科学通报 2013 年 第 58 卷 第 34 期：3589 ~ 3596
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

华北克拉通中部带恒山杂岩变质年龄的重新认识

张颖慧[①], 魏春景[①*], 田伟[①], 周喜文[②]

① 北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;
② 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
* 联系人, E-mail: cjwei@pku.edu.cn

2013-03-25 收稿, 2013-05-03 接受, 2013-10-22 网络版发表
国家自然科学基金(41172055, 41121062)和中国地质调查局地质大调查项目(1212011121062)资助

摘要 恒山麻粒岩相地体由英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩和少量基性高压麻粒岩块体组成. 对两个 TTG 片麻岩样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得到其变质锆石年龄为 1916.7±9.9 Ma 和 1850~1930 Ma, 残留岩浆锆石年龄~2.5 Ga, 两类锆石均为重稀土富集型稀土配分特征. 在含 ZrO_2 体系中进行 *P-T* 视剖面图模拟表明在固相线以上变质作用中锆石随着熔体含量增加而熔解, 只在降温过程中随着熔体结晶而生长, 因此变质新生锆石只能记录麻粒岩相的退变质年龄. 由此推测恒山麻粒岩地体在 1.85~1.93 Ga 期间, 处于发生缓慢抬升冷却的中地壳伸展环境, 而与高压麻粒岩相峰期变质阶段对应的碰撞造山事件发生的时间应该更早.

关键词
锆石年代学
P-T 视剖面图
恒山杂岩
华北克拉通

对华北克拉通在新太古代-古元古代的大地构造属性与演化历史有两种认识. 一种观点认为华北克拉通在新太古代末(~2.5 Ga)通过不同微陆块和岛弧之间的碰撞拼合完成克拉通化[1~5], 在古元古代经历了 2.3~2.0 Ga 拉张和 2.01~1.97 Ga 挤压的一系列裂谷-俯冲-增生-碰撞的陆内造山活动[4~6], 此后 1.95~1.82 Ga 发生高压-中压麻粒岩相变质作用和克拉通基底岩石的整体抬升, 但这期间的构造背景是伴有地幔上涌的伸展体制[5]还是出现俯冲-碰撞作用的造山环境[4]仍存在争议. 另外一种观点认为华北克拉通自新太古代以来一直处于持续的洋盆俯冲环境, 于~1.95 Ga 发生阴山地块和鄂尔多斯地块碰撞形成西部陆块, 于 1.80~1.89 Ga 东、西部陆块之间发生俯冲、碰撞, 形成中部造山带, 完成克拉通化[7~13], 这一观点得到许多学者的支持[14~21]. 目前来看, 多数学者都把在华北克拉通中部带获得的 1.80~1.89 Ga 的变质年龄解释为俯冲-碰撞造山过程的记录[12~15,18,20~25], 只有少数学者[5]认为可能代表持续的伸展背景. 因此, 如何理解 1.80~1.89 Ga 变质年龄的地质意义是探讨华北克拉通古元古代演化历史的关键问题. 本文采用 LA-ICP-MS 方法对恒山高压麻粒岩区的 TTG 片麻岩进行锆石 U-Pb 年代学和微量元素研究, 并结合 *P-T* 视剖面图相平衡模拟结果, 解释麻粒岩相变质过程中熔体和锆石的行为, 以便进一步认识其锆石年龄的地质意义.

1 区域地质背景及样品特征

恒山高级片麻岩地体位于华北克拉通中部带的中段, 以朱家坊韧性剪切带为界分为北恒山杂岩和南恒山杂岩(图 1). 北恒山杂岩由强烈混合岩化的 TTG 片麻岩、基性高压麻粒岩块体及少量花岗质岩石组成, 变质程度达麻粒岩相. TTG 片麻岩的侵位时代为 2.48~2.52 Ga, 代表新太古代岛弧岩浆作用的产物[14], 它们现有矿物组合为角闪岩相, 但普遍遭受强烈的部分熔融, 形成大量花岗质浅色体和脉体及小岩株等. 这些花岗质岩石一部分年龄为 1.85~1.87 Ga[23], 与麻粒岩相变质作用年龄吻合, 另一部分年龄较老, 为 2.05~2.35 和~2.5 Ga[15,26]. 基性高压麻粒岩呈布丁状

引用格式: 张颖慧, 魏春景, 田伟, 等. 华北克拉通中部带恒山杂岩变质年龄的重新认识. 科学通报, 2013, 58: 3589–3596
英文版见: Zhang Y H, Wei C J, Tian W, et al. Reinterpretation of metamorphic age of the Hengshan Complex, North China Craton. Chin Sci Bull, 2013, 58: 4300–4307, doi: 10.1007/s11434-013-5993-x

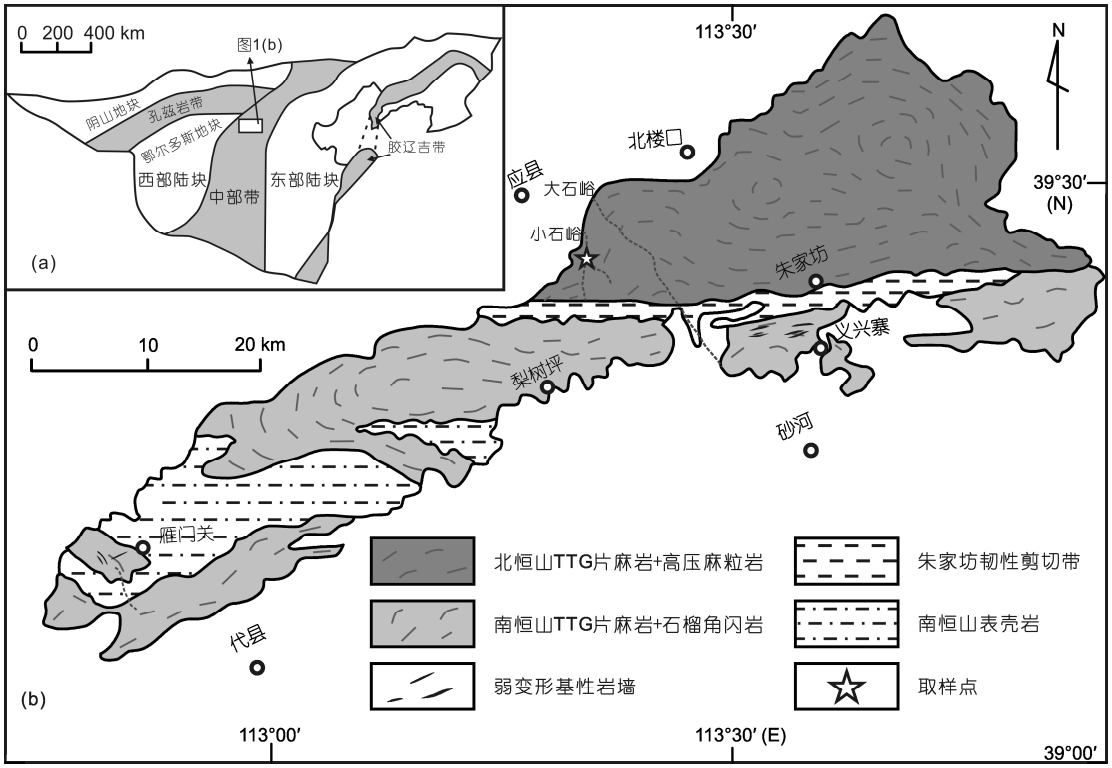


图 1 华北克拉通划分模式图及研究区位置(a)和恒山地区地质简图及采样位置(b)

(a) 据文献[11]修改; (b) 据文献[23]修改

或透镜体产于 TTG 片麻岩中(图 2(a)), 许多块体边部受到角闪岩相退变质改造, 但核部可保留麻粒岩相组合, 部分基性麻粒岩块体可见部分熔融现象[23]. Kröner 等人[23]对基性高压麻粒岩样品中的锆石进行 SHRIMP 定年得到其变质年龄为 1.85~1.88 Ga, 原岩(基性岩墙)年龄为~1915 Ma.

南恒山杂岩由 TTG 片麻岩、表壳岩、弱变形基性岩墙和花岗质岩石组成. 表壳岩包括(石榴)斜长角闪岩、斜长片麻岩、云母片岩、石榴石直闪石岩等, 变质程度为角闪岩相, 变质锆石年龄为 1.90~1.91 Ga[15,27,28]. 弱变形基性岩墙中的锆石定年得到原岩年龄为~2.06 Ga[29], 变质年龄为 1.85~1.87 Ga[23,29].

本文报道的 TTG 片麻岩采自北恒山小石峪, 样品 H912 为石英闪长质黑云角闪斜长片麻岩(图 2(c)), 其矿物组成为斜长石 50%, 石英 10%, 角闪石 25%, 黑云母 8%, 钾长石 4%, 磷灰石、锆石、榍石等副矿物约 3%. 样品 WT1131 为奥长花岗质黑云斜长片麻岩, 矿物组成为斜长石 47%, 石英 25%, 钾长石 10%, 黑云母 10%, 角闪石 5%, 副矿物约 3%.

2 锆石 U-Pb 年代学及微量元素特征

锆石的阴极发光(CL)显微分析在北京大学物理学院电子显微镜实验室完成. 样品 H912 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成, 锆石 U-Pb 比值及年龄校准用标准锆石 PLE[30]. 样品 WT1131 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及微量元素分析在中国地质大学(北京)地学实验中心完成, 锆石 U-Pb 比值及年龄校准用标准锆石 91500[31]. 元素含量校准均使用标样 NIST610. 样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER 4.4 软件计算, 普通 Pb 采用 Andersen 的 3D 坐标法[32]进行校正, 加权平均年龄及谐和图的绘制采用 ISOPLOT 3.75[33]完成. 单个数据点误差均为 1σ, 加权平均值误差为 2σ.

样品 H912 的锆石多为无色透明浑圆状, 粒度多在 100~150 μm, 长宽比 1∶1~1.5∶1, CL 图像(图 2(d))显示大部分锆石内部无分带、弱分带或扇形分带, 具有变质锆石特征; 有少量半自形短柱状锆石, 长宽比约为 2∶1, 发育岩浆成因的震荡环带; 个别锆石颗粒

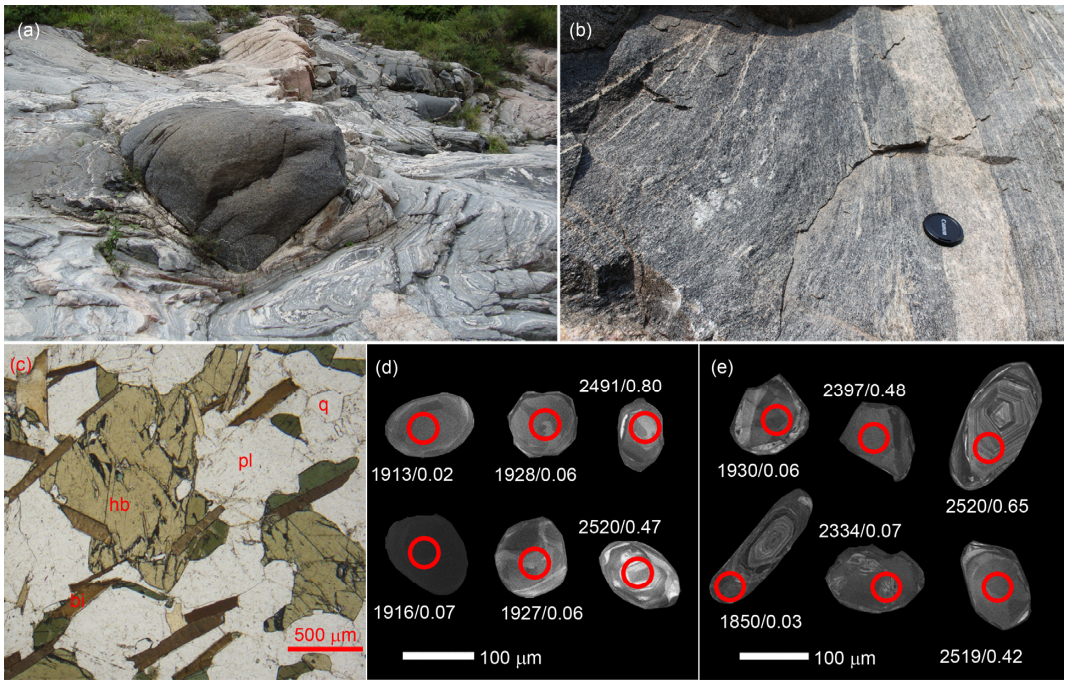


图 2　恒山混合岩化 TTG 片麻岩及其中基性高压麻粒岩块体野外特征、岩相学和锆石 CL 图像

(a), (b)为野外特征; (c) H912 的岩相学; (d) H912 的锆石 CL 图像; (e) WT1131 的锆石 CL 图像. 矿物代号: hb, 角闪石; pl, 斜长石; bi, 黑云母; q, 石英; 红色圆圈: 激光分析点; 数字标记: $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma)/(Th/U)比值

具有核边结构, 内部为岩浆核, 外边为变质边. 选取 19 颗锆石进行了分析, 其中 4 颗岩浆锆石 Th 和 U 含量分别为 21.3~89.4 μg g^{-1} 和 45.2~87.9 μg g^{-1}, Th/U 比值为 0.47~1.02, 它们在图 3(a)中均落在谐和线上, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 2501±19 Ma, MSWD=0.55. 另外 15 颗变质锆石 Th 和 U 含量分别为 2.82~16.6 μg g^{-1} 和 78.8~384 μg g^{-1}, Th/U 比值主要为 0.01~0.07(1 个数据为 0.13), 它们在图 3(a)中均落在谐和线上或附近, 其 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 1916.7±9.9 Ma, MSWD=0.73. 两类锆石的稀土元素均显示重稀土富集, 有明显的 Ce 正异常, 岩浆锆石稀土总量略高, 有 Eu 的负异常, 变质锆石稀土总量略低, 没有明显的 Eu 异常, 中稀土-重稀土的分馏程度比岩浆锆石稍陡(图 3(c)).

样品 WT1131 的锆石多为浅黄色短柱状-浑圆状, 粒度 50~200 μm, 长宽比 1∶1~3∶1. 选取 37 颗锆石进行了分析, 锆石的 Th 和 U 含量分别为 10.2~949 μg g^{-1} 和 31.9~3399 μg g^{-1}, 在谐和图 3(b)上可以分为 3 组. 第一组 28 颗锆石由 CL 图像(图 2(e))中具有明显岩浆震荡环带的锆石和部分弱分带或暗色无分带的锆石组成, 它们大多落在谐和线上~2500 Ma 附近, 与 4 颗不同程度铅丢失而偏离谐和线的数据构成的不一致线与谐和线的上交点年龄为 2500±15 Ma, MSWD=0.59, Th/U 比值变化于 0.05~0.97. 第二组 5 颗 CL 图像暗色内部结构不明显的锆石构成的不一致线与谐和线交于 2369±34 Ma, MSWD=0.72, 其中 2 点在谐和线上, 它们的 Th/U 比值 0.07~0.48. 第三组 4 个变质锆石点, CL 图像为弱分带浑圆状或暗色的变质增生边, Th/U 比值 0.02~0.06, 均落于谐和线附近, 其 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为 1850±48, 1875±45, 1876±17, 1930±19 Ma. 以上 3 类锆石的稀土元素特征相似, 重稀土富集, 轻稀土变化较大, 大多有 Eu 负异常和不同程度的 Ce 正异常(图 3(d)).

3　相平衡模拟

为了模拟高级变质过程中锆石的熔解与生长行为, 我们选择 NCKFMASHTOZr (Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-O-ZrO_2)体系, 依据样品 H912 的全岩化学成分, 使用 THERMOCALC 程序 3.33i[35]计算了 *P-T* 视剖面图(图 4). 计算使用的相关矿物相和熔体的 a-x 模型参见 Kelsey 和 Powell[36], Diener 等人[37]和 Green 等人[38], 假设岩石中的 Zr 主

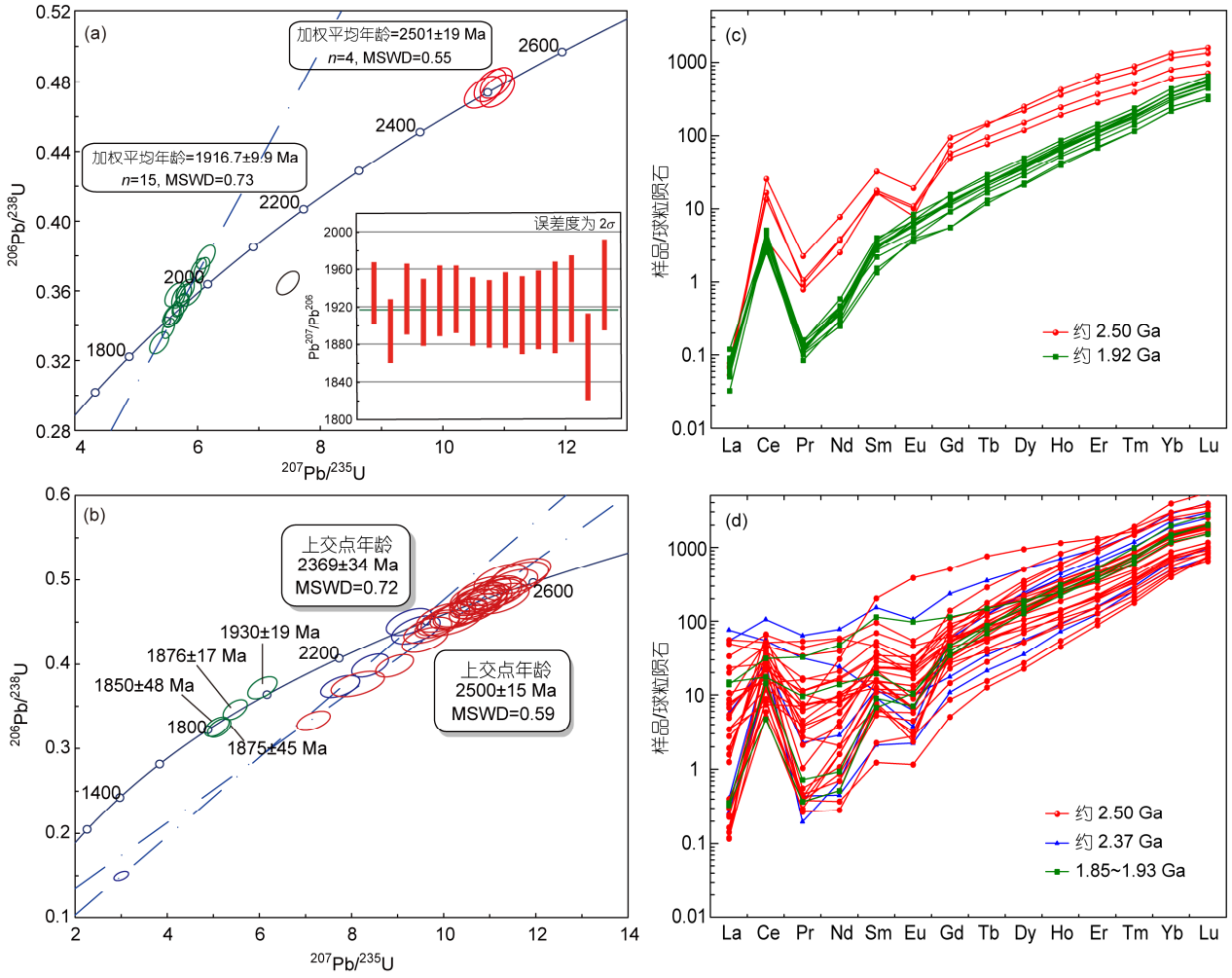


图 3 恒山 TTG 片麻岩锆石 LA-ICP-MS 的 U-Pb 年龄谐和图和稀土元素球粒陨石标准化图

(a)和(c) 样品 H912; (b)和(d) 样品 WT1131. 球粒陨石标准值引自文献[34]

要赋存于锆石、熔体、金红石及石榴石中. 由于缺少可用的固溶体模型, 忽略了其他矿物如钛铁矿、斜方辉石、黑云母和角闪石中的含 Zr 组分[39]. 通过初步质量平衡计算表明这种处理方式不会对体系中熔体及锆石含量变化趋势产生明显影响. 利用 XRF 方法获得 H912 的全岩成分为: SiO_2=61.01%(摩尔分数), Al_2O_3=10.01%, CaO=7.18%, MgO=7.13%, FeO=5.19%, K_2O=0.79%, Na_2O=3.48%, TiO_2=0.49%, 根据烧失量计算得 H_2O=4.73%, 微量元素分析得全岩 Zr 含量 52 μg g^{-1} 换算为 ZrO_2=0.00352%, 据恒山英云闪长岩平均值[40]计算得 O(Fe_2O_3)=0.94%.

在图 4 中岩石的饱和水固相线温度范围 660~750℃, 在 1.1 GPa 以下为负斜率, 以上为正斜率, 石榴石出现于 1.0 GPa 以上的矿物组合中, 锆石的消失温度 820~880℃, 固相线以上锆石和熔体的含量等值线在大部分区域内斜率较陡显示受控于温度, 随着温度的升高熔体增多而锆石减少.

考虑到 TTG 片麻岩与其中的基性高压麻粒岩块体经历了相同的变质演化过程[23,41], 在图 4 中表示了我们对基性麻粒岩研究所得到的 *P-T* 轨迹. 在固相线以上的前进变质过程中, 熔体含量逐渐增加而锆石的含量逐渐减少, 在高压麻粒岩相峰期阶段, 该片麻岩中可能的矿物组合为: 石榴石+单斜辉石+角闪石+斜长石+黑云母+金红石+石英+锆石±蓝晶石±白云母±钛铁矿. 在接续的减压抬升过程中, 当石榴石存在时, 锆石和熔体含量变化不大, 但当石榴石消失特别是斜方辉石出现之后, 岩石中发生角闪石与黑云母的脱水熔融导致熔体含量迅速增加, 锆石含量降低,

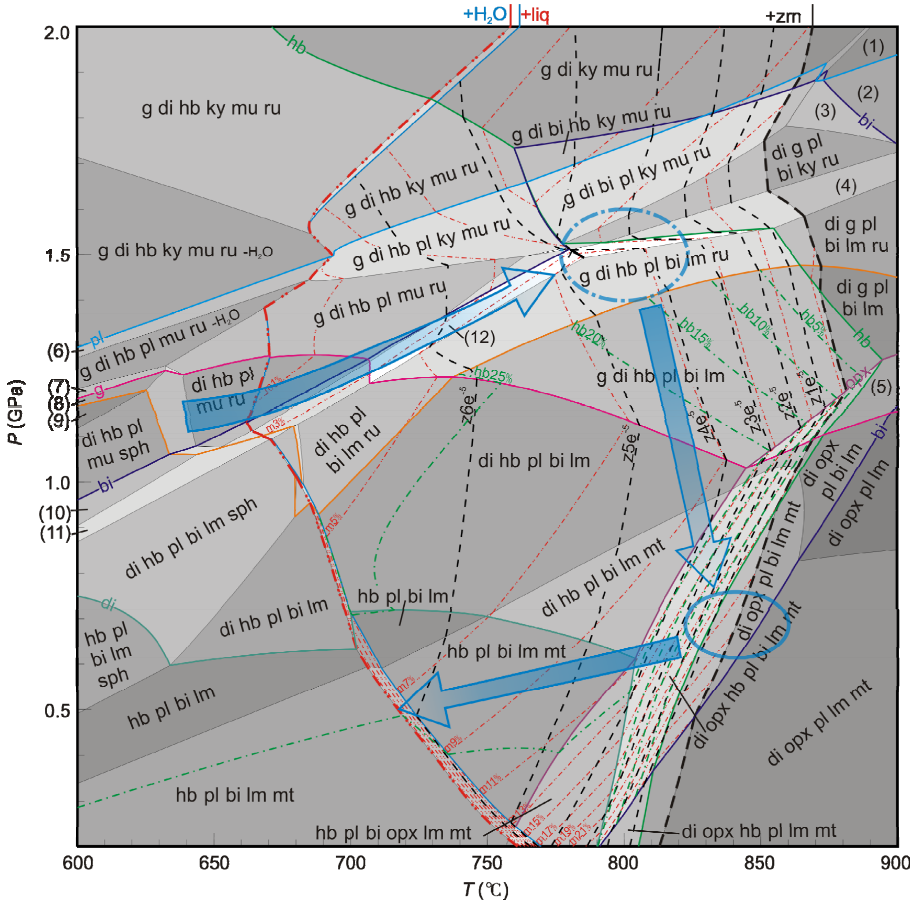


图 4　样品 H912 在 NCKFMASHTOZr+q 体系下的 *P-T* 视剖面图

黑色实线，单变线；0~50%灰度区域，双变域-七变域；彩色实线，主要矿物相界线；红色点虚线，熔体含量等值线；黑色虚线，锆石含量等值线；绿色点虚线，角闪石含量等值线；蓝色箭头及椭圆，*P-T* 轨迹；固相线以下的矿物组合均含水流体，固相线以上的矿物组合均含熔体；矿物代号：di，透辉石；opx，斜方辉石；g，石榴石；mu，白云母；ky，蓝晶石；sph，榍石；ru，金红石；lm，钛铁矿；mt，磁铁矿；zrn，锆石；liq，熔体；其他同图 2；矿物组合：(1) di g ky ksp ru liq q, (2) di g pl ky ksp ru liq q, (3) di g pl ksp bi ky ru liq q, (4) di g pl bi lm ky ru liq q, (5) di g opx pl bi lm liq q, (6) di g hb ky pl mu ru zrn q, (7) di g hb pl mu ru zrn sph q, (8) di hb pl bi mu ru zrn sph q, (9) di hb pl mu zrn sph q, (10) di hb pl bi mu zrn sph q H_2O, (11) di hb pl bi mu lm zrn sph q H_2O, (12) g di hb pl bi mu lm ru zrn q liq

其反应为角闪石+黑云母+石英+锆石=单斜辉石+斜方辉石+熔体，在温度峰期(二辉麻粒岩)阶段，该片麻岩中可能的矿物组合为：单斜辉石+斜方辉石+斜长石+石英+钛铁氧化物±黑云母±角闪石±锆石，当温度超过 840℃时，锆石会全部熔解到熔体中．在之后的冷却降温过程中，首先发生之前所述熔融反应的逆反应，导致大量熔体结晶和锆石生长，并在~800℃时相继发生斜方辉石和单斜辉石消失，直到临近固相线~720℃时出现流体与熔体共存的狭窄区域内，剩余的熔体快速结晶，释放出流体，同时又有些锆石生长．

4　讨论和结论

含 Zr 体系的相平衡模拟表明，具有 H912 成分的 TTG 质岩石，在固相线(>660℃)以上的前进变质到压力峰值，然后减压升温到温度峰值过程中，其熔体含量不断增加，锆石倾向于熔解，不会生长因此也不会有年龄记录．只有在降温过程中，随着熔体结晶(图 4)，锆石才开始结晶记年．因此，在有熔体存在的高级变质岩中，新生锆石应该记录熔体结晶或由此产生的流体活动年龄．就图 4 所示的降温过程，在温度>800℃到<720℃之间都可以有锆石生长，因此会有不同的年龄记录．我们推断样品 H912 中测得的变质年龄 1916.7±9.9 Ma 很可能代表早期冷却阶段，这是因为在图 4 所示早期降温阶段可出现大量熔体结晶和锆石生长．并且，锆石稀土特征也支持这一推论，因为在早期降温阶段伴随大量熔体结晶和锆石生长

会出现大量角闪石结晶, 而角闪石具有相当高的稀土含量, 富集中稀土, 并且在低压下因与富钙斜长石平衡出现 Eu 负异常[42~44], 从而会导致同时结晶的锆石稀土总量相对较低、中-重稀土分馏更强且没有 Eu 负异常. 在 WT1131 中仅有很少量角闪石, 不能缓冲锆石的 Eu 负异常, 因此部分 1.85~1.93 Ga 的锆石表现出明显的 Eu 负异常. 另外, 所测锆石重稀土未表现亏损, 指示其生长过程中没有石榴石, 说明锆石形成于石榴石分解以后的变质过程.

对其他成分岩石包括基性岩的初步相平衡模拟表明, 其变质过程中熔体和锆石行为与图 4 模拟结果相似, 因此可以推测其锆石年龄也只能记录岩石的冷却过程. 但是由于具体岩石成分和所处构造部位的差异, 会导致熔体在岩石中汲取、富集和结晶的程度或方式不同, 因此, 会出现不同阶段的年龄记录, 但是大多数岩石会记录温度下降至固相线附近的年龄. 例如, 如果把区内侵入基性麻粒岩的花岗质脉体年龄(1.85~1.87 Ga)[23]解释为熔体的结晶年龄, 那么, 实际上大多数基性高压麻粒岩的年龄(1.85~1.89 Ga)[23]与之类似, 也说明这一年龄并非对应高压麻粒岩相峰期阶段. 样品 WT1131 中的 4 颗锆石记录了从 1.93 Ga 到 1.85 Ga 的漫长冷却过程, 指示北恒山杂岩的温度在固相线以上的中地壳环境持续超过 80 Ma.

Kröner 等人[23]把在恒山基性高压麻粒岩中获得的 2 个~1915 Ma 的年龄值解释为原岩(侵入岩墙)形成的年龄, 对此, Peng 等人[29]认为从锆石形态学来看这一解释是值得怀疑的. 分析 Kröner 等人的定年锆石发现它们虽有典型岩浆锆石的震荡环带, 但 Th/U 比值都很低, 平均仅为 0.04, 更可能为深熔作用中的新生锆石[45,46]. 并且其中出现~2.1 Ga 的岩浆锆石年龄, 与南恒山弱变形基性岩墙的原岩时代相近[29]. 因此我们认为~1915 Ma 很可能也是麻粒岩冷却过程的变质年龄记录.

南恒山和五台群金岗库组的角闪岩相变质岩与北恒山麻粒岩应代表同一变质造山事件中不同地壳层次的产物[10,47]. 如前所述, 南恒山表壳岩和基性岩墙的变质锆石年龄为 1.90~1.91 和~1.85 Ga, 五台群和吕梁群中也有类似的 2 组年龄, 如五台群石榴斜长角闪岩的 Sm-Nd 全岩-变质矿物等时线年龄为~1.91 Ga[47], 变泥质岩中独居石得到 2 组年龄, 分别为 1.92~1.93 和 1.82~1.85 Ga[18,47]. 吕梁变泥质岩的独居石定年得到核部年龄~1.92 和~1.94 Ga, 而边部为 1.85~1.88 Ga 或更新[18,48]. 这种年龄分布与北恒山麻粒岩地体基本相同. 目前大多数学者把年轻一组年龄解释为东、西部陆块碰撞的时间, 代表峰期变质年龄[12,14,15,18,23,48,49], 但在同一变质序列中不同变质带记录相同的峰期变质年龄, 与 England 和 Thompson[50]的热模拟结果不符. 而对于较老一组年龄的地质意义尚不清楚[48]. 结合本文结果, 我们不排除它们和北恒山麻粒岩地体一样经历了缓慢抬升冷却过程, 至于抬升之前的碰撞事件可能会更早. 恒山-五台地区的古元古造山事件, 尤其是麻粒岩地体从地壳碰撞加厚、加热抬升到冷却过程可能持续>100 Ma.

近年来对大型造山带的数值模拟结果也支持造山带可以经历长期缓慢的抬升冷却历史. 例如 Jamieson 和 Beaumont[51]利用 GO-ST87 模型模拟 Grenville 造山带的构造格局与演化历史, 结果表明热的造山带核部带(hot orogenic core zone)可以经历漫长的埋藏、加热、塑性流动与抬升过程, 可持续>100 Ma 的演化过程, 在这种情况下, 变质作用峰期年龄可能很难厘定, 因为它并不对应于某个特定的热-构造“事件”, 但是利用一些中温定年方法可以确定抬升和冷却年龄.

致谢 中国地质大学(北京)苏犁老师、北京大学马芳老师对锆石测年和数据处理工作提供了很大帮助, 北京大学张爽、钱加慧在野外和实验工作中给予了大力支持并进行有益讨论, 陈意博士和赵国春教授对原稿提出了很多有价值的建议, 谨此致以诚挚谢意.

参考文献

1 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1998. 1–212
2 翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(增刊): 129–137

3 Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoarchean to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. J Asian Earth Sci, 2005, 24: 547–561
4 Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Res, 2011, 20: 6–25
5 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, 2011, 54: 1037–1046
6 Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. Precambrian Res, 2003, 122: 183–199
7 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Carton and its bearing on tectonic setting. Int Geol Rev, 1998, 40: 706–721
8 Zhao G C, Cawood P A, Lu L Z. Petrology and P-T history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China. Precambrian Res, 1999, 93: 181–199
9 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
10 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
11 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res, 2005, 136: 177–202
12 Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Res, 2008, 160: 213–226
13 Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, et al. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. Precambrian Res, 2010, 177: 266–276
14 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. J Asian Earth Sci, 2005, 24: 577–595
15 Kröner A, Wilde S A, O'Brien P J, et al. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a late Archaean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of northern China. Acta Geol Sin, 2005, 79: 605–632
16 Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. J Asian Earth Sci, 2005, 24: 597–613
17 Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. Precambrian Res, 2004, 130: 229–249
18 Liu S W, Zhao G C, Wilde S A, et al. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Res, 2006, 148: 205–224
19 Liu S W, Zhang J, Li Q G, et al. Geochemistry and U-Pb zircon ages of metamorphic volcanic rocks of the Paleoproterozoic Lüliang Complex and constraints on the evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. Precambrian Res, 2012, 222-223: 173–190
20 Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. Precambrian Res, 2006, 149: 249–271
21 Wan Y S, Wilde S A, Liu D Y, et al. Further evidence for 1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. Gondwana Res, 2006, 9: 189–197
22 Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. J Metamorph Geol, 2005, 24: 629–642
23 Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, et al. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton. Precambrian Res, 2006, 146: 45–67
24 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. 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, 2002, 302: 191–226
25 Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. Am J Sci, 2008, 308: 270–303
26 赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 等. 恒山地区古元古代 2.1 Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究. 岩石学报, 2011, 27: 1607–1623
27 王凯怡, 郝杰, Wilde S A, 等. 山西五台山-恒山地区晚太古-早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约. 地质科学, 2000, 35: 175–184
28 庞尔成, 徐永婧, 施光海, 等. 山西代县金红石矿床洪塘矿区含矿岩石的地球化学及年代学. 岩石矿物学杂志, 2010, 29: 497–506
29 Peng P, Guo J, Zhai M, et al. Genesis of the Hengling magmatic belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics. Lithos, 2012, 148: 27–44

30 Sláma J, Kösler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. Chem Geol, 2008, 249: 1–35
31 Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. Geostand Newsl, 1995, 19: 1–23
32 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chem Geol, 2002, 192: 59–79
33 Ludwig K R. Isoplot/Ex Version 3.00: A geological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec Publ 4, 2003. 1–70
34 Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteoric studies. In: Henderson P, ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984. 63–114
35 Powell R, Holland T, Worley B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. J Metamorph Geol, 1998, 16: 577–588
36 Kelsey D E, Powell R. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-ZrO_2 system. J Metamorph Geol, 2011, 29: 151–166
37 Diener J F A, Powell R, White R W, et al. A new thermodynamic model for clino-and orthoamphiboles in the system Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-O. J Metamorph Geol, 2007, 25: 631–656
38 Green E, Holland T, Powell R. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks. Am Mineral, 2007, 92: 1181–1189
39 Bea F, Montero P, Ortega M. A LA-ICP-MS evaluation of Zr reservoirs in common crustal rocks: Implications for Zr and Hf geochemistry, and zircon-forming processes. Can Mineral, 2006, 44: 693–714
40 李江海, 钱祥麟. 恒山早前寒武纪地壳演化. 太原: 山西科学技术出版社, 1994. 1–116
41 Zhao G, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications. J Petrol, 2001, 42: 1141–1170
42 Hanson G N. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth Planet Sci Lett, 1978, 38: 26–43
43 Nehring F, Foley S F, Holtta P. Trace element partitioning in the granulite facies. Contrib Mineral Petrol, 2010, 159: 493–519
44 Spandler C, Hermann J, Arculus R, et al. Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies: Implications for deep subduction-zone processes. Contrib Mineral Petrol, 2003, 146: 205–222
45 Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chem Geol, 2002, 184: 123–138
46 吴元保, 郑永飞. 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, 2004, 49: 1589–1604
47 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 等. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代. 高校地质学报, 2004, 10: 356–363
48 Trap P, Faure M, Lin W, et al. The Lüliang Massif: A key area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China Belt, North China Craton. In: Reddy S M, Mazumder R, Evans D A D, et al., eds. Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution. London: Geol Soc Spec Publ, 2009. 99–125
49 Trap P, Faure M, Lin W, et al. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen: Toward a comprehensive model. Precambrian Res, 2012, 222-223: 191–211
50 England P C, Thompson A B. Pressure-Temperature-time Paths of Regional Metamorphism I. Heat Transfer during the Evolution of Regions of Thickened Continental Crust. J Petrol, 1984, 25: 894–928
51 Jamieson R A, Beaumont C. Coeval thrusting and extension during lower crustal ductile flow—Implications for exhumation of high-grade metamorphic rocks. J Metamorph Geol, 2011, 29: 33–51