

华北桑干地区大规模麻粒岩相变质作用的时代: 锆石 U-Pb 年代学*

郭敬辉 翟明国 许荣华

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 对桑干地区麻粒岩相变质沉积岩系(孔兹岩系)中变质和未变质侵入体进行锆石 U-Pb 年代学研究, 获得变质花岗岩、变质闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 2005 ± 9 Ma 和 1921 ± 1 Ma, 它们代表岩浆结晶年龄. 另外测得未变质粗粒石榴石花岗岩锆石 U-Pb 年龄 1892 ± 10 Ma. 据此, 麻粒岩相变质作用时代应该晚于闪长岩的侵入年龄(1921 Ma), 略早于粗粒石榴石花岗岩的形成年代. 结合已有的年龄资料提出, 桑干地区发育的孔兹岩系、片麻岩地体和高压基性麻粒岩, 它们的麻粒岩相变质作用都发生在早元古代末. 这一时代是华北克拉通碰撞拼合的时代.

关键词 锆石 U-Pb 年龄 麻粒岩 变质作用 早元古代 华北克拉通

桑干地区出露华北克拉通规模最大的早前寒武纪麻粒岩基底, 其中主要三类麻粒岩组合: (1) 麻粒岩相变质沉积岩组合, 是孔兹岩系的主体; (2) 长英质麻粒岩和片麻岩组合, 构成怀安片麻岩地体; (3) 高压基性麻粒岩组合, 主要分布在怀安片麻岩地体的周缘, 与片麻岩地体的关系尚不明确, 这里暂且作为单独的一类. 变质作用资料显示, 三类麻粒岩都具有顺时针的 *PT* 轨迹, 并且经历了程度不同的减压过程^[1~5], 很可能都是在碰撞构造环境形成^[3, 6]. 然而, 碰撞构造作用在什么时代发生, 太古宙末还是早元古代末? 这三套麻粒岩组合是不是同一个碰撞构造过程的产物? 这些问题对于华北克拉通统一的构造拼合模式的任何方案^[7~9], 都是必需回答的关键问题, 也是引起争议较大的问题. 而不同类型麻粒岩的变质作用时代是问题的关键.

对于长英质麻粒岩和片麻岩组合及高压基性麻粒岩组合, 近年来已经有了一些含义清楚的同位素年代学资料来限定它们的形成和变质作用时代^[10~13]. 但是对于孔兹岩系, 现有的年龄数据分布范围较大^[14~17], 其成岩和麻粒岩相变质时代一直不甚明确.

本文主旨是确定孔兹岩系的变质作用时代. 考虑到化学法锆石 U-Pb 年代学技术的适用程度, 本文避开变质沉积岩, 而选择其中地质关系清楚的侵入岩, 包括变质的和未变质的, 测定它们的锆石 U-Pb 年龄, 设想采用相对可靠的岩浆岩的结晶年龄, 来限定孔兹岩系的形成和变质作用的时间范围. 同时, 对三套麻粒岩已有的同位素年龄资料逐一进行甄别分析, 找出其中可靠的麻粒岩相变质作用时代的证据. 最后, 综合讨论桑干地区三套麻粒岩的变质作用时代, 以及相应的碰撞构造与其后的构造过程的区别.

1 地质背景和样品描述

桑干地区位于华北克拉通中北部, 这里的早前寒武纪变质基底主要由两个麻粒岩相岩石组合单元(或构造单元)组成(图 1), 即西北部的孔兹岩系和东南部的片麻岩地体. 片麻岩地体的主要岩类是大致相当于 TTG 成分的长英质麻粒岩和片麻岩, 一般称怀安片麻岩地体或杂岩, 略显穹隆状^[18~20]. 在片麻岩地体的周缘, 分布有一些高压基性麻粒岩组合. 高压麻粒岩与片麻岩地体的关系比较复杂, 有些部位, 高压麻粒岩是较大的构造透镜体, 与围岩片麻岩之间存在强烈的剪切^[4, 20]; 而另一些地方, 高压麻粒岩是混合岩或花岗岩中的包体. 结合岩石组合及变质作用方面的差异, 本文暂且将高压麻粒岩作为与变质沉积岩和长英质麻粒岩/片麻岩不同的单独一类进行讨论.

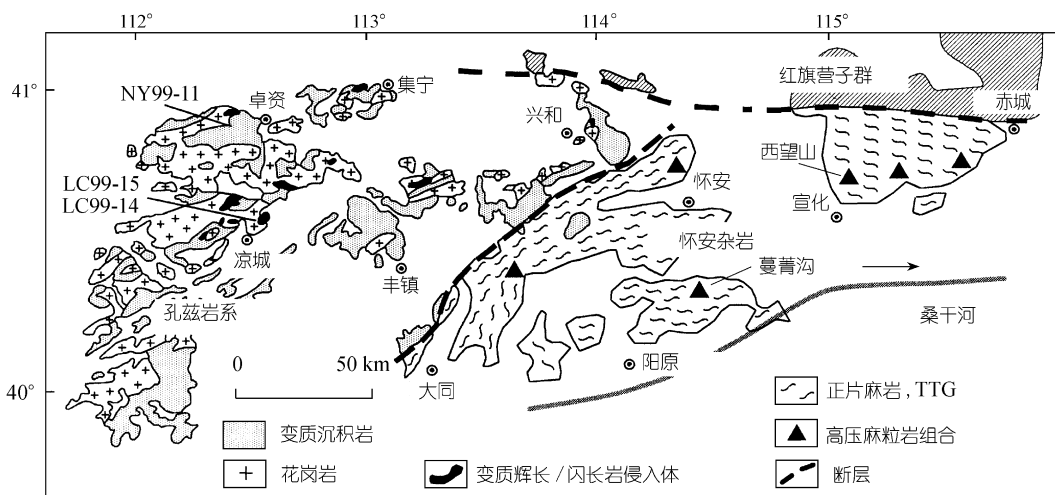


图 1 华北克拉通桑干地区早前寒武纪变质基底地质构造简图

孔兹岩系的主体是麻粒岩相的各类变质沉积岩, 此外还有三类侵入体具有重要的标志意义. (1) 早期的花岗岩侵入体, 已经彻底变成了紫苏花岗岩或紫苏辉石条纹长石麻粒岩, 但具有一定面积的均匀块状的野外特征, 使它们仍然可以从变质沉积岩组合中识别出来. (2) 辉长质-闪长质的小侵入体, 规模从几百米到几公里, 在孔兹岩系分布区有几十个. 它们都经历了麻粒岩相的变质和变形作用, 一般为二辉麻粒岩. (3) 粗粒石榴石花岗岩, 占整个孔兹岩系面积的 40% 左右, 为半原地 S 型花岗岩, 含石榴石、夕线石和堇青石等富 Al 矿物. 这些花岗岩没有经历麻粒岩相变质作用, 但很可能是麻粒岩相变质作用引起的脱水熔融的产物^[21~23]. 本次工作分别选取这三类侵入体中有代表性的样品, 进行锆石 U-Pb 年代学研究.

变质花岗岩样品(99NY11)采自卓资西北牛窑沟. 岩石野外特征是均匀、块状或具弱片麻理, 岩性在几公里范围内没有变化, 但没有见到与变质沉积岩的接触关系. 变质花岗岩中发育基性岩脉, 边界清晰平直, 但已经变质成为粗粒的石榴石二辉麻粒岩.

变质闪长岩样品(99LC15)和粗粒石榴石花岗岩样品(99LC14)均采自凉城鞍子山东北的天子村. 闪长岩体宽 300 m, 长 2 km, 侵入到变质沉积岩中, 岩体内有变质沉积岩的具有棱角的包体(50 cm × 30 cm). 变质闪长岩为深灰色, 有较弱的片麻理, 含有二辉石矿物组合. 粗粒石

榴石花岗岩的岩体巨大, 长达十几公里, 侵入到变质闪长岩体的接触关系清楚.

2 测试方法

U-Pb 分离化学流程采用在 Krogh^[24]方法基础上改进的颗粒锆石方法^[25], 一般用 3~5 个颗粒, 重量大约 15 μg . 将分组锆石分别挑入 TEFLON 闷罐内, 加入定量 ^{235}U - ^{205}Pb 混合稀释剂, 加热蒸干后, 加入 8 滴 40%超纯 HF, 加 TEFLON 热缩管, 将闷罐放入金属套内拧紧, 放入烘箱内, 在 200 $^{\circ}\text{C}$ 下加热一周, 使锆石分解. 铅的分离纯化采用 HBr 体系, 铀的分离纯化采用 HCl 体系. U 和 Pb 同位素测定用硅胶作发射剂, 在 VG-354 固体源质谱仪上完成. 对国际标样 NBS981 的测定误差为 1%左右. U 同位素测量时, 使用电子倍增器, 增益随 UO_2^{2+} 离子强度的不同而略有变化; Pb 同位素测量时, 使用法拉第筒接收. 测试的二次平行误差(2σ)小于 2‰. 全流程 Pb 本底小于 50 pg. 全部测试在中国科学院地质与地球物理研究所同位素年代学实验室完成.

3 测试结果

锆石 U-Pb 测试和计算结果全部列于表 1. 锆石形貌特征的扫描电镜照片见图 2, U-Pb 同位素组成和年龄结果表示在图 3. 下面分别介绍每个样品的锆石特征及其 U-Pb 年龄结果.

变质花岗岩样品 NY99-11, 锆石为棕色, 半透明~不透明. 多为长柱状, 少量短柱状, 晶面清晰完好, 晶棱浑圆(图 2(a)). 所测样品均为长柱状. 4 组数据点的分布呈良好的线性关系(图 3(a)), 其中 2 个点位于谐和线附近, 1 个点位于谐和线略靠下一点的位置, 显示了少量的 Pb 丢失. 另外有 1 个点位于谐和线的上方, 显示 U 丢失或 Pb 过剩的特点. 由于不一致线的下交点接近零点, 因此, 这期 U 丢失或 Pb 获得发生在晚近时代, 很可能只是实验过程中的 U 丢失造成的, 对年龄值并不造成明显的影响. 4 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值都非常高(表 1), 一致线上交点年龄 $t = 2005 \pm 9 \text{ Ma}$. 这一年龄值可能代表花岗岩的形成年龄.

变质闪长岩样品 LC99-15, 锆石为无色~淡黄色, 透明~半透明. 多为短柱状, 少量长柱状和浑圆状. 晶面清晰, 一部分晶棱浑圆(图 2(b)). 4 组数据均落在谐和线下方(图 3(b)), 但都很靠近谐和线, 显示了很有限的 Pb 丢失. 由于 4 个数据点都接近谐和线, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄比一致线上交点年龄有更好的精度和可靠性. 因此本文采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄的加权平均值作为锆石 U-Pb 测试年龄, $t = 1921 \pm 1 \text{ Ma}$. 这一结果代表闪长岩侵入体的岩浆结晶年龄.

粗粒石榴石花岗岩样品 LC99-14, 锆石为无色~淡棕灰色, 半透明. 多为短柱状, 少量浑圆状. 晶面可见, 晶棱浑圆(图 2(c)). 4 组数据的线性关系良好, 其中 2 个点落在谐和线上, 另一个点落在谐和线略靠下的位置, 显示了有限的 Pb 丢失. 还有 1 个点落在谐和线的上方, 与样品 NY99-11 一样, 可能是实验过程造成的 U 丢失所致. 一致线上交点年龄 $t = 1892 \pm 10 \text{ Ma}$. 这一年龄的含义见下面的分析.

4 讨论

4.1 锆石 U-Pb 年龄的含义

对于上述锆石 U-Pb 年龄的含义, 本文主要依据由扫描电镜得到的锆石的形态图和对锆石 U-Pb 体系稳定性的分析来进行讨论和说明.

表 1 锆石的 U-Pb 同位素分析计算结果^{a)}

样品	元素总量		同位素比值				表面年龄/Ma		
	U /pmol	Pb /pmol	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
NY99-11, 变质花岗岩, 卓资牛窑沟									
NY99-11-1	852.11	354.10	18182	0.3411 ± 0.0071	5.761 ± 0.121	0.12249 ± 0.00033	1892	1941	1992.8 ± 4.7
NY99-11-2	374.51	169.01	9524	0.3749 ± 0.0076	6.402 ± 0.131	0.12385 ± 0.00023	2053	2033	2012.5 ± 3.3
NY99-11-3	669.26	300.48	22727	0.3695 ± 0.0075	6.307 ± 0.129	0.12378 ± 0.00023	2027	2019	2011.4 ± 3.2
NY99-11-4	520.24	268.94	9434	0.4224 ± 0.0087	7.199 ± 0.158	0.12361 ± 0.00081	2271	2136	2008.9 ± 12
LC99-15, 变质闪长岩, 凉城鞍子山									
LC99-15-1	13.39	5.61	679.3	0.3290 ± 0.0068	5.354 ± 0.114	0.11804 ± 0.00058	1834	1878	1926.7 ± 8.9
LC99-15-2	57.74	22.77	3584	0.3298 ± 0.0066	5.348 ± 0.108	0.11762 ± 0.00008	1837	1877	1920.4 ± 1.2
LC99-15-3	52.95	22.05	3906	0.3382 ± 0.0068	5.486 ± 0.112	0.11764 ± 0.00035	1878	1898	1920.7 ± 5.4
LC99-15-4	45.78	18.51	4386	0.3312 ± 0.0067	5.371 ± 0.109	0.11762 ± 0.00018	1844	1880	1920.4 ± 2.7
LC99-14, 石榴石花岗岩, 凉城鞍子山									
LC99-14-1	52.93	23.8	4000	0.3494 ± 0.0070	5.602 ± 0.115	0.11630 ± 0.00043	1932	1916	1900.1 ± 6.7
LC99-14-2	80.76	33.76	5319	0.3387 ± 0.0068	5.410 ± 0.110	0.11584 ± 0.00027	1881	1887	1893.0 ± 4.1
LC99-14-3	127.33	51.70	868.8	0.3252 ± 0.0065	5.163 ± 0.104	0.11516 ± 0.00022	1815	1847	1882.4 ± 3.4
LC99-14-4	119.54	54.65	3401	0.3742 ± 0.0075	5.998 ± 0.121	0.11626 ± 0.00013	2049	1976	1899.5 ± 2.0

a) 同位素比值 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为实测值; 其他为扣除了本底和普通 Pb, 并进行了质量歧视效应校正后的值。本底为 50 pg, 本底 Pb 同位素组成为: ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=18.77; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.68; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=38.95。普通 Pb 校正采用 Stacey 两阶段模式的对应值

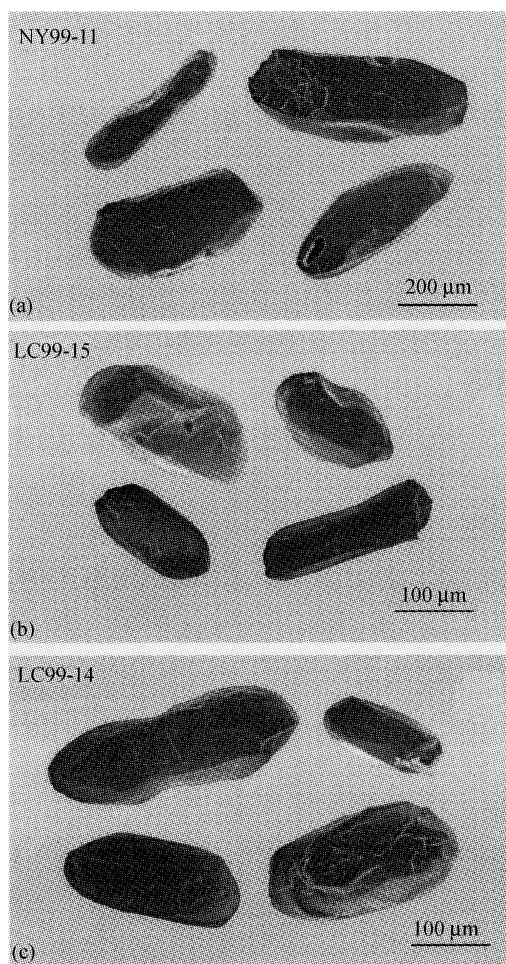


图 2 锆石形态的扫描电镜图像. (a) 卓资变质花岗岩样品 NY99-11; (b) 凉城变质闪长岩样品 LC99-15; (c) 凉城粗粒石榴石花岗岩样品 LC99-14

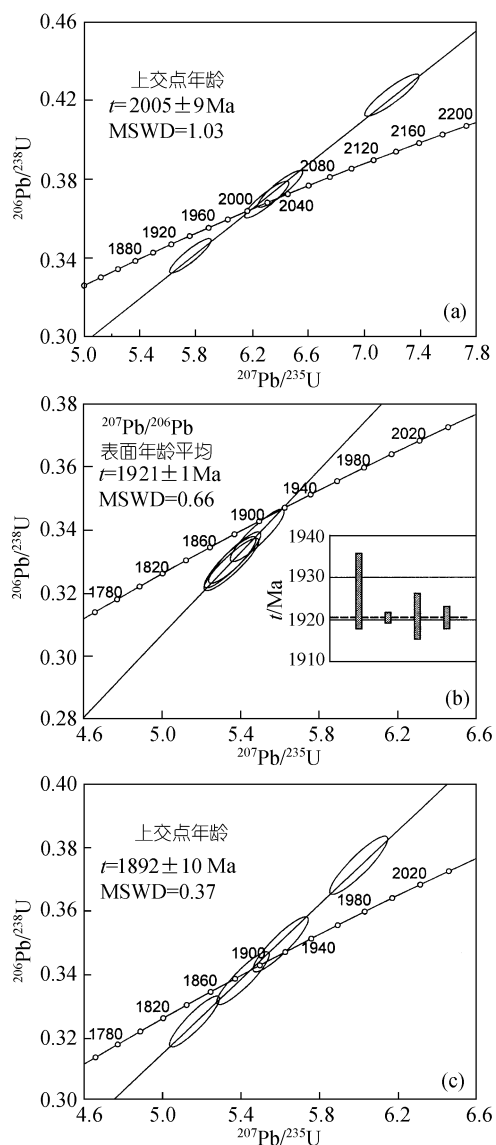


图 3 锆石 U-Pb 谐和图. (a) 卓资变质花岗岩样品 NY99-11; (b) 凉城变质闪长岩样品 LC99-15; (c) 凉城粗粒石榴石花岗岩样品 LC99-14

一般认为, 在同位素年代学体系中, 锆石 U-Pb 体系是最稳定的, 其封闭温度 $T_c > 900^\circ\text{C}$, 即使在麻粒岩相变质作用和部分熔融的条件下, 锆石的 U-Pb 体系也难于再平衡^[26~30]. 另一方面, 锆石 U-Pb 体系也会在某些情况下受到扰动, 如在高级变质作用过程中,

锆石的溶解、再结晶和再生长或附生可能会造成锆石 U-Pb 系统的变化^[28]。在低温条件下锆石的 Pb 丢失也可能造成 U-Pb 体系的扰动。在多数情况下, 只有非常小的锆石, 其 U-Pb 体系才可能在变质作用中重置^[29]。

在变质花岗岩 NY99-11 和变质闪长岩 LC99-15 样品中, 锆石多为长短不一的柱状, 晶面清晰, 晶棱浑圆, 极少浑圆状(图 2)。长柱状是岩浆锆石的特征^[31, 32], 晶棱浑圆可能是麻粒岩相变质作用造成的溶蚀。这些锆石颗粒均大于 100 μm 。这样大小的岩浆锆石, 即使经历了麻粒岩相变质作用, 其 U-Pb 同位素记录中, 岩浆阶段的贡献也是最主要的。在 U-Pb 谐和图中(图 3(a), (b)), 这两个样品的锆石 U-Pb 同位素组成都落在谐和线附近, Pb 丢失非常有限。因此, 这两个样品的年龄 $t = 2005 \pm 9\text{Ma}$ 和 $t = 1921 \pm 1\text{Ma}$ 分别代表岩浆结晶的年代。

样品 LC99-14 是未变质的粗粒石榴石花岗岩。扫描电镜照片(图 2(c))显示, 锆石主要是短柱状, 少量浑圆状, 锆石的岩浆成因特点不明显。该样品是半原地的 S 型花岗岩, 含有一些继承锆石是可能的。也就是说, 花岗岩的形成年龄应该晚于 $1892 \pm 10\text{Ma}$ 。结合作者^[23]曾报导的同类花岗岩的锆石 U-Pb 一致年龄 $1836 \pm 18\text{Ma}$, 这些花岗岩的形成年龄可能介于二者之间。

4.2 三类麻粒岩组合的变质作用时代

实际上, 孔兹岩系在早元古代发生麻粒岩相变质作用, 已有的同位素年龄资料已经提供了很好的证据。作者仔细检查发现, 在已有的年龄资料中, 有些锆石 U-Pb 年龄数据相对可靠, 它们的数据点特别靠近谐和线。这些年龄主要有: (1)兴和小坝子夕线石榴片麻岩, $1892 \pm 23/-19\text{Ma}$ ^[15]; (2)兴和黄土嘴石榴夕线片麻岩, $1916 \pm 16\text{Ma}$ ^[16]; (3)兴和落官窑石榴夕线钾长片麻岩, $1873 \pm 32\text{Ma}$ ^[17]。这三个样品均为典型的麻粒岩相变质泥质岩, 其中的锆石主要是变质成因, 残留锆石的影响相对较小。因此, 三个年龄中的最小值可能最接近孔兹岩系的麻粒岩相变质作用时代。但是在以往的观念中, 1.8~1.9 Ga 的年龄仅仅被认为代表重要的热事件, 是否就是麻粒岩相变质作用的时代并不明确。本文获得变质闪长岩锆石 U-Pb 年龄 $t = 1921 \pm 1\text{Ma}$, 代表闪长岩体侵位的时代, 证明孔兹岩系的麻粒岩相变质作用年代小于 1921 Ma。结合上述分析, 并与粗粒石榴石花岗岩的年龄对比, 可以认为麻粒岩相变质时代大约 1.87 Ga。

怀安片麻岩地体的大部分岩石的成岩年龄为晚太古代^[10, 11, 14, 15, 33], 但变质作用的时代, 有太古宙末、早元古代(2.2~2.3 Ga)、早元古代(1.8~1.9 Ga)等不同看法。本文检查已发表的锆石 U-Pb 年代学数据, 发现刘敦一等^[10]和耿元生等^[11]报导的 3 组锆石 U-Pb 离子探针数据最能说明问题。三个样品分别是宣化张全庄花岗闪长质片麻岩(Z9116), 怀安瓦沟台英云闪长质片麻岩(Z9167), 怀安蔓菁沟灰色片麻岩(Z9238)。它们的离子探针锆石同位素数据在 U-Pb 谐和图上的分布非常相似, 即散落分布在靠近谐和线下方 2.7~1.8 Ga 的范围内。在 2.5 Ga 和 2.6~2.7 Ga 有许多谐和年龄, 代表原岩的形成时代, 而其他数据点从 2.5 Ga 向年轻的方向散布, 无例外地指向大致 1.85~1.95 Ga 的位置, 并且有两个数据就落在谐和线上, 年龄分别为 1950 和 1850 Ma。这样的数据分布与世界其他大陆片麻岩地体的锆石 U-Pb 离子探针数据的分布形式非常一致^[30], 典型地指示了片麻岩地体的形成时代和变质时代, 分别为谐和图中数据点群展布的上端和下端。原因是, TTG 类的侵入体在经历麻粒岩相变质作用过程中, 岩浆锆石受到的改造是有限的, 彻底改造更是几乎不可能^[29, 30]。因此, 可以肯定, 怀安 TTG 片麻岩的锆石 U-Pb 离子探针资料中, 年龄数据点群中的下交点年龄才真正代表变质作用时代, 即早元古代大约 1.85~1.95 Ga。

最近的一些年龄资料对高压基性麻粒岩的变质作用时代作出了较好的限定. 两个高压麻粒岩石榴石 + 全岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为 1842 ± 38 Ma 和 1856 ± 26 Ma^[13], 高压麻粒岩的石榴石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热法坪年龄为 1852 ± 8 Ma, 相应的等时线年龄 1962 ± 37 Ma^[34]. 考虑到石榴石对 Sm-Nd 和 K-Ar 同位素体系的保存能力, 这些年龄可能代表高压麻粒岩变质作用结束或开始冷却的时代. 也就是说, 高压麻粒岩的变质作用时代可能略大于这些年龄, 而接近一个小范围采样获得的 Sm-Nd 全岩等时线年龄 1.87 Ga^[13].

在华北克拉通中北部地区还广泛存在 1.80~1.70 Ga 的同位素年龄资料, 代表性的有变质岩锆石和金红石 U-Pb 年龄^[11, 17]、变质岩中角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄^[35]、辉长-辉绿岩墙的锆石 U-Pb 年龄^[36]、辉长岩-斜长岩-环斑花岗岩侵入体的锆石 U-Pb 年龄^[37]. 上述年龄无疑代表了另一次热事件和小规模岩浆活动, 时代明显晚于大规模的麻粒岩相变质作用, 性质也完全不同, 很可能与近年来提出的早元古代华北克拉通经历的广泛的伸展构造过程有关^[38, 39].

4.3 结论及地质意义

本文报导了孔兹岩系中三类侵入体的三个锆石 U-Pb 年龄, 它们是: 卓资变质花岗岩年龄 $t = 2005 \pm 9$ Ma, 代表早期花岗岩侵入时代; 凉城变质闪长岩年龄 $t = 1921 \pm 1$ Ma, 代表闪长岩体的侵位年代; 粗粒石榴石花岗岩年龄 $t = 1892 \pm 10$ Ma.

根据地质关系和变质作用特征可以确定, 桑干地区孔兹岩系沉积原岩形成时代早于侵入其中的花岗岩的时代, 即大于 2.0 Ga, 而麻粒岩相变质作用的时代晚于闪长岩体的侵入年龄 1921 Ma, 早于粗粒石榴石花岗岩的形成年代. 综合已有同位素年龄资料, 可以进一步明确, 桑干地区的三套麻粒岩: 孔兹岩系、片麻岩地体和高压麻粒岩, 在大致同一时代(1.87 Ga)发生麻粒岩相变质作用.

桑干地区的麻粒岩都具有顺时针的 *PT* 轨迹, 形成于碰撞构造过程, 是华北克拉通碰撞拼合作用的产物. 本文的研究表明, 华北克拉通碰撞拼合作用发生在早元古代末. 这一结论证实了 Zhao 等^[9, 40]模式的合理性.

致谢 分析测试工作得到了乔广生高级工程师、储著银博士以及研究生张晓曼和刘文军的协助, 李永刚和关鸿博士参加了野外工作. 审稿人对本文提出了详尽的修改意见. 作者在此表示诚挚的谢意.

参 考 文 献

- 1 Lu L Z, Jin S Q. *P-T-t* paths and tectonic history of an early Precambrian granulite facies terrane, Jining District, south-eastern Inner Mongolia, China. *J Metamorphic Geol*, 1993, 11: 483~498
- 2 刘福来, 沈其韩. 冀西北麻粒岩相带富铝片麻岩的退变结构及其变质反应性质. *岩石学报*, 1999, 15(4): 505~517
- 3 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *中国科学, B 辑*, 1992, (12): 1325~1330
- 4 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. *岩石学报*, 1993, 8(4): 329~341
- 5 刘树文, 沈其韩, 耿元生. 冀西北两类石榴石基性麻粒岩的变质演化及 Gibbs 方法分析. *岩石学报*, 1996, 12(2): 261~275
- 6 王仁民, 赖兴运, 董卫东, 等. 冀西北晚太古宙碰撞带的一些证据. 见: 钱祥麟, 王仁民主编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994. 7~20

- 7 吴昌华, 钟长汀. 华北陆台中段吕梁期的 SW-NE 向碰撞. 前寒武纪研究进展, 1998, 21(2): 28~50
- 8 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 1999, 310: 37~53
- 9 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55~88
- 10 刘敦一, 耿元生, 宋彪. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造——同位素年代学证据. 地球学报, 1997, 18(3): 226~232
- 11 耿元生, 刘敦一, 宋彪. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架. 地质学报, 1997, 71(4): 316~327
- 12 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 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, 1999, 15(4): 524~531
- 13 Guo J H, Zhai M G. Sm-Nd age dating of high-pressure granulites and amphibolite from Sanggan area, North China craton. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(2): 106~110
- 14 沈其韩, 刘敦一, 王平, 等. 内蒙集宁群变质岩系 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素年龄的讨论. 中国地质科学院院报, 1987, (16): 165~178
- 15 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 等. 晋冀内蒙交界地区早前寒武纪变质杂岩同位素年代及其构造意义. 见: 钱祥麟, 王仁民主编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994. 130~144
- 16 王 楫, 陆松年, 李惠民, 等. 内蒙古中部变质岩同位素年龄构造格架. 天津地质矿产研究所所刊, 1995, 29: 1~76
- 17 吴昌华, 李惠民, 钟长汀, 等. 内蒙古黄土窑孔兹岩系的锆石与金红石年龄研究. 地质论评, 1998, 44(6): 628~626
- 18 Zhang J Sh, Dirks P H G, Passchier C W. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archaean and Palaeoproterozoic of north China. *Precambrian Res*, 1994, 67: 37~57
- 19 Dirks P H G M, Zhang J S, Passchier C W. Exhumation of high-pressure granulites and the role of lower crustal advection in the North China craton near Datong. *J Struct Geol*, 1997, 19: 1343~1358
- 20 李江海, 翟明国, 钱祥麟, 等. 华北中北部晚太古代高压麻粒岩的地质产状及其出露的区域构造背景. 岩石学报, 1998, 14(2): 176~189
- 21 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 276
- 22 闫月华, 刘文军. 晋冀内蒙边界地区灰片麻岩和孔兹岩的讨论. 岩石学报, 1996, 12(2): 329~342
- 23 郭敬辉, 石 昕, 卞爱国, 等. 桑干地区早元古代花岗岩 Pb 同位素组成和锆石 U-Pb 年龄: 变质与地壳熔融作用及构造-热事件演化. 岩石学报, 1999, 15(2): 199~207
- 24 Krogh T E. A low contamination method for the hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 37: 485~494
- 25 许荣华. 微量及颗粒锆石 U-Pb 定年方法. 岩石学报, 1989, 5(2): 88~93
- 26 Pidgeon R T, Aftalion M. Cogenetic and inherited zircon U-Pb systems in granites: Paleozoic granites of Scotland and England. In: Bowes R D, Leake B E, eds. *Crustal Evolution of Northwestern Britain and Adjacent Regions*. Geological Journal Special Issue, 1978, 10: 183~220
- 27 Schenk V. U-Pb and Rb-Sr radiometric dates and their correlation with metamorphic events in the granulite facies basement of the Serre, southern Calabria (Italy). *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 73: 23~38
- 28 Kroner A, Stern R J, Dawoud A S, et al. The Pan-African continental margin in northeastern Africa: evidence from a geochronological study of granulites at Saboloka, Sudan. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 85: 91~104
- 29 Mezger K. Geochronology in granulites. In: Vielzeuf D, Vidal Ph, eds. *Granulites and Crustal Evolution*. Dordrecht: Kluwer, 1990. 451~470
- 30 Kroner A, Jaeckel P, Williams I S. Pb-loss patterns in zircons from a high-grade metamorphic terrain as revealed by different dating methods: U-Pb and Pb-Pb ages for igneous and metamorphic zircons from northern Sri Lanka. *Precambrian Res*, 1994, 66: 151~181
- 31 Pupin J P. Zircon and granite petrology. *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 73: 207~220
- 32 Vavra G. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: a cathodoluminescence study. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 106: 90~99
- 33 张宗清, 沈其韩, 耿元生, 等. 赤城伙房村和崇礼上新营变质岩的地球化学特征、年龄及其区域地壳形成时间. 岩石学

报, 1996, 12(2): 315~328

- 34 郭敬辉, 王松山, 桑海清, 等. 变斑晶石榴石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱的含义与华北高压麻粒岩变质时代. 岩石学报, 2001, 17(3): 436~442
- 35 Yan Y H, Li J H, Liu W J. Huaian Massif and Hengshan Massif. In: Zhai M G et al. Granulites and Lower Continental Crust in North China Archaean Craton. Beijing: Seismological Press, 1996. 55~131
- 36 李江海, 侯贵廷, 钱祥麟. 恒山中元古代基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义. 地质论评, 2001, 47(3): 234~238
- 37 Ramo O T, Haapala I, Vaasjoki M, et al. 1700 Ma Shachang complex, northeast China: Proterozoic rapakivi granite not associated with Paleoproterozoic orogenic crust. Geology, 1995, 23(9): 815~818
- 38 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷. “吕梁运动”新认识. 地球科学, 2000, 25(1): 15~20
- 39 Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. Science in China, Ser D, 2000, 43(3): 220~232
- 40 Zhao G C. Paleoproterozoic assembly of the North China craton. Geol Mag, 2001, 138(1): 87~91