>[3]</sup>, 被认为与锡林浩特杂岩一样, 属于华北克拉通与西伯

利亚克拉通之间的微陆块, 因此对研究本区前寒武纪地质演化及其与中生代大规模的铅锌银及钨锡矿的成矿关系具有重要意义; 另一方面是双井子杂岩产于西拉木伦深大断裂旁侧, 对其深入研究对

收稿日期: 2014-05-06; 改回日期: 2014-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB429805)、国家自然科学基金项目(41273061)和中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010561510、1212011120330)联合资助。

作者简介: 江思宏, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事金属矿床成矿规律研究; E-mail: jiangsihong1@163.com。

解西拉木伦深大断裂的活动具有重要的构造意义。有学者将双井子杂岩与区域上的志留纪地层都划归古生代晚期的增生-碰撞杂岩<sup>[1]</sup>,由于在这套杂岩中的云母和钾长石中获得的 Ar-Ar 年龄介于 110~230 Ma,因此认为它们还受到了中生代区域动力变质作用的强烈改造。

近年来,有不少学者对华北克拉通与西伯利亚克拉通之间的微陆块开展了较为深入的研究。如锡林浩特微陆块,已经有不少文献对此进行论述<sup>[4-14]</sup>,但是其形成年代是一个争论的焦点问题。《内蒙古自治区区域地质志》<sup>[3]</sup>报道了锡林浩特杂岩(也有学者将其称为锡林郭勒杂岩)内普通锆石 U-Pb 年龄为 1060 Ma;徐备等<sup>[14]</sup>将获得的锡林浩特杂岩 Sm-Nd 全岩等时线年龄 1025 Ma 解释为杂岩的成岩年龄,而 Rb-Sr 全岩等时线年龄(651±21) Ma 为杂岩的主变质年龄。施光海等<sup>[11]</sup>通过对杂岩中锆石及侵入于杂岩内的石榴石花岗岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究认为,杂岩形成年龄为(437±3) Ma~(316±3) Ma。陈斌等<sup>[7]</sup>对锡林浩特杂岩大量碎屑锆石研究后认为,锡林浩特杂岩的原岩形成于古生代古蒙古洋板块俯冲消减期间,而其变质时间可能是在晚古生代,与南蒙微大陆和华北克拉通沿索伦缝合带的碰撞有关,锡林浩特杂岩并不是前寒武纪陆块残留。薛怀民等<sup>[8]</sup>对锡林浩特杂岩中的正副片麻岩测年研究后也认为锡林浩特杂岩并非前寒武纪古陆块。因此,越来越多的年代学数据并不支持锡林浩特杂岩为前寒武纪变质基底。然而,近年来葛梦春等<sup>[6]</sup>的最新研究认为,锡林浩特微陆块还是存在的,形成于中元古代。而对于双井子杂岩是否属于前寒武纪变质岩块体的一部分,也有不同的认识。李锦轶等<sup>[1]</sup>在位于西拉木伦河以南的双井子杂岩中的花岗片麻岩中获得锆石的 SHRIMP <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄介于 267~309 Ma,没有发现更为古老的锆石年龄信息,因此认为这套杂岩不是形成于前寒武纪。

鉴于前人对双井子杂岩研究较少,分析的样品有限,代表性较差,因此本次在前人工作基础上,通过对西拉木伦河北岸双井子杂岩及其内产出的侵

入岩开展了锆石 LA-MC-ICP-MS 测年研究,来大致限定双井子杂岩可能的形成时间,并探讨其可能的形成背景。

## 1 地质概况

双井子杂岩沿内蒙古东部林西县西拉木伦河的南北两侧产出(图 1),所处大地构造位置为中亚造山带东部温都尔庙俯冲-增生杂岩带内<sup>[15]</sup>。李锦轶等<sup>[1]</sup>认为西拉木伦河深断裂从双井子杂岩的南侧经过(图 1-a),该深断裂被认为是主要大地构造单元的界线,它到底是板块缝合线,还是板块内的次一级构造单元的界线,至今仍然存在争议<sup>[1,15-16]</sup>。

区域上,双井子杂岩呈近东西向的带状,断续出露长约 50 km,宽约 15 km(图 1-b),主要为一套片岩和片麻岩以及侵入其中并受强烈构造变形的片麻状花岗岩。在 1:20 万《林西县幅》<sup>①</sup>和《五分地幅》<sup>②</sup>地质图上,这套杂岩曾被划为奥陶-志留纪地层。紧靠其北侧出露出一套面积不大的志留系,主要岩性为灰黑色板岩夹灰岩。晚石炭世林西组黑色板岩、砂岩夹灰岩,主要出露在区域上的西北部,东南部出露下二叠统黄岗梁组,岩石类型主要为变质粉砂岩夹泥灰岩透镜体,南部零星出露上二叠统染房地组蚀变安山岩、玄武安山岩、砂岩和砾岩。大面积的中侏罗统紫色砂砾岩和上侏罗统兴安岭组火山岩(包括安山岩、流纹岩和角砾熔岩等)分布在北部地区。在地势低洼和沟谷处分布有第四系的风成砂、黄土、红土层及冲洪积层等。

区域地层褶皱强烈、断裂发育,主构造线方向呈近东西-北东东向,控制了地层与岩体的产出。

区域上出露的最大岩体为双井子花岗岩体,岩性为二云母花岗岩,呈岩株状产出。岩体主体在西侧,向东呈岩枝状侵入到双井子杂岩里。李锦轶等<sup>[1]</sup>从双井子岩体中采集的 2 个样品获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(229.2±4.1) Ma 和(237.5±2.7) Ma,表明该岩体是在三叠纪中期侵位。另外,区域范围内还发育了一些脉岩,包括花岗斑岩、花岗伟晶岩和闪长玢岩等。

①辽宁省第二区域地质测量队.中华人民共和国区域地质矿产报告书(地质部分)—白塔子庙幅和林西幅(1:20万)(内部报告). 1971.

②辽宁省第二区域地质测量队.中华人民共和国区域地质矿产报告书(地质部分)—克什克腾旗幅和五分地幅(1:20万)(内部报告). 1971.



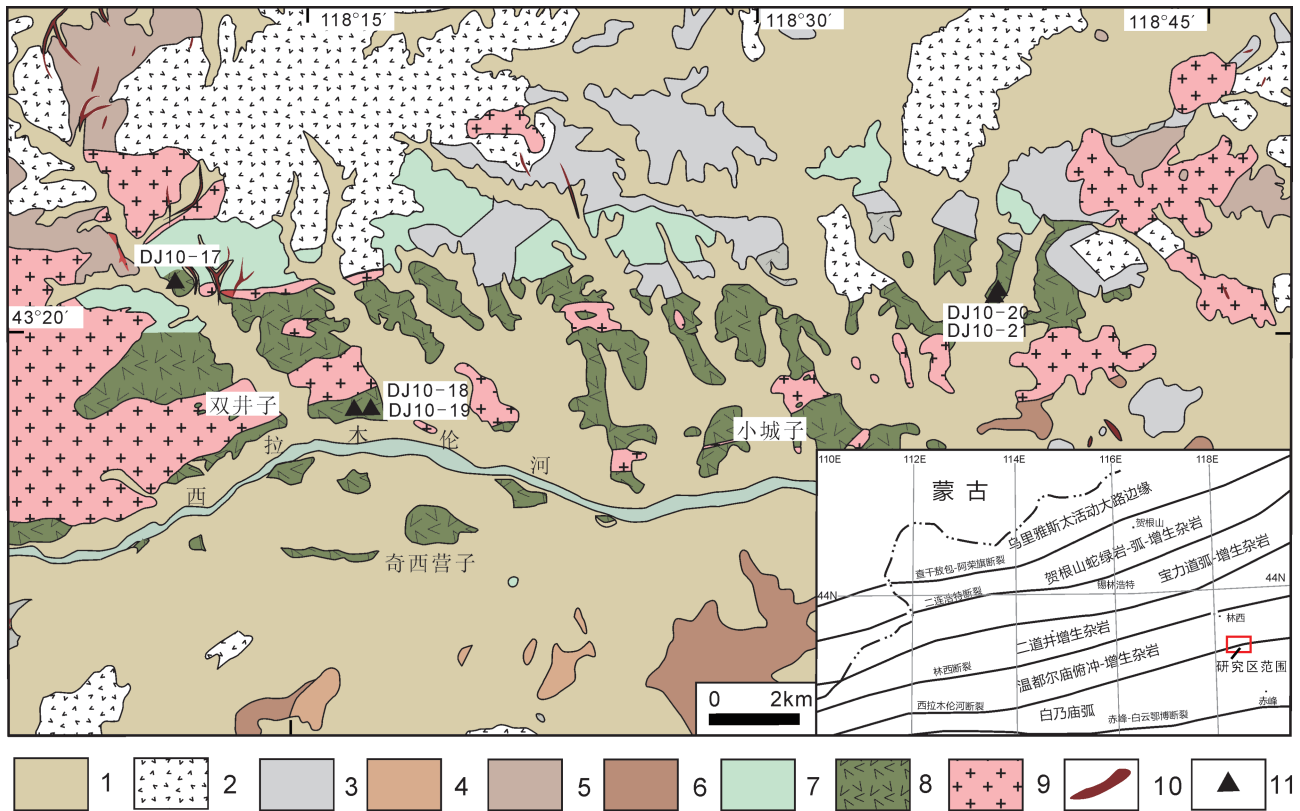


图1 内蒙古林西双井子杂岩地质简图(根据1:20万《林西县幅》<sup>①</sup>和《五分地幅》<sup>②</sup>地质图改编,图中小插图引自[15])  
 1—第四系沉积物;2—上侏罗统安山岩、流纹岩和角砾熔岩;3—中侏罗统砂砾岩;4—上二叠统板岩、砂岩夹泥灰岩;5—下二叠统变质粉砂岩夹泥灰岩透镜体;6—晚石炭世林西组黑色板岩、砂岩夹灰岩;7—志留系板岩夹灰岩;8—双井子杂岩(片岩、片麻岩和片麻状花岗岩);  
 9—印支期花岗岩;10—花岗岩脉;11—取样位置

Fig.1 Simplified geological map of the Shuangjingzi complex in Linxi County, Inner Mongolia (modified after geological maps of "Linxi County Sheet" and "Wufendi Sheet" at a scale of 1:200 000. the inset from [15])

1—Quaternary sediments; 2—Upper Jurassic andesite, rhyolite and breccia lava; 3—Middle Jurassic sandy conglomerate; 4—Upper Permian slate, sandstone intercalated with muddy limestone; 5—Lower Permian metamorphic siltstone intercalated with muddy limestone lens; 6—Late Carboniferous black shale, sandstone intercalated with limestone; 7—Sillurian slate intercalated with limestone; 8—Shuangjingzi complex (schist, gneiss, and gneissic granite); 9—Indosinian granite; 10—Granite porphyry dyke; 11—Sampling location

## 2 样品特征及分析方法

### 2.1 样品特征

本文所研究的样品均采自西拉木伦河北侧的双井子杂岩及其内产出的侵入岩脉(图1)。其中样品DJ10-17采自双井子北约4 km的绿泥石片岩,采样位置坐标为:北纬43°21'10",东经118°10'41";岩石表面呈灰黑—灰绿色,粒状变晶结构,片状构造。岩石韧性变形强烈,可见石英、方解石呈透镜状拉长、变形(图2-a),地表风化形成豆荚状孔洞,

绿泥石化发育。镜下观察为片理化绿泥石化,绿帘石化凝灰质砂岩,矿物成分以石英为主,其次为斜长石和钾长石,三者共占65%~70%,绢云母—白云母—绿泥石和少量绿帘石占25%~30%,方解石占3%~5%。岩石片理化较为强烈,具薄层状构造,不同的薄层之间具有不同的物质成分,其中以片理化砂岩为主,片理化粉砂岩次之,并夹有片理化凝灰岩层或凝灰质砂岩层。经片理化作用,凝灰物质多已搓碎,但仍残留有粒度在0.3~0.5mm呈晶屑状产出的斜长石、石英和钾长石(图2-c)。原岩中的绢

① 辽宁省第二区域地质测量队. 中华人民共和国区域地质矿产报告书(地质部分)—白塔子庙幅和林西幅(1:20万)(内部报告). 1971.

② 辽宁省第二区域地质测量队. 中华人民共和国区域地质矿产报告书(地质部分)—克什克腾旗幅和五分地幅(1:20万)(内部报告). 1971.

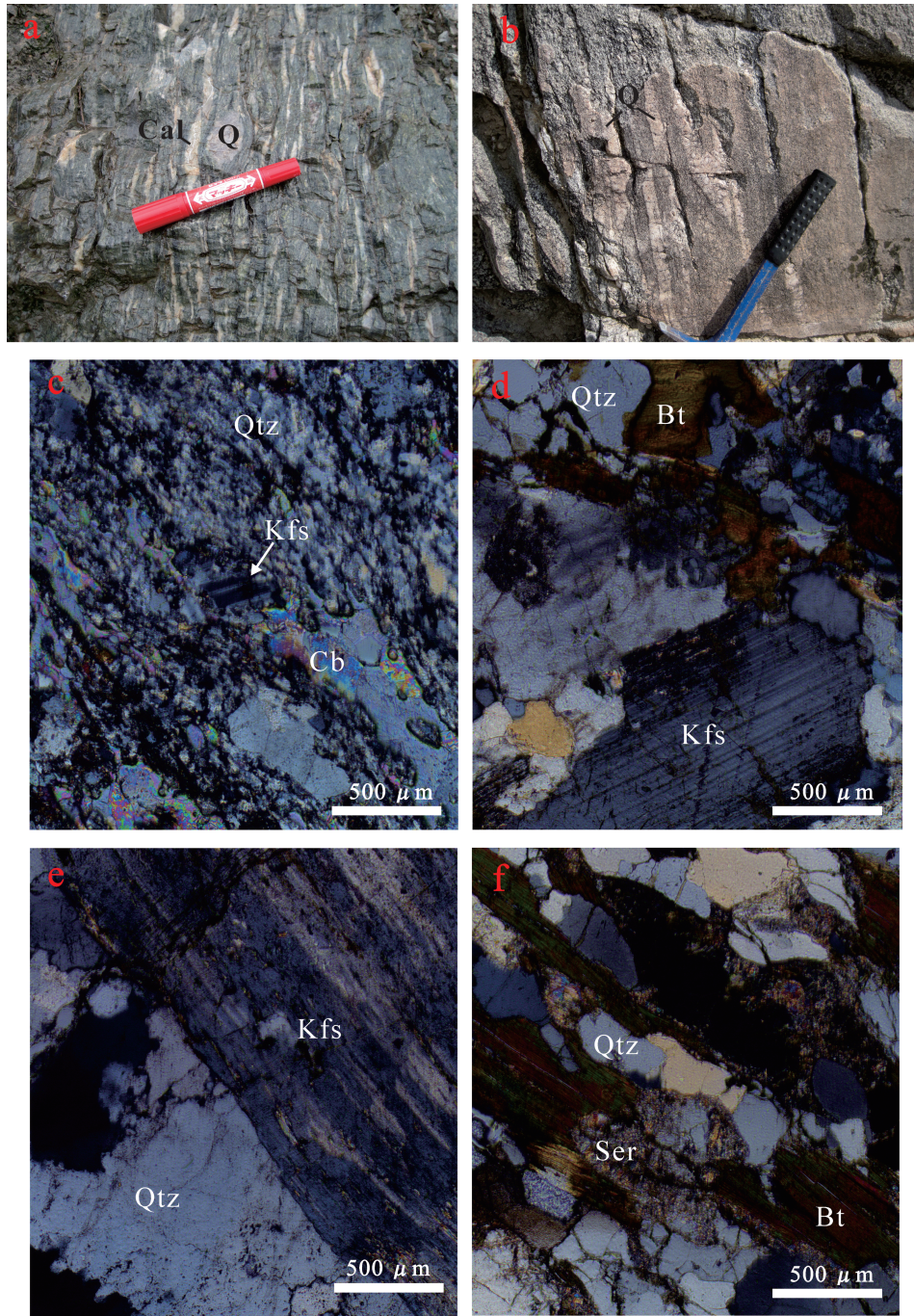


图2 双井子杂岩野外和镜下照片

地表:a—绿泥片岩,岩石韧性变形强烈,可见石英(Qtz)、方解石(Cal)呈透镜状拉长、变形;b—片麻状黑云母花岗岩,可见沿片理方向产生的石英细脉。镜下:c—绿泥石片岩,可见钾长石(Kfs)晶屑,表明其原岩可能为火山碎屑岩,还可见细粒的石英和颗粒较粗的碳酸盐矿物(Cb);d—片麻状黑云母花岗岩,黑云母具有一定的定向排列特征;e—花岗伟晶岩,石英和长石矿物晶体粗大;f—黑云斜长片麻岩,黑云母、石英、长石(多已绢云母化)呈定向排列。矿物名称缩写:Bt—黑云母;Cal—方解石;Cb—碳酸盐;Qtz—石英;Kfs—钾长石;Ser—绢云母

Fig.2 Photos of rocks from the Shuangjingzi complex

At the surface: a—Chlorite schist which experienced strong ductile deformation, with lenticular elongated quartz and calcite minerals; b—Gneissic biotite granite with quartz veinlets occurring along the foliation. Under microscope: c—Chlorite schist with K-feldspar crystal fragments, indicating that the original rock might have been volcanoclastic rock. Fine-grained quartz and coarse carbonate minerals can also be seen in the thin section; d—Gneissic biotite granite with the biotite occurring in a certain direction; e—Granite pegmatite with coarse quartz and K-feldspar crystals; f—Biotite plagioclase gneiss with biotite, quartz and feldspar (mostly sericitized) occurring in a certain direction  
Mineral abbreviation: Bt—Biotite; Cal—Calcite; Cb—Carbonate; Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Ser—Sericite



云母-白云母多已被绿泥石和绿帘石所交代,晚期还有一次碳酸盐交代作用。

样品 DJ10-18 和 DJ10-19 采自双井子东约 2 km、西拉木伦河北约 1 km 的细粒片麻状黑云母花岗岩(图 2-b),采样位置坐标为:北纬 43°17'53.8",东经 118°17'10.1"。地表可见片理化,片理产状 155°∠70°,沿片理方向产出有石英细脉。镜下岩石呈混染-细晶结构,局部具蠕英结构。主要矿物为斜长石(30%~35%)、钾长石(25%~30%)、石英(30%~35%),少量黑云母和白云母,占 3%~5%,其中黑云母要多于白云母。矿物粒度一般在 1~2 mm。斜长石、钾长石,石英均呈他形晶,尤其是石英具有压扁、拉长的特征,黑云母也沿一定的方向排列(图 2-d)。使岩石具有弱定向构造。岩石受到围岩的混染,混染物主要为粒度在 0.1 mm 左右的细粒长英矿物,在岩石中不均匀分布,含量不超过 15%。

样品 DJ10-20 采自 S205 省道路边的花岗伟晶岩脉,采样位置坐标为:北纬 43°20'55",东经 118°37'47.5"。花岗伟晶岩侵入到双井子杂岩中,呈灰白色,花岗伟晶结构,块状、角砾状构造,其中有石英、白云母呈脉状穿插花岗伟晶岩角砾,在伟晶岩中有黑云母斜长片麻岩捕虏体,团块状产出。周围有 10 余条花岗伟晶岩脉近 SN 向平行产出。镜下观察花岗伟晶岩呈压碎结构,矿物成分主要为斜长石(40%±)、钾长石(20%~25%)、石英(35%~40%),少量的白云母(1%~2%),次生矿物绢云母(1%~2%)。矿物晶体粗大(图 2-e)。

样品 DJ10-21 采自 S205 省道路边花岗伟晶岩中的捕虏体,为黑云母斜长片麻岩,采样位置坐标为:北纬 43°20'55",东经 118°37'47.5"。镜下观察片麻岩具有鳞片粒状变晶结构,片麻状构造,矿物成分主要为斜长石(45%±)、石英(30%~35%)、黑云母(20%±),还有少量的白云母和绿泥石。岩石中的斜长石和石英均呈他形粒状,被压扁、拉长定向排列;黑云母呈鳞片状,均匀分布,定向排列,使岩石具有明显的片麻状构造,矿物粒度大小均匀,一般在 0.5~1 mm。

## 2.2 锆石特点

上述岩石样品的锆石挑选工作是委托廊坊科大岩石矿物分选技术服务公司完成的。在开展锆石测年之前,首先将所测样品的锆石颗粒用环氧树

脂制靶,并对靶中的锆石作阴极发光和背散射电子图像分析。所测样品锆石特征如下(图 3):

样品 DJ10-17:绿泥石片岩中的锆石晶型多不完整,具有碎屑锆石的特征,锆石颗粒大小一般在 80~100 μm,少量可达 150~200 μm,锆石中的环带结构多不发育。

样品 DJ10-18:片麻状黑云母花岗岩中的锆石晶型相对比较完整,多为短柱状,其柱长多在 100~120 μm,锆石中一般发育有环带结构,未见包裹有残留锆石。

样品 DJ10-20:花岗伟晶岩中的少数锆石晶型完整,但是大多数锆石残缺不全,锆石颗粒大小多数在 80 μm 左右,少量可达 150 μm。有一部分锆石环带结构清晰,具有岩浆锆石特点。

样品 DJ10-21:黑云母斜长片麻岩中的锆石晶型均不完整,具有碎屑锆石的特征,其锆石颗粒大小在 60~80 μm,少数可达 100 μm。个别锆石环带发育,具有岩浆锆石特点。

## 2.3 分析方法

主元素分析采用 X 荧光光谱仪, Ba、Sr 分析采用 ICP-AES,其他元素(包括稀土元素)分析采用 ICP-MS,分析测试工作是由核工业地质分析测试研究中心完成。测试精度: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 的 RSD<10%,其他主元素的 RSD<2%~8%,微量和稀土元素的 RSD<10%。

锆石 LA-MC-ICP-MS 测年是在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成,锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127 (U: 923×10<sup>-6</sup>; Th: 439×10<sup>-6</sup>; Th/U: 0.475<sup>[17]</sup>)为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 4.3 程序<sup>[18]</sup>,测量过程中绝大多数分析点 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb>1000,未进行普通铅校正,<sup>204</sup>Pb 由离子计数器检测,<sup>204</sup>Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 <sup>204</sup>Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谱和图用



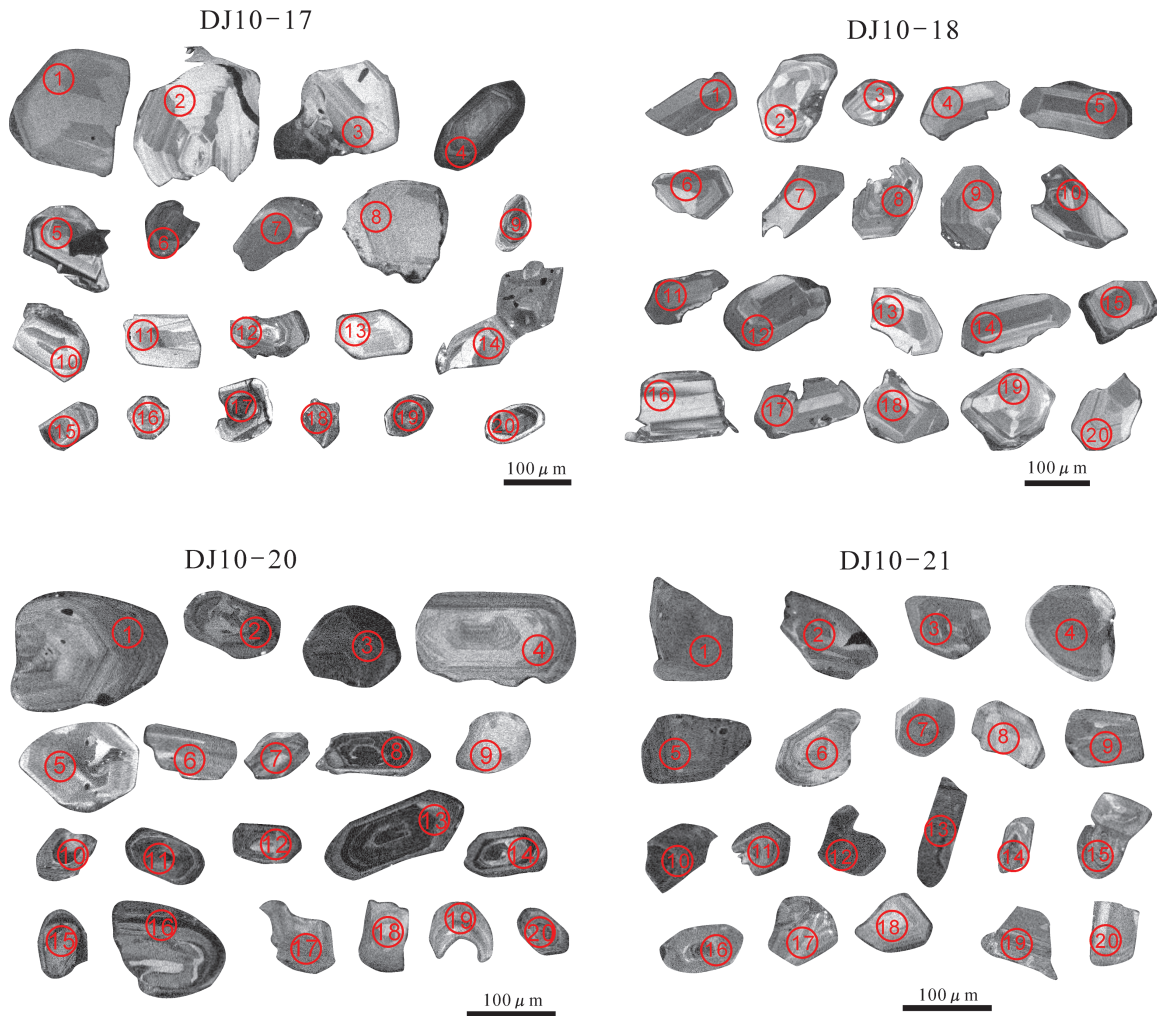


图3 双井子杂岩的锆石 CL 图像

Fig.3 CL images of the zircons from the Shuangjingzi complex

Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等<sup>[19]</sup>。样品分析过程中, Plesovice 标样的分析结果为  $(337.9 \pm 2.2) \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $n=8$ ,  $\text{MSWD}=0.31$ ), 对应的年龄推荐值为  $(337.1 \pm 0.4) \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ )<sup>[20]</sup>, 两者在误差范围内完全一致。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石测年

样品 DJ10-17: 锆石 Th 的质量分数为  $(22\sim 266) \times 10^{-6}$ , U 的质量分数为  $(46\sim 1060) \times 10^{-6}$ , Th/U 比值 0.03~0.91, 绝大多数介于 0.2~0.7 (表 1)。获得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1970 Ma, 年龄比较分散 (图 4-a)。古老的锆石 (前寒武纪年龄) 年龄采用

$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  年龄结果, 获得了 6 个前寒武纪年龄, 分别为 2405 Ma、2073 Ma、1917 Ma、1633 Ma、1524 Ma 和 1300 Ma, 其他锆石年龄多介于古生代, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄结果多位于 395~488 Ma。总之, 年龄结果以古生代为主, 其次是元古宙, 中生代只有 2 个锆石年龄。

样品 DJ10-18: 锆石 Th 的质量分数为  $(35\sim 214) \times 10^{-6}$ , U 质量分数为  $(86\sim 363) \times 10^{-6}$ , Th/U 比值 0.41~0.61, 比较集中 (表 1)。获得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 253.9~289.7 Ma, 绝大多数年龄在 275~285 Ma, 在去掉异常偏高或偏低的 4 个测点 (4、12、16、17) 年龄值, 其他 16 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为  $(278.4 \pm 1.4) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD}=1.9$  (图 4-b), 可

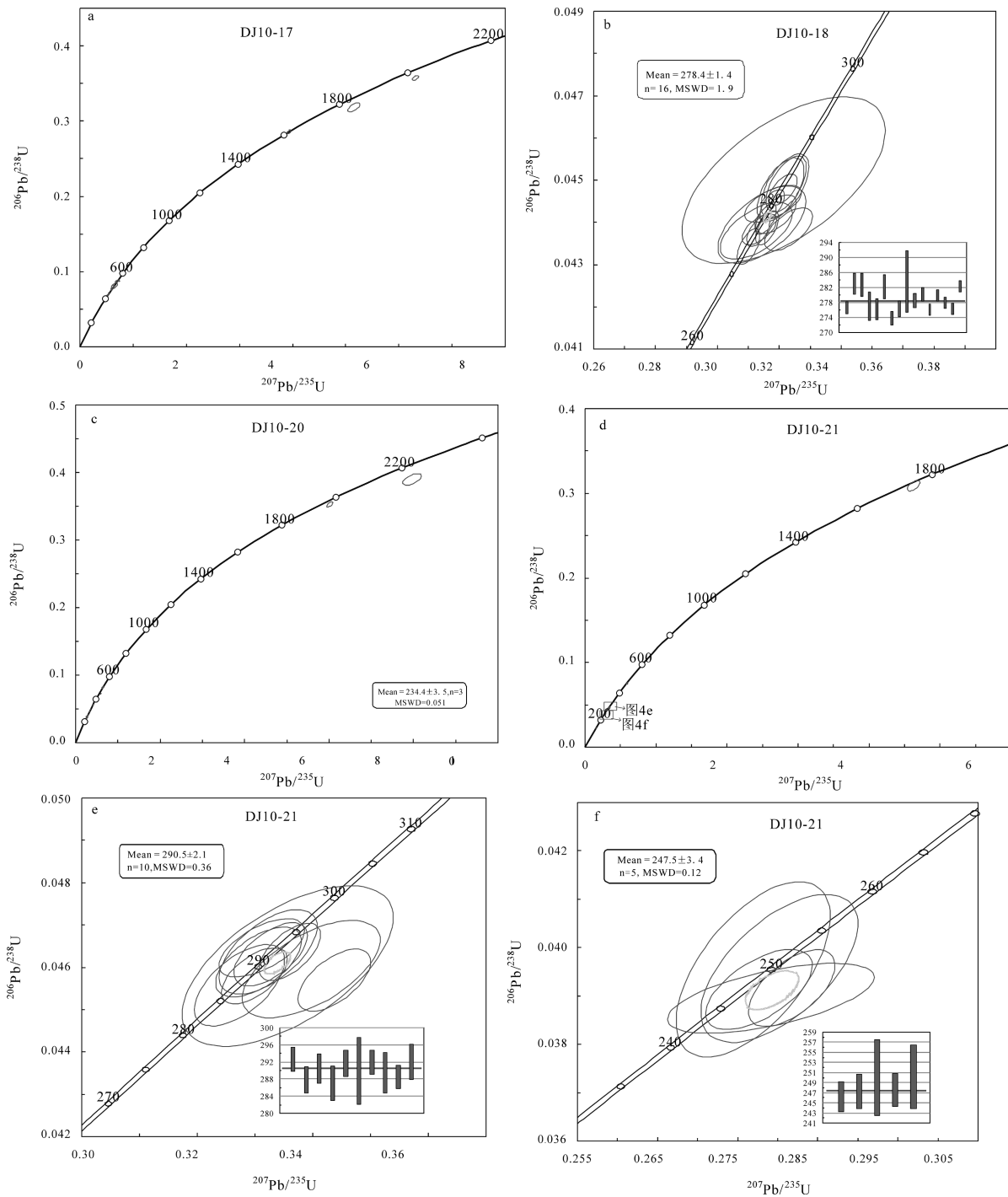


图4 双井子杂岩中主要岩石的锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.4 Concordia diagram showing all LA-MC-ICP-MS data points for zircons from the main rocks in the Shuangjingzi complex

以代表原岩岩体的侵位年龄,为早二叠世。

样品 DJ10-20: 锆石 Th 的质量分数为  $(38\sim 958)\times 10^{-6}$ , U 质量分数为  $(82\sim 2431)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值 0.13~1.46, 绝大多数介于 0.4~0.8 (表 1)。获得的

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 206.9~2122 Ma, 年龄比较分散 (图 4-c)。古老的锆石 (前寒武纪年龄) 年龄采用  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  年龄结果, 获得了 2 个前寒武纪年龄, 分别为 2325 Ma 和 2011 Ma, 其他年龄多介于晚古生代

表 1 内蒙古林西双井子杂岩锆石 LA-MC-ICP-MS 测年结果  
Table 1 LA-MC-ICP-MS data for zircons from the Shuangjingzi complex in Linxi, Inner Mongolia

测点编号	Pb/10 <sup>-6</sup>	<sup>232</sup> Th/10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	DJ10-17 绿泥石片岩	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb/Ma	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U/Ma	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U/Ma	1 σ
DJ10-17.1	8.5	60	87	0.69	0.0568	0.0009	0.65	0.04	0.0811	0.0022	483.4	35.2	508.9	23.0	502.8	13.2	
DJ10-17.2	1.7	29	46	0.62	0.0515	0.0013	0.34	0.01	0.0476	0.0011	261.2	54.6	296.6	9.5	299.9	6.6	
DJ10-17.3	4.5	37	62	0.60	0.0553	0.0007	0.52	0.02	0.0678	0.0011	433.4	27.8	424.8	10.1	422.7	6.8	
DJ10-17.4	26	233	1060	0.22	0.0520	0.0002	0.28	0.00	0.0393	0.0006	283.4	9.3	251.9	3.3	248.6	3.5	
DJ10-17.5	1.5	61	265	0.23	0.0561	0.0005	0.62	0.02	0.0791	0.0019	453.8	18.5	488.6	13.5	491.0	11.2	
DJ10-17.6	6.7	136	301	0.45	0.0489	0.0005	0.15	0.00	0.0230	0.0003	146.4	22.2	146.1	2.0	146.3	1.8	
DJ10-17.7	138	212	324	0.65	0.1173	0.0004	5.15	0.07	0.3182	0.0040	1917	5.9	1845	11.9	1781	19.7	
DJ10-17.8	16	109	192	0.57	0.0565	0.0004	0.59	0.01	0.0755	0.0007	472.3	14.8	470.1	4.3	469.4	4.1	
DJ10-17.9	30	141	469	0.30	0.0566	0.0003	0.59	0.01	0.0763	0.0007	476.0	9.3	473.8	3.7	473.7	4.0	
DJ10-17.10	13	115	182	0.63	0.0557	0.0004	0.54	0.01	0.0709	0.0007	442.6	12.0	441.4	4.4	441.3	4.2	
DJ10-17.11	17	164	200	0.82	0.0545	0.0004	0.48	0.01	0.0633	0.0007	394.5	16.7	395.2	4.2	395.9	4.1	
DJ10-17.12	31	258	379	0.68	0.0551	0.0003	0.53	0.00	0.0694	0.0005	416.7	11.1	430.0	2.9	432.6	3.0	
DJ10-17.13	7.0	52	102	0.51	0.0553	0.0005	0.53	0.01	0.0698	0.0004	433.4	25.0	433.6	3.6	435.2	2.3	
DJ10-17.14	22	98	300	0.33	0.0576	0.0007	0.70	0.02	0.0868	0.0013	522.3	25.9	536.3	12.7	536.4	8.0	
DJ10-17.15	63	132	144	0.91	0.0999	0.0003	3.94	0.02	0.2858	0.0015	1633	5.9	1621	4.7	1620	7.5	
DJ10-17.16	22	123	331	0.37	0.0947	0.0004	1.09	0.02	0.0836	0.0010	1524	7.4	750.4	7.7	517.5	6.1	
DJ10-17.17	236	266	544	0.49	0.1553	0.0004	6.88	0.05	0.3214	0.0019	2405	195.2	2096	5.9	1796	9.3	
DJ10-17.18	137	195	274	0.71	0.1281	0.0003	6.31	0.04	0.3574	0.0021	2073	0.2	2020	5.5	1970	9.8	
DJ10-17.19	83	22	792	0.03	0.0843	0.0003	2.19	0.03	0.1889	0.0026	1300	5.6	1179	9.1	1116	14.0	
DJ10-17.20	39	33	865	0.04	0.0618	0.0002	0.74	0.01	0.0873	0.0006	733.3	7.4	564.5	3.2	539.4	3.4	
DJ10-18 片麻状黑云母花岗岩																	
DJ10-18.1	13	148	273	0.54	0.0523	0.0003	0.32	0.00	0.0439	0.0003	298.2	11.1	278.9	1.9	276.8	1.6	
DJ10-18.2	6.6	55	125	0.44	0.0521	0.0005	0.32	0.00	0.0449	0.0004	287.1	12.0	283.6	3.3	283.2	2.7	
DJ10-18.3	9.1	102	231	0.44	0.0519	0.0004	0.32	0.01	0.0449	0.0005	279.7	16.7	283.3	3.9	282.9	3.1	
DJ10-18.4	2.9	35	86	0.41	0.0643	0.0010	0.38	0.01	0.0428	0.0007	751.6	34.1	326.7	6.4	270.2	4.1	
DJ10-18.5	17	214	363	0.59	0.0520	0.0015	0.31	0.01	0.0439	0.0006	283.4	66.7	277.6	7.3	277.2	3.7	
DJ10-18.6	7.8	107	216	0.49	0.0518	0.0012	0.31	0.01	0.0438	0.0004	276.0	47.2	276.2	6.0	276.4	2.8	
DJ10-18.7	12	124	228	0.55	0.0519	0.0004	0.32	0.01	0.0448	0.0005	279.7	16.7	282.2	3.8	282.3	3.1	
DJ10-18.8	9.3	126	218	0.58	0.0519	0.0003	0.31	0.00	0.0434	0.0003	279.7	-16.7	274.2	1.9	274.1	1.7	
DJ10-18.9	12	150	275	0.55	0.0534	0.0006	0.32	0.01	0.0438	0.0003	346.4	27.8	284.2	3.9	276.6	2.1	



续表1

测点编号	Pb/10 <sup>-6</sup>	<sup>232</sup> Th/10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb/Ma	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U/Ma	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U/Ma	1 σ
DJ10-18.10	6.4	41	95	0.43	0.0511	0.0013	0.32	0.02	0.0450	0.0013	242.7	59.2	283.0	16.7	283.7	8.0
DJ10-18.11	16	163	320	0.51	0.0523	0.0006	0.32	0.00	0.0442	0.0003	301.9	24.1	281.0	3.4	278.8	1.9
DJ10-18.12	13	113	231	0.49	0.0737	0.0004	0.46	0.00	0.0457	0.0003	1033	16.8	387.1	2.8	288.2	2.1
DJ10-18.13	5.9	52	117	0.44	0.0519	0.0008	0.32	0.01	0.0444	0.0003	279.7	37.0	280.3	4.7	280.3	1.8
DJ10-18.14	9.7	102	210	0.49	0.0519	0.0003	0.31	0.00	0.0438	0.0002	283.4	19.4	276.7	1.9	276.3	1.5
DJ10-18.15	6.8	67	145	0.47	0.0519	0.0003	0.32	0.00	0.0444	0.0002	283.4	17.6	280.2	2.0	280.1	1.5
DJ10-18.16	12	149	244	0.61	0.0552	0.0005	0.35	0.00	0.0460	0.0003	420.4	20.4	304.1	2.3	289.7	1.6
DJ10-18.17	11	156	346	0.45	0.0540	0.0014	0.30	0.01	0.0402	0.0007	372.3	61.1	265.8	7.8	253.9	4.2
DJ10-18.18	12	130	251	0.52	0.0520	0.0003	0.32	0.00	0.0441	0.0002	283.4	11.1	278.5	1.7	278.1	1.5
DJ10-18.19	6.5	57	135	0.43	0.0519	0.0005	0.31	0.00	0.0438	0.0002	279.7	22.2	276.9	2.9	276.6	1.5
DJ10-18.20	4.5	51	113	0.45	0.0521	0.0004	0.32	0.00	0.0448	0.0002	300.1	12.0	282.8	2.3	282.4	1.5
DJ10-20 花岗岩样品																
DJ10-20-1	16	222	283	0.78	0.0610	0.0004	0.32	0.00	0.0385	0.0003	638.9	8.3	284.7	2.3	243.6	1.7
DJ10-20-2	25	285	354	0.80	0.0534	0.0004	0.41	0.01	0.0555	0.0005	346.4	16.7	349.3	4.5	348.1	3.3
DJ10-20-3	34	190	461	0.41	0.0571	0.0004	0.65	0.01	0.0818	0.0011	494.5	14.8	507.5	8.6	506.9	6.3
DJ10-20-4	12	130	269	0.48	0.0525	0.0007	0.35	0.01	0.0489	0.0004	305.6	36.1	307.2	4.1	307.8	2.3
DJ10-20-5	26	345	236	1.46	0.0537	0.0004	0.42	0.00	0.0564	0.0004	366.7	16.7	354.5	3.5	353.6	2.6
DJ10-20-6	5.8	124	150	0.83	0.0505	0.0008	0.23	0.00	0.0326	0.0005	216.7	38.9	207.3	3.8	206.9	2.9
DJ10-20-7	38	509	833	0.61	0.0525	0.0004	0.29	0.01	0.0407	0.0007	305.6	12.0	262.1	4.1	257.3	4.4
DJ10-20-8	73	842	2431	0.35	0.0537	0.0005	0.28	0.01	0.0372	0.0007	366.7	15.7	246.9	4.2	235.7	4.5
DJ10-20-9	5.8	77	161	0.48	0.0507	0.0009	0.26	0.01	0.0369	0.0013	227.8	73.1	234.0	9.3	233.5	8.3
DJ10-20-10	56	582	2130	0.27	0.0529	0.0002	0.27	0.00	0.0370	0.0003	324.1	11.1	242.7	2.1	234.2	1.9
DJ10-20.11	67	958	1840	0.52	0.0571	0.0002	0.28	0.00	0.0356	0.0002	494.5	9.3	250.8	1.8	225.7	1.5
DJ10-20.12	30	217	434	0.50	0.0592	0.0004	0.59	0.01	0.0724	0.0009	572.3	10.2	470.7	5.0	450.4	5.4
DJ10-20.13	72	785	2169	0.36	0.0614	0.0003	0.32	0.00	0.0373	0.0003	653.7	4.6	278.8	2.1	236.0	1.6
DJ10-20.14	31	449	861	0.52	0.0599	0.0003	0.30	0.00	0.0362	0.0003	598.2	9.3	265.5	2.0	229.2	1.7
DJ10-20.15	106	38	299	0.13	0.1482	0.0011	7.96	0.15	0.3897	0.0057	2325	8.3	2227	16.4	2122	26.2
DJ10-20.16	62	79	146	0.54	0.1238	0.0003	6.02	0.05	0.3530	0.0025	2011	5.1	1979	6.8	1949	12.1
DJ10-20.17	14	170	303	0.56	0.0521	0.0003	0.33	0.00	0.0456	0.0003	300.1	11.1	287.7	1.9	287.5	1.6
DJ10-20.18	6.5	96	82	1.17	0.0521	0.0006	0.33	0.01	0.0464	0.0004	287.1	30.6	292.8	4.2	292.6	2.3
DJ10-20.19	30	452	572	0.79	0.0510	0.0002	0.28	0.00	0.0397	0.0003	242.7	9.3	249.9	1.6	250.8	1.6
DJ10-20.20	38	483	1159	0.42	0.0514	0.0002	0.27	0.00	0.0384	0.0003	261.2	41.7	244.6	1.7	242.9	1.7

续表 1

测点编号	Pb/10 <sup>-6</sup>	<sup>232</sup> Th/10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb/Ma	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U/Ma	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U/Ma	1 σ
DJ10-21 黑云斜长片麻岩																
DJ10-21.1	9.2	87	166	0.52	0.0516	0.0004	0.33	0.00	0.0465	0.0005	264.9	16.7	290.5	3.7	292.8	2.8
DJ10-21.2	25	275	467	0.59	0.0546	0.0005	0.34	0.00	0.0457	0.0005	394.5	22.2	300.0	3.1	288.1	3.0
DJ10-21.3	33	415	650	0.64	0.0520	0.0006	0.33	0.00	0.0461	0.0005	287.1	32.4	290.0	3.7	290.7	3.4
DJ10-21.4	96	148	283	0.52	0.1087	0.0005	4.63	0.06	0.3089	0.0040	1778	9.1	1735	10.8	1736	19.8
DJ10-21.5	6.6	78	274	0.28	0.0505	0.0005	0.24	0.01	0.0338	0.0006	216.7	22.2	215.0	4.2	214.5	3.6
DJ10-21.6	8.7	153	123	1.25	0.0518	0.0011	0.28	0.01	0.0390	0.0005	276.0	48.1	250.0	6.8	246.3	3.0
DJ10-21.7	8.4	167	341	0.49	0.0490	0.0005	0.16	0.00	0.0229	0.0003	146.4	22.2	146.4	2.2	146.3	1.9
DJ10-21.8	3.5	54	69	0.78	0.0516	0.0008	0.28	0.00	0.0391	0.0005	333.4	35.2	248.8	3.5	247.5	3.4
DJ10-21.9	10	99	175	0.56	0.0521	0.0005	0.33	0.01	0.0456	0.0006	287.1	12.0	287.5	3.9	287.3	3.9
DJ10-21.10	17	9.3	828	0.01	0.0514	0.0003	0.28	0.01	0.0396	0.0010	257.5	8.3	250.8	5.1	250.2	6.3
DJ10-21.11	10	115	300	0.38	0.0583	0.0068	0.28	0.01	0.0396	0.0012	538.9	257.4	248.2	5.0	250.0	7.4
DJ10-21.11	14	2.6	760	0.00	0.0522	0.0002	0.28	0.00	0.0392	0.0005	300.1	9.3	252.0	2.8	247.6	3.2
DJ10-21.12	11	107	200	0.53	0.0521	0.0005	0.33	0.00	0.0463	0.0005	300.1	12.0	291.6	3.2	291.8	3.0
DJ10-21.13	34	186	560	0.33	0.0571	0.0003	0.59	0.01	0.0754	0.0008	494.5	14.8	473.2	4.3	468.7	5.1
DJ10-21.14	6.9	7.5	309	0.02	0.0525	0.0006	0.34	0.01	0.0460	0.0013	309.3	24.1	293.9	9.2	290.1	7.7
DJ10-21.15	38	257	412	0.62	0.0779	0.0011	0.94	0.04	0.0874	0.0033	1144	27.8	675.1	23.3	540.1	19.8
DJ10-21.16	64	925	972	0.95	0.0526	0.0003	0.34	0.00	0.0464	0.0004	309.3	13.0	294.2	2.7	292.2	2.7
DJ10-21.17	18	300	505	0.59	0.0507	0.0005	0.23	0.00	0.0327	0.0003	233.4	25.0	209.1	2.6	207.5	2.2
DJ10-21.18	6.2	67	130	0.52	0.0537	0.0010	0.34	0.01	0.0460	0.0008	366.7	40.7	297.0	6.0	289.7	4.7
DJ10-21.19	31	396	584	0.68	0.0522	0.0004	0.33	0.00	0.0458	0.0004	294.5	21.3	289.5	2.9	288.7	2.7
DJ10-21.20	17	235	320	0.73	0.0520	0.0011	0.33	0.01	0.0464	0.0007	287.1	46.3	291.3	4.3	292.2	4.0

和早中生代,并以早中生代年龄为主。由于最小的锆石年龄为206.9 Ma,表明片岩的形成年龄不会早于这个年龄。

样品 DJ10-21: 锆石 Th 的质量分数为  $(2.6\sim 925)\times 10^{-6}$ , U 质量分数为  $(69\sim 971)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值 0.003~1.25, 绝大多数介于 0.3~0.8 (表 1)。获得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1736 Ma。获得 2 组比较可靠的年龄: 一组由 10 个点组成,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为  $(290.5\pm 2.1)\text{Ma}$ , MSWD = 0.36, 为早二叠世 (图 4-d, e); 另一组由 5 个点组成,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为  $(247.5\pm 3.4)\text{Ma}$ , MSWD = 0.12, 为早三叠世 (图 4-d, f)。其他锆石年龄数据较为分散, 获得 1 个古老锆石 (前寒武纪年龄) 的年龄, 其  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  年龄结果为 1778 Ma。

### 3.2 元素地球化学分析

#### 3.2.1 主量元素

绿泥片岩的主量元素含量 (表 2):  $\text{SiO}_2$  为 61.97%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 1.47%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 2.18%, CaO 含量高, 达 14.76%, 烧失量达 4.71%。2 件片麻状黑云母花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 74.00%~77.18%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 4.43%~5.33%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.46%~3.62%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 1.28~1.47, A/NKC 值为 0.95~1.00, 显示铝略不饱和。花岗伟晶岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 76.46%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 4.64%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 4.14%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 1.12; A/NKC 值为 1.03, 显示铝略过饱和。1 件黑云斜长片麻岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 72.49%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 1.63%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.51%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 0.46。2 件片麻状黑云母花岗岩样品在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解上 (图略) 均落入“高钾钙碱系列”区。

#### 3.2.2 稀土元素

绿泥片岩的  $\Sigma\text{REE}$  为  $83.50\times 10^{-6}$  (表 2),  $\delta\text{Eu}$  为 0.80, Eu 弱亏损 (图 5-a)。2 件片麻状黑云母花岗岩的  $\Sigma\text{REE}$  为  $94.19\times 10^{-6}$ ~ $168.10\times 10^{-6}$  (表 2),  $\delta\text{Eu}$  为 0.39~0.54, Eu 亏损明显。花岗伟晶岩的  $\Sigma\text{REE}$  为  $44.86\times 10^{-6}$  (表 2),  $\delta\text{Eu}$  为 0.21, Eu 强烈亏损。1 件黑云斜长片麻岩的 REE 总量为  $115.00\times 10^{-6}$  (表 2),  $\delta\text{Eu}$  为 0.77, Eu 弱亏损。上述岩石在稀土元素球粒陨石标准化图上均表现为具有一定分异特征的稀土元素组成模式, LREE 分馏明显, 而 HREE 分馏不明显 (图 5-a)。

#### 3.2.3 微量元素

所有岩石均以富集大离子亲石元素 (LILE) 为

表 2 双井子杂岩的主元素 (%), 微量和稀土元素 ( $10^{-6}$ ) 分析结果

Table 2 Major elements (%), rare earth elements and trace elements ( $10^{-6}$ ) analyses of the Shuangjingzi complex

分析项目	DJ10-17	DJ10-18	DJ10-19	DJ10-20	DJ10-21
	绿泥片岩	片麻状 黑云母花岗岩		花岗伟晶岩	黑云母 斜长片麻岩
$\text{SiO}_2$	61.97	77.18	74.00	76.46	72.49
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9.14	11.70	13.38	13.02	12.34
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.66	0.73	0.39	0.08	3.69
FeO	2.15	0.65	0.90	0.30	1.35
MgO	1.08	0.12	0.23	0.06	1.18
CaO	14.76	0.99	0.89	0.43	1.09
$\text{Na}_2\text{O}$	2.18	3.46	3.62	4.14	3.51
$\text{K}_2\text{O}$	1.47	4.43	5.33	4.64	1.63
MnO	0.12	0.02	0.02	0.05	0.08
$\text{TiO}_2$	0.41	0.09	0.11	0.02	0.35
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.09	0.02	0.06	0.02	0.06
烧失量	4.71	0.47	0.94	0.68	1.94
Total	99.74	99.86	99.88	99.89	99.71
A/CNK	0.29	0.95	1.00	1.03	1.30
$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	3.65	7.89	8.95	8.78	5.14
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	0.67	1.28	1.47	1.12	0.46
$\sigma$	0.70	1.82	2.58	2.30	0.90
La	16.60	18.40	35.10	8.57	20.90
Ce	32.60	36.90	69.40	16.20	44.10
Pr	3.91	4.36	8.01	2.23	5.44
Nd	15.1	17.9	31.2	8.29	22.1
Sm	3.04	3.8	6.15	3.12	4.68
Eu	0.776	0.660	0.770	0.192	1.14
Gd	2.88	3.56	5.72	2.47	4.26
Tb	0.545	0.591	0.961	0.414	0.832
Dy	3.13	3.18	4.67	1.66	4.60
Ho	0.591	0.601	0.822	0.236	0.851
Er	1.75	1.75	2.31	0.647	2.62
Tm	0.300	0.281	0.361	0.100	0.401
Yb	1.97	1.90	2.21	0.617	2.64
Lu	0.305	0.303	0.389	0.118	0.427
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.55	6.38	10.468	9.15	5.21
$\delta\text{Eu}$	0.80	0.54	0.39	0.21	0.77
$\Sigma$	83.497	94.186	168.073	44.864	114.991
Rb	40.8	104	144	259	82.8
Sr	304	100	142	36.8	186
Y	16.9	16.9	22.8	8.08	23.0
Nb	5.61	2.2	4.21	16.8	7.13
Ba	302	975	1108	105	570
Ta	0.411	0.253	0.453	6.60	0.401
Pb	8.53	29.3	40.4	32.6	7.65
Th	5.82	9.75	32.7	13.4	5.47
U	1.11	1.03	2.70	0.712	0.644
Zr	113	88.2	190	18.5	67.8
Hf	2.83	3.01	6.44	1.55	1.86

特征 (图 5-b), 都是 U、Nb、Sr、P、Ti 相对亏损, 而 Th、K、Ce、Nd、Hf、Sm、Y 和 Yb 相对富集。与其他岩石相比, 花岗伟晶岩显示明显不同的 Ba 亏损和 Ta 富集, 而其他元素的富集和亏损趋势则几乎一致。

## 4 讨论

### 4.1 双井子杂岩的形成时代

笔者曾在区域上大井矿区及外围通过锆石 LA-MC-ICP-MS 测年, 识别出了至少 4 期岩浆活动, 分别是海西晚期、印支早期、燕山早期和燕山中期<sup>[22]</sup>。



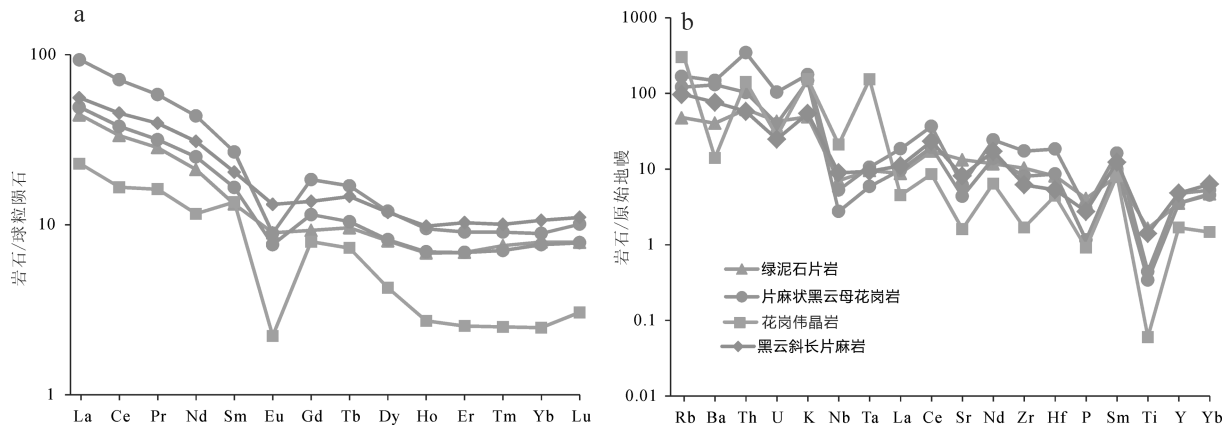


图5 双井子杂岩的稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(原始地幔数据引自[21])  
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns(a)and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for the Shuangjingzi complex (data of primitive mantle after [21])

本次在双井子杂岩中的片麻状黑云母花岗岩中获得的锆石加权平均年龄值为  $(278.4 \pm 1.4)$  Ma, MSWD=1.9, 代表了原岩的侵位年龄。该年龄结果与区域上马鞍子黑云母二长花岗岩体中的锆石年龄  $(279.7 \pm 1.3)$  Ma<sup>[22]</sup> 在误差范围内一致, 说明区域上该期岩浆活动较为频繁, 可能形成于类似火山弧的构造背景<sup>[22]</sup>。这一年龄也与西拉木伦河南侧奇西营子花岗片麻岩中的锆石 SHRIMP 年龄  $(283 \pm 9)$  Ma 近于一致<sup>[1]</sup>。由于片麻状黑云母花岗岩发生了明显的片理化, 因此表明双井子杂岩的形成年代不会早于片麻状黑云母花岗岩的侵位年龄, 即  $(278.4 \pm 1.4)$  Ma。

由于在双井子杂岩中没有见到明显的变质成因锆石, 因此只能通过对这些碎屑锆石和岩浆锆石年龄的测定, 来间接限定双井子杂岩的形成年代。采自双井子杂岩中的2件样品中, 样品 DJ10-17 绿泥石片岩中获得的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1970 Ma, 由于年龄比较分散, 没有获得可靠的年龄数据。样品 DJ10-21 黑云母斜长片麻岩中的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 146.3~1736 Ma, 其中有两组锆石年龄比较集中, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值分别为  $(290.5 \pm 2.1)$  Ma 和  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma, 其他锆石年龄数据较为分散。其中这个  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma 的早三叠世年龄与我们在区域上大四段村似斑状黑云母二长花岗岩体获得的锆石年龄  $(242.8 \pm 1.7)$  Ma 在误差范围内一致<sup>[22]</sup>, 而且这一时期还是区域上一个重要的成矿期, 如莲花山<sup>[23]</sup>、车户沟<sup>[24]</sup>、敖尔盖<sup>[25]</sup>、库里吐<sup>[26]</sup>、鸭鸡山<sup>[27]</sup>等铜钼多金属矿床的矿化时间

都发生在大约 240 Ma。总之, 从这2件样品的锆石测年结果来看, 双井子杂岩的形成年龄不会早于  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma, 即应该在这之后形成。

花岗伟晶岩侵入到黑云母斜长片麻岩中, 其侵位年龄可以间接限定片麻岩的形成时间。但是, 样品 DJ10-20 花岗伟晶岩中的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于 206.9~2122 Ma, 由于这些年龄比较分散(图4), 所以难以获得一个比较可靠的谐和年龄。但是根据花岗伟晶岩中最为年轻的锆石年龄为 206.9 Ma, 说明片麻岩的形成年龄应该不会晚于这个年龄。

由上可见, 根据本次双井子杂岩中的锆石测年数据推断, 双井子杂岩的形成年龄可能介于  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma~206.9 Ma。结合李锦轶等<sup>[1]</sup>在发生片理化的双井子岩体中获得的2个锆石 SHRIMP U-Pb 年龄  $(229.2 \pm 4.1)$  Ma 和  $(237.5 \pm 2.7)$  Ma, 可以将双井子杂岩的形成年龄进一步限定在 230~206 Ma。

#### 4.2 双井子杂岩的成因及对形成环境的约束

岩石地球化学分析结果表明, 双井子杂岩岩石(包括绿泥石片岩、黑云斜长片麻岩和片麻状黑云母花岗岩)成分复杂, 其主量元素含量变化较大,  $\text{SiO}_2$  含量变化于 61.97%~77.18%, 但是所有的岩石样品都具有轻稀土分异明显、富集大离子亲石元素(LILE)的特征, 都是 U、Nb、Sr、P、Ti 相对亏损, 而 Th、K、Ce、Nd、Hf、Sm、Y 和 Yb 相对富集。与杂岩岩石相比, 花岗伟晶岩显示明显不同的 Ba 亏损和 Ta 富集, 而其他元素的富集和亏损趋势则与其几乎一致。因此, 总的来说, 双井子杂岩是由不同成分和

时代的岩石(包括地层和岩浆岩)混合组成,具有增生-碰撞杂岩的特点<sup>[1]</sup>。

本次研究在DJ10-18号样品片麻状黑云母花岗岩中未发现古老的锆石年龄数据,这一点与李锦轶等<sup>[1]</sup>在西拉木伦河南侧奇西营子花岗片麻岩中开展锆石测年时遇到的情况一致,在马鞍子黑云母二长花岗岩体的锆石测年中,也没有遇见古老的锆石年龄<sup>[22]</sup>,至少反映这一期岩体可能不是古老陆壳重熔的产物,岩浆来源较深。而没有见到古老的残留锆石,是否反映本区不存在古老陆壳?

本次在DJ10-17号样品绿泥石片岩中获得6个古老(前寒武纪年龄)的锆石年龄,其<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄结果分别为2405 Ma、2073 Ma、1917 Ma、1633 Ma、1524 Ma和1300 Ma;在DJ10-20号花岗伟晶岩和DJ10-21号黑云斜长片麻岩中各获得了2个古老锆石年龄,其<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄结果分别为2325 Ma、2011 Ma和1778 Ma、1144 Ma。与锡林浩特杂岩<sup>[7]</sup>相比,双井子杂岩中的早元古代锆石较多,由于其更为靠近华北克拉通,因此来自华北克拉通古陆壳的可能性比较大,而中新元古代锆石数量较少,也有可能与其距离南蒙古微大陆较远有关。在DJ10-17和DJ10-21 2件样品的碎屑锆石测年数据统计中(图6),其早古生代锆石较多,这一点与锡林浩特杂

岩<sup>[7]</sup>相似,可能来自早中古生代的岩浆弧?而更多的锆石年龄数据则来自二叠纪和三叠纪(图6),表明当时本区发生了强烈的构造岩浆活动,李锦轶等<sup>[1]</sup>曾认为与华北板块和西伯利亚板块二叠纪中期—三叠纪中期的碰撞拼合有关。但是,从这些碎屑锆石年龄上看,在250~280 Ma有一个时间间断;而双井子杂岩中产出的锆石年龄为(278.4±1.4)Ma的片麻状黑云母花岗岩也不是与碰撞有关的陆壳重熔型花岗岩,与区域上的马鞍子黑云母二长花岗岩体一样可能属于火山弧花岗岩<sup>[22]</sup>,因此我们更相信华北板块和西伯利亚板块的碰撞拼合可能发生在二叠纪晚期至三叠纪早期,这与我们在孟恩陶勒盖岩体获得的认识是一致的<sup>[28]</sup>。

值得一提的是,在DJ10-17号样品绿泥石片岩和DJ10-21黑云母斜长片麻岩中,均有1粒锆石的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U测年结果为146.3 Ma,是巧合吗?区域上,这一时期的岩浆活动非常强烈,笔者曾在大坝南部的火山岩中获得的锆石LA-MC-ICP-MS年龄分别为(143.5±0.7)Ma,(144.3±0.7)Ma和(145.3±1.0)Ma,在小城子村南部石英斑岩脉中获得的锆石年龄为(146.1±0.9)Ma<sup>[22]</sup>。是不是有可能有少量的晚侏罗—早白垩世的地层也被卷入进去,形成了片岩和片麻岩?如果是这样的话,片岩的最终形成年龄岂不是

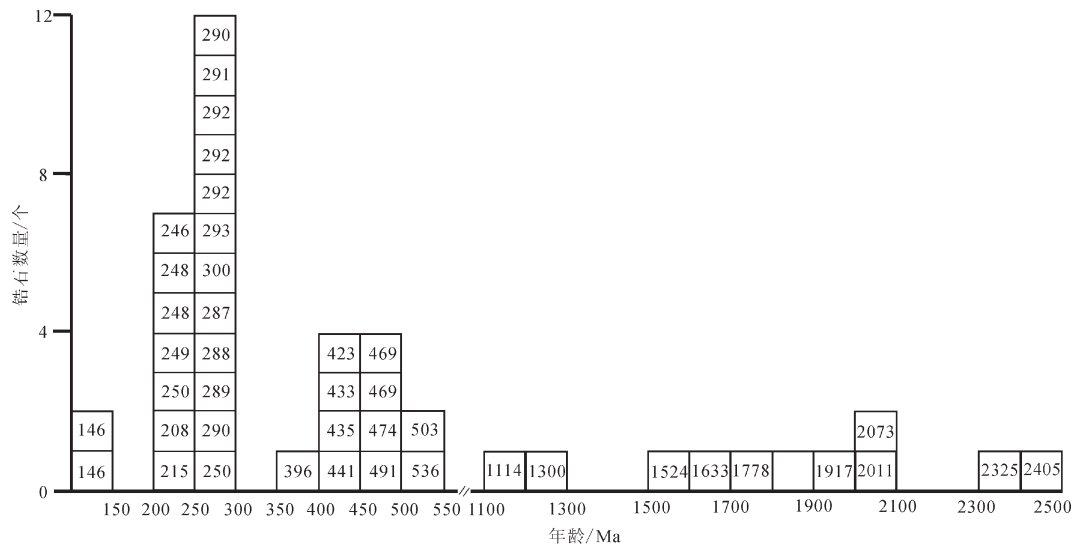


图6 双井子杂岩中碎屑锆石年龄直方图

(图中小方格中的数字代表碎屑锆石年龄(Ma),其中锆石年龄小于1000 Ma,采用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄值;锆石年龄大于1000Ma,采用<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄值)

Fig.6 Histogram of the detrital zircon ages from the Shuangjingzi complex

(The number in the square is the age (Ma) of the detrital zircon, using the <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age to represent the zircon age younger than 1000Ma, and using the <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age to represent the zircon age older than 1000 Ma)

要更年轻? 李锦轶等<sup>[1]</sup>曾在这套杂岩的云母和钾长石中测量的 Ar-Ar 年龄介于 110~230 Ma, 其最晚的构造热事件年龄要略晚于我们在片岩和片麻岩中获得的锆石年龄, 可以间接证明双井子杂岩中含有晚侏罗一早白垩世地层似乎也是合情合理的。

因此, 通过对双井子杂岩锆石年龄的研究, 笔者认为本区可能并不存在前寒武纪基底, 双井子杂岩可能是在华北板块和西伯利亚板块碰撞过程中沿西拉木伦河深断裂形成的一套变形程度较高的中浅变质岩系, 这套杂岩有可能在后期的燕山中晚期由于西拉木伦河深断裂的重新活动(?), 使得少部分晚侏罗一早白垩世地层也被卷入到这套杂岩中来。

## 5 结 论

(1) 根据对双井子杂岩中的锆石 LA-MC-ICP-MS 测年数据推断, 双井子杂岩的形成年龄估计在 230~206 Ma。

(2) 通过对双井子杂岩中碎屑锆石的年龄研究, 笔者认为本区可能并不存在前寒武纪基底, 双井子杂岩可能是在华北板块和西伯利亚板块碰撞过程中沿西拉木伦河深断裂形成的一套变形程度较高的中浅变质岩系, 并有可能存在燕山中晚期的再次改造。

### 参考文献(References):

- [1] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 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, 2007, 23 (3): 565-582.  
Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (3): 565-582 (in Chinese with English abstract).
- [2] Jian P, Shi YR, Zhang FQ, et al. Geological excursion to Inner Mongolia, China, to study the accretionary evolution of the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[C]//Liu D Y, Natal'in B, Jian P, et al(eds.). Abstract & Excursion Guidebook: Third International Workshop and Field Excursion for IGCP Project. 2007, 480: 49-72.
- [3] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991:1-725.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. Regional Geology of Nei Mongol

- Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-725 (in Chinese).
- [4] 孙俊俊, 葛梦春, 周文孝, 等. 内蒙古锡林浩特岩群岩相学、地球化学特征及构造环境分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 144-155.  
Sun Junjun, Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, et al. Lithofacies, geochemical characteristics and tectonic environment of Xilinhot Group, Inner Mongolia, China[J]. Earth Frontiers, 2012, 19(5): 144-155 (in Chinese with English abstract).
- [5] 于洋, 葛梦春, 周文孝, 等. 内蒙古锡林浩特岩群岩石学特征及变质温压条件[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 136-143.  
Yu Yang, Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, et al. Petrology and metamorphic temperature-pressure conditions of Xilinhot Group, Inner Mongolia, China[J]. Earth Frontiers, 2012, 19(5): 136-143 (in Chinese with English abstract).
- [6] 葛梦春, 周文孝, 于洋, 等. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 182-195.  
Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, Yu Yang, et al. Dissolution and supracrustal rocks dating of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China[J]. Earth Frontiers, 2011, 18(5): 182-195 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈斌, 马星华, 刘安坤, 等. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索仑缝合带演化的意义[J]. 岩石学报, 2009, 25 (12): 3123-3129.  
Chen Bin, Ma Xinghua, Liu Ankun, et al. Zircon U-Pb ages of the Xilinhot metamorphic complex and blueschist, and implications for tectonic evolution of the Solonker suture[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (12): 3123-3129 (in Chinese with English abstract).
- [8] 薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 等. 中亚-蒙古造山带东段的锡林郭勒杂岩: 早华力西期造山作用的产物而非古老陆块?—锆石 SHRIMP U-Pb 年代学证据[J]. 岩石学报, 2009, 25 (8): 2001-2010.  
Xue Huaimin, Guo Lijun, Hou Zengqian, et al. The Xilingele complex from the eastern part of the Central Asian-Mongolia Orogenic Belt, China: Products of Early Variscan orogeny other than ancient block: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb ages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (8): 2001-2010 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱永峰, 孙世华, 毛骞, 等. 内蒙古锡林格勒杂岩的地球化学研究: 从 Rodinia 聚合到古亚洲洋闭合后碰撞造山的历史记录[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 343-355.  
Zhu Yongfeng Sun Shihua, Mao Qian, et al. Geochemistry of the Xilingele Complex, Inner Mongolia: A Historic Record from Rodinia Accretion to Continental Collision after Closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(3): 343-355 (in Chinese with English abstract).
- [10] 沈存利, 陈志勇, 常忠耀. 内蒙古“宝音图隆起”的归属讨论[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(1): 18-23.  
Shen Cunli, Chen Zhiyong, Chang Zhongyao. The Caledonian Foldbelt or the North China Platform does the Buyant Uplift in



- Inner Mongolia belong to? [J] Geological Survey and Research, 2004, 27(1): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- [11] 施光海, 刘敦一, 张福勤, 等. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义[J]. 科学通报, 2003, 48(20):2187–2192. Shi Guanghai, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and significance of Xilinhot metamorphic complex, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(20):2187–2192 (in Chinese).
- [12] 赵光, 朱永峰, 张勇. 内蒙古锡林郭勒杂岩岩石学特征及其变质作用的 p-t 条件[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1):40–48. Zhao Guang, Zhu Yongfeng, Zhang Yong. Petrology and metamorphic p-t condition of Xilin Gol complex, Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(1):40–48 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郝旭, 徐备. 内蒙古锡林浩特锡林郭勒杂岩的原岩年代和变质年代[J]. 地质论评, 1997, 43(1):101–105. Hao Xu, Xu Bei. Sm-Nd, Rb-Sr isotopic geochronology of the Xilin Gol complex, Inner Mongolia, China[J]. Geological Review, 1997, 43(1):101–105 (in Chinese with English abstract).
- [14] 徐备, 陈斌, 邵济安. 内蒙古锡林郭勒杂岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年代研究[J]. 科学通报, 1996, 41(2):153–155. Xu Bei, Chen Bin, Shao Jian. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic geochronology of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(13): 1107–1110.
- [15] Xiao W J, Windley B, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonics, 2003, 22: 1069–1089.
- [16] Xu B, Charvet J, Chen Y, et al. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4):1342–1364.
- [17] Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257 — a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2008, 32: 247–265.
- [18] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34–43.
- [19] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481–492. Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract).
- [20] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon — A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249: 1–35.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42: 313–345.
- [22] 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 等. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 495–513. Jiang Sihong, Liang Qingling, Liu Yifei, et al. Zircon U-Pb ages of the magmatic rocks occurring in and around the Dajing Cu-Ag-Sn polymetallic deposit of Inner Mongolia and constrains to the ore-forming age[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 495–513 (in Chinese with English abstract).
- [23] 周振华, 武新丽, 欧阳荷根. 内蒙古莲花山铜银矿斜长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素研究及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1472–1485. Zhou Zhenhua, Wu Xinli, Ouyang Hegen. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope study of the plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1472–1485 (in Chinese with English abstract).
- [24] Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, et al. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch), 2011, 100: 1791–1809.
- [25] 郭志军, 周振华, 李贵涛, 等. 内蒙古敖尔盖铜矿中—酸性侵入岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年与岩石地球化学特征研究[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1486–1500. Guo Zhijun, Zhou Zhenhua, Li Guitao, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating and petrogeochemical characteristics of the intermediate-acid intrusive rocks in the Aoergai copper deposit of Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1486–1500 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zhang L C, Wu H Y, Wan B, et al. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2009, 16: 243–254.
- [27] 代军治, 谢桂青, 王瑞廷, 等. 内蒙古赤峰鸭鸡山铜(铜)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1614–1621. Dai Junzhi, Xie Guiqing, Wang Ruiting, et al. Re-Os isotope dating of molybdenite separates from the Yajishan Mo(Cu) deposit, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1614–1621 (in Chinese with English abstract).
- [28] 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 等. 内蒙古孟恩陶勒盖银多金属矿床及其附近侵入岩的年代学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6):1755–1769. Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, et al. Geochronology of Intrusive Rocks Occurring in and around the Mengentaolegai Ag-polymetallic Deposit, Inner Mongolia[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(6):1755–1769 (in Chinese with English abstract).

## A preliminary study of zircon LAMC-ICP-MS U-Pb ages of the Shuangjingzi complex in Linxi, Inner Mongolia

JIANG Si-hong, LIANG Qing-ling, NIE Feng-jun, LIU Yi-fei

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The Shuangjingzi complex occurs on the southern and northern sides of the Xar Moron River in Linxi County, eastern Inner Mongolia and is composed of schist, gneiss and gneissic granite. There exists controversy over timing of the Shuangjingzi complex. Some researchers hold that it belongs to Precambrian metamorphic rocks, while others argue that it belongs to the Early Mesozoic strong structural deformation products. In this paper, the authors studied zircon geochronology of the main rocks in the Shuangjingzi complex by using the LA-MC-ICP-MS method with the purpose of constraining the timing of the complex. The zircon dating results show that the  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of the chlorite schist range from 146.3 Ma to 1970 Ma, with no reliable weighted mean ages obtained due to the too scattered ages. The  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of the biotite plagioclase gneiss vary from 146.3 Ma to 1736 Ma, with two reliable weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $(290.5 \pm 2.1)$  Ma (MSWD = 0.36, n=10) and  $(247.5 \pm 3.4)$  Ma (MSWD = 2.9, n=5), respectively, indicating that two epochs of magmatic emplacement events took place in the original rocks of the complex during Early Permian and Early Triassic, respectively. The zircons from the granite pegmatite that intruded into the complex do not give a reliable weighted mean age, with the scattered  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages ranging from 206.9 Ma to 2122 Ma, while the zircons from the gneissic granite occurring within the complex yielded a weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $(278.4 \pm 1.4)$  Ma (MSWD=1.9, n=16), suggesting that the emplacement of the original rock occurred during Early Permian. Geochemical analyses show that the Shuangjingzi complex, including chlorite schist, biotite plagioclase gneiss and gneissic biotite granite, is characterized by complicated constituents, with  $\text{SiO}_2$  content from 61.97% to 77.18%. All samples collected from the complex have the features of LREE differentiation, and are enriched in LILE elements with relative depletion of U, Nb, Sr, P and Ti, and enriched in Th, K, Ce, Nd, Hf, Sm, Y and Yb. A comparison with the Shuangjingzi complex shows that the granite pegmatite exhibits similar enrichment and depletion trends of the trace elements, except for the distinctive relatively depleted Ba and enriched Ta. Therefore, the Shuangjingzi complex is composed of the mixture of rocks (including strata and magmatic rocks) of different compositions and ages. Based on the age data available and the zircon ages obtained by the authors, it is held that Shuangjingzi complex consisting of a set of low-medium grade metamorphic rocks occurring along the Xar Moron River deep-seated fault was formed between 230 and 206 Ma, resulted from the collision between North China and Siberian Plates, and might have been reworked during Middle-Late Yanshanian period. Therefore, no Precambrian basement exists in the study area.

**Key words:** zircon LA-MC-ICP-MS dating; complex; Shuangjingzi; Xar Moron River; Inner Mongolia

---

**About the first author:** JIANG Si-hong, male, born in 1968, professor, supervisor of doctor candidates, majors in ore geology and engages in research on metallogenesis; E-mail: jiangsihong1@163.com.