河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成

第五春荣, 孙勇, 林慈奎, 王洪亮

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

E-mail: diwuchunrong@163.com

2010-01-05 收稿, 2010-04-13 接受

国家自然科学基金(40773044, 40902056)、国家重点基础研究发展计划(2009CB825003)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项资助

摘要 太华杂岩广泛分布在华北克拉通南缘, 总体呈北西-南东向展布. 在河南省鲁山地区, 大致以荡泽河为界, 可将鲁山地区的太华杂岩分为北部以 TTG 质片麻岩和斜长角闪岩为主的片麻岩系以及南部的表壳岩系. 前人以及此次定年结果表明, 鲁山地区太华杂岩的形成时间跨度较大, 是由新太古代早期和古元古代早期两个不同阶段形成的地质体组成的. 其中, TTG 质片麻岩及斜长角闪岩形成于新太古代早期(2794~2752 Ma), 且在斜长角闪岩中存在 2.9 Ga 乃至 3.1 Ga 的残留锆石. 目前所知, 2.8~2.7 Ga 的岩石仅在河南鲁山、山东西部和胶东地区广泛出露. 此外, 在怀安、阜平、五台等地区以及山东蒙阴和辽宁复县早古生代金伯利岩中也发现 2.8~2.7 Ga 的碎屑锆石或继承锆石, 暗示华北克拉通 2.8~2.7 Ga 的构造岩浆事件分布可能比现存范围更为广泛. 锆石 Hf 同位素及全岩 Nd 同位素显示, 2.8~2.7 Ga 的地质事件是以新太古代地壳形成为主, 伴有少量古老地壳物质的再循环, 是华北克拉通一期重要的构造-热事件. 鲁山地区太华杂岩中的表壳岩系的形成年龄可进一步限定为 2.2~2.0 Ga, 其形成时代应为古元古代, 而不是之前所认为的新太古代. 结合华北克拉通北部以及中部富铝沉积变质岩的年代学资料, 可以推测, 新太古代华北克拉通形成之后, 在华北克拉通南缘以及相邻地区曾经广泛发育古元古代被动大陆边缘相沉积.

关键词

华北克拉通
太华杂岩
锆石
Hf 同位素

近年来, 随着 SHRIMP 以及 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄数据的增多, 一些研究者强调华北克拉通主要构造-热事件发生在 2.5 Ga 左右^[1-4], 认为这一期构造-热事件是华北克拉通主要的地壳生长事件. 然而, 华北克拉通 Nd 同位素^[5]及现代河流中碎屑锆石^[6]的研究结果表明, 2.8~2.7 Ga 这一期全球克拉通普遍发育的地壳生长事件在华北克拉通同样存在. 与之相比, 华北克拉通 2.5 Ga 的地壳生长可能还要弱一些. 就目前所知, 2.8~2.7 Ga 的岩石在河南鲁山^[7-10]、山东西部^[11]和胶东地区^[12]广泛存在, 这与全球其他许多典型克拉通 2.7 Ga 的地壳增生、造山带形成以

及超级大陆的循环在时间上表现出很强的一致性^[13-15]. 因此, 对河南鲁山地区太华杂岩进行详细的年代学研究将有助于探讨本区以及华北克拉通前寒武纪陆壳形成和演化.

河南鲁山地区太华杂岩比较成熟的年代学研究始于 20 世纪 80 年代. 最早, Kröner^[7]和 Sun^[8]利用单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 蒸发法获得 TTG 片麻岩的形成年龄为(2841±16)和(2806±7) Ma, 提出太华杂岩的形成时代为中太古代. 但是, 近年来的研究表明, 太华杂岩的形成历史非常复杂^[7-10,16]. 本文利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 微区定年方法, 对河南鲁山地区太

英文版见: Diwu C R, Sun Y, Lin C L, et al. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua Complex on the southern margin of the North China Craton. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11431-010-3273-6

华杂岩的划分提供年代学证据, 并利用 Hf 同位素进一步制约其原岩性质. 综合前人年代学工作, 认为太华杂岩的形成在时间上跨度较大, 可能由新太古代早期及古元古代两个不同时期和不同构造环境形成的地质体组成.

1 区域地质背景及样品概述

太华杂岩广泛分布在华北克拉通南缘, 总体呈北西-南东向展布, 由西向东从陇山、骊山, 经小秦岭地区华山、灵宝、崤山地区, 到洛宁县熊耳山地区、鲁山县背孜-马楼地区和叶县辛店-舞阳县铁山庙地区, 向东可能到安徽西部, 断续延展千余千米^[8,17~23](图 1(a)). 在安徽的霍邱和蚌埠地区, 分别改称为霍邱群和五河群^[24,25](图 1(c)). 其中以河南鲁山地区出露最为典型; 在安徽西部霍邱地区无基岩出露, 仅有钻孔资料; 在蚌埠地区也有零星分布.

前人多以传统地层学为指导, 曾将这套杂岩称为太华群, 并根据构造特征和岩石组合, 将所谓的太华群划分为上、下两个亚群, 即上太华群和下太华群, 二者大致以北西-南东向的荡泽河为界^[8,17~22](图 2). 下太华群(出露于荡泽河以北)以 TTG 质片麻岩为主, 局部夹斜长角闪岩(原岩为基性火山岩); 上太华群(出露于荡泽河以南)属表壳岩系, 岩石类型复杂, 主要为富铝质副片麻岩、斜长角闪岩、大理岩、石英岩、磁铁石英岩等, 可与孔兹岩系对比^[18,20]. 我们对这套地质体采用太华杂岩的称谓, 将荡泽河之北出露的 TTG 质片麻岩和夹斜长角闪岩的岩石组合称为片麻岩系; 将荡泽河之南出露的以孔兹岩系为主的岩石组合

称为表壳岩系. 这两套岩系变质程度普遍达铁铝榴石角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 混合岩化发育^[18,20,21].

本文研究的样品分别产自片麻岩系和表壳岩系.

(i) 片麻岩系样品. 样品 TH-07 为奥长花岗岩质片麻岩, 采自瓦屋街以东, GPS 点位为 33°53'10"N, 112°43'15"E; 样品 TH-13 为英云闪长质片麻岩, 采自耐庄, GPS 点位为 33°54'56"N, 112°41'14"E. 上述片麻岩呈穹窿状产出, 为中粒变晶结构, 片麻状构造, 主要由斜长石(65%~70%)、石英(25%~30%)、角闪石(10%~15%)和黑云母(5%)组成, 黑云母可见绿帘石化, 副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石. 样品 TH-05, TH-29 为斜长角闪岩, 均采自背孜南, GPS 点位分别为 33°57'17"N, 112°36'13"E 和 33°57'25"N, 112°36'09"E, 为中粗粒变晶结构, 块状构造, 主要矿物为角闪石(50%~60%)、斜长石(35%~45%), 含少量透辉石(5%), 副矿物为铁铝榴石、锆石、磷灰石、磁铁矿及榍石.

(ii) 表壳岩系样品. LS08-3 为石英岩, 采自明山口大桥附近, GPS 点位为 33°46'58"N, 112°45'09"E, 野外露头可见清晰的波痕(图 3(a)), 岩石为不等粒镶嵌变晶结构, 块状构造, 主要矿物为石英(>95%), 含少量长石、黑云母、磁铁矿及锆石. 石英颗粒为他形粒状, 颗粒边界圆滑, 在正交镜下呈波状消光. 由于重结晶作用, 可见由原硅质胶结物结晶成的石英, 分布在原石英颗粒的边部, 形成石英次生边(图 3(b)).

2 仪器设备和分析方法

本文所有的测试分析均在西北大学大陆动力学

图 1 地质简图

(a) 太华杂岩分布图; (b) 工作区在华北克拉通的位置; (c) 安徽省霍邱和蚌埠地区前寒武纪地体分布图(引自文献[27])

图 2 鲁山地区地质简图

据文献[8]修改. 1, TTG 质片麻岩; 2, 斜长角闪岩; 3, 表壳岩系; 4, 表壳岩系中的标志层大理岩; 5, 熊耳群; 6, 汝阳群; 7, 第四系; 8, 镁铁质岩脉; 9, 断层; 10, 不整合; 11, 采样位置

图 3 鲁山地区石英岩的野外照片(a)和石英岩显微镜下照片(10×, 正交偏光) (b)

国家重点实验室完成.

(i) 锆石 U-Pb 定年. 锆石 U-Pb 定年工作在连接 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS 上进行. 激光剥蚀斑束直径为 30 μm, 频

率为 8 Hz. 采样为单点剥蚀方式. 以 He 作为剥蚀物质的载气. ICP-MS 数据采集选用跳峰方式, 数据处理采用 GLITTER (ver 4.0) 程序, 年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正. 样品的谐和

图、加权平均年龄计算及绘制均采用 Isoplot(ver 2.49)^[26]. 元素浓度计算采用 NIST610 为外标, Si 为内标. 在样品分析过程中, 获得国际标样 91500 及 GJ-1 的年龄分析结果为 (1064.1 ± 3.2) ($n=16, 2\sigma$), (603.1 ± 3.0) Ma ($n=14, 2\sigma$), 与对应的年龄推荐值在误差范围内完全一致^[27,28].

(ii) 锆石原位 Hf 同位素分析. 锆石原位 Hf 同位素测定在配备 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统(LA) 的 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪上完成(MC-ICP-MS). 激光剥蚀的脉冲频率为 10 Hz, 激光束直径为 32 μm , 激光束的能量密度为 $10 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰通过监测 ^{175}Lu 和 ^{172}Yb 信号强度, 采用 $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu}=0.02655$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ ^[29] 进行校正. 用标准锆石 91500 与锆石样品交叉分析对仪器漂移进行外部监控. 在本研究分析过程中, 获得标准锆石样品 91500 和 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282295 ± 0.000027 ($n=14, 2\sigma$), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282734 \pm 0.000015$ ($n=16, 2\sigma$), 在误差范围内与文献[30,31]的结果一致. 计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值时, 球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值为 0.0332^[32]. 单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算时, 亏损地幔的值采用 Vervoort 和 Blichert-Toft^[33]的结果; 两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})计算时, 下地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.022^[34].

3 分析结果

3.1 U-Pb 年龄

太华杂岩锆石 U-Pb 分析结果见表 S1. 分析结果如下.

(i) TTG 质片麻岩. 奥长花岗质片麻岩样品 TH-07 中的锆石多为长柱状, 长度为 150~200 μm , 长宽比 3:1~5:1, 自形, 浅黄色, 透明. 对 15 粒锆石进行 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定, 分析点均位于具有典型成分韵律环带的核部区域(图 4(a)), 分析点 Th 和 U 的含量分别为 41~116, 216~385 ppm(1 ppm=1 $\mu\text{g/g}$, 下同), Th/U 比值为 0.11~0.63, 表明这些锆石为岩浆成因. 在锆石 U-Pb 年龄谐和图上(图 5(a)), 两颗锆石具有较老谐和的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 分别为 (2821 ± 11) 和 (2845 ± 11) Ma. 其余的 13 个分析点, 除少数分析点位于谐和线上外, 多数沿不一致线上分布, 表明锆石可能经历了后期变质作用的扰动, 放射成因 Pb 有不同程度丢失, 上交点年龄为 (2752 ± 5) Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 (2755 ± 7) Ma, 二者在误差范围内完全一致, 因此采用 2752 Ma 的上交点年龄代表该片麻岩原岩的形成年龄.

英云闪长质片麻岩样品 TH-13 中的锆石长度为 150~300 μm , 长宽比 3:1~4:1, 自形. 对该样品中 16 粒锆石颗粒进行 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定, 也有两粒

图 4 TTG 质麻岩中锆石的 CL 图像

带箭头线的数字表示激光分析点编号; 小圈表示激光剥蚀点位; 圈内数字表示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值; 圈外的数字表示该分析位置锆石的年龄, 单位: Ma

锆石具有较老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 分别为 (2850 ± 16) 和 (2827 ± 17) Ma. 如图 4(b) 所示, 其中年龄为 2850 Ma 的锆石幔部年龄为 (2745 ± 16) Ma, 被分析的区域具有较差的阴极发光性, 具有较低的 Th (9 ppm), U (112 ppm) 含量及 Th/U 比值 (0.08), 因此, 说明该区域为变质成因的. 其余 13 个分析点 Th 和 U 的含量分别为 52~229, 28~359 ppm, 这些锆石具有较高的 Th/U 比值 (0.18~1.86) 及清晰的岩浆锆石成分韵律环带, 表明这些锆石皆为岩浆成因 (图 4(c)). 在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 5(b)), 少数分析点位于谐和线上, 多数沿不一致线上分布, 给出上交点的年龄为 (2763 ± 4) Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 (2771 ± 8) Ma. 因此, 2763 Ma 代表该片麻岩原岩的形成年龄.

(ii) 斜长角闪岩. 对斜长角闪岩样品 TH-05 中的 18 粒锆石进行 U-Pb 同位素年龄分析, 样品中锆石粒径约 100~200 μm , 以无色透明粒状或其他形为主,

多为短柱状, 长宽比约为 2:1. 18 个分析点可分为两组, 一组为残留锆石 (4 颗), 它们具有较一致谐和的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 加权平均结果为 (2884 ± 16) Ma, 另一组 14 颗锆石除少数点位于谐和线上外, 多数锆石发生不同程度的 Pb 丢失, 沿不一致线分布, 不一致线的上交点年龄为 (2791 ± 7) Ma, 加权平均结果为 (2785 ± 9) Ma (图 5(c)), 与上交点年龄在误差范围内完全一致. 这些锆石具有清楚的成分韵律环带 (图 6(a)), Th 和 U 含量分别为 43~426 和 41~220 ppm, Th/U 比值为 0.72~3.86, 表明应为岩浆成因的锆石. 因此, 2791 Ma 的上交点年龄代表该斜长角闪岩原岩的形成年龄.

对另一个斜长角闪岩样品 TH-29 中的 17 颗锆石进行 21 次分析 (图 5(d)), 最老的 1 粒锆石核部给出 (3092 ± 20) Ma 的谐和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 另外 5 粒锆石给出 (2909 ± 13) Ma 的谐和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 这些锆石

图 5 TTG 质片麻岩及斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄

均具有明显的韵律成分环带及较高的 Th, U 含量 (30~77, 60~146 ppm) 和较大的 Th/U 比值 (0.21), 且位于锆石的核部, 因此它们应为斜长角闪岩原岩岩浆在侵位过程中捕获的锆石. 如图 6(b) 和 (d) 所示, 在这些捕获锆石的幔部为黑色的弱阴极发光的变质区域 (图 6(b)), 或具有弱阴极发光的变质增生边 (图 6(d)), 这些锆石的变质区域 (TH-29-01, TH-29-17 和 TH-29-18) 相对锆石核部具有较低的 Th, U 含量, 分别为 2~9, 7~21 ppm, 虽然具有较高的 Th/U 比值 (>0.2), 这可能是由于 Th, U 含量太低的缘故. 除此之外, 其余 11 粒锆石在 U-Pb 年龄谐和图上 (图 5(d)), 除少数点位于谐和线附近外, 其余的沿不一致线分布, 不一致线的上交点年龄为 (2794±5) Ma, 加权平均结果为 (2786±8) Ma, 与上交点的年龄在误差范围内完全一致. 这 11 粒锆石具有清楚的岩浆成分环带 (图 6(c)) 以及较高的 Th, U 含量 (分别为 25~121, 37~275 ppm) 和 Th/U 比值 (0.27~0.90). 因此, 2794 Ma 的不一致线上交点年龄代表该斜长角闪岩原岩的形成年龄.

(iii) 石英岩. 对表壳岩系中的石英岩进行了锆石分离, 获得 1000 多粒锆石, 多为紫色, 还有棕色、白色等, 呈等轴状或短柱状, 明显遭受强烈的磨蚀. 在阴极发光图像中, 多数锆石的主体或局部具有较清楚的韵律成分环带; 少数锆石的 CL 发光性较差, 无明显的成分环带 (图 7).

对该样品中锆石进行随机分析, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄代表锆石分析部位的年龄, 剔除 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄不谐性大于 ±10% 的数据后, 获得有效分析数据 34 个, 可满足统计分析的要求^[35]. 这些锆石可分为两类, 一类为变质锆石 (图 7(e), (f)); 分析点 LS08-03-34, LS08-03-24, LS08-03-15 和 LS08-03-17), 这些锆石的激光剥蚀区域均具有较差的阴极

发光性, 且位于锆石的边部, 虽然其 Th/U 比值较大 (0.4~0.8), 可是结合锆石的 CL 图像, 说明这些锆石为变质成因的^[36]. 因为虽然一般认为岩浆成因的锆石具较高 Th/U 比值. 通常大于 0.4, 而变质成因锆石的比值相对较低, 小于 0.1^[37,38]. 可是 Vavra 等人^[39]发现生长最快的麻粒岩相的变质增生锆石具有较低的 U 含量 (53~127) 和较高的 Th/U 比值, 均大于 0.1, 最高可达 0.73. 另一类为岩浆成因的锆石 (共 30 颗), 这些锆石往往在 CL 图像上具有清楚的岩浆成分环带 (图 7(a)~(d)) 以及较高的 Th/U 比值 (0.37~1.12), 表明这些锆石来自岩浆岩物源区.

在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 8(a)), 大多数锆石均位于谐和线上, 或在其附近分布. 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 2956~1843 Ma 之间, 图 8(b) 为全部碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测年频率分布图. 从图中可以看出, 2.55~2.35 Ga 构成年龄峰值区, 代表碎屑锆石物源区主体的形成时代. 样品中最年轻的岩浆锆石有两粒, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 (2229±16), (2258±14) Ma, 且具有较好的谐和性, 这两粒锆石测试区域具有清晰的成分韵律环带以及较高的 Th/U 比值 (0.42~0.65), 因此 2.2 Ga 可以作为该石英岩的最大沉积年龄来考虑. 而小于 2.2 Ga 的 4 粒锆石具有变质锆石特征, 反映变质作用时限, 其变质年龄为 2025~1843 Ma.

3.2 Hf 同位素组成

(i) TTG 质片麻岩. 在 U-Pb 测年的基础上, 对奥长花岗质片麻岩样品 TH-07 进行了 Hf 同位素分析, 结果见表 2. 从测试结果可以看出, 除分析点 TH-07-11 外, 其余 14 粒锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 表明锆石在形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累. 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 0.28093~0.28123, 以

图 6 斜长角闪岩中锆石的 CL 图像

带箭头线的数字表示激光分析点编号; 小圈表示激光剥蚀点位; 圈内数字表示 $\delta_{\text{Hf}}(t)$ 值; 圈外的数字表示该分析位置锆石的年龄, 单位: Ma

图7 石英岩中锆石 CL 图像

带箭头线的数字表示激光分析点编号; 小圈表示激光剥蚀点位; 圈外的数字表示该分析位置锆石的年龄, 单位: Ma

图8 石英岩锆石 U-Pb 测年结果

(a) 石英岩锆石 U-Pb 年龄; (b) 石英岩年龄频率分布图

每个分析点锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 为 $-3.8 \sim 3.6$ 。由于片麻岩的原岩为酸性侵入岩, 因此采用两阶段模式年龄来反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间, 其两阶段模式年龄为 $3293 \sim 2834$ Ma。

对英云闪长质片麻岩样品 TH-13 中 16 粒锆石进行了 Hf 位素分析, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 $0.28021 \sim 0.28119$, 以每个锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 为 $0.3 \sim 3.6$, 并计算得到其

T_{DM2} 为 $3129 \sim 2847$ Ma。

(ii) 斜长角闪岩。样品 TH-05 中 18 粒岩浆锆石的数据点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM1} 变化较大, 分别为 $-3.1 \sim 6.3$ 和 $2798 \sim 3164$ Ma, 结果见表 S2。

从样品 TH-29 中获得 21 个分析点的数据。测得年龄最老的那粒锆石 (3092 Ma) 核部具有较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.28102) 以及较正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (6.3), 其单阶段模式年龄为 3081 Ma。年龄约为 2.9 Ga 的锆石也具有较正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (5.9~6.7) 以及与锆石形成年龄接

近的模式年龄(2954~2905 Ma). 这些较老锆石的幔部和变质边(图 6(b), (d))则具有相对较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和相对较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值. 其余年龄为 2.79 Ga 的岩浆锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化较大, 为 0.28097~0.281209, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值从-5.8 变化至+7, 单阶段 Hf 模式年龄为 3277~2977 Ma.

4 讨论

4.1 鲁山地区太华杂岩的二分

如前所述, 太华杂岩可分为片麻岩系和表壳岩系两部分. 根据岩石组合特点可以看出上、下部分形成于不同的构造环境: 太华杂岩的下部, 发育近东西向呈串珠状的穹窿构造、无根褶皱、透镜体构造, 并出现小型的平卧褶皱, 混合岩化强烈; 太华杂岩的上部, 岩石成分层发育较好, 基本不发育无根褶皱, 混合岩化相对较弱. 因此, 对于鲁山太华杂岩上下两部分的关系存在着很大争议, 有的认为是断层接触, 有的认为是整合接触, 有的则认为是非整合接触^[19,24].

Kröner^[7]和 Sun^[8]利用单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 蒸发法获得原太华下亚群英云闪长质片麻岩的年龄为 (2841±16)和(2806±7) Ma, 认为太华杂岩的形成时代为中太古代. Liu 等人^[10]利用 SHRIMP 法测得英云闪长质片麻岩的年龄为 (2829±18)和(2832±11) Ma, 且记录了大约(2772±22/17)和(2638±61) Ma 的两期变质年龄; 同时测得两个斜长角闪岩的年龄分别为(2838±35)和(2845±23) Ma, 亦记录了(2792±12) Ma ((2776±20) Ma)和(2651±13) Ma((2671±25) Ma)两期变质. 但是, 如果将所获得年龄数据的分析误差考虑在内的话, 不难看出, 不管是 TTG 质片麻岩还是斜长角闪岩, 其 2.8 Ga 的岩石形成年龄和 2.7 Ga 的变质年龄几乎是相同的, 很难将其区分. 本文采用 LA-ICPMS 方法测得英云闪长质片麻岩的年龄为(2752±5) Ma, 奥长花岗质片麻岩的年龄为(2763±4) Ma, 其中都包含 2.8 Ga 的捕获锆石, 那么可以推测 TTG 质片麻岩原岩的侵位年龄应为 2752~2763 Ma; 另外, 测得两个斜长角闪岩原岩的形成年龄分别为(2791±7)和(2794±5) Ma, 其中含有(2884±16)($n=4$), (2909±13)($n=5$), 乃至(3091±21) Ma ($n=1$)的捕获锆石, 这些锆石应是斜长角闪岩原岩岩浆在上升过程中捕获的锆石, 这些捕获锆石的幔部及边部往往发生变质(图 6(b), (d)), 变质年龄与斜长角闪岩原岩的形成年龄几

乎同时, 可以解释为斜长角闪岩原岩岩浆结晶成岩过程中导致已存在的捕获锆石发生了变质作用.

最早, 孙勇^[8,18,20]提出鲁山地区太华杂岩上部表壳岩系应为孔兹岩系建造, 经历了麻粒岩相峰期变质作用, 后又经历了广泛的角闪岩相退变质作用, 可是对于其形成时代未获得可靠的年龄数据. 最近, Wan 等人^[16]从石墨夕线石片麻岩中获得的最年轻的碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 2.310~2.250 Ga, 将此年龄解释为该石墨夕线石片麻岩的形成年龄; 同时获得 6 粒锆石变质增生边的年龄数据点的不一致线上交点年龄为(1.84±0.07) Ga, 将该数据解释为岩石的变质年龄. 本文报道在鲁山太华杂岩发现了古元古代的石英岩, 岩石表面原始的波痕构造清晰可见, 从该样品中获得两个最年轻的岩浆锆石, 其年龄分别为 2229 和 2258 Ma, 且具有较好的谐和性, 因此认为该石英岩原岩的最大沉积年龄应小于 2.2 Ga, 且该样品记录了大约 2.0~1.8 Ga 的变质事件.

综上所述, 可以看出鲁山地区的太华杂岩由新太古代早期(2794~2752 Ma)和古元古代早期两个不同阶段形成的地质体组成, 其中 TTG 质片麻岩系形成于新太古代; 表壳岩系的形成年龄介于 2.2~2.0 Ga 之间, 属于古元古代.

4.2 新太古代(2.8~2.7 Ga)事件及地质意义

已有的同位素年龄数据统计结果表明, 华北克拉通基底岩浆锆石的年龄峰值主要是 2.5 Ga^[1-3,40,41]. 且 2.5 Ga 岩石年龄记录广泛存在于整个华北克拉通, 主要为 TTG 质片麻岩、壳源花岗岩以及少量的表壳岩石^[1-4,41-43]. 可是, 根据华北克拉通 Nd 同位素模式年龄及现代河流碎屑锆石 Hf 模式年龄研究, 其峰期年龄为 2.8~2.7 Ga. 在华北克拉通, 大面积 2.8~2.7 Ga 的岩石年龄纪录主要发现在河南鲁山^[7-10]、山东西部^[11-13]和胶东地区^[14]. 此外, 在怀安^[4]、阜平^[44]、五台^[45]等地区的花岗质片麻岩和变质沉积岩中也发现年龄为 2.8~2.7 Ga 的碎屑锆石或者继承锆石, 这些资料暗示, 华北克拉通 2.8~2.7 Ga 的构造岩浆事件分布似乎比现在认为的范围更为广泛, 可能是华北克拉通一期重要的构造岩浆活动.

Jahn^[11,14]通过对胶东和鲁西地区中太古代-新太古代岩石的 Nd 同位素研究发现, 这些岩石大多数具有较正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 且多数 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与当时(2.9~2.7 Ga)的亏损地幔的组成接近, 表明这些岩石主要来自亏

损地幔分异形成的新生地壳,少数分析点具有较负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明有少量古老地壳物质再造. 锆石的 U-Pb 年龄代表的是锆石结晶或变质作用的时间;而锆石的 Hf 同位素模式年龄则代表原岩物质从亏损地幔提取的时间^[34,46,47]. 在山东西部,不仅存在 2.8~2.7 Ga 的基性-超基性岩石^[48],而且还大面积分布 2.75~2.7 Ga 变质沉积岩和 TTG 片麻岩^[49], Wan¹⁾和杜利林²⁾对这些表壳岩系和 TTG 质片麻岩中锆石进行 Hf 同位素研究表明,这些岩石的原岩代表了新太古代新生地壳的形成. 此外,在山东蒙阴和辽宁复县早古生代金伯利岩中及其基性麻粒岩捕虏体中也发现了年龄为 2.8~2.7 Ga 的捕获岩浆锆石^[50,51].

Zheng^[52]和郑永飞^[53]强调,在应用锆石 Hf 同位素研究大陆地壳生长时,只有当最大正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与同时期亏损地幔的初始 Hf 同位素比值一致,并且对应的 Hf 模式年龄与锆石的 U-Pb 年龄相近时,才能将该锆石的 Hf 模式年龄解释为新生地壳生长事件的时间. 虽然壳幔相互作用也具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$,其源区可能由具有亏损地幔型或者富集地幔型的 Hf 同位素组成,这要取决于岩浆中地壳所占的比例. 为了判断河南鲁山地区太华杂岩中获得的锆石寄主岩石年龄是否代表地壳增生时间,我们按照 Griffin^[54]的方法,计算出 3200~2200 Ma 亏损地幔的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,然后乘以 0.75,也就是保证这些锆石具有最大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且与同时期亏损地幔的 Hf 同位素值相近^[53,54]. 如图 9 中黄线所示,如果锆石具有较正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且大于同时期亏损地幔值的 0.75 倍,也就是位于图中黄线以上,表示该锆石具有新生地壳的特征. 从图 9 可以看出,有 6 粒 2.80~2.75 Ga 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值投点位于黄线以上,同时其 T_{DM1} 模式年龄与锆石的 U-Pb 年龄非常接近,说明这些锆石具有明显新生地壳的特征. 虽然大多数锆石的投点位于球粒陨石线与 0.75 倍同时期亏损地幔线之间,其寄主岩浆源区可能来自于壳幔相互作用的混合源区或富集性地幔源区,但是亏损地幔的 Hf 同位素储库还是应该占主导. 此外,部分 2.80~2.75 Ga 的锆石投点位于球粒陨石线之下,表明其原岩物质来源于古老地壳,如分析点 TH-07-10, TH-29-04, TH-29-20 和 TH-05-02 等,这些锆石具有较负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-0.4~-5.8),对应的 Hf 段模式年龄(3277~3074 Ma)

图 9 河南鲁山地区 TTG 片麻岩及斜长角闪岩的 Hf 同位素组成

明显大于锆石的结晶年龄(2791~2751 Ma),表明它们为古老陆壳物质的衍生物,源区物质在地壳滞留时间相对较长(0.3~0.4 Ga).

此外,从斜长角闪岩样品中获得年龄为 2.9 和 3.1 Ga 的锆石应是迄今太华杂岩中发现的最老的残留锆石,暗示该区可能存在着中太古代的地壳物质,从图 9 可以看出,这些锆石具有接近当时亏损地幔的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且其 Hf 单阶段模式年龄与锆石的形成年龄接近,表明这些锆石也具有新生地壳的性质.

上述结果分析表明,华北克拉通 2.8~2.7 Ga 的事件主要代表了新太古代新生地壳的形成,包括胶东、鲁西以及河南鲁山地区. 当然,其中可能还包含少量古老地壳物质的再造. 2.8~2.7 Ga 岩石记录在华北克拉通分布面积较少可能是由于 2.5 Ga 构造-热事件的强烈改造和破坏所致;也可能与工作程度不够有关.

4.3 早元古代(2.2~1.8 Ga)事件的地质意义

钱祥麟和李江海^[55]以及卢兆良等人^[56]也注意到在华北克拉通南部鲁山、小秦岭地区普遍发育富铝沉积变质岩套,认为这些孔兹岩系不整合覆盖在灰色片麻岩杂岩基底之上,并将这些富铝质沉积变质岩时代归属于新太古代,认为这些富铝质沉积变质岩中存在的早元古代年龄可能是后期热事件叠加改造的结果. 李江海等人^[57]发现在华北克拉通中部如吕梁山-霍山地区也发育新太古代以孔兹岩系为主的沉

1) Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, et al. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from zircon U-Pb dating and Hf isotope composition. *Precambrian Res.* 2010, in Press

2) 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 等. 鲁西新泰孟家屯~2.7 Ga 变质沉积岩与 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素特征. *地质学报*, 2010, 84, 已接受

积岩系。最近, Wan^[58]利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄研究表明, 这些变沉积岩系中的孔兹岩系主体形成于古元古代, 而不是太古代。翟明国^[59]指出这些富铝沉积岩在华北克拉通具面状分布特点, 大多经历了麻粒岩相变质, 认为古元古代(1950~1800 Ma)的变质年龄记录了这些沉积岩从最下部地壳抬升到地表的地质过程。赵国春等人^[60]则认为 1.95 Ga 的麻粒岩相变质事件是阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞拼合的年龄纪录, 而 1.85 Ga 的变质作用是华北克拉通西部陆块和东部陆块最终碰撞形成统一基底的结果。

在华北克拉通南缘, 本文的测年研究表明, 河南鲁山地区太华杂岩中的表壳岩石形成时间大约为 2.2~2.0 Ga。最近, 我们获得陕西小秦岭渭南市罗夫地区副变质片麻岩中岩浆锆石的年龄结果为 2269 Ma, 也记录了 2.0~1.9 Ga 的变质年龄, 推测其沉积年龄也为古元古代(未发表资料), 这充分说明无论是鲁山地区还是小秦岭地区, 太华杂岩中的表壳岩系的岩石组合、变质类型乃至形成时代均表现出很强的一致性。再结合之前我们确定嵩山石英岩沉积年龄为古元古代^[61]的结论, 说明太华杂岩中的表壳岩系可能和嵩

山群形成于相同的时代, 岩石组合表明它们的沉积环境也类似。鉴于这些富铝质沉积变质岩系的形成环境极可能属于具有被动大陆边缘性质的陆架区, 推测在新太古代华北克拉通形成之后, 至少华北克拉通南缘曾经广泛发育稳定的大陆架沉积, 而后经历了区域性的古元古代变质作用。

5 结论

根据前人及此次定年结果, 我们提出河南鲁山地区的太华杂岩是由新太古代和古元古代早期形成的两个地质体构成, 其中太华杂岩的下部, 即片麻岩系, 属于新太古代早期(2794~2752 Ma); 而上部, 即具有孔兹岩系建造的表壳岩系, 形成于古元古代。其中, 新太古代(2.8~2.7 Ga)的地质事件代表新生地壳的形成, 伴随有少量古老地壳物质的再造, 是华北克拉通一期重要的构造岩浆事件; 而古元古代(2.2~2.0 Ga)的地质事件表明, 在新太古代华北克拉通形成之后, 克拉通南缘及邻区在古元古代期间曾广泛发育被动大陆边缘相沉积, 而后经历了区域性的古元古代晚期变质作用。

致谢 诚挚感谢翟明国院士、刘树文教授、万渝生研究员、郑建平教授提出的宝贵修改建议。

参考文献

- 1 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件. 北京: 地质出版社, 1991. 10—11
- 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 (Suppl1): 129—137
- 3 Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoarchean continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Asian Earth Sci*, 2005, 24: 547—561
- 4 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. 科学通报, 2009, 54: 2517—2526
- 5 Wu F Y, Zhao G C, Simon A. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523—545
- 6 Yang J, Gao S, Chen C, et al. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 2660—2673
- 7 Kröner A, Compston W, Zhang G W, et al. Age and tectonic setting of late Archaean greenstone-gneisses terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 1988, 16: 211—215
- 8 Sun Y, Yu Z P, Kröner A. Geochemistry and single zircon geochronology of Archaean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *J Southeast Asian Earth Sci*, 1994, 10: 227—233
- 9 Diwu C R, Sun Y, Lin C L, et al. Formation history of Archaean TTG gneisses in the Taihua complex, Lushan area, central China: *In situ* U-Pb age and Hf-isotope analysis of zircons. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: A226
- 10 Liu D Y, Simon A, Wan Y, et al. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. *Chem Geol*, 2008, 261: 140—154
- 11 Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, et al. Archean crustal evolution in China: The Taishan Complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precambrian Res*, 1988, 38: 381—403

- 12 Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, et al. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *Am J Sci*, 2008, 308: 232—269
- 13 Condie K C. Episodic continental growth and supercontinents: A mantle avalanche connection? *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 163: 97—108
- 14 Condie K C. Episodic continental growth models: Afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 2000, 322: 153—162
- 15 O'Neill C, Lenardic A, Moresi A L, et al. Episodic Precambrian subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 263: 552—562
- 16 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 b Lushan area, Henan Province. *Gondwana Res*, 2006, 9: 189—197
- 17 孙勇. 河南鲁山地区早前寒武纪变质火山岩系的岩石化学特征. *西北大学学报(前寒武纪地质专辑)*, 1982, 1: 31—43
- 18 孙勇. 河南鲁山太华群的多期变质作用. *西北大学学报(前寒武纪地质专辑)*, 1982, 2: 44—65
- 19 张国伟, 周鼎武, 张延安, 等. 河南中部登封群-太华群构造序列对比. *西北大学学报(前寒武纪地质专辑)*, 1982, 1: 1—21
- 20 孙勇. 河南鲁山太华群的麻粒岩相变质岩. *西北大学学报(自然科学版)*, 1983, 1: 92—98
- 21 Zhang G W, Bai Y B, Sun Y, et al. Composition and evolution of the archaean crust in central henan, china. *Precambrian Res*, 1985, 27: 7—35
- 22 张国伟, 于在平, 董云鹏, 等. 秦岭区前寒武纪构造格局与演化问题探讨. *岩石学报*, 2000, 16: 11—21
- 23 何艳红, 孙勇, 陈亮, 等. 陇山杂岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 2005, 21: 125—134
- 24 孙枢, 张国伟, 陈志明. 华北断块区南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 216
- 25 Wan Y S, Dong C Y, Wang W, et al. Archean basement and a Proterozoic collision orogen in the Huoqiu Area at the southeastern margin of North China Craton: Evidence from sensitive high resolution ion micro-probe U-Pb zircon geochronology. *Acta Petrol Sin*, 2009, 83: 801—840
- 26 Ludwig K R. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec Pub, 2003, 4: 1—70
- 27 Wiedenbeck M, Alle P, Griffin W L, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand Newslett*, 1995, 19: 1—23
- 28 Simon E J, Norman J P, William L G, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in-situ* U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 2004, 211: 47—69
- 29 Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J Anal Atom Spectrom*, 2002, 17: 1567—1574
- 30 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105—126
- 31 Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace Element and Isotopic Composition of GJ Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70 (Supp 1): A158
- 32 Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243—258
- 33 Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle; Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 533—556
- 34 Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 4205—4225
- 35 Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem Geol*, 2005, 216: 249—270
- 36 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
- 37 Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143: 602—622
- 38 Hoskin P W O, Schaltegger U. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 27—62
- 39 Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-togranulitefacies zircons: Geochronology of the Ivrea zone (Southern Alps). *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 380—404
- 40 彭澎, 翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. *地球科学进展*, 2002, 17: 818—825
- 41 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 2002, 76: 199—208
- 42 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2001, 107: 45—73
- 43 Zhao G C, Sun M, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177—202

- 44 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 paleo-proterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *Am J Sci*, 2002, 302: 191—226
- 45 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of alate 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
- 46 Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 133—147
- 47 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 2007, 23: 185—220
- 48 Polat A, Li J H, Fryer B, et al. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic (2800—2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China Craton: evidence for plume-craton interaction. *Chem Geol*, 2006, 230: 60—87
- 49 曹国权. 鲁西早前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1996. 1—210
- 50 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. U-Pb and Hf-Isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China Craton. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 148: 79—103
- 51 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Neoproterozoic (2.7—2.8 Ga) accretion beneath the North China Craton: U-Pb age, trace elements and Hf isotopes of zircons in diamondiferous kimberlites. *Lithos*, 2009, 112: 188—202
- 52 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158
- 53 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. *岩石学报*, 2007, 23: 317—330
- 54 Griffin W L, Belousova E B, Begg G C, et al. Growth of continental crust from the Archean to now. In: Guo A L, Hua H, Hu X J, eds. *International Discussion Meeting on Continental Geology and Tectonics*, Xi'an, 2009. 4—5
- 55 钱祥麟, 李江海. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 1—8
- 56 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 276
- 57 李江海, 钱祥麟, 刘树文. 华北克拉通中部孔兹岩系的地球化学特征及其大陆克拉通化意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 193—203
- 58 Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidences for a major Late Paleoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Res*, 2006, 149: 249—271
- 59 翟明国. 华北克拉通早前寒武纪高温高压麻粒岩及其相关问题. *岩石学报*, 2009, 25: 1753—1771
- 60 赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. *岩石学报*, 2009, 25: 1772—1792
- 61 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *科学通报*, 2008, 53: 2828—2839

补充材料

表 S1 太华杂岩 U-Pb 同位素数据

表 S2 太华杂岩片麻岩锆石 Hf 同位素数据

本文的以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 太华杂岩 U-Pb 同位素数据

编号	组成/ppm			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
奥长花岗质片麻岩(TH-07)																
TH-07-01	199	65	278	0.23	0.1921	0.0040	14.1798	0.3284	0.5353	0.0078	2760	20	2762	22	2764	33
TH-07-02	183	77	269	0.29	0.1891	0.0038	13.2878	0.1342	0.5096	0.0070	2734	11	2700	10	2655	30
TH-07-03	232	41	376	0.11	0.1925	0.0039	12.5078	0.1274	0.4711	0.0065	2764	11	2643	10	2489	28
TH-07-04	165	62	254	0.25	0.1913	0.0041	12.8681	0.1680	0.4878	0.0075	2754	11	2670	12	2561	32
TH-07-05	220	52	300	0.17	0.1994	0.0041	15.1320	0.1710	0.5504	0.0079	2821	11	2824	11	2827	33
TH-07-06	308	107	456	0.23	0.1923	0.0040	13.3384	0.1435	0.5032	0.0071	2762	11	2704	10	2627	30
TH-07-07	257	116	385	0.30	0.1913	0.0040	12.9907	0.1520	0.4925	0.0072	2754	11	2679	11	2581	31
TH-07-08	175	55	254	0.22	0.1924	0.0040	13.5491	0.1478	0.5109	0.0072	2762	11	2719	10	2661	31
TH-07-09	156	49	221	0.22	0.1911	0.0040	13.7412	0.1553	0.5216	0.0075	2752	11	2732	11	2706	32
TH-07-10	227	81	364	0.22	0.1910	0.0041	12.0270	0.1453	0.4567	0.0067	2751	11	2607	11	2425	30
TH-07-11	232	55	375	0.15	0.1934	0.0040	12.2423	0.1335	0.4592	0.0065	2771	11	2623	10	2436	28
TH-07-12	161	43	246	0.17	0.1936	0.0041	12.7417	0.1417	0.4776	0.0067	2773	11	2661	10	2517	29
TH-07-13	168	110	219	0.50	0.1911	0.0040	14.0420	0.1600	0.5331	0.0076	2752	11	2753	11	2755	32
TH-07-14	170	98	216	0.45	0.2023	0.0043	15.1057	0.1816	0.5419	0.0080	2845	11	2822	11	2791	33
TH-07-15	217	194	306	0.63	0.1913	0.0040	12.4614	0.1298	0.4727	0.0065	2753	11	2640	10	2495	28
英云闪长质片麻岩(TH-13)																
TH-13-01	89	26	118	0.22	0.2001	0.0069	15.2708	0.3549	0.5536	0.0103	2827	17	2832	22	2840	43
TH-13-02	200	129	315	0.41	0.1945	0.0061	12.0196	0.2066	0.4482	0.0067	2781	13	2606	16	2387	30
TH-13-03	237	229	323	0.71	0.1955	0.0061	13.2357	0.2207	0.4910	0.0073	2789	12	2697	16	2575	32
TH-13-04	158	128	214	0.60	0.1940	0.0062	13.6214	0.2551	0.5092	0.0081	2776	14	2724	18	2653	35
TH-13-05	208	226	263	0.86	0.1933	0.0060	13.8123	0.2313	0.5182	0.0077	2771	12	2737	16	2692	33
TH-13-06	233	162	333	0.48	0.1928	0.0061	13.0055	0.2275	0.4892	0.0075	2766	13	2680	16	2567	32
TH-13-07	157	54	228	0.23	0.1950	0.0065	13.5609	0.2864	0.5044	0.0087	2785	16	2720	20	2633	37
TH-13-08	134	49	200	0.24	0.1940	0.0062	13.7188	0.2549	0.5129	0.0082	2776	14	2730	18	2669	35
TH-13-09	176	44	251	0.18	0.1923	0.0060	14.2633	0.2458	0.5379	0.0082	2762	13	2767	16	2775	34
TH-13-10	238	157	331	0.48	0.1941	0.0060	13.5797	0.2185	0.5074	0.0074	2777	12	2721	15	2645	32
TH-13-11	140	150	200	0.75	0.1952	0.0065	12.7140	0.2702	0.4724	0.0082	2786	16	2659	20	2494	36
TH-13-12	27	52	28	1.86	0.1906	0.0078	13.6401	0.4598	0.5190	0.0128	2748	27	2725	32	2695	54
TH-13-13	94	63	120	0.52	0.1949	0.0068	14.5701	0.3605	0.5423	0.0106	2784	19	2788	24	2793	44
TH-13-14	287	214	359	0.60	0.1910	0.0059	14.4749	0.2493	0.5496	0.0085	2751	13	2781	16	2824	35
TH-13-15	212	9	112	0.08	0.1903	0.0062	14.4291	0.3089	0.5499	0.0097	2745	16	2778	20	2825	40
TH-13-16	112	47	149	0.32	0.2029	0.0067	15.2661	0.3351	0.5457	0.0099	2850	16	2832	21	2807	41
斜长角闪岩(TH-05)																
TH-05-01	52	159	41	3.86	0.1946	0.0029	13.3587	0.1733	0.4991	0.0065	2781	10	2705	12	2610	28
TH-05-02	60	91	73	1.23	0.1945	0.0029	12.9973	0.1687	0.4858	0.0063	2780	10	2679	12	2553	27
TH-05-03	52	84	58	1.44	0.1956	0.0030	14.0893	0.1830	0.5237	0.0068	2790	10	2756	12	2715	29
TH-05-04	84	137	79	1.74	0.2060	0.0031	15.7780	0.2022	0.5565	0.0071	2874	10	2863	12	2852	30
TH-05-05	118	426	94	4.54	0.1928	0.0029	13.1610	0.1706	0.4959	0.0064	2766	10	2691	12	2596	27
TH-05-06	48	74	54	1.38	0.1953	0.0030	14.4904	0.1858	0.5389	0.0069	2787	10	2782	12	2779	29
TH-05-07	59	81	66	1.23	0.2073	0.0031	15.7995	0.2006	0.5534	0.0070	2885	9	2865	12	2839	29
TH-05-08	53	74	57	1.31	0.2079	0.0031	15.7896	0.1996	0.5514	0.0070	2889	9	2864	12	2831	29
TH-05-09	94	103	116	0.89	0.1956	0.0029	14.2999	0.1797	0.5309	0.0067	2790	9	2770	12	2745	28
TH-05-10	38	22	52	0.43	0.1943	0.0029	13.8149	0.1740	0.5162	0.0065	2779	9	2737	12	2683	28
TH-05-11	43	53	60	0.88	0.1951	0.0029	13.9541	0.1757	0.5193	0.0066	2785	9	2747	12	2696	28

续表 S1

编号	组成/ppm			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
TH-05-12	173	159	220	0.72	0.1962	0.0029	14.1766	0.1771	0.5245	0.0066	2795	9	2762	12	2718	28
TH-05-13	52	73	52	1.40	0.2077	0.0031	15.8509	0.1979	0.5539	0.0069	2887	9	2868	12	2841	29
TH-05-14	76	131	84	1.56	0.1955	0.0029	13.1262	0.1627	0.4871	0.0061	2789	9	2689	12	2558	26
TH-05-15	95	54	130	0.41	0.1936	0.0029	13.6505	0.1691	0.5114	0.0064	2773	9	2726	12	2663	27
TH-05-16	36	43	43	1.00	0.1951	0.0029	13.5628	0.1681	0.5040	0.0063	2786	9	2720	12	2631	27
TH-05-17	62	102	67	1.54	0.1965	0.0029	14.3848	0.1773	0.5309	0.0066	2797	9	2775	12	2745	28
TH-05-18	83	131	85	1.54	0.1951	0.0029	13.4763	0.1650	0.5009	0.0062	2785	9	2714	12	2618	27
斜长角闪岩(TH-29)																
TH-29-01	15	9	21	0.46	0.1931	0.0034	13.5406	0.2241	0.5084	0.0054	2769	14	2718	16	2650	23
TH-29-02	82	37	103	0.36	0.2101	0.0033	16.4317	0.2421	0.5670	0.0056	2907	12	2902	14	2896	23
TH-29-03	153	57	206	0.27	0.1936	0.0030	13.8566	0.2017	0.5190	0.0050	2773	12	2740	14	2695	21
TH-29-04	98	55	127	0.43	0.1958	0.0031	14.5356	0.2169	0.5384	0.0053	2791	13	2785	14	2777	22
TH-29-05	57	56	66	0.85	0.1984	0.0034	15.1199	0.2431	0.5525	0.0056	2813	14	2823	15	2835	23
TH-29-06	21	26	30	0.87	0.1954	0.0036	14.0212	0.2437	0.5203	0.0055	2788	15	2751	16	2700	23
TH-29-07	11	25	48	0.52	0.1972	0.0043	13.0416	0.2705	0.4795	0.0058	2803	19	2683	20	2525	25
TH-29-08	76	49	99	0.49	0.1947	0.0035	14.3519	0.2462	0.5344	0.0055	2783	15	2773	16	2760	23
TH-29-09	95	53	114	0.47	0.2124	0.0037	16.8465	0.2735	0.5751	0.0057	2924	14	2926	16	2929	23
TH-29-10	48	46	61	0.74	0.1927	0.0036	13.1198	0.2339	0.4936	0.0051	2766	16	2688	17	2586	22
TH-29-11	68	36	83	0.43	0.2116	0.0041	16.5782	0.3000	0.5681	0.0059	2918	16	2911	17	2900	24
TH-29-12	47	42	90	0.47	0.1975	0.0044	15.0491	0.3195	0.5525	0.0066	2806	20	2818	20	2835	27
TH-29-13	195	121	275	0.44	0.1944	0.0037	14.0499	0.2528	0.5240	0.0053	2780	17	2753	17	2716	22
TH-29-14	49	30	60	0.49	0.2072	0.0042	16.2948	0.3078	0.5704	0.0059	2883	18	2894	18	2909	24
TH-29-15	32	33	37	0.90	0.1980	0.0043	15.0730	0.3071	0.5520	0.0059	2810	20	2820	19	2834	25
TH-29-16	120	77	146	0.52	0.2091	0.0044	16.4333	0.3263	0.5699	0.0059	2899	19	2902	19	2908	24
TH-29-17	5	2	7	0.23	0.1964	0.0058	14.6066	0.4085	0.5395	0.0079	2796	27	2790	27	2781	33
TH-29-18	10	6	13	0.49	0.1956	0.0051	14.1816	0.3519	0.5258	0.0067	2790	24	2762	24	2724	28
TH-29-19	81	37	85	0.43	0.2358	0.0053	19.9119	0.4181	0.6125	0.0065	3092	20	3087	20	3080	26
TH-29-20	105	46	150	0.30	0.1921	0.0046	13.2141	0.2935	0.4990	0.0053	2760	23	2695	21	2610	23
TH-29-21	24	23	31	0.74	0.1942	0.0049	14.2522	0.3378	0.5324	0.0061	2778	24	2767	22	2752	26
石英岩(LS08-03)																
LS08-03-01	11	14	15	0.91	0.1624	0.0045	10.5834	0.1628	0.4727	0.0058	2480	12	2487	14	2495	26
LS08-03-02	57	57	86	0.66	0.1570	0.0041	9.8063	0.1214	0.4530	0.0051	2424	9	2417	11	2408	23
LS08-03-03	16	19	24	0.77	0.1622	0.0043	9.6783	0.1284	0.4327	0.0050	2479	10	2405	12	2318	23
LS08-03-04	19	26	28	0.94	0.1581	0.0042	9.6823	0.1326	0.4441	0.0052	2436	10	2405	13	2369	23
LS08-03-05	12	17	18	0.93	0.1599	0.0043	9.3137	0.1328	0.4226	0.0049	2454	11	2369	13	2272	22
LS08-03-06	10	15	14	1.06	0.1627	0.0049	10.2230	0.2723	0.4556	0.0083	2484	22	2455	25	2420	37
LS08-03-07	16	21	24	0.88	0.1488	0.0058	8.8414	0.3187	0.4309	0.0091	2332	34	2322	33	2310	41
LS08-03-08	82	115	121	0.96	0.1745	0.0053	11.9029	0.3204	0.4947	0.0093	2601	22	2597	25	2591	40
LS08-03-09	37	47	51	0.91	0.1639	0.0040	10.6569	0.2169	0.4715	0.0078	2496	16	2494	19	2490	34
LS08-03-10	51	76	204	0.37	0.1519	0.0038	9.0638	0.1905	0.4326	0.0072	2367	17	2344	19	2318	32
LS08-03-11	31	29	35	0.81	0.2167	0.0060	16.9190	0.4050	0.5661	0.0104	2956	18	2930	23	2892	43
LS08-03-12	30	36	50	0.71	0.1704	0.0043	11.5337	0.2471	0.4897	0.0084	2562	16	2567	20	2569	36
LS08-03-13	25	28	43	0.64	0.1604	0.0039	9.5033	0.1945	0.4293	0.0072	2460	16	2388	19	2302	32
LS08-03-14	50	82	73	1.12	0.1650	0.0037	10.6196	0.1910	0.4665	0.0075	2508	13	2490	17	2468	33
LS08-03-15	48	43	106	0.40	0.1247	0.0028	6.2636	0.1121	0.3642	0.0058	2025	14	2013	16	2002	27
LS08-03-16	62	67	101	0.66	0.1612	0.0034	10.1445	0.1731	0.4565	0.0072	2468	13	2448	16	2424	32

续表 S1

编号	组成/ppm			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
LS08-03-17	50	47	105	0.45	0.1255	0.0034	5.9881	0.1424	0.3459	0.0060	2036	20	1974	21	1915	28
LS08-03-18	31	41	50	0.81	0.1591	0.0037	9.7534	0.1847	0.4446	0.0073	2446	14	2412	17	2371	32
LS08-03-19	26	48	53	0.90	0.1690	0.0042	9.1991	0.1905	0.3949	0.0067	2548	16	2358	19	2145	31
LS08-03-20	12	14	18	0.79	0.1578	0.0039	9.9522	0.2113	0.4575	0.0078	2432	16	2430	20	2429	34
LS08-03-21	38	36	55	0.66	0.1816	0.0039	12.9045	0.2219	0.5155	0.0082	2667	13	2673	16	2680	35
LS08-03-22	37	25	49	0.51	0.2059	0.0044	15.7165	0.2668	0.5537	0.0088	2873	12	2860	16	2840	37
LS08-03-23	35	41	63	0.65	0.1523	0.0036	9.1041	0.1734	0.4334	0.0068	2372	15	2349	17	2321	31
LS08-03-24	33	55	71	0.77	0.1212	0.0032	5.8163	0.1295	0.3480	0.0057	1974	19	1949	19	1925	27
LS08-03-25	48	59	90	0.65	0.1425	0.0033	8.0400	0.1465	0.4092	0.0064	2258	14	2236	16	2211	29
LS08-03-26	49	39	94	0.42	0.1401	0.0034	7.9708	0.1592	0.4126	0.0066	2229	16	2228	18	2227	30
LS08-03-27	81	64	124	0.51	0.1574	0.0036	9.9888	0.1799	0.4602	0.0072	2428	14	2434	17	2440	32
LS08-03-28	50	81	66	1.23	0.1794	0.0040	12.1028	0.2120	0.4892	0.0076	2648	13	2612	16	2567	33
LS08-03-29	32	38	53	0.72	0.1625	0.0047	10.1866	0.2573	0.4547	0.0081	2482	21	2452	23	2416	36
LS08-03-30	47	57	70	0.81	0.1607	0.0037	10.1766	0.1879	0.4593	0.0073	2463	14	2451	17	2437	32
LS08-03-31	35	44	54	0.81	0.1618	0.0038	9.8240	0.1903	0.4404	0.0071	2474	15	2418	18	2352	32
LS08-03-32	28	42	41	1.04	0.1611	0.0041	10.0432	0.2122	0.4521	0.0075	2467	16	2439	20	2405	33
LS08-03-33	69	61	115	0.53	0.1554	0.0034	9.3785	0.1618	0.4376	0.0068	2406	13	2376	16	2340	30
LS08-03-34	21	38	46	0.82	0.1127	0.0031	5.0038	0.1203	0.3220	0.0054	1843	22	1820	20	1799	26

表 S2 太华杂岩片麻岩锆石 Hf 同位素数据

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	f_{Lu}/Hf
奥长花岗质片麻岩(TH-07)											
TH-07-01	2760	0.032453	0.001232	0.281070	0.000050	-60.2	-0.4	2.1	3052	3133	-0.96
TH-07-02	2734	0.032734	0.001153	0.281140	0.000048	-57.7	1.7	2.0	2951	3011	-0.97
TH-07-03	2764	0.009111	0.000302	0.281130	0.000034	-58.1	3.6	1.6	2900	2942	-0.99
TH-07-04	2754	0.013411	0.000451	0.281138	0.000038	-57.8	3.4	1.7	2900	2945	-0.99
TH-07-05	2821	0.013996	0.000571	0.280995	0.000046	-62.8	-0.4	2.0	3101	3184	-0.98
TH-07-06	2762	0.027312	0.001032	0.281010	0.000046	-62.3	-2.1	2.0	3118	3218	-0.97
TH-07-07	2754	0.005837	0.000224	0.281105	0.000046	-58.9	2.6	2.0	2927	2981	-0.99
TH-07-08	2762	0.024438	0.000834	0.281160	0.000050	-57.0	3.6	2.1	2899	2939	-0.97
TH-07-09	2752	0.026909	0.000990	0.281179	0.000040	-56.3	3.8	1.8	2885	2923	-0.97
TH-07-10	2751	0.007643	0.000281	0.280929	0.000040	-65.2	-3.8	1.8	3165	3293	-0.99
TH-07-11	2771	0.062769	0.002346	0.281234	0.000042	-54.4	3.6	1.9	2914	2947	-0.93
TH-07-12	2773	0.010191	0.000459	0.281058	0.000015	-60.6	0.9	1.2	3008	3080	-0.99
TH-07-13	2752	0.021569	0.000912	0.281111	0.000016	-58.7	1.5	1.2	2972	3035	-0.97
TH-07-14	2845	0.014305	0.000548	0.281086	0.000030	-59.6	3.4	1.5	2977	3017	-0.98
TH-07-15	2753	0.012759	0.000483	0.281110	0.000026	-58.8	2.3	1.4	2940	2997	-0.99
英云闪长质片麻岩(TH-13)											
TH-13-01	2827	0.010455	0.000476	0.281021	0.000032	-61.9	0.8	1.2	3059	3129	-0.99
TH-13-02	2781	0.015883	0.000643	0.281118	0.000028	-58.5	2.9	1.2	2942	2990	-0.98
TH-13-03	2789	0.012626	0.000520	0.281106	0.000026	-58.9	2.9	1.2	2949	2997	-0.98
TH-13-04	2776	0.011923	0.000512	0.281124	0.000034	-58.3	3.2	1.3	2924	2969	-0.98
TH-13-05	2771	0.011776	0.000514	0.281078	0.000030	-59.9	1.5	1.2	2986	3050	-0.98
TH-13-06	2766	0.022997	0.000968	0.281134	0.000030	-57.9	2.5	1.2	2945	2996	-0.97
TH-13-07	2785	0.011355	0.000465	0.281189	0.000042	-56.0	5.8	1.3	2834	2848	-0.99
TH-13-08	2776	0.042115	0.001741	0.281141	0.000032	-57.7	1.5	1.2	2996	3053	-0.95
TH-13-09	2762	0.016683	0.000694	0.281101	0.000030	-59.1	1.8	1.2	2969	3030	-0.98
TH-13-10	2777	0.005590	0.000278	0.281070	0.000026	-60.2	1.8	1.2	2979	3041	-0.99
TH-13-11	2786	0.021341	0.000918	0.281100	0.000036	-59.1	1.8	1.3	2987	3045	-0.97
TH-13-12	2748	0.017577	0.000675	0.281124	0.000030	-58.3	2.3	1.2	2937	2992	-0.98
TH-13-13	2784	0.014615	0.000620	0.281100	0.000030	-59.1	2.4	1.2	2965	3018	-0.98
TH-13-14	2751	0.015002	0.000655	0.281099	0.000030	-59.2	1.5	1.2	2969	3033	-0.98
TH-13-15	2745	0.012008	0.001362	0.281105	0.000022	-59.0	0.3	1.2	3015	3089	-0.96
TH-13-16	2850	0.030673	0.000518	0.281093	0.000034	-59.4	3.8	1.3	2966	3001	-0.98
斜长角闪岩(TH-05)											
TH-05-01	2781	0.007025	0.000284	0.280982	0.000039	-63.3	-1.3	1.8	3095	3192	-0.99
TH-05-02	2780	0.007564	0.000287	0.280931	0.000042	-65.1	-3.1	1.9	3164	3283	-0.99
TH-05-03	2790	0.014333	0.000514	0.281058	0.000045	-60.6	1.2	2.0	3012	3079	-0.98
TH-05-04	2874	0.004838	0.000197	0.280924	0.000019	-65.3	-1.0	1.4	3165	3256	-0.99
TH-05-06	2787	0.008694	0.000321	0.280964	0.000044	-63.9	-1.9	2.0	3123	3226	-0.99
TH-05-07	2885	0.008137	0.000302	0.281033	0.000029	-61.5	2.9	1.6	3029	3073	-0.99
TH-05-08	2889	0.012420	0.000443	0.281035	0.000023	-61.4	2.8	1.4	3038	3083	-0.99
TH-05-09	2790	0.006465	0.000245	0.281169	0.000029	-56.7	5.7	1.6	2845	2862	-0.99
TH-05-10	2779	0.007466	0.000292	0.281206	0.000099	-55.4	6.6	3.7	2798	2804	-0.99
TH-05-11	2785	0.008861	0.000331	0.281001	0.000030	-62.6	-0.6	1.6	3074	3163	-0.99
TH-05-12	2795	0.010456	0.000381	0.281204	0.000037	-55.5	6.8	1.8	2807	2811	-0.99
TH-05-13	2887	0.011985	0.000440	0.281096	0.000037	-59.3	4.9	1.8	2956	2978	-0.99
TH-05-14	2789	0.017386	0.000660	0.281109	0.000029	-58.8	2.7	1.6	2956	3005	-0.98
TH-05-15	2773	0.005481	0.000208	0.281063	0.000032	-60.4	1.6	1.6	2982	3047	-0.99
TH-05-16	2786	0.009379	0.000345	0.281077	0.000040	-59.9	2.1	1.8	2974	3031	-0.99
TH-05-17	2797	0.009843	0.000362	0.280949	0.000036	-64.5	-2.2	1.7	3146	3252	-0.99
TH-05-18	2785	0.012411	0.000459	0.281202	0.000034	-55.5	6.3	1.7	2816	2825	-0.99

续表 S2

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
斜长角闪岩(TH-29)											
TH-29-02	2907	0.016515	0.000684	0.281148	0.000033	-57.4	6.7	1.6	2905	2904	-0.98
TH-29-03	2773	0.016927	0.000597	0.281096	0.000029	-59.3	2.0	1.5	2968	3027	-0.98
TH-29-04	2791	0.012111	0.000485	0.280858	0.000054	-67.7	-5.8	2.2	3277	3423	-0.99
TH-29-08	2783	0.019108	0.000713	0.281134	0.000028	-57.9	3.4	1.5	2926	2969	-0.98
TH-29-09	2924	0.028172	0.001572	0.281162	0.000032	-56.9	5.9	1.6	2954	2962	-0.95
TH-29-10	2766	0.021367	0.000836	0.281185	0.000031	-56.1	4.6	1.6	2866	2895	-0.97
TH-29-11	2918	0.015166	0.000579	0.281117	0.000024	-58.5	6.1	1.5	2939	2945	-0.98
TH-29-12	2806	0.009374	0.000364	0.280855	0.000046	-67.8	-5.4	2.0	3270	3412	-0.99
TH-29-16	2899	0.030716	0.001202	0.281165	0.000028	-56.8	6.2	1.6	2920	2926	-0.96
TH-29-17	2796	0.009793	0.000364	0.281209	0.000025	-55.3	7.0	1.5	2799	2800	-0.99
TH-29-18	2790	0.005637	0.000214	0.281053	0.000022	-60.8	1.6	1.5	2996	3060	-0.99
TH-29-19	3092	0.019448	0.000751	0.281020	0.000023	-61.9	6.3	1.5	3081	3078	-0.98
TH-29-20	2760	0.018517	0.000728	0.280970	0.000023	-63.7	-3.0	1.5	3148	3261	-0.98
TH-29-21	2778	0.020162	0.000850	0.281209	0.000031	-55.3	5.7	1.7	2835	2851	-0.97