

冀北单塔子杂岩的地质学和锆石U-Pb年代学

刘树文^{1,3}, 吕勇军¹, 凤永刚¹, 张臣¹, 田伟¹, 闫全人², 柳小明³

(1. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京: 100037;

3. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安: 710069)

摘要: 冀北单塔子杂岩位于华北克拉通北缘中段隆化-赤城断裂以南, 主要由高角闪岩相-麻粒岩相变质的英云闪长质、奥长花岗质、花岗闪长质片麻岩(TTG岩套)和铁镁质二辉麻粒岩、辉石斜长角闪岩、石榴石斜长变粒岩、石榴石夕线石黑云母片岩及少量的大理岩等表壳岩残留体组成。详细的SHRIMP和LA-ICPMS锆石U-Pb同位素地质年代学研究表明, 冀北单塔子杂岩的形成主要经历了7个演化阶段: (1) 2 600~2 530 Ma之间形成了单塔子杂岩中英云闪长质和奥长花岗质片麻岩的围岩, 其中一部分铁镁质表壳岩, 即铁镁质二辉麻粒岩, 可能为英云闪长质-奥长花岗质岩浆的源岩; (2) 2 517~2 505 Ma主要为英云闪长质岩浆的侵位结晶阶段; (3) 2 494~2 473 Ma, 奥长花岗质片麻岩侵位结晶; (4) 2 427~2 404 Ma, 发生了早期麻粒岩相相变变质作用和深溶混合岩化作用, 使这一杂岩经历了强烈的改造; (5) ~1 859 Ma, 铁镁质岩浆侵位, 形成一些铁镁质岩株和岩脉; (6) ~1 834 Ma到1 793 Ma, 单塔子杂岩经历了最强烈的变质作用改造, 形成了晚期麻粒岩相变质作用; (7) ~1 730 Ma经历了强烈的流体活动, 使得一些锆石发生了流体交代和改造。但是总体上单塔子杂岩没有经历~300 Ma的古生代的变质作用。

关键词: 单塔子杂岩; TTG岩石组合; SHRIMP锆石年代学; LA-ICPMS锆石年代学; 形成与演化; 华北克拉通北缘中段

中图分类号: P588.3; P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2007)03-0484-14

冀北是华北克拉通北缘中段重要的前寒武纪变质地区, 以赤城-隆化断裂为界, 断裂带以北是内蒙古隆起, 以南被称为燕山台褶带(许绍忠等, 2002)。分布于内蒙古隆起上的前寒武纪基底杂岩归为红旗营子群, 其时代是新太古代还是古元古代尚有争议(王启超, 1992; 胡学文等, 1996a)。分布于赤城-隆化断裂以南的基底变质杂岩通常被归于单塔子群, 先前的研究认为单塔子群下部以变质火山岩为主, 经历了高角闪岩相到麻粒岩相变质作用, 上部以变质沉积岩为主夹有变质玄武岩(王启超, 1992)。研究者们通常将单塔子群上部变质岩系与内蒙古隆起上的红旗营子群变质岩系对比(王启超, 1992; 胡学文等, 1996b, 2003), 并认为红旗营子群以角度不整合覆盖在单塔子群下部变质岩系之上(胡学文等, 1996b)。单塔子群下部变质杂岩中的石榴石麻粒岩被建议为高压麻粒岩, 并认为赤城-隆化断裂可能代表

了一个古老的缝合带(钟长汀等, 2001)。

然而, 近年来的年代学研究表明冀北前寒武纪基底杂岩可能比先前的认识要复杂得多, 一方面地质年代学表明赤城-隆化断裂带以南保存了新太古代的年龄信息(2.50 Ga和2.59 Ga; 毛德宝等, 1999; 王启超, 1992; 胡学文等, 1996b), 也保存了大量的古元古代年代学信息(~2.45 Ga 锆石U-Pb年龄和2.45 Ga全岩Rb-Sr等时线年龄; 王启超, 1992)。这些古元古代年龄与赤城-隆化断裂带以北的红旗营子杂岩早期的锆石U-Pb年龄(2.45~2.43 Ga, 王启超, 1992; 2.43~2.42 Ga, 胡学文等, 1996a, 2003)一致, 赤城-隆化断裂带以北红旗营子杂岩中保存了2.21~2.02 Ga, 1.98~1.93 Ga和~1.85 Ga, ~1.80 Ga不同年龄的花岗质侵入体(胡学文等, 1996a)。这些花岗质侵入体的年龄结构与太行山-五台山-恒山变质地块古元古代花岗质岩石、尤其是古元古代吕梁变质杂岩中

收稿日期: 2007-05-28; 修回日期: 2007-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472096; 40511140503; 40502009; 40472118)

作者简介: 刘树文, 男, 1958年9月生, 教授, 岩石学专业; E-mail: swliu@pku.edu.cn

花岗质岩石的年代学结构基本一致。而太行山—五台山—恒山变质地块古元古代花岗质岩石被认为与东部陆块、西部陆块的古元古代晚期碰撞有关 (Zhao et al, 2001, 2002, 2005; Guan et al, 2002; Wilde et al, 1998, 2002; Kröner, 2005; 耿元生等, 2000; Liu et al, 2007)。这些年代学特征表明, 华北克拉通北缘中段可能经历了与华北克拉通中部带类似的古元古代晚期的构造热演化。

上述地质年代学研究初步奠定了冀北前寒武纪变质地块的形成与演化研究基础。然而, 相对于冀东、恒山—五台山—太行山变质地块的地质学和地质年代学研究, 冀北地区的前寒武纪地块的研究程度明显偏低, 主要表现在: (1) 对冀北前寒武纪变质地块的结构和组成缺少明确的认识; (2) 目前尽管积累了较多的地质年代学数据, 但是, 可靠的年代学数据实在太少; (3) “红旗营子群”和“单塔子群”均为地层概念, 新一轮的地质学研究表明原“单塔子群”中大部分组成为花岗质片麻岩, 原“红旗营子群”中也含有大量的变质和未变质深成侵入体。新近研究表明, 部分原来认为是早前寒武纪的花岗质片麻岩和变质基性岩是古生代变质的深成侵入体 (张拴宏等, 2004; Liu et al, 2006, 倪志耀等, 2004); (4) 原“红旗营子群”和“单塔子群”之间的关系不清。这些研究中的问题严重地制约了冀北地区前寒武纪变质地块形成和演化历史的认识, 同时制约了关于华北克拉通形成与演化的总体认识。因此本文在先前地质学和地质年代学研究的基础上, 从地质年代学研究入手, 对赤城—隆化断裂带以南的各类片麻岩的进行了 SHRIMP、LA-ICPMS 方法原位锆石 U-Pb 同位素定年研究, 目的在于揭示单塔子杂岩的年代学结构和形成演化历史, 为冀北前寒武纪变质地块研究提供可靠的年代学证据。

1 地质学特征

单塔子杂岩主要分布在承德—滦平—丰宁南一带, 前人称之为单塔子群。大体上以大庙断裂为界, 南部为单塔子下亚群, 主体岩性是花岗质深成片麻岩, 其中含有大量的铁镁质麻粒岩、长英质变粒岩和大理岩等表壳岩的残留体, 本文保留为单塔子杂岩。北部为原单塔子上亚群, 前

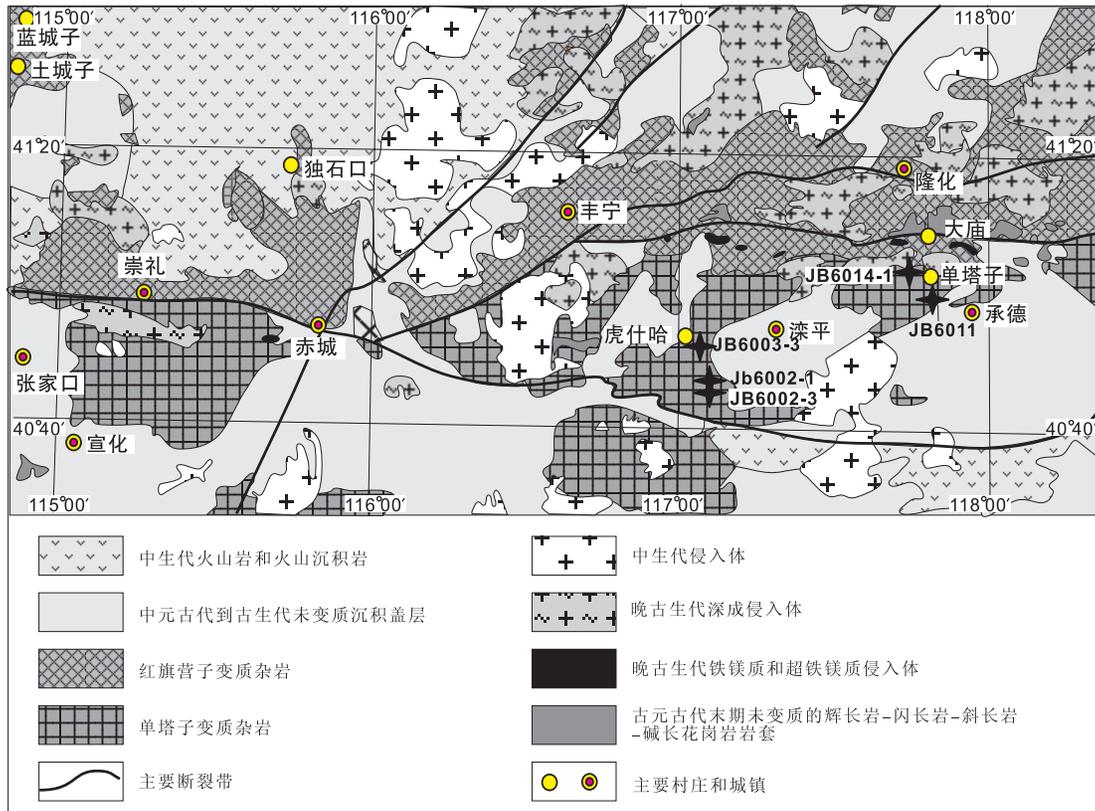
人的研究证明该上亚群具有 2.45~2.41 Ga 的锆石 U-Pb 年龄, 与赤城—隆化断裂带以北的红旗营子杂岩下部的岩石组合相似, 与下部原单塔子群下亚群为角度不整合接触关系 (胡学文, 1996b; 毛德宝等, 1999), 因此本文将这一部分岩石组合划归为红旗营子杂岩 (图 1)。

单塔子杂岩主要由 TTG 片麻岩组成, 主体岩性为二辉石石英闪长质片麻岩、透辉石 (二辉石) 英云闪长质片麻岩、黑云母奥长花岗质片麻岩和含辉石角闪黑云花岗闪长质片麻岩, 主要分布在大庙—赤城断裂以南的承德—三岔口—虎什哈一带, 是单塔子杂岩的主体岩性。这些花岗质片麻岩经历了高角闪岩相到麻粒岩相强烈变形变质作用, 形成明显的片麻理 (图 2A)。这些花岗质片麻岩明显地经历了深溶混合岩化作用, 形成粉红色奥长花岗质脉体。这些花岗岩脉体中含有 2~15 cm 规模的铁镁质暗色麻粒岩包体, 可能为部分熔融的残留体 (图 2A, B)。然而这些深溶作用形成的奥长花岗岩脉体也经历了后期变形变质作用的改造, 形成了强烈的片麻理, 并发生了同斜褶皱 (图 2A)。在三岔口西北到燕窝铺一带, 这些花岗质片麻岩经历了强烈的高温糜棱岩化作用, 形成了石英拉长条带, 透辉石和角闪石沿着糜棱页理分布。

单塔子杂岩中的表壳岩组合主要有: (1) 原燕窝铺组的细粒石榴石黑云母斜长变粒岩、强烈绿泥石化角闪斜长片麻岩、强烈绿泥石化的角闪石片岩、石榴石透辉石角闪石岩、石榴石角闪二辉麻粒岩和磁铁石英岩等, 主要分布在大庙南—燕窝铺等地 (毛德宝等, 1999); (2) 石榴石变粒岩、石榴石夕线石片岩, 大理岩和石墨变粒岩等, 主要分布在红旗镇—朝梁沟—凤凰嘴一带。这些表壳岩组合, 多呈不同规模透镜状集合体分布在大规模的长英质片麻岩中 (图 2C)。

单塔子杂岩的 TTG 片麻岩被晚期的铁镁质岩株和岩墙侵位, 铁镁质岩墙截断早期 TTG 片麻岩的片麻理 (图 2D), 并保存了围岩 TTG 片麻岩的捕虏体。组成这些铁镁质岩株的岩石主要为细粒石榴石二辉麻粒岩。

倪志耀等 (2004) 在赤城附近发现晚古生代高压麻粒岩, 并认为是洋壳残留。另外, 一些原来被认为是古元古代的长英质片麻岩, 也被新的



星号为采样地点 (The stars show the sampled locations)

图1 冀北前寒武纪变质区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Precambrian metamorphic region in northern Hebei province

SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果证实为古生代侵入体 (张栓宏等 2004)

2 岩石学特征

本文用来做锆石 U-Pb 地质年代学分析的样品共有 5 个, 其中 JB6002-1 和 JB6002-3 采自虎什哈东长海沟门桥头。JB6003-3 采自虎什哈东北岗子村, JB6011 采自小三岔口, JB6014-1 采自朝梁沟, 具体岩性特征描述如下。

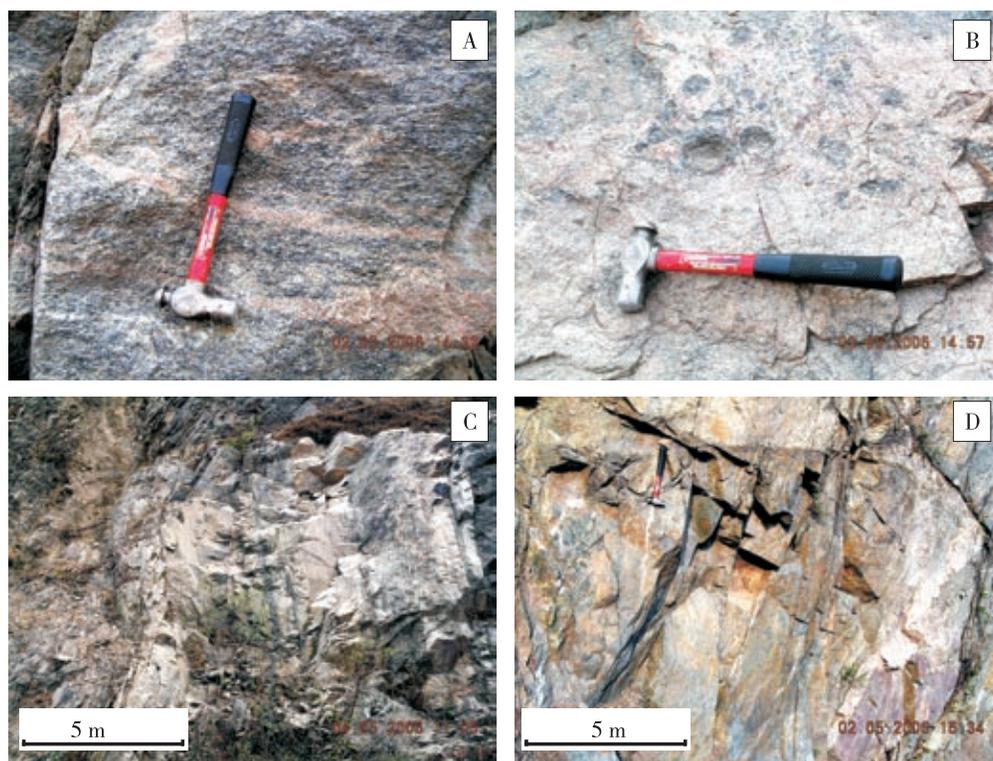
样品 JB6002-1 为二辉石英云闪长质片麻岩, 深灰色, 中细粒鳞片粒状变晶结构, 片麻状构造 (图 2A)。主要的矿物组合为斜长石 (65%)、石英 (15% 左右), 暗色矿物主要为黑云母 (7%)、角闪石 (5%)、透辉石 (5%) 和紫苏辉石 (3%)。副矿物有锆石、榍石和磁铁矿等。黑云母和角闪石构成强烈的片麻理, 透辉石和紫苏辉石也沿着片麻理分布, 表明该样品经历了麻粒岩相变形变质作用。

样品 JB6002-3 为侵入二辉石英云闪长质片麻岩中的奥长花岗质脉体 (图 2B)。风化面粉红色、

新鲜面灰白色, 细粒粒状变晶结构, 片麻状构造。其片麻理方向与围岩二辉石英云闪长岩一致, 含有大量的不同规模铁镁质麻粒岩包体, 表明它们一起经历了变形变质作用。主要矿物组合为角闪石 (2%)、黑云母 (3%)、斜长石 (65%) 和石英 (30%), 岩石中偶见透辉石和紫苏辉石。副矿物组合与二辉石英云闪长质片麻岩完全一致, 即由锆石、榍石和磁铁矿等副矿物组成。

样品 JB6011, 为强烈蚀变的糜棱岩化花岗闪长质片麻岩。风化面深辉绿色, 新鲜片深灰色, 表现了强烈的糜棱页理, 石英被拉长形成条带, 沿着糜棱面理分布。角闪石、黑云母和绿泥石等矿物沿着面理分布, 与石英条带一起构成了糜棱页理, 可见有由斜长石构成的眼球状构造。显微镜下观察, 表明石英、斜长石和黑云母等均经历了强烈的动态重结晶。

样品 JB6014-1, 采自朝梁沟侵位于表壳岩组合中的奥长花岗质片麻岩, 侵入斜长角闪岩、石榴石夕线石黑云母片岩的表壳岩中 (图 2C)。斑状



A. 二辉石英云闪长质片麻岩及其中的花岗质脉体 (其中锤子长度为 40 cm); B. 奥长花岗质片麻岩及其中暗色麻粒岩包体 (其中锤子长度为 40 cm); C. 朝梁沟奥长花岗质片麻岩及其围岩表壳岩; D. 细粒二辉麻粒岩株与奥长花岗质片麻岩之间的侵入关系

A, two pyroxene tonalitic gneiss and inside granitoid veins (40 cm long in hammer scale); B, trondhjemitic gneiss and inside mafic granulite enclaves (40 cm long in hammer scale); C, trondhjemitic gneiss and the relationship between the gneiss and its country rocks; D, fine-grained two pyroxene granulite and its intrusive contact relationship with wall rocks.

图 2 单塔子杂岩主要地质特征和不同岩性之间的关系

Fig. 2 Geological features and relationships among the different lithologies

鳞片粒状变晶结构, 片麻状构造。基质主要由斜长石 (63%)、石英 (26%)、微斜长石 (6%) 和少量的黑云母 (5%) 组成。

样品 JB6003-3 为侵入 TTG 片麻岩中的细粒石榴石角闪二辉麻粒岩小岩株, 与 TTG 片麻岩之间为侵入接触关系 (图 2D)。岩石为灰黑色, 细粒粒状变晶结构, 块状到弱片麻状构造。主要矿物组合为石榴石 (7%)、透辉石 (14%)、紫苏辉石 (7%), 角闪石 (20%), 斜长石 (50%)。岩石明显的绿泥石和绿帘石化, 蚀变矿物沿着弱的片麻理分布, 表明经历了两个阶段的变质作用。

3 锆石 U-Pb 同位素年龄

3.1 样品制备和分析方法

各样品的锆石单矿物分离是在河北区测队 (廊坊) 完成, 将大约 10 kg 重的样品破碎到 80 ~ 100 目, 经常规浮选和磁选方法分选后, 然后在双目镜下挑纯。将挑纯的锆石颗粒置于 DEVCON 环氧树

脂中, 待固结后抛磨至粒径的大约二分之一, 使锆石内部充分暴露, 然后进行锆石显微 (反射光和透射光) 照相。锆石的阴极发光 (CL) 图像在北京大学电镜室扫描电镜完成。

样品 JB6011 和 JB6014 的锆石 U-Pb 测年分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成, 采用标准测定程序进行, 详细的分析流程见刘敦一等 (2003) 和简平等 (2003) 的详细描述。实验中应用澳大利亚国立大学标准锆石 TEM 进行同位素分馏校正, 用标准锆石 SL13 (572 Ma, $U = 238 \times 10^{-6}$) 标定样品的 U、Th 及 Pb 含量。普通 Pb 由实测 ^{204}Pb 校正。所有测点的误差均为 1σ , 所采用的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄具 95% 的置信度。其年龄采用 Ludwig (2006) 的 ISOPLOT 程序计算, 年龄计算误差均为 2σ 。

样品 JB6002-1, JB6002-3 和 JB6003-3 的 LA-ICPMS 法锆石微区 U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Agilent7500 型 ICPMS 和

德国 Lambda Physik 公司的 ComPex 102 ArF 准分子激光器 (工作物质 ArF, 波长 193 nm) 以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 $30\ \mu\text{m}$, 激光剥蚀深度为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标样, 元素含量采用 NISTSRM610 作为外标, 具体分析技术见 Yuan et al (2004) 和 杨进辉等 (2005)。普通铅校正采用 Anderson (2002) 的方法, 其年龄采用 Isoplot 程序计算。

3.2 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年结果

强烈糜棱岩化的英云闪长质片麻岩样品 (JB6011), 共进行了 16 颗锆石 17 个点的 SHRIMP U-Pb 同位素分析。代表性锆石的阴极发光图像和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄被表示在图 3A 上。几乎所有锆

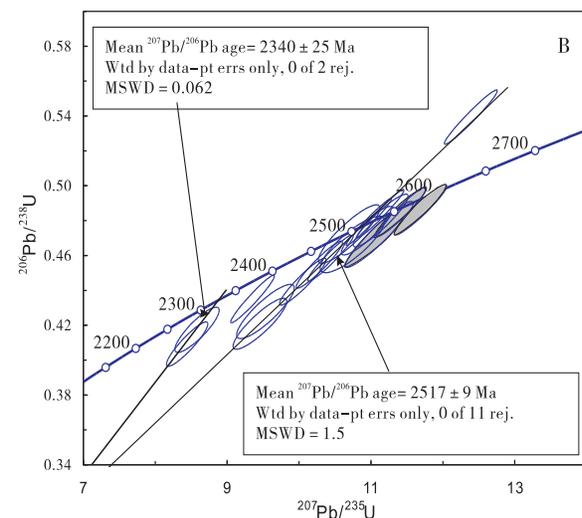
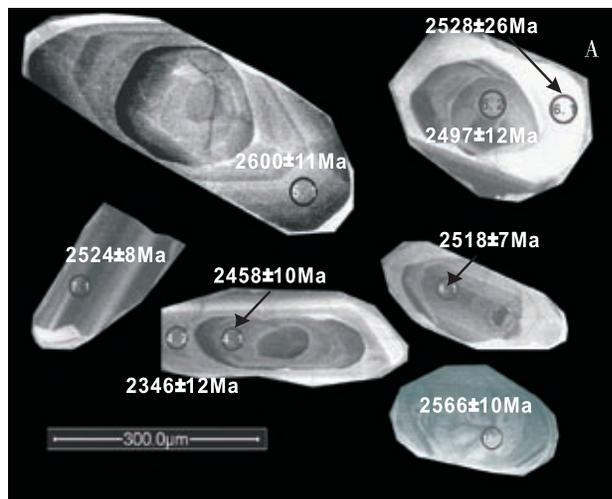


图 3 样品 JB6011 的锆石阴极发光图像 (A) 和 U-Pb 同位素谐和线图 (B)

Fig. 3 Analyzed zircon CL images (A) and U-Pb isotopic concordia diagram of sample JB6011 (B)

石都有震荡环带, 多数锆石的内部结构中不仅保存了明显的岩浆锆石的环带特征, 而且保存有暗色低亮度的圆滑内核 (图 3A 中分析点 8.1, 6.2 和 4.1)。这些暗色圆滑内核的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与震荡环带幔部分分析点年龄一致或者略微年轻, 可能形成于早期继承锆石, 但是这些锆石在岩浆形成过程中受到了改造。在锆石的 U-Pb 同位素谐和线图上, 绝大部分锆石都落在了谐和线上或者谐和线附近, 11 个点的分析构成了跨越谐和线的不一致线分布 (图 3B), 产生了 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\ 517\pm 9\ \text{Ma}$ (图 3B)。除此以外有 3 颗锆石年龄明显老于这一众数分布 (图 3B, 阴影充填的 3 个颗粒), 它们阴极发光图像表现出明显的震荡环带 (图 3A), 分布在谐和线上或者谐和线附近, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2\ 600\pm 11\ \text{Ma}$ (分析点 5.1)、 $2\ 566\pm 10\ \text{Ma}$ (分析点 15.1) 和 $2\ 565\pm 16\ \text{Ma}$ (分析点 13.1), 是继承锆石, 反映了花岗质片麻岩的源区年龄。还有 3 个分析点落在了谐和线之下 (图 3B), 表现了更年轻的年龄, 其中两个分析点产生了一个 $2\ 340\pm 25\ \text{Ma}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 代表了早元古代更晚期构造-热事件的改造, 可能与强烈的糜棱岩化作用有关。

作者对采自朝梁沟的奥长花岗质片麻岩样品 (JB6014-1), 共分析了 11 颗粒锆石 11 个点。所分析锆石的大部分表现了内部结构, 存在震荡环带 (图 4A, 1.1) 和核边结构 (图 4A 上 7.1), 个别锆石表现了板条状内部结构 (图 4A, 11.1), 另外一组锆石缺少内部结构 (图 4A, 3.1)。具有核边结构的锆石产生了两组年龄, 较老的一组锆石的 3 个分析点落在谐和线下靠近上交点的部分, 产生 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2\ 492\pm 24\ \text{Ma}$, $\text{MSWD} = 3.3$ (图 4B, 分析点 5.1, 7.1 和 8.1)。另有 2 颗缺少核边结构的锆石 (6.1 和 10.1) 产生 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2\ 427\pm 12\ \text{Ma}$, $\text{MSWD} = 0.13$ (图 4A, B)。还有 1 颗具有震荡环带锆石产生了更年轻的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $2\ 374\pm 7\ \text{Ma}$ (图 4A 上 1.1 和图 4B)。具有板条状内部结构的 2 颗锆石表现了强烈的铅丢失 (图 4A, B)。其余 3 颗无内部结构的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\ 911\pm 36\ \text{Ma}$, $\text{MSWD} = 0.015$ (图 4A 上 2.1)。根据分析锆石的内部结构、U-Pb 成分和同位素特征, 可解释:

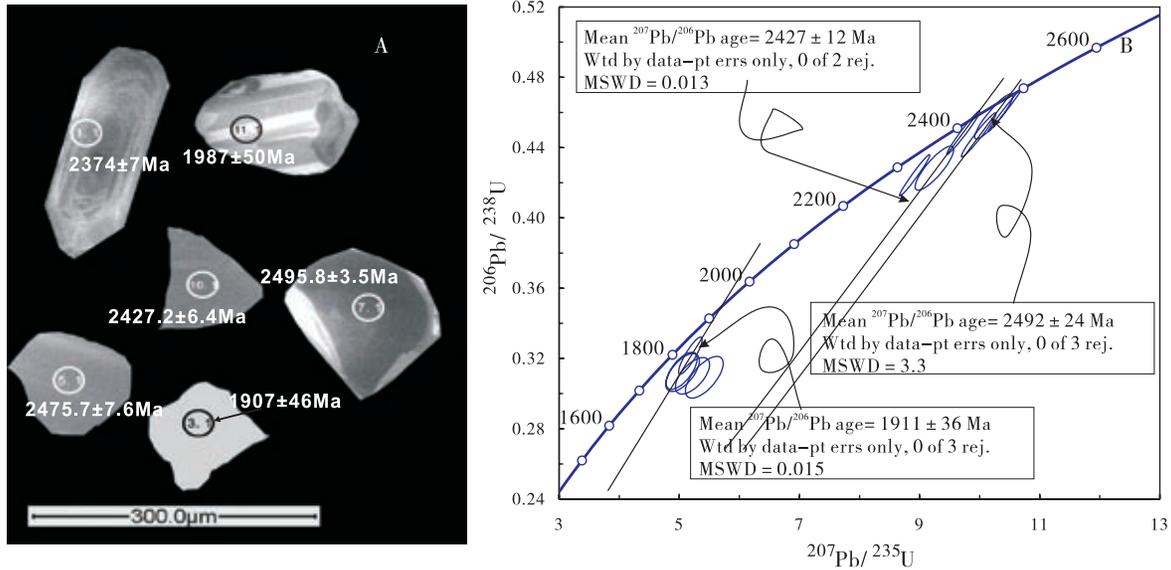


图 A 中的年龄为分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄；(Note: the ages shown on figure A are $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages)

图 4 样品 JB6014-1 的锆石阴极发光图像 (A) 和 U-Pb 同位素谱和线图 (B)

Fig. 4 Zircon CL images (A) and U-Pb isotopic concordia diagram (B) of sample JB6014-1

2 492 ± 24 Ma 为岩浆结晶年龄；2 427 ± 24 Ma 和 2 374 ± 7 Ma 的年龄为晚期改造年龄，代表了一次构造热事件。而 1 911 ± 36 Ma 应为变质年龄，可能代表了一期变质变形改造事件。

3.3 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

在进行 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析的二辉石英云闪长质片麻岩中 (样品 JB6002-1)，共分析了 41 锆石颗粒的 55 个点。所有的锆石颗粒都表现了明显的环带状内部结构，一部分锆石存在色调较暗的内核 (图 5，分析点 20)。一些内核表现出了复杂的内部结构 (图 6，分析点 55 和 56)，表明其岩浆成因。一些岩浆锆石还具亮白生长边，

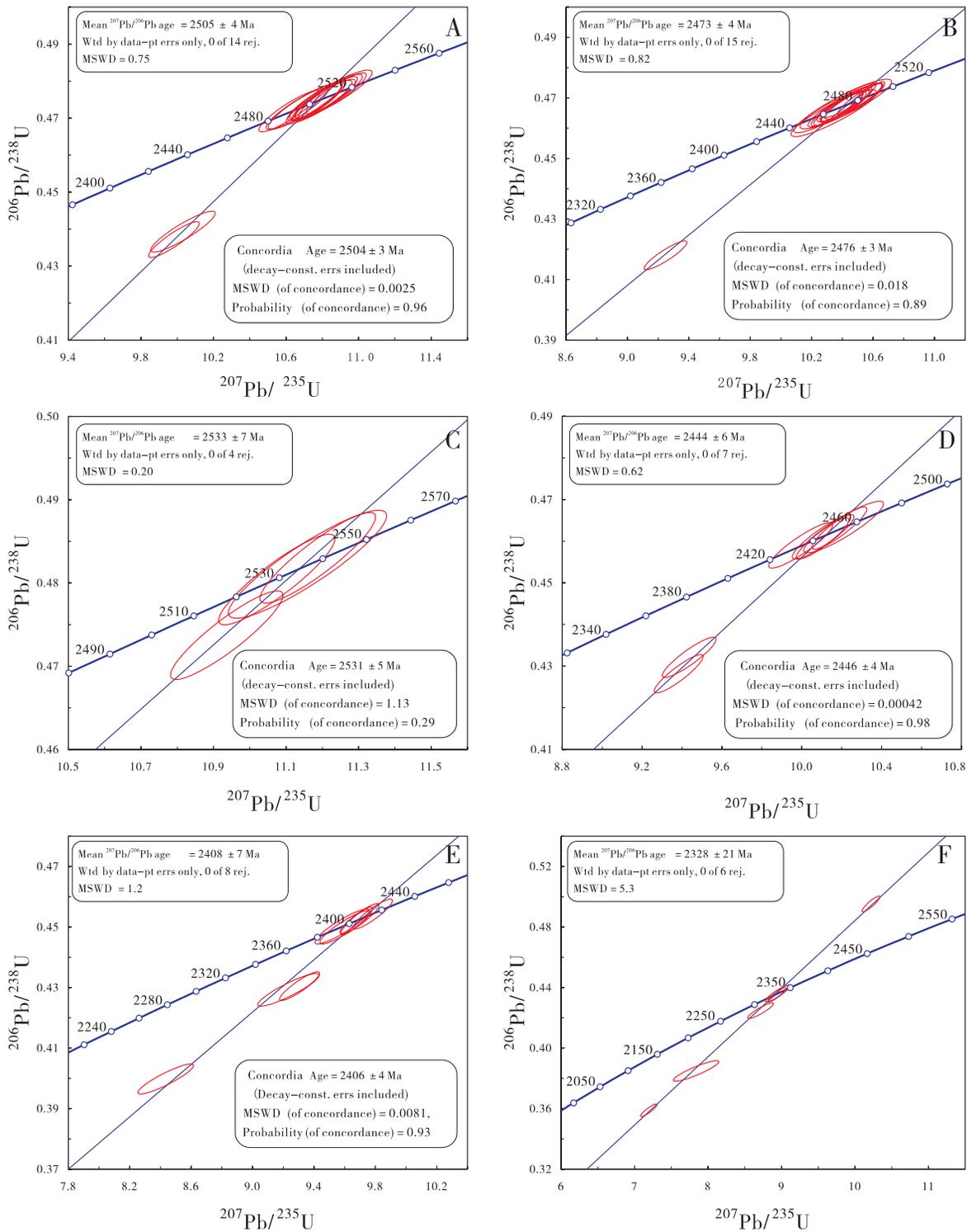
分布该处的分析点，具有较高的 Th/U 比值 (>0.2)，其成因有待进一步研究。

根据锆石的阴极发光图像和年龄特征分析，可将这些分析点分为 6 组。第一组由 14 个分析点组成，构成了一条不一致线，产生 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 2 505 ± 4 Ma, MSWD = 0.75 (图 6A)。落在谐和线上的 12 个分析点产生一个谐和年龄 2 504 ± 3 Ma, MSWD = 0.0025 (图 6A)。第二组由 15 个分析点组成，构成了一个不一致线，产生 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 2 473 ± 4 Ma, MSWD = 0.82 (图 6B)。落在谐和线上的 14 个分析点产生了一个谐和年龄 2 476 ± 3 Ma, MSWD = 0.018 (图 6B)。第三组由分布在锆石内核的 5 个分析点组成，它们构成不一致线，表现了较老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄，即 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2 533 ± 7 Ma, MSWD = 0.2。落在谐和线上的 4 个分析点产生了一个谐和年龄 2 531 ± 5 Ma, MSWD = 1.13 (图 6C)。第四组 7 个分析点分布在锆石暗色内核，构成了一条不一致线， $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2 444 ± 6 Ma, MSWD = 0.62，其中 5 个颗粒落在了谐和线上，产生谐和年龄 2 446 ± 4 Ma, MSWD = 0.00042 (图 6D)。第五组在岩浆锆石亮白生长边的 8 个分析点构成了一条不一致线， $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2 408 ± 7 Ma, MSWD = 1.2，其中 5 个颗粒落在了谐和线上，产生一个谐和年龄 2 406 ± 4 Ma, MSWD = 0.0081 (图 6E)。第六



图 5 样品 JB6002-1 的锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircons for sample JB6002-1



A-F 分别为 6 组锆石的谐和线图
 (A to F show the concordia diagrams for 6 groups of analytical zircons, respectively)

图 6 样品 JB6002-1 锆石 U-Pb 同位素谐和线图
 Fig. 6 Zircon U-Pb isotopic concordia diagrams

组由 6 个分析点组成, 同样分布在岩浆锆石的亮白生长边, 但落在谐和线两侧, 构成了一条很好的不一致线, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\ 328 \pm 21$

Ma, MSWD = 5.3 (图 6F)。

根据上述分析结果, 我们解释第一组和第二组年龄, 共由 29 个分析点构成, 年龄值为 $2\ 505 \sim$

2 473 Ma, 应属岩浆结晶年龄, 两个年龄峰值可能代表了岩浆结晶的两个主要阶段。第三组年龄, ~ 2 531 Ma, 主要是岩浆锆石的内核和震荡环带幔, 为捕获锆石, 其年龄可能代表了侵入围岩的形成年龄。第四组年龄, 2 446 Ma, 主要为锆石的暗色内核, 内部结构复杂, 常常可见其震荡环带的幔部年龄高于这种暗色内核的年龄 (图 5), 因此这组锆石经历了蜕晶质化, 年龄可能不具有真实的地质意义。第五组和第六组锆石, 年龄为 ~ 2 406 至 2 328 Ma, 主要是分布在岩浆锆石的外部亮白生长边, 但是不具备典型变质锆石低的 Th/U 比值特征。该样品锆石的所有分析中没有符合 $\text{Th}/\text{U} < 0.1$ 的典型变质成因锆石, 但是岩相学观察表明, 该二辉石英云闪长质片麻岩 (紫苏花岗闪长岩或者长英质二辉麻粒岩) 明显地经历了麻粒岩相变质作用, 并且辉石颗粒沿着片麻理分布, 表明麻粒岩相变质作用与强烈的变形作用同时发生。因此我们建议 ~ 2 406 至 2 328 Ma 年龄为早期变形变质作用的时期。

样品 JB6002-3 为侵入二辉石英云闪长岩中的片麻状奥长花岗质脉体 (图 2B)。与二辉石英云闪长质片麻岩一起经历了变形变质作用。共进行了 37 颗粒锆石的 48 个点 U-Pb 同位素分析。分析的所有锆石都具有核边内部构造, 多数锆石具有暗色内核和亮白的生长边 (图 7), 大部分锆石内部具有震荡环带, 表明它们主要是岩浆成因的锆石。从 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄可以看出, 多数暗色内核

的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄比亮白生长边缘年轻 (图 7)。根据锆石的阴极发光图像和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 可以将 37 颗粒锆石的 48 个分析点分为 4 组。其中一组具有震荡环带的暗色锆石的 17 个分析点, 均落在了谐和线上, 产生谐和年龄为 $2\,494 \pm 2$ Ma, $\text{MSWD} = 0.022$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,494 \pm 4$ Ma, $\text{MSWD} = 1.5$ (图 8A)。二组由具有震荡环带锆石的亮白生长边和缺少明显内部结构的较高亮度的锆石颗粒的 15 个分析点组成, 有 11 个分析点落在了一条较好的一致线上, 产生一个 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,474 \pm 9$ Ma, $\text{MSWD} = 0.70$ 。其中的 8 个点落在了谐和线上, 构成谐和年龄为 $2\,471 \pm 6$ Ma, $\text{MSWD} = 0.039$ (图 8B)。另有 4 个分析点, 落在了谐和线之上 (被填充成灰色), 它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为: $2\,537 \pm 15$ Ma, $2\,533 \pm 7$ Ma, $2\,563 \pm 13$ Ma 和 $2\,505 \pm 6$ Ma (图 8B)。三组 13 个分析点, 主要为暗色环带锆石和锆石的暗色内核, 它们沿着谐和线成串分布 (图 8C), 其中 8 个分析点在谐和线上分布集中, 产生一个谐和年龄, 为 $2\,458 \pm 10$ Ma, $\text{MSWD} = 0.0013$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,458 \pm 11$ Ma, $\text{MSWD} = 3.9$ (图 8C)。最后一组为 3 个缺少内部结构的锆石和岩浆锆石的亮白生长边的分析点, 产生了一个谐和年龄: $2\,404 \pm 11$ Ma, $\text{MSWD} = 0.0031$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,404 \pm 24$ Ma, $\text{MSWD} = 0.078$ (图 8D)。

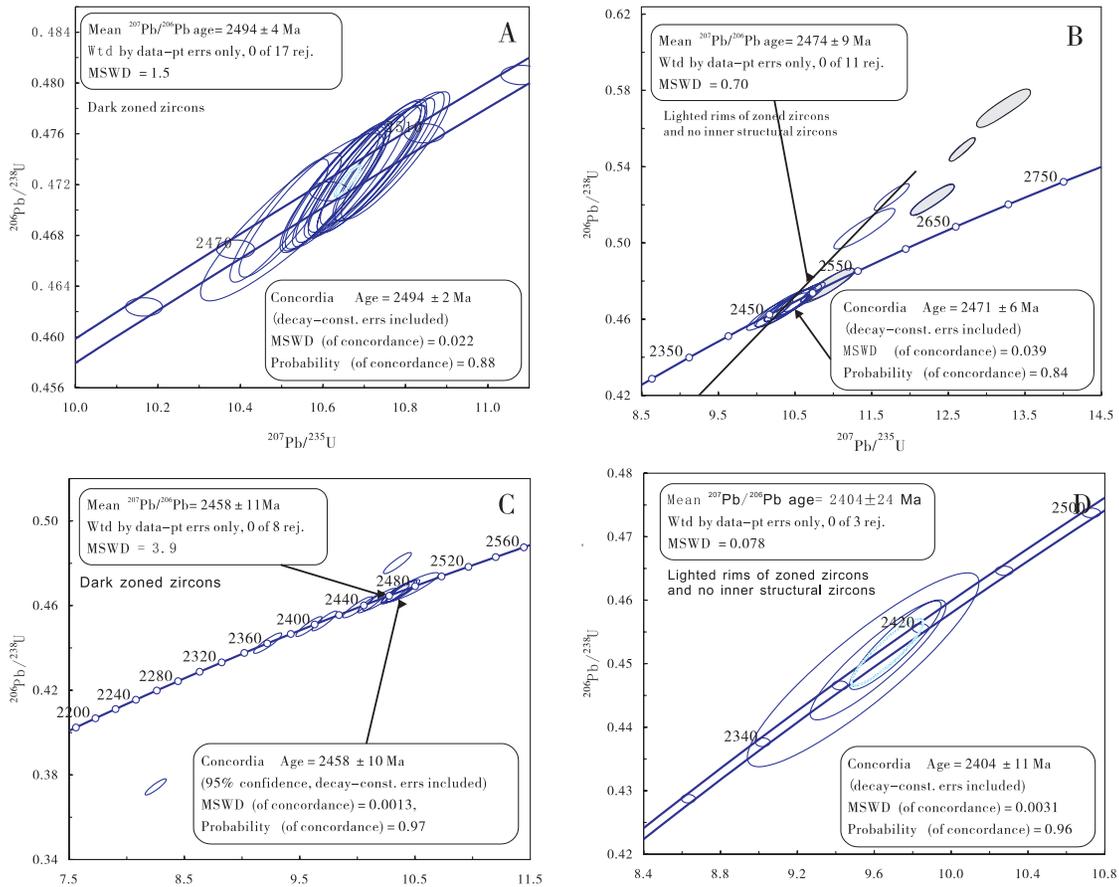
根据上述锆石阴极发光图像和分析点的分布, 我们认为 ~ 2 493 至 2 471 Ma 为两个阶段的岩浆结晶年龄, 与样品 JB2001-1 的 2 505 ~ 2 473 Ma 年龄段相对应。但是野外地质观察表明样品 JB2001-3 的奥长花岗质片麻岩侵入到 JB2001-1 的二辉石英云闪长岩, 因此 ~ 2 471 Ma 为该期奥长花岗质片麻岩侵位的上限年龄。而 2 404 Ma 为变质年龄, 2 458 Ma 可能为没有完全重结晶的部位 (包括暗化内核和边缘等), 不具有真实的地质意义。

样品 JB6003-3 为侵入 TTG 片麻岩中的细粒石榴石角闪二辉麻粒岩小岩株 (图 2D)。共进行了 32 颗粒锆石的 35 个点分析。锆石的阴极发光图像 (图 9) 表明绝大部分锆石不具有震荡环带, 而是表现出复杂的补片状内部结构, 只有个别锆石表现出不很清晰的简单环带 (图 9, 分析点 29)。



图 7 样品 JB6002-3 锆石阴极发光图像和分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)

Fig. 7 Zircon CL images and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages at analytical spots



注：A、B、C 和 D 分别为四组锆石的 U-Pb 同位素谱和线图
 A, B, C and D show the concordia diagrams for 4 groups of analytical spots of zircons
 图 8 样品 JB6002-3 锆石 U-Pb 同位素谱和线图
 Fig. 8 Zircon U-Pb isotopic concordia diagrams for sample JB6002-3

然而较多的锆石具有较亮的内核和暗色边缘（图 9），可见暗色部分与较亮的内核之间为交代关系，具有港湾状的特征（图 9，分析点 4 和 7 等）。35 个分析点中有 11 个分析点表现了高的 Th/U 比值 (>0.2)，其余分析点表现了低的 Th/U 比值 (<0.1)。

高 Th/U 比值的分析点中有 9 个在谐和线上分布集中到一个群（图 10A），产生谐和年龄：1 859 ± 5 Ma，MSWD = 0.016，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1 860 ± 18 Ma，MSWD = 1.6（图 10A）。另外一个分析点在谐和线附近，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 2 289 ± 32 Ma 和一个分析点在谐和线附近 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 1 796 ± 8 Ma（图 10A）。其余 4 个高 Th/U 比值的分析点均落在谐和线上，产生一个谐和年龄 1 788 ± 4 Ma，MSWD = 0.0024，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1 787 ± 9 Ma，MSWD = 1.2（图 10B）。

统计分析表明，低 Th/U 比值的 20 个分析点可以分为 3 组。其中第一组 13 个分析点，9 个在谐

和线上集中分布，产生一个谐和年龄 1 835 ± 4 Ma，MSWD = 0.102，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1 837 ± 9 Ma，MSWD = 1.13（图 10C）。该组中另外一个点落在谐和线上，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 1 946 ± 16 Ma，另一个分析点落在谐和线之下，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 1 907 ± 18 Ma（图 10C）。第二组由 7 个分析点组成，均落在谐和线上，产生一个谐和年龄 1 793 ± 4 Ma，MSWD = 0.13，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1 794 ± 9 Ma，MSWD = 1.0（图 10D）。最后一组分析点有 3 个，分布在谐和线上，产生谐和年龄 1 731 ± 8 Ma，MSWD = 0.00067，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1 730 ± 20 Ma，MSWD = 0.97（图 10E）。

根据分析锆石的阴极发光图像和 Th/U 比值特征，我们解释早期高 Th/U 比值的 ~ 1 859 Ma 年龄组为基性岩小岩株的侵位时代；2 289 Ma 高 Th/U 比值锆石与 1 946 Ma 和 1 907 Ma 低 Th/U 比值锆石均为捕获围岩锆石。低 Th/U 比值锆石的 1 835

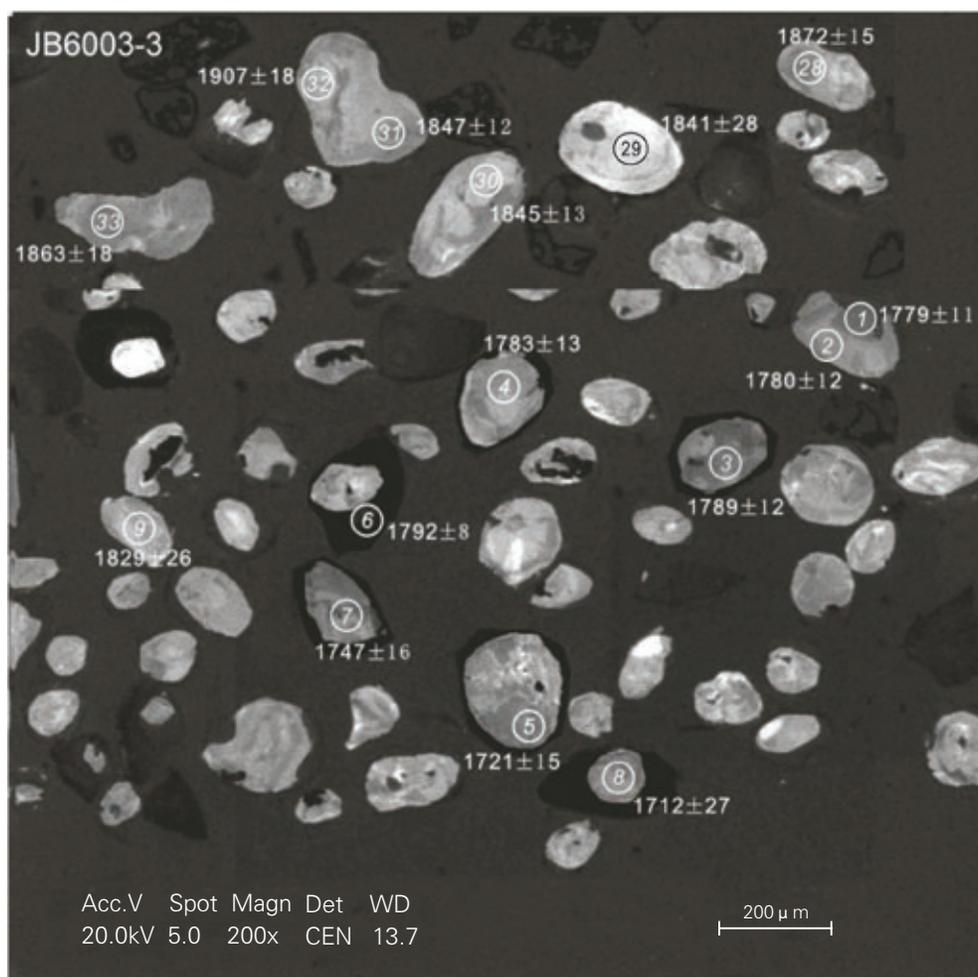


图9 样品 JB6003-3 的锆石阴极发光图像 (单位: Ma)

Fig. 9 zircon CL images for sample JB6003-3

Ma 年龄, 记录了变质事件早期阶段, 低 Th/U 比值锆石的 1 793 Ma 为变质作用的晚期阶段, 而 1 731 Ma 的年龄则代表晚期流体改造事件, 与大庙斜长岩—密云环斑花岗岩的岩浆活动有关 (Zhang et al., 2007)。

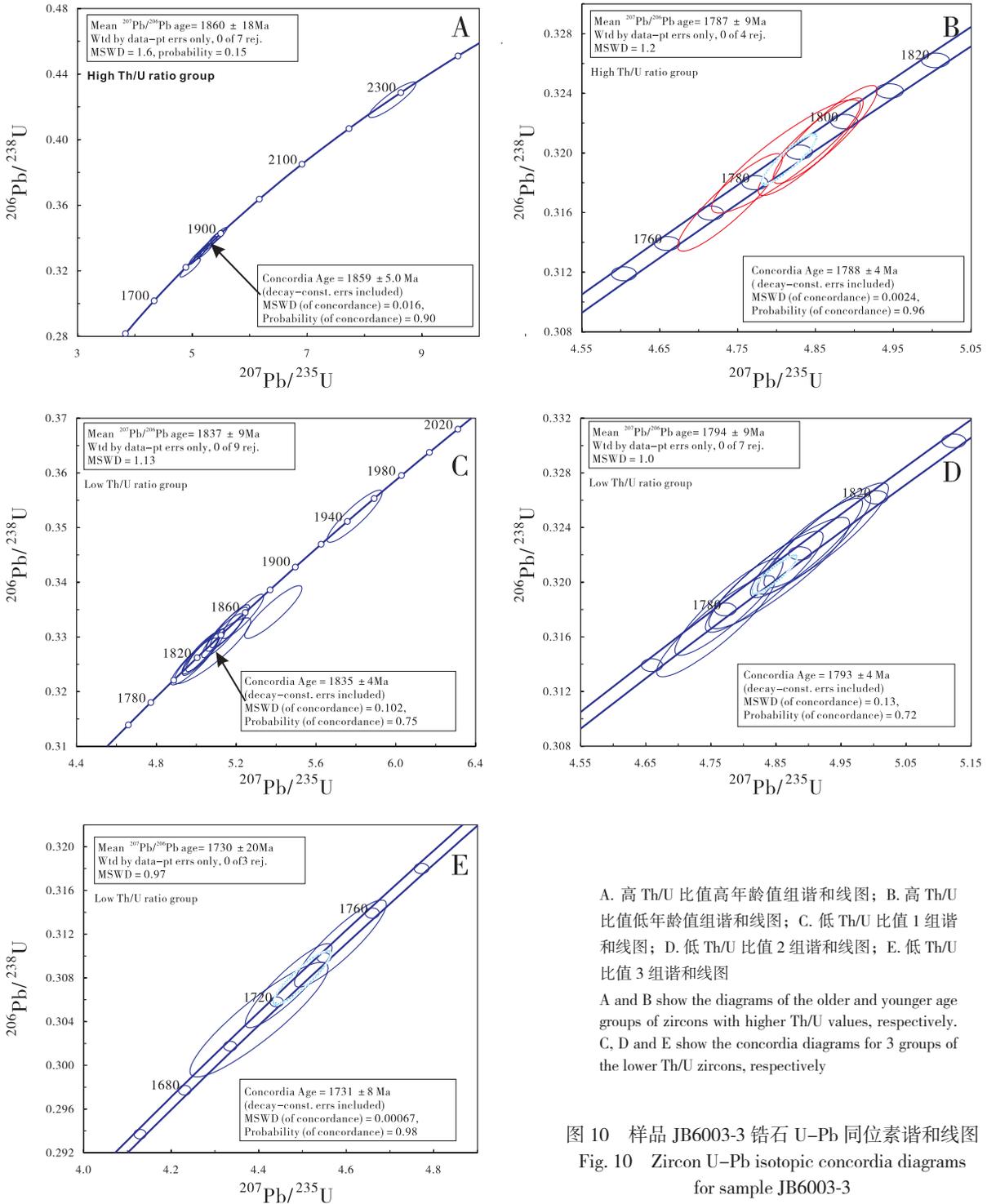
4 锆石同位素年龄的地质意义

上述的 SHRIMP 和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析表明, 糜棱岩化英云闪长岩形成于 2 517 Ma, 麻粒岩相变质的二辉石英云闪长岩的形成时代为 2 505 Ma, 侵入于二辉石英云闪长岩奥长花岗岩的侵位年龄为 2 494 Ma, 朝梁沟表壳岩组合中的奥长花岗质片麻岩的成岩年龄为 2 492 Ma, 揭示冀北单塔子杂岩中的主体 TTG 岩石组合形成于 2 517~2 492 Ma, 结束于 2 473 Ma。该时期是冀北单塔子杂岩形成的最主要深成岩浆活动

期。样品 JB6011, JB6002-1 和 JB6002-3 中均存在 2 563~2 531 Ma 的捕获 / 继承锆石, 显示存在这个年龄段的主要围岩。此外最老的继承锆石或者岩浆锆石的继承内核记录了岩浆作用的源区为 2 600~2 563 Ma 的初生地壳。

除此以外, 大量的锆石亮白生长边记录了 2 427 Ma (样品 JB6014) 和 2 409~2 404 Ma (样品 JB6002-1 和 JB6002-3) 的成岩年龄。尽管这些锆石亮白边缘具有较高的 Th/U 比值 (>0.2), 鉴于其生长边结构, 加上岩相学特征证明所有这些岩石都经历了麻粒岩相变质作用, 因此我们倾向于这期变质作用发生在 ~ 2 404 Ma。

样品 JB6003-3 细粒石榴石二辉麻粒岩, 具有块状到很弱的片麻状构造。早期岩浆成因的锆石记录了 ~1 859 Ma 成岩年龄。该样品中低 Th/U 比值锆石记录的 ~1 835 Ma 和 1 793 Ma 的变质年



A. 高 Th/U 比值高年龄值组谱和线图; B. 高 Th/U 比值低年龄值组谱和线图; C. 低 Th/U 比值 1 组谱和线图; D. 低 Th/U 比值 2 组谱和线图; E. 低 Th/U 比值 3 组谱和线图

A and B show the diagrams of the older and younger age groups of zircons with higher Th/U values, respectively. C, D and E show the concordia diagrams for 3 groups of the lower Th/U zircons, respectively

图 10 样品 JB6003-3 锆石 U-Pb 同位素谱和线图
Fig. 10 Zircon U-Pb isotopic concordia diagrams for sample JB6003-3

龄, 代表了古元古代末期变质事件的两个发展阶段, 与华北克拉通中部带的主要变质事件相对应。而 ~ 1 730 Ma 与大庙斜长岩、环斑花岗岩的形成时代相当, 与吕梁山晚期花岗质岩脉的形成年龄、吕梁山和中条山的晚期流体活动事件相对应, 代表了晚期流体活动事件 (Zhang et al, 2007; Liu et

al, 2006, 刘树文等, 2007)。同时样品中许多锆石的暗化边结构和交代记录与这一解释一致。样品中具 2 289 Ma, 1 946 Ma 和 1 907 Ma 的捕获锆石, 与 2 340 ~ 1 911 Ma 之间的各种改造作用的时代相对应。但是总体上缺少 ~ 300 Ma 的锆石年代学记录, 说明单塔子杂岩可能没有经历晚古生代的

变质作用。

5 结论

SHRIMP和LA-ICPMS锆石 U-Pb同位素地质年代学分析表明, 冀北单塔子杂岩的形成主要经历了7个阶段: (1) 2 600~2 530 Ma之间形成了单塔子杂岩中英云闪长质和奥长花岗质片麻岩的围岩, 其中一部分铁镁质表壳岩, 即铁镁质二辉麻粒岩, 可能为英云闪长质-奥长花岗质岩浆的源岩; (2) 2 516~2 505 Ma主要为英云闪长质岩浆的侵位结晶; (3) 2 494~2 473 Ma, 奥长花岗质片麻岩侵位结晶; (4) 2 417~2 404 Ma, 发生了早期麻粒岩相变形变质作用和深溶混合岩化作用, 使这一杂岩经历了强烈的改造; (5) ~1 859 Ma, 铁镁质岩浆侵位, 形成一些铁镁质岩株和岩脉; (6) ~1 834 Ma到1 793 Ma, 单塔子杂岩经历了最强烈的变质作用改造, 形成了晚期麻粒岩相变质作用; (7) ~1 730 Ma经历了强烈的流体活动。

致谢: 本文的研究得到了北京离子探针中心刘敦一研究员、西北大学大陆动力学国家重点实验室的袁洪林博士等的大力支持, 在此一并表示感谢。评审者提出了许多宝贵的修改意见, 使本文的质量得到了明显提高, 作者深表感谢。本项目的LA-ICPMS 锆石年代学分析得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室的开放基金资助(资助号: 06LCD08)。

谨以此文祝贺我的导师董申保院士九十寿辰, 感谢董先生长期对我的教诲和指导, 祝愿董先生健康长寿!

参考文献 [References]:

- Anderson T. 2002. Correlation of common lead in U-Pb analysis that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 2000. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. *地质学报*, 74(3): 216-223.
- [Geng Yuansheng, Wan Yusheng, Shen Qihan, et al. 2000. Chronological framework of the early Precambrian important events in the Luliang area, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 74: 216-223. (in Chinese with English abstract)]
- Guan H, Sun M, Wilde SA, et al. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: implications for for Mation

and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 113:1-18.

- 胡学文. 2003. 河北北部蓝城子-蔡家营子区红旗营子群德 Sm-Nd 等时线年龄. *河北地质矿产信息*, (2): 2-4.
- [Hu Xuewen. 2003. A Sm-Nd isotopic age of Hongqiyingsi group at Lanchengzi-Caijiayingzi area, Northern Hebei province. *Hebei Geological and Resource Information*, (2): 2-4. (in Chinese)]
- 胡学文, 张江满, 权恒. 1996a. 冀北红旗营子群同位素年龄及其时代归属. *中国区域地质*, (2):186-192.
- [Hu Xuewen, Zhang Jiangman, Quan Heng. 1996a. The isotopic ages of the hongqiyingsi group in northern Hebei and its age assignment. *Regional Geology of China*, (2): 186-192. (in Chinese with English abstract)]
- 胡学文, 张江满, 权恒. 1996b. 燕辽地区太古宇与下元古界间不整合面的发现及其意义. *地质论评*, 42(3): 186-192.
- [Hu Xuewen, Zhang Jiangman, Quan Heng. 1996b. The discovery of unconformity between the Archean and the lower Proterozoic in the Yanliao area and its geological significance. *Geological Reviews*, 42(3): 1986-192. (in Chinese with English abstract)]
- Jacobsen S B. 1988. Isotopic constraints on crustal growth and recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90:315-329.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约. *地质学报*, 77(2):217-228
- [Jian Ping, Liu Dunyi, Sun Xiaomeng. 2003. SHRIMP dating of Carboniferous Jinshajiang ophiolite in western Yunnan and Sichuan: Geochronological constraints on the evolution of the Paleo-Tethys oceanic crust. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217-228. (in Chinese with English abstract)]
- Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. 2005. Age and evolution of a late Archean to early Palaeozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *J.Asian Earth Sciences*, 24: 577-595.
- Kusky T M and Li J H. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *J. Asian Earth Sci.*, 22: 383-397.
- 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消滅的证据. *地质学报*, 77(3): 317-327.
- [Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, et al. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulinkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317-327. (in Chinese with English abstract)]
- 刘树文, 张臣, 刘超辉, 等. 2007. 中条山-吕梁山前寒武纪变质杂岩的独居石电子探针定年研究. *地学前缘*, 14(1): 64-74.
- [Liu Shuwen, Zhang Chen, Liu Chaohui, et al. 2007. EPMA Th-U-Pb dating of monazite for Zhongtiao and Luliang Precambrian metamorphic complexes. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 64-74. (in Chinese with English abstract)]
- Liu S W, Wilde S A, Zhao G C, et al. 2007. Granitoids in the Luliang Precambrian Complex in the Trans-North China Orogen, the North China Craton: their SHRIMP zircon ages, petrogenesis and tectonic implications. *Am. J. Sci.*, in press.
- Liu S W, Tian W, Liu C H, et al. 2006. Geochemistry, Nd isotopic characteristics of metamorphic complexes in North Hebei: Implications for crustal accretion. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 807-818.
- Liu S W, Zhao G C, Wilde S A, et al. 2006. Th-U-Pb monazite

- geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148 (3–4): 205–224.
- Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping complex: implications for the tectonic evolution of the Central zone, North China Craton. *Journal of Asia Earth Sciences*, 24: 643–658.
- Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. 2004. Archean geodynamics in the central zone, North China craton: constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutaishan complexes. *Precambrian Research*, 130: 229–249.
- 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 1999. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义. *岩石学报*, 15(4): 524–531.
- [Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. 1999. The isotope ages and their geological implications of high-pressure basic granulites in north region to Chengde, Hebei province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 524–531. (in Chinese with English abstract)]
- 倪志耀, 翟明国, 王仁民, 等. 2004. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩. *科学通报*, 49(6): 585–591.
- [Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, Wang Renmin, et al. 2004. Discovery of Late Paleozoic retro-eclogite at the northern Margin of the NCC. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 585–591. (in Chinese)]
- 王启超. 1992. 红旗营子群的时代归属及所经历的地质热事件. *地质科学*, 增刊, 17–24.
- [Wang Qichao. 1992. On the age of Hongqiyingsi group and geological thermal events in undergone. *Chinese Geological Sciences*, Supplement, 17–24. (in Chinese)]
- Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. 1998. SHRIMP U-Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan–Wutaishan area: implications for the timing of crustal growth in the North China craton. *Chinese Science Bulletin*, 43: 144–145.
- Wilde S A, Zhao G C, Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the Late Archaean and its amalgamation along a Major 1.8 Ga collision zone; including speculations on its position within a global Paleoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5: 85–94.
- Wood D A. 1980. The application of a TH-Hf-Ta diagram to problems of tectono magmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 11–30.
- 许绍忠, 崔玉芝, 许桂玲, 等. 2002. 河北省地质图 (1:500000). 见: 马丽芳编辑, 中国地质图集. 北京: 地质出版社, p125–132.
- [Xu Shaozhong, Cui Yuzhi, Xu Guiling, et al. 2002. Geological Map of Hebei Province (1:500000). // Ma Lifang, ed. Geological Maps of China. Beijing: Geological Publishing House, 125–132. (in Chinese)]
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. *岩石学报*, 21(6): 1633–1644.
- [Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, et al. 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1633–1644. (in Chinese with English abstract)]
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. 2004. Accurate U-Pb age and trace elements determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma Mass spectrometry. *Geostand. Newsl.*, 28: 353–370.
- 张拴宏, 赵越, 宋彪, 等. 2004. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩—锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. *岩石学报*, 20 (3): 621–626.
- [Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, et al. 2004. Late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in early Pre-cambrian highgrade metamorphic terrains near Longhua county in northern Hebei province, north China: result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (3): 621–626. (in Chinese with English abstract)]
- Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, et al. 2007. The 1.75–1.68 Ga anorthositic-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen. *Precambrian Research*, 155(3–4): 287–312.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45–73.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *Am. J. Sci.*, 302: 191–226.
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, et al. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177–202.
- 钟长汀, 毛德宝, 赵凤清, 等. 2001. 冀北高压麻粒岩带岩石组合性质、同位素特征及其演化. 前寒武纪研究进展, 24 (3): 175–183.
- [Zhong Changting, Mao Debao, Zhao Fengqing, et al. 2001. Rock units of the high-pressure Granulite Belt in the Northern Hebei Province, North China: Their properties, Isotopic characteristics and evolution. *Progress in Precambrian Research*, 24(3): 175–183. (in Chinese with English abstract)]

Geology and Zircon U–Pb Isotopic Chronology of Dantazi Complex, Northern Hebei Province

LIU Shu-wen^{1,3}, LÜ Yong-jun¹, FENG Yong-gang¹, ZHANG Chen¹,
TIAN Wei¹, YAN Quan-ren², LIU Xiao-ming³

(1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*;
3. *State key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: The Dantazi complex in northern Hebei province, located in the middle segment of northern margin of the North China Craton, consists of the tonalitic, trondhjemitic and granodioritic gneisses (TTG) metamorphosed in high amphibolite facies to granulite facies, and a supracrustal rock association of mafic two-pyroxene granulites, clinopyroxene amphibolites, garnet plagioclase fine-grained gneisses, garnet sillimanite biotite schists and minor marbles. Detailed studies in SHRIMP and LA-ICPMS zircon U–Pb isotopic chronology reveal that the Dantazi complex experienced seven stages of evolution: (1) 2 600–2 530 Ma, the formation of the country rocks of the TTG gneisses, including some mafic supracrustal rocks that might be sources of the TTG magma; (2) 2 517–2 505 Ma, tonalitic magma emplaced and crystallized; (3) 2 494–2 473 Ma, trondhjemitic magma emplaced and crystallized; (4) 2 427–2 404 Ma, the plutonic and supracrustal lithological associations in the complex were metamorphosed and deformed in high amphibolite facies to granulite facies (earlier stage) and reworked; (5) ~1 859 Ma, mafic magma emplaced, forming some mafic dykes and stocks; (6) ~1 834 Ma to 1 793 Ma, the Dantazi complex experienced an intensive regional metamorphism in granulite facies (later stage); (7) ~1 730 Ma, the complex was altered by intensive activation of geological fluids. However, there is no ~300 Ma Paleozoic age record in all the samples analyzed for zircon U–Pb isotopic chronology, suggesting that the Dantazi complex did not experience the Paleozoic metamorphism.

Key words: Dantazi complex; TTG gneisses; SHRIMP zircon U–Pb chronology; LA-ICPMS zircon chronology; formation and evolution of the complex; the middle segment of the North China Craton