

鲁西沂水地区早前寒武纪混合岩锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其构造意义

毛永生^{1,2}, 彭头平^{1,3*}, 范蔚茗^{3,4}, 高剑峰⁵, 方小玉^{1,2}, 刘兵兵^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 沂水地区位于鲁西花岗绿岩区东部沂水-汤头断裂带内。本文对区内九层岭与大山两地的混合岩样品进行了锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素分析研究。结果显示九层岭混合岩有(2693±11) Ma 和(2558±9) Ma 两个年龄记录, 分别代表早期熔融年龄和混合岩化年龄; 锆石 Hf 同位素组成较为均一, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.42 \sim +5.46$ 并且沿 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ 平均地壳演化线分布, 相应二阶段锆石 Hf 模式年龄都在 2.80~2.93 Ga 之间。而两个来自大山的样品则给出了(2475±14) Ma 和(2474±14) Ma 一致的结果, 代表了混合岩化年龄; Hf 同位素组成变化较大, $\epsilon_{\text{Hf}}(2475 \text{ Ma}) = -1.48 \sim +8.0$, $\epsilon_{\text{Hf}}(2474 \text{ Ma}) = -2.76 \sim +6.43$, 二阶段锆石 Hf 模式年龄整体在 2.48~3.15 Ga 之间。结合区域演化背景, 我们认为以上特征指示沂水地区很可能残存 2.8 Ga 的古老基底于地壳深部, 经历并且记录了 2.8~2.9 Ga 新生地壳形成, 及新太古代两期重要的 2.7 Ga 和 2.5 Ga 的岩浆作用事件。同时该地区存在多个时期形成的地壳物质(2.48~2.99 Ga)复合的源区, 在板片俯冲角度变大(~2.54 Ga)后构造热作用影响加强使得源区在 2.48 Ga 重熔并有少量古老地壳物质(3.15 Ga)的贡献。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 古老基底; 地壳增生; 沂水

中图分类号: P59; P597; P597.1; P597.3 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)06-0517-19

Early Pre-Cambrian migmatites in Yishui area of Luxi: Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions and their geological significance

MAO Yong-sheng^{1,2}, PENG Tou-ping^{1,3*}, FAN Wei-ming^{3,4}, GAO Jian-feng⁵,
FANG Xiao-yu^{1,2} and LIU Bing-bing^{1,2}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: The Yishui area is located in the east of the Luxi granite-greenstone belt, and is bounded by the Yishui-Tangtou Fault zone to the east. In this article we present zircon U-Pb ages and Hf isotopic results of migmatites from the Jiucengling (08YS-50) and Dashan (08YS-14 and 08YS-21) in the Yishui area. The Jiucengling sample gives two ages of (2693±11) Ma and (2558±9) Ma, representing the time of previous partial melting and recent metamorphic anatexis, respectively. Their zircon Hf isotopic compositions vary slightly with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values in the range from +2.42 to +5.46, and define a line as the evolution tendency of the average crust (with $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$), while the corresponding two-stage Hf model age gives similar ages of 2.80~2.93 Ga. However, two samples from the Dashan migmatites yield identical results of (2475±14) Ma and (2474±14) Ma within errors, which means that their protolith was remelted at (2475±14) Ma. Their zircon Hf compositions show

收稿日期(Received): 2015-03-03; 改回日期(Revised): 2015-04-07; 接受日期(Accepted): 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41372197)

作者简介: 毛永生(1986-), 男, 硕士研究生, 岩石大地构造学专业, E-mail: maoyongsheng@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): PENG Tou-ping, E-mail: tppeng@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290573

a wide range of ε_{Hf} (2475 Ma) from -2.76 to $+8.0$, with the two-stage Hf model ages varying from 2.48 to 3.15 Ga. Based on previous data, the aforementioned characteristics probably indicate the survival of 2.8 Ga basement at depth and witnessed the formation of juvenile crust aged at 2.8~2.9 Ga, and two other important magmatic events in the Neoproterozoic at 2.7 Ga and 2.5 Ga, respectively. These signatures indicate that a heterogeneous source region including juvenile materials with different ages (2.48~2.99 Ga) and an ancient crust aged 3.15 Ga were present beneath the study area. Therefore, it is likely that the tectono-thermal event at 2.48 Ga was related to slab subduction and these older basement rocks were the results of the transition of slab subduction angle in this area from a flat subduction to a steeper one which probably occur at ~ 2.54 Ga.

Key words: zircon U-Pb ages; zircon Hf isotope; ancient basement; crustal growth; Yishui

0 引言

造山带演化中普遍伴随地壳的部分熔融事件^[1]。这一过程不但影响着板块汇聚作用下的陆壳形成及分异^[2],而且也改变着地壳的流变学与热力学行为^[3-4]。地壳熔体的演化强烈受控于构造作用过程^[1],以至于人们的研究越来越关注于造山带中部分熔融与构造过程的关系^[3,5],而地壳发生熔融的年代学分析有助于深入理解这一问题^[1,5]。但是由于伴随的多期变质及流体活动的影响,我们很难直接界定部分熔融的时间^[5]。

锆石是混合岩中一种常见而重要的副矿物,具有高于一般变质作用的 U-Pb 体系封闭温度^[6],能够较可信的记录部分熔融过程岩浆结晶时间。另外,锆石具有高的 Hf 和低的 Lu 含量因而极低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值^[7],其 Hf 同位素组成能够指示寄主岩体特征,反映熔体作用过程中不同组分的影响^[5,8,9]。

鲁西地区位于山东省的西南部(图 1),其主要的特征是发育有前太古代早期约 2.7 Ga 的泰山岩群和广泛分布的花岗质片麻岩组成的世界上典型的花岗绿岩组合^[11-15]。且区内出露有大面积太古宙变质结晶基底,是我国进行早前寒武纪地壳早期生长演化研究的热点地区之一。不同于东部陆块的其他地区,如鞍山地区 3.8~3.4 Ga 奥长花岗岩、3.31 Ga 基性岩脉、3.6~3.3 Ga 长英质脉体和 3.1 Ga 二长花岗岩^[16-17]以及鞍山和铁甲山 ~ 3.0 Ga 花岗岩^[18-19],鲁西地区仅有泰山杂岩中花岗岩的 3.6 Ga 和约 2.85 Ga 继承锆石年龄^[14]以及沂水埃达克质岩石的 (2837 ± 10) Ma^[20]和蔡峪岩体闪长质岩石的 2.82 Ga、2.93 Ga 和 3.07 Ga^[21]继承锆石,目前并未证实有老于 2.8 Ga 的岩浆岩存在。因此,鲁西是否存在古老基底(> 2.8 Ga)问题引起人们的关注^[22-23]。

本研究工作区沂水地区位于鲁西花岗-绿岩带

东部的郯庐断裂带内(图 2)。在区域构造演化上中太古代形成了沂水古陆块^[24-29];而根据 Wan *et al.*^[11]对鲁西岩浆作用时空展布推断,研究区南西向东北方向的弧俯冲作用主导背景位于远离俯冲带的后方,因而更可能保留有古老基底岩浆作用信息。本文拟通过对沂水九层岭与大山等地的混合岩样品的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素研究,并结合前人对鲁西花岗-绿岩区已取得的成果,进一步探讨鲁西地区岩浆作用时序与地壳增生演化记录。

1 地质概况与样品特征

鲁西花岗-绿岩区位于华北克拉通东部陆块的南缘(图 1),总出露面积大于 10000 km²,整体呈北东-南西向构造展布,东部至沂水地区被郯庐断裂带所截切。基底岩石多为新太古代至古元古代的花岗岩和片麻岩类,大部为古生代至新生代沉积盖层所覆。地表分布主要有新太古代早期至晚期(2.7~2.5 Ga)的 TTG 片麻岩和片麻质二长花岗岩,占该区前寒武基底的大约 80%^[11,15,30]。少量呈透镜状或条带状发育在 TTG 片麻岩中的 2.7~2.6 Ga 超基性-酸性火山岩和变质沉积岩,组成泰山绿岩系^[12,15,31,32]。部分新太古代辉石岩、辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩及花岗岩岩体侵入于片麻岩中,野外观察显示发生了低于围岩变质作用^[12,15]。该区除记录一个强烈的约 2.5 Ga 事件外,还保留有大量的约 2.7 Ga 事件的记录^[12-15,22,28,33]而区别于世界其他克拉通约 2.7 Ga 的构造-岩浆事件^[28]。Wan *et al.*^[11]对泰山岩系及侵入岩锆石 Hf 同位素研究,也提出鲁西地区经历了 2.75~2.70 Ga 的地壳增生及新生地壳改造事件。

沂水地块出露于紧邻鲁西花岗-绿岩区东部的郯庐断裂带内(图 2),主要由面积大于 70%的新太古代花岗岩类侵入岩体和中太古代壳岩系组成。前者包括蔡峪、牛心官庄、马山、雪山、大山、林家

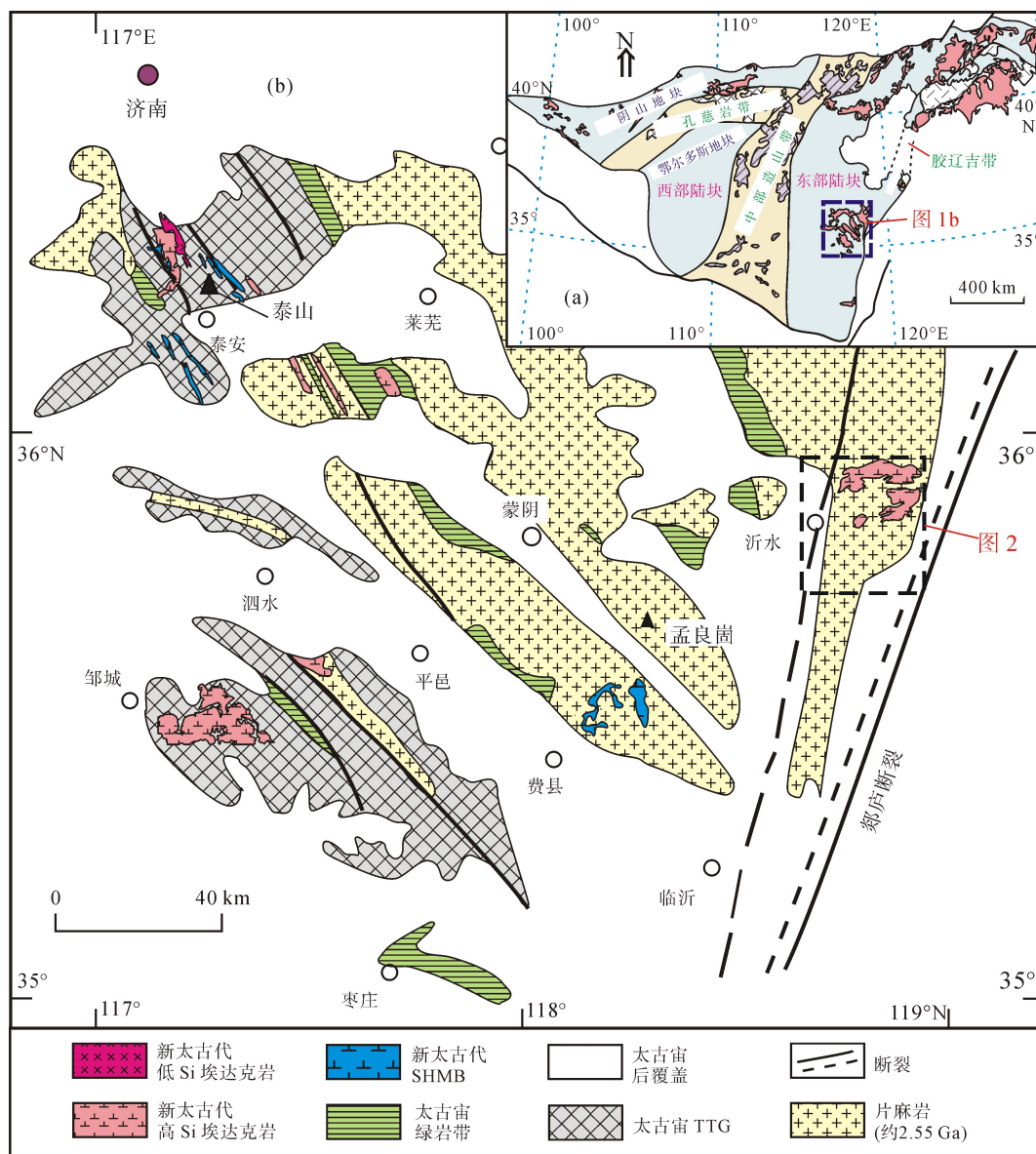


图 1 华北克拉通构造划分(a) (据 Zhao *et al.*^[10])和鲁西地区地质简图(b) (据 Wan *et al.*^[11])

Fig. 1 Geologic map showing tectonic subdivision of the North China Craton (a, after Zhao *et al.*^[10]) and simplified geological map of the Luxi area (b, after Wan *et al.*^[11]) (SHMB = siliceous high-Mg basalt)
SHMB-硅质高镁玄武岩。

官庄、英灵山等地区的花岗质片麻岩及紫苏花岗岩等杂岩体; 后者主要有麻粒岩相的变基性岩及少量长英质片麻岩与变泥质岩等, 呈大小不等的包体散布于变质变形的杂岩体中, 称沂水岩群。众多对表壳岩中变质锆石的 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测定给出约 2.50 Ga 的变质年龄, 认为该区在新太古代晚期及古元古代早期遭受了区域变质作用的改造^[34-36]。

本研究选取 08YS-50(采自九层岭地区 35°49.646'N, 118°42.653'E)与 08YS-14、08YS-21(采自大山地区 35°46.619'N, 118°42.728'E)等两套(3 件)混合岩样品进行锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测定。其中九层岭

混合岩(08YS-50)为浅灰色-灰色, 呈片麻状-弱条带状, 主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母及少量角闪石组成。大山混合岩(08YS-14 和 08YS-21)呈灰白色-灰色弱条带状, 矿物组成与九层岭样品相似而长英质较多。

2 分析方法

岩石样品在人工碎样至 80~100 目后通过常规重力和电磁方法进行锆石的初步分选, 然后在双目镜下挑选出晶型和透明度较好的锆石颗粒。将挑选

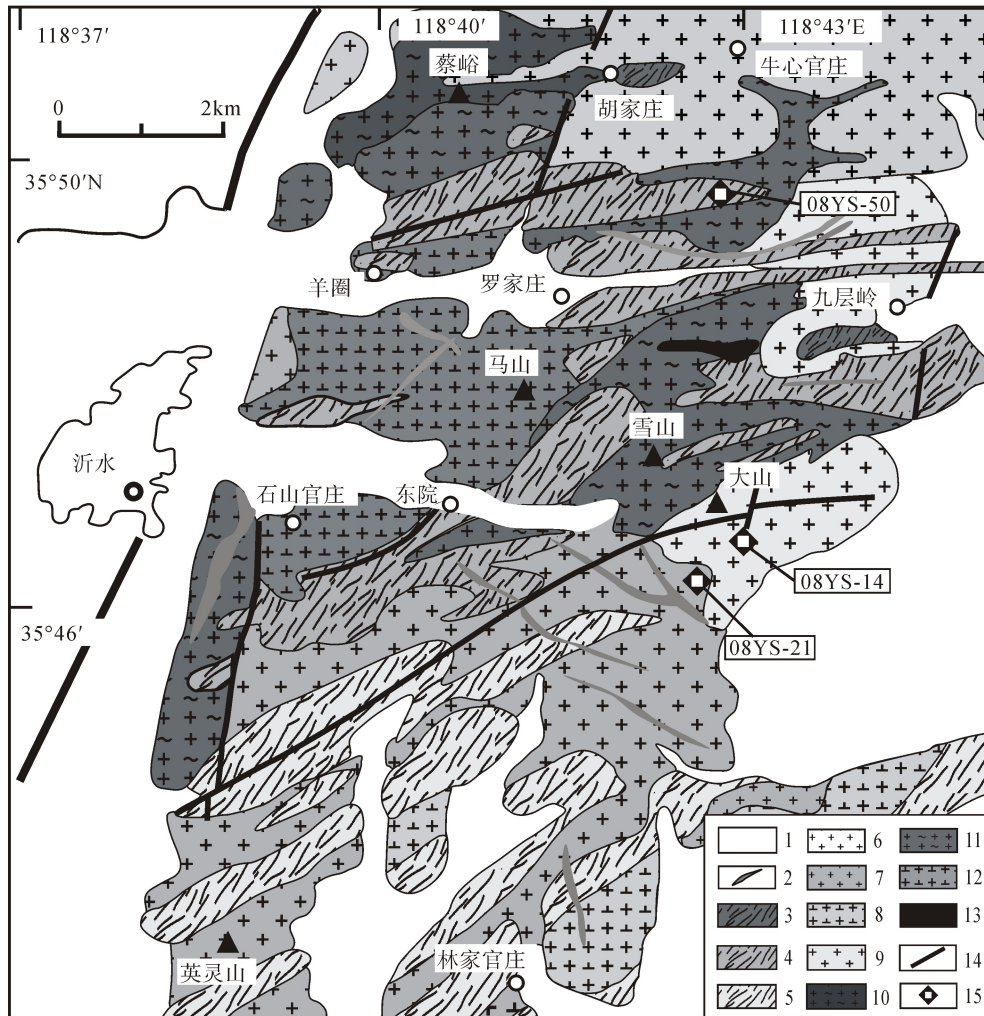


图 2 山东沂水地区地质略图(据沈其韩等^[24])

Fig.2 Geological sketch map of the Yishui area (revised after Shen *et al.*^[24])

1-新生代覆盖; 2-脉体; 3-北下庄组; 4-石山官庄组; 5-林家官庄组; 6-大山岩体; 7-英灵山岩体; 8-林家官庄岩体; 9-牛心官庄岩体; 10-蔡峪岩体; 11-雪山岩体; 12-马山岩体; 13-辉长岩; 14-断层; 15-采样位置。

1-Cenozoic covers; 2-veins; 3-Beixiazhuang Formation; 4-Shishanguanzhuang Formation; 5-Linjiaguanzhuang Formation; 6-Dashan pluton; 7-Yinglingshan pluton; 8-Linjiaguanzhuang pluton; 9-Niuxingguanzhuang pluton; 10-Caiyu pluton; 11-Xueshan pluton; 12-Mashan pluton; 13-gabbro; 14-faults; 15-sample locations.

出的锆石颗粒置于无色透明的环氧树脂上, 经打磨、抛光使锆石完全暴露, 制成锆石靶用于 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。对待分析的锆石靶分别进行显微镜下透、反射光照相和阴极发光(CL)成相, 选择测点时对比 CL 图与镜下锆石照片尽量减少由锆石颗粒裂隙及包裹体等带来的分析误差。阴极发光(CL)在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室通过 EMPA-JXA-8100 电子探针完成。

样品 08YS-50 的锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所完成。U-Pb 同位素分析使用 Agilent 公司 7500a 型 ICP-MS 进行测试, Lu-Hf 同位素测试使用德国 Finnigan 公司

制造的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS), 加载德国 Lamda Physik 公司制造的 Geolas193nm 准分子激光取样系统。Lu-Hf 同位素分析所用仪器为配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS), 激光束斑直径为 63 μm , 激光剥蚀时间为 26 s, 所用的激光脉冲速率为 8~10 Hz, 激光脉冲能量为 100 mJ, 测定时用锆石国际标样 91500 作外标, 实验中采用 He 气作为剥蚀物质载气。详细测试流程以及仪器运行条件等参见 Wu *et al.*^[37]。

样品 08YS-14 和 08YS-21 的锆石 U-Pb 定年和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 仪器采用由美

国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统(LA)和 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)联机结合的方法。用 He 作为剥蚀物质的载气, 剥蚀激光束斑直径 31 μm , 频率为 8 Hz, 剥蚀时间 40 s。采用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化, 使仪器达到最佳的灵敏度、最小的氧化物产率($\text{CeO}/\text{Ce} < 3\%$)和最低的背景值。实验采用标准锆石 TEMORA^[38]作为测年外标。相关分析方法详见文献[39]。Lu-Hf 同位素分析同样在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室进行, 采用仪器为 Neptune Plus 多吸收 ICP-MS 和 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统, 剥蚀位置为先前进行过 U-Pb 年龄测试过的点位, 个别点位由于锆石颗粒大小等问题导致剥蚀量不够的则选择在附近的但锆石结构相同的部位进行以保证接近原位分析结果。激光参数斑束 45 μm , 重复率 8 Hz, 能量 80 mJ, 以 He 作为载气并加入少量氮气。样品正常信号分析包括 30 s 的空白气体收集和 30 s 的激光剥蚀。积分时间为 0.131 s, 约有 200 个周期数据被收集。利用 ^{173}Yb 和 ^{175}Lu 进行纠正 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 干扰。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 用质量偏差校正指数定律标准化为 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ ^[37]。Penglai 锆石作为标样用于测试中。

锆石 U-Pb 数据处理通过 ICPMSDataCal 软件完成。U-Pb 年龄计算中 U 的衰变常数引自 Steiger *et al.*^[40], 一致曲线图绘制和加权平均年龄计算采用 Isoplot/Ex_ver3^[41]软件。单个测点误差为 1 σ , 加权平均年龄数据置信度达 95%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

九层岭混合岩(08YS-50)样品的锆石多呈灰色自形的柱状-短柱状, 粒径 100~300 μm , CL 图上多可见明显的震荡环带。所挑选进行测定的 20 颗锆石 Th、U 含量分别为 55~45 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 187~847 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 比值均大于 0.1 (0.10~0.55) (表 1), 具有岩浆成因锆石特征。所有 20 个测点数据都位于谐和线上, 且有宽的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围(2556~2695 Ma), 4 个较为集中的年轻点给出平均年龄为 (2558 \pm 9) Ma (MSWD = 0.09), 代表混合岩化作用的时间。同时, 3 个年老的点也相对集中, 给出了 (2693 \pm 11) Ma

(MSWD = 0.15)的平均年龄结果, 指示先前早期的熔融事件; 而中间连续的年龄序列(2577~2668 Ma)可能为多次部分熔融的记录。另外两个明显老的 2817 Ma 和 2868 Ma 年龄可能为继承年龄(图 3a 和 3b)。

采自大山的混合岩(08YS-14 和 08YS-21)锆石样品呈暗色的自形-半自形短柱状-柱状, 晶棱浑圆, 粒径 100~200 μm 。部分颗粒发育很窄的增生边, 内部大多发育密集-宽缓的环带结构。2 个样品的锆石均具有较大变化的 Th 和 U 含量, 其中 08YS-14 Th 为 123~8816 $\mu\text{g}/\text{g}$, U 为 283~5735 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 比值 0.12~2.36; 08YS-21 Th 为 73~64610 $\mu\text{g}/\text{g}$, U 为 361~2398 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 比值 0.07~33 (表 1)。两者的内部震荡环带结构及高的 Th/U (绝大部分高于 0.1)说明锆石为深熔岩浆成因。剔除不谐和测点(谐和度小于 90%), 两个样品分别选取了 23 和 22 个数据点进行 U-Pb 年龄分析。他们都显示不同程度的 Pb 丢失或获得而偏离一致曲线, 但都形成很好的不一致曲线。其中样品 08YS-14 除 3 个继承锆石显示 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 2528 Ma、2562 Ma 和 2687 Ma 外, 其余 20 个得到(2475 \pm 14) Ma (MSWD = 0.65)的上交点年龄(图 3c); 08YS-21 只有 1 个较大年龄 2589 Ma, 剩余 21 个则有与 08YS-14 极为一致的(2474 \pm 14) Ma (MSWD = 0.85) 的上交点年龄(图 3e), 代表了混合岩化作用的时间。

3.2 锆石 Hf 同位素

对九层岭混合岩(08YS-50)进行了 U-Pb 年龄测定的锆石做 Lu-Hf 同位素的原位分析(表 2)。所得结果, 除 2 个测点(08YS-50-05 和 08YS-50-15)可能由于获取了不同时代的样本(部分锆石内部有不同结构, 且数据结果的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值及误差并未明显偏大)导致出现的异常值(明显大于同时期亏损地幔演化值即位于 DM 以上区域)外, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为 0.281172~0.281260, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.42\sim+5.46$ (t 为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄); 在图 4 中, 它们都大致落于同一平均地壳演化线($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$)趋势上, 且具有相同的同时较窄范围的二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf}) = 2.80\sim 2.93$ Ga。

对大山的样品, 我们对已完成 U-Pb 测年中的 23 个(08YS-14)和 21 个(08YS-21)锆石进行了 Hf 同位素测定。除个别点(08YS-14-02、06、07)明显存在偏差(其原因可能同九层岭样品)外, 2 个样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值整体地都有较大的范围(0.281125~0.281427),

表1 沂水混合岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Yishui migmatites

测点号	含量 ($\mu\text{g/g}$)				Th/U	同位素比值											
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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
08YS-50																	
A39	62	599	371	0.10	0.1731	0.0022	11.67	0.14	0.4896	0.0063	2587	10	2578	12	2569	27	
A40	131	255	167	0.51	0.1795	0.0019	12.53	0.13	0.5066	0.0061	2648	9	2645	10	2642	26	
A41	172	569	376	0.30	0.1807	0.0018	12.63	0.13	0.5076	0.0060	2659	9	2652	9	2646	26	
A42	90	187	132	0.48	0.1816	0.0023	12.82	0.15	0.5125	0.0066	2667	10	2666	11	2667	28	
A43	399	803	555	0.50	0.1988	0.0025	14.97	0.18	0.5466	0.0072	2817	10	2813	12	2811	30	
A44	102	390	254	0.26	0.1845	0.0022	13.16	0.15	0.5180	0.0065	2694	9	2691	11	2691	28	
A45	456	847	556	0.54	0.1839	0.0011	13.05	0.07	0.5151	0.0053	2688	10	2683	5	2678	23	
A51	125	250	166	0.50	0.1815	0.0013	12.78	0.09	0.5113	0.0054	2667	9	2664	6	2662	23	
A52	94	214	143	0.44	0.1817	0.0014	12.79	0.09	0.5111	0.0055	2668	9	2664	7	2661	24	
A53	85	389	244	0.22	0.1698	0.0013	11.38	0.08	0.4863	0.0052	2556	9	2555	7	2555	23	
A54	96	290	191	0.33	0.1720	0.0018	11.60	0.12	0.4899	0.0058	2577	9	2573	9	2570	25	
A55	160	623	373	0.26	0.1701	0.0016	11.36	0.11	0.4847	0.0056	2558	9	2553	9	2548	24	
A56	118	587	368	0.20	0.1704	0.0013	11.40	0.08	0.4858	0.0052	2562	9	2557	7	2552	23	
A57	103	579	329	0.18	0.1768	0.0014	12.23	0.10	0.5022	0.0055	2623	9	2622	7	2623	24	
A62	112	203	145	0.55	0.2052	0.0023	15.78	0.17	0.5584	0.0069	2868	9	2864	10	2860	29	
A63	55	309	185	0.18	0.1749	0.0013	11.93	0.09	0.4954	0.0053	2605	9	2599	7	2594	23	
A64	70	733	415	0.10	0.1699	0.0018	11.26	0.12	0.4814	0.0057	2557	9	2545	10	2533	25	
A65	112	210	143	0.53	0.1846	0.0017	13.19	0.12	0.5188	0.0059	2695	9	2693	8	2694	25	
A66	123	366	224	0.33	0.1767	0.0013	12.17	0.09	0.5002	0.0054	2622	9	2618	7	2614	23	
A67	87	192	125	0.45	0.1770	0.0023	12.13	0.15	0.4978	0.0065	2625	10	2615	12	2604	28	
08YS-14																	
B01	1804	1778	1225	1.01	0.1670	0.0057	11.28	0.41	0.4837	0.0081	2528	57	2547	34	2543	35	
B02	2372	2356	1584	1.01	0.1705	0.0051	11.31	0.36	0.4750	0.0073	2562	45	2549	30	2506	32	
B03	5930	2512	1430	2.36	0.1629	0.0044	9.44	0.26	0.4145	0.0044	2487	46	2381	25	2235	20	
B04	599	1490	905	0.40	0.1585	0.0040	10.45	0.28	0.4717	0.0059	2440	44	2476	25	2491	26	
B05	207	283	190	0.73	0.1622	0.0047	11.49	0.37	0.5103	0.0105	2480	49	2563	30	2658	45	
B06	2121	1891	1095	1.12	0.1557	0.0045	9.79	0.33	0.4503	0.0092	2409	48	2415	31	2397	41	
B07	123	996	588	0.12	0.1578	0.0041	10.32	0.30	0.4695	0.0078	2432	44	2464	27	2481	34	
B08	220	1243	709	0.18	0.1598	0.0039	10.25	0.29	0.4601	0.0076	2453	41	2457	26	2440	34	
B09	184	464	244	0.40	0.1633	0.0045	11.11	0.38	0.4903	0.0118	2500	46	2532	32	2572	51	
B10	798	1597	824	0.50	0.1668	0.0045	9.44	0.32	0.4075	0.0097	2526	45	2382	32	2203	44	
B12	8816	5735	4773	1.54	0.1555	0.0039	9.89	0.32	0.4583	0.0110	2409	43	2424	30	2432	49	

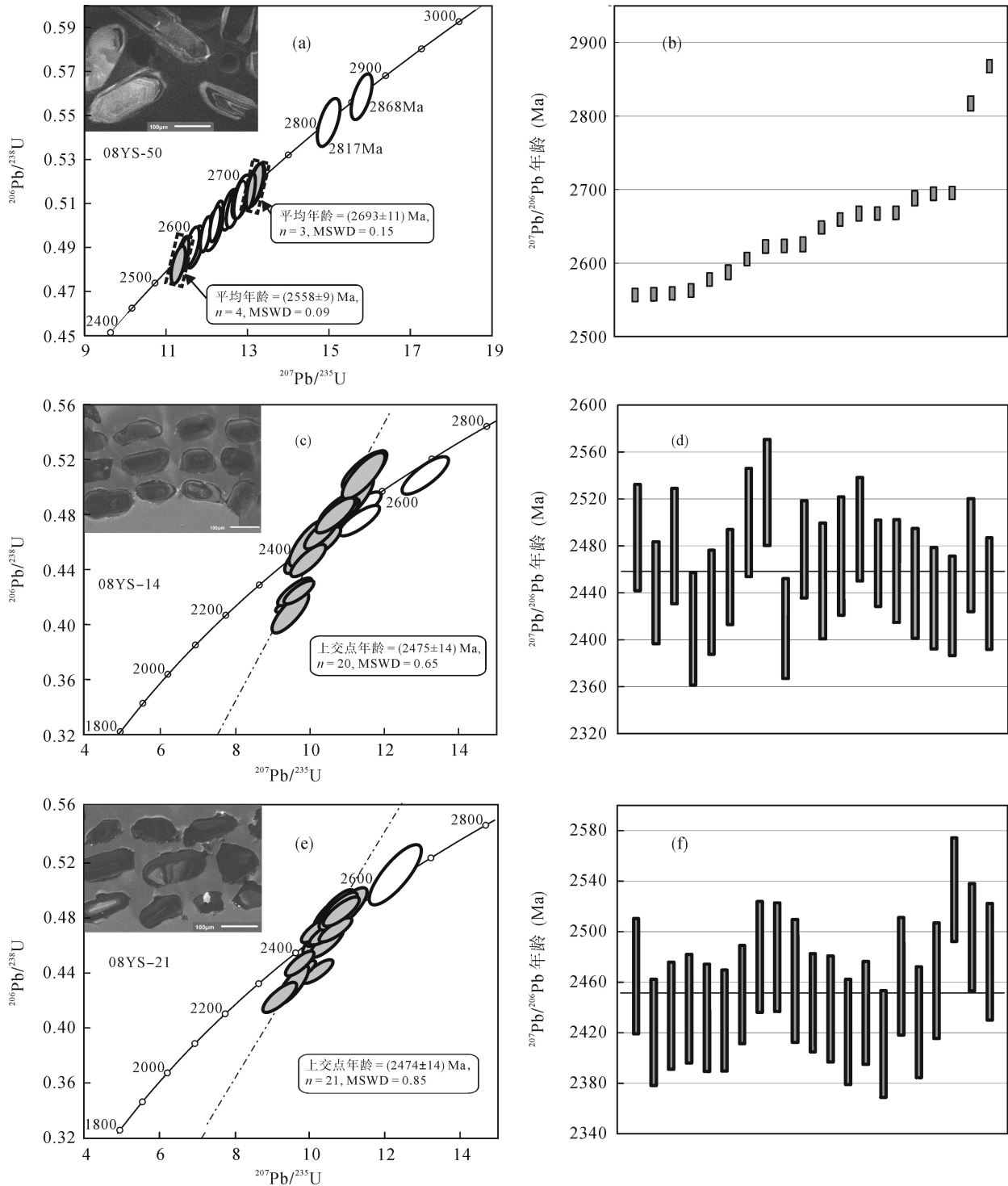


图3 锆石 U-Pb 谐和图

Fig.3 U-Pb concordia diagrams for zircons

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 总体为 $-2.7 \sim +8.0$ (表 2), 对应的二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2} = 2.49 \sim 3.15$ Ga。2 个具 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与同时期 DM 演化值接近的点, 单阶段模式年龄 $t_{\text{DM}1} = 2.48$ Ga 和 2.50 Ga, 这与它们的 U-Pb 年龄结果极为接近。

3.3 锆石微量元素(大山混合岩)

由图 5a 和 5b 及表 3 可见, 它们均显示 HREE 的中度富集和 LREE 的不同程度的亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为 0.0001~0.2109 和 0.0003~0.7127; 以及中等-强

表 2 沂水混合岩 LA-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon Lu-Hf isotopic results for the Yishui migmatites

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	f_{LuHf}
08YS-50												
A39	0.281239	0.000011	0.000629	0.000010	0.018381	0.000185	2693	0.281206	5.20	2.78	2.83	-0.98
A40	0.281217	0.000011	0.000899	0.000011	0.028179	0.000366	2693	0.281171	3.94	2.83	2.91	-0.97
A41	0.281273	0.000013	0.001019	0.000037	0.033386	0.001142	2693	0.281220	5.71	2.76	2.80	-0.97
A42	0.281226	0.000010	0.000852	0.000010	0.027906	0.000417	2693	0.281182	4.34	2.81	2.88	-0.97
A43	0.281258	0.000015	0.001100	0.000009	0.032515	0.000290	2817	0.281198	7.80	2.79	2.77	-0.97
A44	0.281222	0.000012	0.000736	0.000002	0.020086	0.000136	2693	0.281184	4.42	2.81	2.88	-0.98
A45	0.281239	0.000012	0.000900	0.000018	0.028867	0.000495	2693	0.281192	4.70	2.80	2.86	-0.97
A51	0.281231	0.000012	0.001046	0.000014	0.029913	0.000427	2693	0.281177	4.14	2.82	2.90	-0.97
A52	0.281231	0.000011	0.000505	0.000001	0.015090	0.000066	2693	0.281205	5.16	2.78	2.83	-0.98
A53	0.281237	0.000010	0.000544	0.000002	0.016374	0.000098	2558	0.281211	2.23	2.77	2.91	-0.98
A54	0.281272	0.000012	0.000953	0.000017	0.029366	0.000431	2693	0.281223	5.79	2.76	2.80	-0.97
A55	0.281258	0.000011	0.000856	0.000020	0.025605	0.000666	2558	0.281216	2.42	2.77	2.90	-0.97
A56	0.281249	0.000009	0.000704	0.000039	0.023880	0.001451	2558	0.281215	2.38	2.77	2.90	-0.98
A57	0.281237	0.000011	0.000661	0.000013	0.018920	0.000337	2693	0.281203	5.09	2.78	2.84	-0.98
A62	0.281271	0.000012	0.000944	0.000025	0.028329	0.000622	2868	0.281219	9.73	2.76	2.69	-0.97
A63	0.281236	0.000010	0.000511	0.000015	0.015368	0.000420	2693	0.281210	5.32	2.77	2.82	-0.98
A64	0.281289	0.000010	0.000597	0.000006	0.017598	0.000298	2558	0.281260	3.97	2.71	2.80	-0.98
A65	0.281262	0.000011	0.000967	0.000020	0.029867	0.000624	2693	0.281212	5.42	2.77	2.82	-0.97
A66	0.281234	0.000011	0.000593	0.000015	0.019180	0.000361	2693	0.281203	5.09	2.78	2.84	-0.98
A67	0.281247	0.000012	0.000696	0.000012	0.020925	0.000255	2693	0.281211	5.39	2.77	2.82	-0.98
08YS-14												
B01	0.281384	0.000010	0.001217	0.000024	0.038452	0.000674	2528	0.281325	5.61	2.62	2.68	-0.96
B02	0.281522	0.000010	0.001948	0.000019	0.070709	0.000627	2562	0.281427	10.01	2.48	2.44	-0.94
B03	0.281356	0.000011	0.001084	0.000016	0.038406	0.000549	2475	0.281305	3.67	2.65	2.76	-0.97
B04	0.281335	0.000009	0.000817	0.000020	0.027429	0.000637	2475	0.281296	3.35	2.66	2.78	-0.98
B05	0.281305	0.000010	0.000754	0.000002	0.027668	0.000121	2475	0.281269	2.39	2.70	2.83	-0.98
B06	0.281738	0.000014	0.003219	0.000047	0.113177	0.001912	2475	0.281586	13.65	2.25	2.14	-0.90
B07	0.281728	0.000012	0.003332	0.000042	0.118505	0.001559	2475	0.281570	13.09	2.28	2.18	-0.90
B08	0.281219	0.000012	0.001354	0.000018	0.045966	0.000561	2475	0.281155	-1.66	2.86	3.08	-0.96
B09	0.281206	0.000010	0.000743	0.000004	0.028697	0.000099	2475	0.281171	-1.10	2.83	3.05	-0.98
B10	0.281341	0.000011	0.001023	0.000021	0.037032	0.000823	2475	0.281292	3.22	2.67	2.78	-0.97
B12	0.281516	0.000013	0.002102	0.000014	0.075653	0.000613	2475	0.281417	7.64	2.50	2.51	-0.94
B13	0.281254	0.000008	0.000836	0.000005	0.029986	0.000145	2475	0.281215	0.46	2.77	2.95	-0.97

(续表 2)

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
B14	0.281234	0.000011	0.001900	0.000024	0.068723	0.000823	2687	0.281136	2.57	2.88	2.99	-0.94
B15	0.281269	0.000011	0.000721	0.000009	0.024924	0.000270	2475	0.281235	1.19	2.74	2.91	-0.98
B16	0.281520	0.000010	0.001961	0.000030	0.068654	0.000892	2475	0.281427	8.00	2.48	2.49	-0.94
B17	0.281338	0.000009	0.001153	0.000003	0.041423	0.000084	2475	0.281283	2.89	2.68	2.80	-0.97
B18	0.281216	0.000010	0.001092	0.000009	0.040580	0.000328	2475	0.281164	-1.35	2.84	3.06	-0.97
B19	0.281220	0.000010	0.000719	0.000003	0.023463	0.000090	2475	0.281186	-0.55	2.81	3.01	-0.98
B20	0.281248	0.000009	0.001090	0.000011	0.038082	0.000409	2475	0.281196	-0.20	2.80	2.99	-0.97
B22	0.281188	0.000008	0.000591	0.000007	0.020990	0.000217	2475	0.281160	-1.48	2.84	3.07	-0.98
B23	0.281270	0.000010	0.000769	0.000018	0.026944	0.000666	2475	0.281234	1.14	2.75	2.91	-0.98
B24	0.281309	0.000012	0.000791	0.000007	0.027652	0.000210	2475	0.281271	2.47	2.70	2.83	-0.98
B25	0.281301	0.000010	0.001639	0.000012	0.051306	0.000316	2475	0.281223	0.75	2.77	2.93	-0.95
08YS-21												
B27	0.281173	0.000010	0.001016	0.000017	0.037591	0.000831	2474	0.281125	-2.76	2.90	3.15	-0.97
B28	0.281208	0.000009	0.000481	0.000008	0.016198	0.000255	2474	0.281185	-0.62	2.81	3.02	-0.99
B29	0.281295	0.000007	0.000510	0.000001	0.016364	0.000045	2474	0.281271	2.42	2.70	2.83	-0.98
B30	0.281455	0.000007	0.001523	0.000007	0.054501	0.000247	2474	0.281383	6.43	2.55	2.59	-0.95
B31	0.281308	0.000010	0.001040	0.000012	0.032425	0.000304	2474	0.281258	1.99	2.71	2.86	-0.97
B32	0.281239	0.000007	0.000556	0.000004	0.018048	0.000129	2474	0.281212	0.35	2.77	2.96	-0.98
B33	0.281448	0.000009	0.001420	0.000006	0.049831	0.000260	2474	0.281380	6.33	2.55	2.59	-0.96
B34	0.281269	0.000009	0.000682	0.000018	0.022280	0.000554	2474	0.281236	1.21	2.74	2.91	-0.98
B35	0.281352	0.000009	0.001170	0.000010	0.036965	0.000263	2474	0.281296	3.33	2.66	2.78	-0.96
B36	0.281311	0.000009	0.000858	0.000003	0.031133	0.000122	2474	0.281271	2.43	2.70	2.83	-0.97
B38	0.281376	0.000009	0.001106	0.000013	0.039000	0.000430	2474	0.281324	4.31	2.63	2.72	-0.97
B39	0.281242	0.000011	0.000515	0.000002	0.017633	0.000075	2589	0.281217	3.17	2.77	2.87	-0.98
B40	0.281250	0.000007	0.000516	0.000006	0.014837	0.000147	2474	0.281225	0.82	2.76	2.93	-0.98
B41	0.281308	0.000011	0.000898	0.000008	0.028337	0.000283	2474	0.281266	2.25	2.70	2.84	-0.97
B42	0.281369	0.000008	0.000881	0.000013	0.029122	0.000459	2474	0.281327	4.43	2.62	2.71	-0.97
B44	0.281246	0.000009	0.000717	0.000005	0.023249	0.000095	2474	0.281212	0.33	2.78	2.96	-0.98
B45	0.281373	0.000010	0.001086	0.000013	0.037881	0.000437	2474	0.281322	4.24	2.63	2.72	-0.97
B47	0.281296	0.000009	0.000752	0.0000753	0.026184	0.043812	2474	0.281260	2.04	2.71	2.85	-0.98
B48	0.281443	0.000010	0.001456	0.000008	0.049104	0.000291	2474	0.281375	6.12	2.56	2.61	-0.96
B49	0.281352	0.000010	0.001031	0.000006	0.035714	0.000193	2474	0.281303	3.58	2.65	2.76	-0.97
B50	0.281226	0.000007	0.000317	0.000001	0.009617	0.000053	2474	0.281211	0.30	2.77	2.96	-0.99

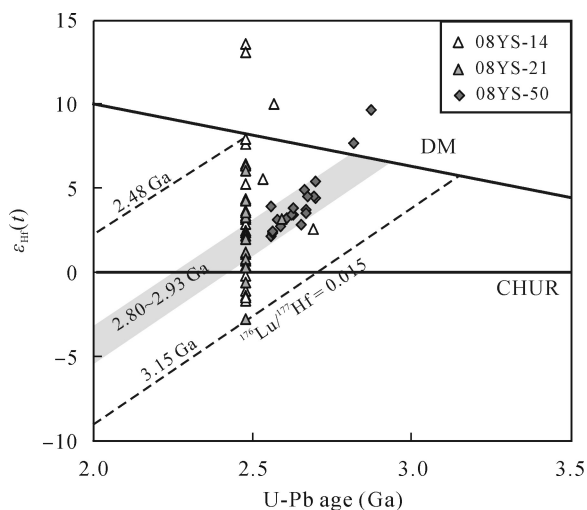


图 4 沂水混合岩锆石 U-Pb 年龄与 $\epsilon_{Hf}(t)$ 关系图

Fig.4 Age versus $\epsilon_{Hf}(t)$ diagram for zircons from the Yishui migmatites

的 Ce 正异常(δCe 变化于 1.0~109 之间)与强烈的 Eu 负异常(δEu 变化于 0.07~0.43 之间, 远小于 1), 显示岩浆锆石与热液锆石过渡的特征。并且在 $(Sm/La)_N$ -La 与 δCe - $(Sm/La)_N$ 等图解(图 6a 和 6b)中, 2 个样品的分析结果也同样分布于岩浆锆石与热液锆石的过渡区域, 暗示岩浆和热液过渡性质。然而, 近年来的研究显示, 岩浆和热液锆石的稀土特征主要取决于岩浆源区和热液的性质^[44-45], 而且进一步的锆石 Ti 含量温度计算显示(绝大部分大于 600 °C; 表 3), 所有锆石都显示出岩浆结晶的温度, 明显高于热液作用的特征(< 500 °C)^[44]。事实上, 部分显示岩浆型稀土特征的锆石与热液型的锆石都具有一致的上交点年龄(图 3c 和 3e), 也暗示其锆石的年龄代表的是深熔作用的信息, 其微量元素和同位素体系并未受到热液作用的明显改造。

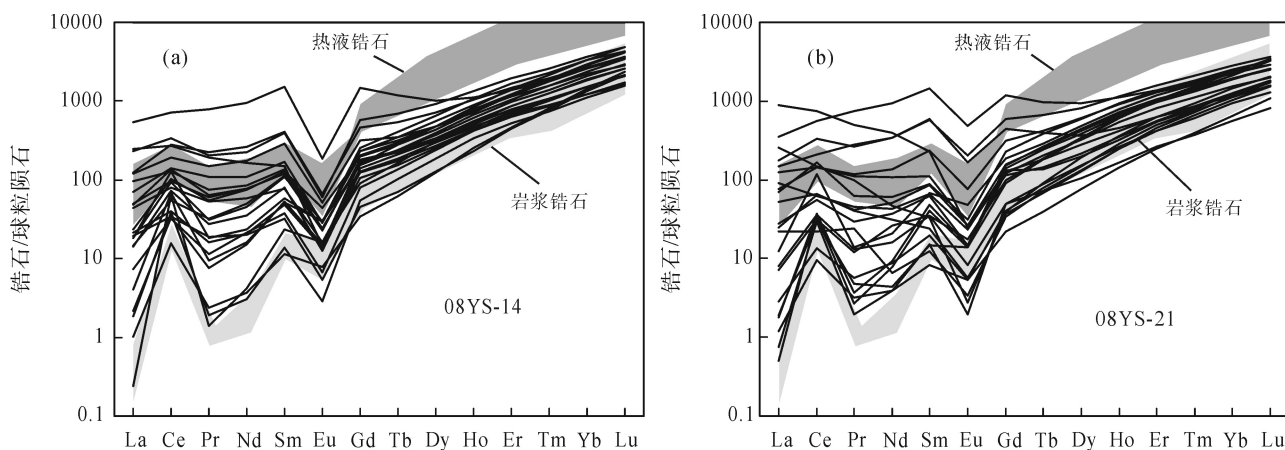


图 5 沂水地区大山混合岩锆石 REE 配分图(底图据文献[42])

Fig.5 REE patterns of zircons from the Dashan migmatites in the Yishui area (underdrawings after citation [42])

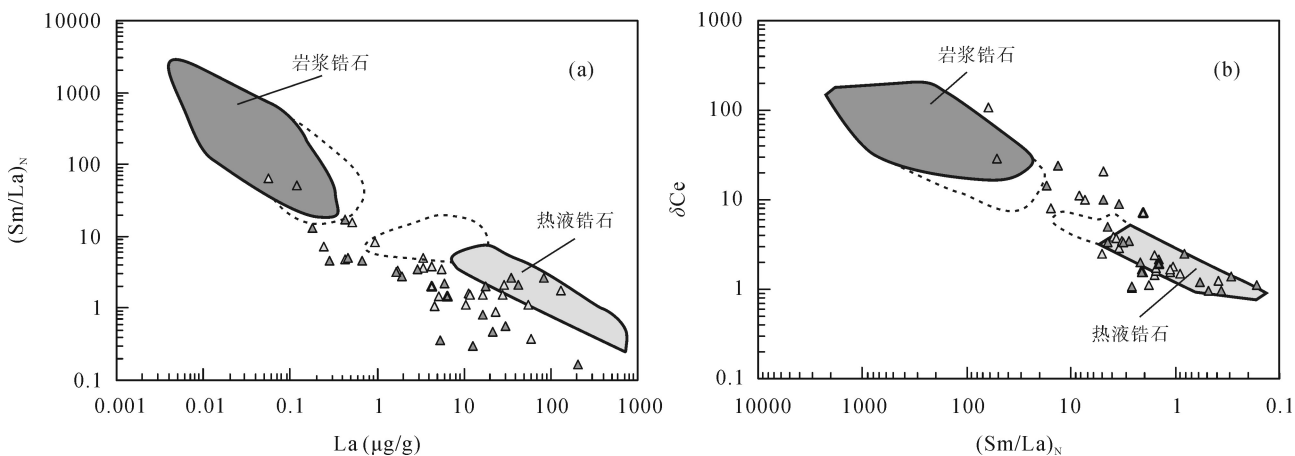


图 6 沂水地区大山混合岩锆石 $(Sm/La)_N$ -La($\mu g/g$) (a) 与 δCe - $(Sm/La)_N$ 相关图(b) (底图据文献[42])

Fig.6 $(Sm/La)_N$ versus La (a) and δCe versus $(Sm/La)_N$ (b) plots for zircons from the Dashan migmatites in the Yishui area (underdrawings after citation [42])

表3 大山混合岩的锆石微量元素组成($\mu\text{g/g}$)
Table 3 Trace element composition ($\mu\text{g/g}$) of zircons from Dashan migmatites

测点号	Nb	Ta	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	P	Ti	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(Sm/La) _N	t (°C)
08YS-14																								
B01	17.6	8.33	4.3	79	1.7	11	8.8	1.7	33	11	122	48	239	55	566	123	9606	477	14.8	0.31	7.1	0.0054	2.05	776
B02	12.4	5.03	5.4	205	19	104	61	3.5	120	26	234	77	324	67	622	122	9553	1094	9.46	0.13	1.6	0.0624	1.12	736
B03	15.0	12.9	130	441	75	439	230	10.7	305	44	261	62	229	46	442	89	11730	2908	38.2	0.12	1.1	0.2109	1.77	874
B04	9.21	6.42	59	166	18	77	23	0.8	35	8.3	87	31	145	32	318	66	12042	3521	8.37	0.09	1.2	0.1340	0.38	725
B05	1.89	0.91	0.5	20	0.7	7.0	8.1	0.9	29	7.8	81	27	116	23	208	41	9263	510	4.89	0.18	8.2	0.0018	15.6	682
B06	15.0	12.4	28	119	14	82	44	3.0	65	13	120	41	195	46	491	105	8887	3463	18.9	0.17	1.5	0.0409	1.57	800
B07	4.12	7.50	0.2	10	0.2	1.7	1.8	0.5	7.0	2.3	32	14	77	21	241	59	10182	185	4.17	0.40	10.1	0.0007	7.25	669
B08	5.30	7.15	4.6	21	1.8	9.5	4.8	0.3	9.3	2.7	33	13	74	19	225	55	14823	165	5.11	0.14	1.8	0.0146	1.05	685
B09	4.06	1.76	5.1	25	1.5	9.7	7.4	0.8	22	5.8	64	24	106	22	211	44	8931	332	63.2	0.20	2.2	0.0172	1.45	934
B10	11.0	4.79	17	86	10	52	26	1.6	48	12	120	44	188	40	372	72	10814	682	19.7	0.14	1.6	0.0320	1.55	804
B12	13.6	12.9	5.6	63	5.2	35	20	2.5	41	10	110	42	204	48	504	110	10683	317	19.7	0.27	2.9	0.0080	3.47	804
B13	6.40	3.47	0.4	23	0.2	1.4	2.1	0.2	11	3.9	47	19	87	19	192	40	12506	320	2.85	0.11	20.7	0.0016	4.88	641
B14	13.0	5.96	29	174	22	122	62	3.8	94	20	180	59	247	50	456	88	8046	7411	15.8	0.15	1.7	0.0459	2.12	783
B15	3.18	2.00	10	50	5.0	28	12	0.9	26	6.6	69	24	111	23	211	43	10038	2052	5.88	0.16	1.7	0.0354	1.13	696
B16	12.6	19.2	12	83	6.1	36	18	1.7	43	11	120	44	205	46	452	94	11671	778	5.81	0.19	2.4	0.0183	1.60	695
B17	10.8	7.98	4.3	57	3.0	21	17	1.7	48	13	142	51	226	49	462	91	12031	503	6.39	0.18	3.9	0.0066	3.87	703
B18	11.5	6.48	23	78	7.1	39	21	1.7	52	15	167	62	275	59	560	109	11663	973	4.79	0.15	1.5	0.0296	0.91	680
B19	7.45	4.37	3.3	45	2.6	17	12	0.7	26	7.1	75	27	121	27	262	54	12083	285	4.33	0.12	3.8	0.0091	3.70	672
B20	5.25	5.62	1.0	42	0.9	7.5	8.0	1.7	32	9.1	101	38	175	40	407	87	11215	249	5.60	0.34	11.0	0.0017	8.30	692
B22	6.45	6.79	0.1	39	0.1	1.9	3.6	0.9	19	6.1	77	30	144	32	316	65	11022	340	3.80	0.35	109.1	0.0001	62.8	662
B23	5.92	4.34	1.8	19	1.1	10	5.7	0.4	16	5.1	61	24	116	26	258	54	12187	254	3.96	0.12	3.4	0.0049	3.28	665
B24	3.94	1.39	3.4	33	3.0	23	17	1.3	37	8.7	85	29	132	28	261	53	8087	825	9.62	0.16	2.5	0.0094	5.07	737
B25	6.56	4.28	12	58	5.8	36	18	1.4	34	8.9	95	35	161	36	350	75	12567	780	42.2	0.18	1.7	0.0243	1.53	885

(续表 3)

测点号	Nb	Ta	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	P	Ti	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(Sm/La) _N	t (°C)
08YS-21																								
B27	7.08	3.32	6.5	34	2.8	17	9.4	0.8	25	7.5	82	31	135	28	259	51	11278	1026	5.37	0.17	2.0	0.0180	1.45	689
B28	3.86	2.23	0.2	18	0.2	1.8	2.3	0.1	10	3.3	39	15	69	15	157	32	11373	238	3.67	0.07	24.3	0.0008	13.2	660
B29	7.34	6.14	0.7	8	0.5	4.1	3.0	0.3	8.4	2.9	38	16	82	19	187	40	12855	191	4.37	0.19	3.4	0.0026	4.50	673
B30	12.5	6.05	18	89	11	63	36	4.4	65	16	156	51	215	43	381	73	11661	992	8.59	0.28	1.5	0.0338	2.02	728
B31	6.85	4.58	0.1	21	0.3	3.6	6.2	0.8	29	9.0	99	36	161	34	321	65	10854	291	1.32	0.19	29.2	0.0003	51.4	589
B32	10.0	10.7	210	451	48	184	35	1.4	27	5.0	50	18	90	20	211	46	12291	10699	8.10	0.14	1.1	0.7127	0.17	723
B33	12.0	4.73	17	101	5.9	28	14	1.8	47	14	150	53	225	46	423	82	9727	2242	4.61	0.22	2.5	0.0280	0.82	677
B34	2.94	1.04	1.9	22	1.2	7.4	5.4	0.5	10	2.7	27	10	43	10	96	20	11429	195	5.80	0.20	3.5	0.0144	2.81	695
B35	6.59	4.69	35	127	26	160	90	9.7	92	15	92	26	104	22	214	43	10931	310	18.8	0.32	1.0	0.1166	2.59	800
B36	4.81	2.10	0.4	23	0.3	4.3	7.3	0.8	31	9.9	113	41	175	36	331	64	10065	251	4.16	0.17	14.7	0.0009	17.4	669
B38	13.6	5.76	42	202	25	159	87	11.7	123	25	206	64	261	54	484	93	9791	763	19.3	0.34	1.5	0.0616	2.09	802
B39	1.94	0.76	22	38	4.3	20	10	1.3	26	6.9	70	23	103	21	202	44	11527	309	3.86	0.25	1.0	0.0766	0.48	664
B40	6.67	7.98	5.3	13	2.3	3.0	1.9	0.2	6.9	2.7	33	14	75	18	197	43	12350	174	1.50	0.16	0.9	0.0192	0.36	598
B41	4.46	2.92	1.7	19	1.2	12	5.3	1.0	21	6.9	86	35	169	39	390	86	9559	409	4.50	0.30	3.4	0.0031	3.13	675
B42	4.05	2.71	0.5	19	0.5	2.1	2.2	0.8	19	6.8	85	35	163	37	362	82	9939	363	1.96	0.38	10.1	0.0009	4.92	615
B44	2.59	0.68	13	40	3.8	15	3.7	0.3	7.6	2.6	32	14	69	17	175	38	8696	279	7.81	0.19	1.4	0.0517	0.29	720
B45	5.82	5.29	30	88	11	51	17	1.5	23	5.4	56	20	92	21	209	45	12084	1197	1.80	0.23	1.2	0.1025	0.57	610
B46	6.64	6.41	3.0	71	1.3	9.6	10	2.8	38	11	121	44	197	41	399	84	11761	3481	4.45	0.43	8.8	0.0053	3.50	674
B47	8.69	9.12	61	89	9.5	22	5.0	0.2	8.0	3.4	48	20	104	24	248	52	12913	361	5.76	0.08	0.9	0.1774	0.08	695
B48	10.0	6.13	84	338	72	438	222	28.3	245	36	240	63	225	45	398	74	9894	688	13.7	0.37	1.1	0.1514	2.65	769
B49	7.87	3.55	5.9	40	4.0	24	13	1.5	33	9.5	106	38	170	35	329	65	10333	1316	5.84	0.23	2.0	0.0129	2.19	696
B50	4.58	2.60	0.3	6	0.3	1.8	1.3	0.3	4.5	1.5	19	8	41	10	111	27	11533	91	4.18	0.40	4.9	0.0018	4.47	670

注: 锆石 Ti 含量温度 t (°C) 计算据文献[43]。

Note: Ti-in-Zircon temperature was calculated after citation [43].

4 讨论

4.1 U-Pb 年代学意义

4.1.1 九层岭混合岩

样品 08YS-50 的锆石 2556~2695 Ma 序列中较老的 3 个和最年轻的 4 个测点分布相对集中, 加权平均年龄计算得到 2 个年龄结果(2693±11) Ma (MSWD = 0.15)和(2558±9) Ma (MSWD = 0.09), 结合区域地质背景, 我们认为能够反映该区岩浆作用演化信息^[46]。

(2693±11) Ma (MSWD = 0.15) 代表早期一部分熔融事件的时间, 理由是: (1) 约 2.7 Ga 是在全球范围内可对比的重要构造热事件, 而 Wan *et al.*^[22]也揭示了鲁西地区 2.75~2.70 Ga 的地壳增生及新生地壳改造事件, 考虑误差范围(2693±11) Ma 与这一年龄相一致; (2) 赵子然等^[47]在沂水杂岩变质碎屑锆石中得到了(2695±32) Ma 的上交点年龄; (3) 最老的 3 个数据点相对较集中, 并且所测锆石中有的具有规则的晶型、充分发育的震荡环带以及高 Th/U 比值(0.26~0.54)等明显是岩浆锆石的特征(区别于 2558 Ma 的深熔锆石), 代表了区域上一次重要岩浆事件的记录。

(2558±9) Ma (MSWD = 0.09) 约 2.5 Ga 代表的是鲁西地区一次强烈的岩浆作用活动。这与沂水地区岩浆热作用事件记录相一致(如: (2545±10) Ma、(2562±14) Ma^[21]; (2532±9) Ma、(2538±6) Ma^[48]; (2543±8) Ma^[20]), 说明九层岭混合岩是同一时期的产物。4 颗最年轻锆石数据相对集中, Th/U 比值稍大于 0.1 (0.10~0.26)且具有较规则外形和可见的岩浆环带表明其深熔锆石成因^[6,49]。因此, (2558±9) Ma 代表最近的混合岩化作用的时间。

对于中间高度谐和且连续的年龄(2577~2668 Ma), 可能记录了 2693~2558 Ma 两期重熔事件也遭受复杂的变质深熔作用的影响。由于混合岩化作用发生于深部地壳, 因而具有较长可达 30 Ma 的持续时间^[50], 九层岭混合岩锆石 140 Ma 时间延续记录表明曾经历了多期的热事件影响。沂水地区同样的记录也有见报道^[36], 说明多期次岩浆作用事件在该区域发生的普遍性。

关于沂水地区最老的岩浆作用, 沈其韩等^[24]曾认为以马山岩体为代表时代在 2706 Ma; 近年新的锆石 U-Pb 定年结果为新太古代晚期 2562 Ma^[51]。然

而最近, 赵子然等^[52]在沂水青龙峪的基性(超基性)岩捕获锆石中获得了 2657~2702 Ma 的岩浆结晶年龄和 2551~2585 Ma 的新生变质年龄, 九层岭混合岩锆石中 2693 Ma 和 2558 Ma 的年龄记录与这两次事件可对比, 表明沂水地区也存在 2.7 Ga 的岩浆作用事件并遭受了 2.5 Ga 热事件的影响改造。

4.1.2 大山混合岩

大山混合岩锆石具较高的 Th/U 比值(大部分大于 0.5, 整体大于 0.1) (表 1), HREE 的强烈富集和 LREE 的中度-强烈亏损, 以及中等-强的 Ce 正异常与强烈的 Eu 负异常的岩浆-热液锆石的 REE 分布特征^[6,53]及相对集中的 U-Pb 年龄测定结果(图 3d 和 3f), 表明原岩遭受混合岩化作用较强, 变质深熔熔体中有新生岩浆锆石的生成。从而两个样品所测得的一致的结果(2475±14) Ma (MSWD = 0.65)应记录的是深熔熔体的结晶年龄, 也即混合岩化作用的年龄。事实上, 区域上该时期的岩浆活动最近已经被陆续揭露出来, 如: Wan *et al.*^[11]根据岩浆基底出露的构造时空展布对该区的划分总结, 有少量((2480±7) Ma 和 (2481±17) Ma^[14])分布于东北部 A 带; 最近 Peng *et al.*^[23]也报道了鲁西地区夏家庄高 Ba-Sr 花岗岩侵入时间为(2469±12) Ma。因此, 约 2.48 Ga 的岩浆事件在鲁西花岗绿岩区是一次重要构造热事件。实际上, Wang *et al.*^[54]在对东部地块胶北地区研究中得到 TTG 片麻岩中(2488±9) Ma 的变质深熔时间及基性岩中(2484±7) Ma 的岩浆结晶时间, 并提出新太古代晚期东部地块作为统一单元经历了 2.49~2.48 Ga 普遍的地壳新生与再造的岩浆构造作用。我们的分析结果也从鲁西地区进一步提供了支持。

4.2 岩浆源区示踪

4.2.1 九层岭混合岩

由于锆石在结晶时继承寄主岩浆 Hf 同位素组成^[7,55-57], 并且具有很高的甚至大于 U-Pb 体系的对 Lu-Hf 体系封闭温度^[7,58], 因而即使经历高级变质作用如麻粒岩相仍能反映岩浆源区的 Hf 同位素特征^[7](根据衰变原理计算的初始组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)。同时锆石又具有很高的 U-Pb 体系封闭温度^[59-60](850 °C)而在岩浆作用早期就结晶出来, 因而锆石的 Hf 同位素组成是其原岩的同位素组成特征的反应^[7-8]。

九层岭混合岩(08YS-50)锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 较高的正值(+2.42~+5.46)指示来自新生基性地壳的重熔^[61]。如图 4 所示, 2556~2695 Ma 锆石的初始 Hf 同位素组成呈线性分布且遵从平均地壳组成($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} =$

0.015)的演化趋势,反映在二阶段模式年龄上则分布于较集中范围(2.80~2.93 Ga)内,说明供应源区地壳物质组成的单一性。对于两个 2817 Ma 和 2868 Ma 的锆石,虽然它们确切的 Hf 同位素信息可能由于实验误差未能获得,但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与地壳增生时间 2.8~2.9 Ga 吻合,并且考虑九层岭混合岩锆石所指示 Lu-Hf 体系未受明显外来物质的贡献,它们很可能是形成于 2.80~2.93 Ga 新生地壳经过极短停留时间即发生的重熔,因为直接来自地幔的熔体由于 Zr 不饱和和很难形成锆石^[57]。另外,目前发表的大量花岗岩类锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大,绝大部分大于 2 个 ε 单位,暗示花岗岩类形成与侵位过程中就同位素体系而言受混合或混染作用影响的普遍性(岩浆在上升过程中与围岩发生混染,能使得围岩组分进入岩浆而导致岩浆演化期间的 Hf 同位素变化^[62]);而若大致以 0.06 Ga 模式年龄对应 1 个 ε 单位,则每一时间片段(0.13 Ga)内即变化为约 2 个 ε 单位。由此我们认为九层岭混合岩从原岩的形成到其后 2556~2695 Ma 间发生的多期次部分熔融可能未做长距离上侵,仅就位于中深地壳部位而形成封闭环境^[63]。由以上锆石年龄与 Hf 同位素记录,九层岭混合岩自起源的新生地壳形成与随即的重熔(2.8~2.9 Ga),经历 2.7 Ga ((2693±11) Ma)与 2.5 Ga ((2558±9) Ma)两期区域性的强烈岩浆事件(及其间的多次重熔)在达 300 Ma 的地质历史保持了体系的封闭性而整体遵从单一系统的演化分异^[8]。

4.2.2 大山混合岩

明显不同于前者,大山混合岩(08YS-14和08YS-21)锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化很大,从-2.7 到+8.0 ($t = 2474$ Ma 和 2475 Ma,剔除 3 个异常高值),二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2} = 2.49\sim 3.15$ Ga,可能指示岩浆源区组成的复杂性,涉及新生地壳及古老地壳物质^[9,53]。最近, Tang *et al.*^[64]提出地壳重熔中熔体与原岩(锆石)的同位素不平衡(锆石的低溶解度及熔体快速分离)造成深熔花岗岩中 Hf 同位素分异较大的机制。而大山混合岩样品中 3 个继承锆石具有不同的 U-Pb 年龄(2528 Ma、2589 Ma 和 2687 Ma)与较大差异的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(对应于二阶段模式年龄 2.68 Ga、2.81 Ga 和 2.99 Ga),表明深熔源区的物质组成并非单一。在混合岩化作用过程中,深熔锆石的 Hf 同位素更多受控于邻近原岩中锆石,因新生锆石的结晶与继承锆石的(部分)溶解作用间隔较短以及 Zr 在熔体中的低扩散率从而阻止了同位素的均一化过程,进而同位素信息得以在老

的与新的锆石间传递^[65]。因此,大山混合岩的深熔锆石 Hf 同位素组成的较大变化性是其原岩富含的锆石复杂组成(保存不同的 U-Pb 结晶年龄、显示不同 $t_{\text{DM}2}$ 信息的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)的反映。

由图 4, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 绝大部分位于亏损地幔(DM)和球粒陨石(CHUR)演化线之间,说明大山混合岩形成中岩浆源区新生地壳物质或者未受明显再造的深部地壳物质占很大比例。2 个具高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的点位于和靠近 DM 演化线,相应的单阶段模式年龄 $t_{\text{DM}1} = 2.48$ Ga 和 2.50 Ga,与 U-Pb 年龄 2475 Ma 的结果极为接近,说明有来源于亏损地幔物质的参与^[9]。同时,由于地幔部分熔融只能产生玄武质至多到安山质熔体^[57],而基性玄武质岩浆混合(混染)地壳熔体只能生成中间组分的(花岗)闪长质岩浆^[66],所以混合岩(08YS-14 和 08YS-21)的花岗质原岩应是亏损地幔熔体底侵于下地壳经过极短的停留时间发生重熔的产物^[67],重熔中形成的熔体与围岩古老地壳物质混染或者熔融源区中有古老地壳物质的参与。考虑深熔锆石记录的 $t_{\text{DM}2} = 2.49\sim 3.15$ Ga,而继承锆石 $t_{\text{DM}2} = 2.68\sim 2.99$ Ga 均具有较大变化,我们认为大山混合岩锆石记录的 Hf 同位素组成变化不只是初始熔融源区中新生地幔物质(约 2.5 Ga)与古老地壳物质(约 3.1 Ga)两端元混合均一化过程的结果,其源区组成中可能也有约 2.6 Ga 至约 2.9 Ga 的地壳物质的参与(如九层岭混合岩所揭示 2.80~2.93 Ga 增生地壳的循环)。总之,大山混合岩是约 2.48 Ga 的基性地幔物质底侵作用下促使涉及有不同的新生及古老物质复合的源区重熔而形成。

4.3 构造意义

图 7 和表 2 结果显示,研究区锆石 Hf 二阶段模式年龄峰值为 2.8~2.9 Ga,这与东部陆块 2.8 Ga 显著的地壳增生事件年龄相一致(由全岩 Nd 同位素二阶段模式年龄揭示,另一幕为约 3.4 Ga^[68]),表示沂水地区曾发生 2.8~2.9 Ga 的重要的壳-幔分异事件。而 Wu *et al.*^[36]针对沂水地区表壳岩及变质侵入岩中的锆石 Hf 分析获得二阶段模式年龄峰值为 2.7~2.8 Ga,然而缺乏 2.84~2.90 Ga 间的数据。前人研究如 Wan *et al.*^[22]据鲁西泰山地区 3.51~2.92 Ga 锆石 Hf 模式年龄的记录及 3.6 Ga 的继承锆石年龄推测可能有大于 3.0 Ga 的深藏于地壳下部的古老基底岩石。因此,针对以上不同的结果,我们认为是沂水地区可能存在位于深部地壳孤立体系的 2.8 Ga 基底及演

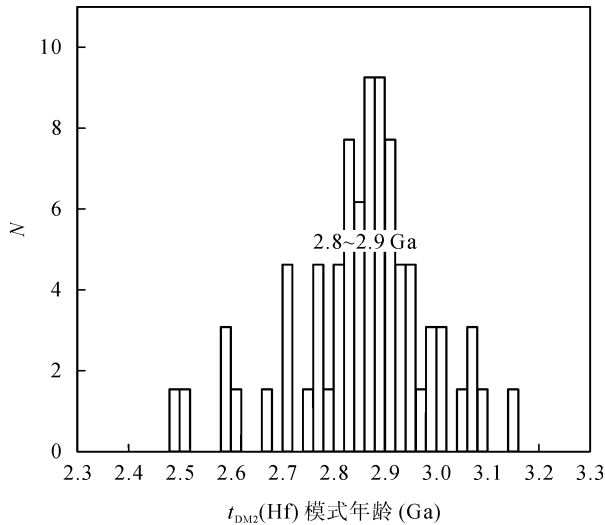


图7 沂水混合岩锆石 Hf 二阶段模式年龄分布图

Fig.7 Distribution of $t_{DM2}(Hf)$ model ages of the zircons from the migmatites in the Yishui area

化地体的反映。首先九层岭混合岩锆石记录了寄主岩浆岩体 Lu-Hf 体系均一且单一性演化代表的封闭系统；其次，以上锆石 Hf 揭示的明显不同的壳幔分离时间(2.8~2.9 Ga 和 2.7~2.8 Ga)同样暗示 2.8~2.9 Ga 的新生及其演化地壳物质主要赋存于地壳深部而并未明显出露浅部地表剥蚀；而且沂水是鲁西麻粒岩相变质发育的主要地区而不同于该花岗绿岩区的其他地区^[51,69]，而麻粒岩相变质作用的广泛发育指示存在稳定的下地壳^[70]。稳定的独立封闭环境使得地质体(九层岭混合岩)经历并且保存了沂水及至鲁西地区 3 期重要的地质事件：2.8~2.9 Ga 的亏损地幔熔体底侵事件(模式年龄，新生地壳意义^[7])；约 2.7 Ga 在华北克拉通“被抹去了的”具全球意义的重要岩浆作用^[11,22]；及约 2.5 Ga 华北克拉通有别于其他各大典型太古宙地区的强烈的岩浆活动^[11,20,22,23,71,72]。相比于 2.5 Ga 热事件对鲁西其他地区的强烈改造，如果这一结果对应的是沂水地区影响有限的话(对九层岭混合岩(2693±11) Ma 熔融事件的不彻底改造)，则加之 2 个 2817 Ma 和 2868 Ma 锆石的存在，更进一步暗示了古老基底(约 2.8 Ga)残存的可能性。同时，可能位于板片俯冲方向(南西-北东向^[11])后方较稳定的背景环境，不同时间(2.48~2.99 Ga，大山混合岩 Hf 模式年龄)从亏损地幔分离出的地壳物质囤积于下地壳(校正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值暗示较少的循环再造)；由于约 2.54 Ga 俯冲作用由低角度(平缓)转为高角度^[20,71]地幔物质上涌对该地区的影响作用加大，约 2.48 Ga 的构造热事件促使这一多个时代形成的地壳物质复合源区发生的深熔导致大山混合岩的形成，其中并

有对古老地壳(3.15 Ga, 08YS-21)的再造。

感谢张德圣博士在野外考察和样品收集方面的帮助。本研究也得到了中国科学院地球化学研究所高剑峰百人计划项目的资助，在此表示感谢。此外，也要感谢审稿老师和编辑部老师的建设性意见对文章的改进。

参考文献(References):

- [1] Brown M. Orogeny, migmatites and leucogranites: A review [J]. *J Earth Syst Sci*, 2001, 110(4): 313–336.
- [2] Rubatto D, Hermann J, Berger A, Engi M. Protracted fluid-induced melting during Barrovian metamorphism in the Central Alps [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2009, 158(6): 703–722.
- [3] Andersson J, Möller C, Johansson L. Zircon geochronology of migmatite gneisses along the Mylonite Zone (S Sweden): A major Sveconorwegian terrane boundary in the Baltic Shield [J]. *Precamb Res*, 2002, 114(1): 121–147.
- [4] Faccenda M, Gerya T V, Chakraborty S. Styles of post-subduction collisional orogeny: Influence of convergence velocity, crustal rheology and radiogenic heat production [J]. *Lithos*, 2008, 103(1): 257–287.
- [5] Keay S, Lister G, Buick I. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece [J]. *Tectonophysics*, 2001, 342(3): 275–312.
- [6] 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[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604. Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogical study of zircon and its constrain on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [7] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220. Wu Fu-yuan, Li Xian-hua, Zheng Yong-fei, Gao Shan. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- [8] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61(3): 237–269.
- [9] Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, Zhang S B, Liu X M, Wu F Y. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogeny [J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(1/2): 135–158.
- [10] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precamb Res*, 2005, 136(2): 177–202.
- [11] Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, Dong C Y, Yang E X, Wang W, Zhou H Y, Ning Z G, Du L L, Yin X Y, Xie H Q, Ma M Z. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China

- Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating [J]. *Am J Sci*, 2010, 310(10): 1503–1552.
- [12] 曹国权, 王致本, 张成基. 鲁西早前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1–210.
Cao Guo-quan, Wang Zhi-ben, Zhang Cheng-ji. Early Precambrian Geology of Western Shandong [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1–210 (in Chinese).
- [13] 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社, 王世进, 张连峰. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义[J]. 地质学报, 2003, 77(3): 359–366.
Du Li-lin, Zhuang Yu-xun, Yang Chong-hui, Wan Yu-sheng, Wang Xin-she, Wang Shi-jin, Zhang Lian-feng. Characters of zircons in the Mengjiatun Formation in Xintai of Shandong and their chronological significance [J]. *Acta Geol Sinica*, 2003, 77(3): 359–366 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陆松年, 陈志宏, 相振群. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–90.
Lu Song-nian, Chen Zhi-hong, Xiang Zhen-qun. Geochronological Framework of Ancient Intrusions in Taishan Geopark [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–90 (in Chinese).
- [15] Jahn B M, Auvray B, Shen Q H. Archean crustal evolution in China: The Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle [J]. *Precamb Res*, 1988, 38(4): 381–403.
- [16] Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton [J]. *Am J Sci*, 2008, 308(3): 200–231.
- [17] Wan Y S, Liu D Y, Nutman A. Multiple 3.8–3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton [J]. *J Asian Earth Sci*, 2012, 54(4): 18–30.
- [18] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton [J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339–342.
- [19] Song B, Nutman A P, Liu D Y, Wu J S. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China [J]. *Precamb Res*, 1996, 78(1/3): 79–94.
- [20] Peng T P, Fan W M, Peng B X. Geochronology and geochemistry of late Archean adakitic plutons from the Taishan granite-greenstone Terrain: Implications for tectonic evolution of the eastern North China Craton [J]. *Precamb Res*, 2012, 208: 53–71.
- [21] 沈其韩, 宋彪, 徐惠芬, 耿元生, 沈昆. 山东沂水太古宙蔡峪和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 275–284.
Shen Qi-han, Song Biao, Xu Hui-fen, Geng Yuan-sheng, Shen Kun. Emplacement and metamorphism ages of the Caiyu and Dashan igneous bodies, Yishui County, Shandong Province: zircon SHRIMP chronology [J]. *Geol Rev*, 2004, 50(3): 275–284 (in Chinese with English abstract).
- [22] Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, Yang E X, Wang W, Dong C Y, Zhou H Y, Du L L, Yang Y H, Diwu C R. ~ 2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon [J]. *Precamb Res*, 2011, 186(1/4): 169–180.
- [23] Peng T P, Wilde S A, Fan W M, Peng B X. Late Neoproterozoic potassic high Ba-Sr granites in the Taishan granite-greenstone terrane: Petrogenesis and implications for continental crustal evolution [J]. *Chem Geol*, 2013, 344: 23–41.
- [24] 沈其韩, 沈昆, 耿元生. 山东沂水杂岩的组成与地质演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1–230.
Shen Qi-han, Shen Kun, Geng Yuan-sheng. The Composition and Evolution of the Yishui Complex, Shandong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1–230 (in Chinese with English abstract).
- [25] 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 刘敦一, 厉子龙, 赵敦敏. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 10–11.
Wu Jia-shan, Geng Yuan-sheng, Shen Qi-han, Liu Dun-yi, Li Zi-long, Zhao Dun-min. Geological Key Events of the North China Platform in Early Precambrian [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 10–11 (in Chinese).
- [26] 沈其韩, 钱祥麟. 中国太古代地质体成分、阶段划分和演化[J]. 地球学报, 1995 (2): 113–120.
Shen Qi-han, Qian Xiang-lin. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China [J]. *Acta Geosci Sinica*, 1995 (2): 113–120 (in Chinese with English abstract).
- [27] 宋明春. 山东省大地构造格局和地质构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
Song Ming-chun. Tectonic framework and tectonic evolution of the Shandong province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 张富中. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 山东国土资源, 2008, 24(1): 10–20.
Wang Shi-jin, Wan Yu-sheng, Zhang Cheng-ji, Yang En-xiu, Song Zhi-yong, Wang Li-fa, Zhang Fu-zhong. Major advance in early Precambrian geology of Western Shandong Province [J]. *Shandong Geol*, 2008, 24(1): 10–20 (in Chinese with English abstract).
- [29] 耿科, 李洪奎, 梁太涛, 褚传源, 张玉波. 鲁西陆块前寒武纪大地构造演化[J]. 山东国土资源, 2014, 30(7): 1–8.
Geng Ke, Li Hong-kui, Liang Tai-tao, Zhuo Chuan-yuan, Zhang Yu-bo. Precambrian tectonic evolution of Luxi Landmass [J]. *Shandong Geol*, 2014, 30(7): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [30] Kröner A, Cui W Y, Wang S Q. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China [J]. *J Asian Earth Sci*, 1998, 16(5): 519–532.
- [31] Polat A, Li J, Fryer B. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic (2800–2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China Craton: Evidence for plume-craton interaction [J]. *Chem Geol*, 2006, 230(1): 60–87.
- [32] Wang W, Yang E X, Zhai M G, Wang S J, Santosh M, Du L L, Xie H Q, Lv B, Wan Y S. Geochemistry of ~ 2.7 Ga basalts

- from Taishan area: Constraints on the evolution of early Neoproterozoic granite-greenstone belt in western Shandong Province, China [J]. *Precamb Res*, 2013, 224: 94–109.
- [33] 庄育勋, 王新社, 徐洪林, 任志康, 张富中, 张锡明. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 313–330.
Zhuang Yu-xun, Wang Xin-she, Xu Hong-lin, Ren Zhi-kang, Zhang Fu-zhong, Zhang Xi-ming. Main geological events and crustal evolution in Early Precambrian of Taishan region [J]. *Acta Petrol Sinica*, 1997, 13(3): 313–330 (in Chinese with English abstract).
- [34] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *地质论评*, 2009, 55(2): 286–299.
Zhao Zi-ran, Song Hui-xia, Shen Qi-han, Song Biao. The petrogeochemical characters and SHRIMP U-Pb zircon ages of meta-mafic rocks from the Yishui Complex, in Yishui County, Shandong Province [J]. *Geol Rev*, 2009, 55(2): 286–299 (in Chinese with English abstract).
- [35] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun Min. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. *Precamb Res*, 2001, 107(1/2): 45–73.
- [36] Wu M L, Zhao G C, Sun M, Li S Z, He Y H, Bao Z. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Yishui Terrane: Implications for the crustal evolution of the Eastern Block, North China Craton [J]. *Lithos*, 2013, 170: 164–178.
- [37] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology [J]. *Chem Geol*, 2006, 234(1): 105–126.
- [38] Black L P, Kamo S L, Allen C M. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chem Geol*, 2003, 200(1): 155–170.
- [39] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J]. *地球化学*, 2011, 40(1): 83–98.
Tu Xiang-lin, Zhang Hong, Deng Wen-feng, Ling Ming-xing, Liang Hua-ying, Liu Ying, Sun Wei-dong. Application of RESOLUTION *in-situ* laser ablation ICP-MS in trace element analyses [J]. *Geochimica*, 2011, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract).
- [40] Steiger R H, Jäger E. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1977, 36(3): 359–362.
- [41] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4(1): 1–17.
- [42] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(3): 637–648.
- [43] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 151(4): 413–433.
- [44] Fu B, Mernagh T P, Kita N T. Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia [J]. *Chem Geol*, 2009, 259(3): 131–142.
- [45] Wang A D, Liu Y C, Gu X F, Hou Z H, Song B. Late-Neoproterozoic magmatism and metamorphism at the southeastern margin of the North China Craton and their tectonic implications [J]. *Precamb Res*, 2012, 220–221: 65–79.
- [46] Wan Y, Liu D, Dong C. U-Th-Pb behavior of zircons under high-grade metamorphic conditions: A case study of zircon dating of meta-diorite near Qixia, eastern Shandong [J]. *Geosci Front*, 2011, 2(2): 137–146.
- [47] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 沂水杂岩中变泥砂质岩石的岩石化学特征及年代[J]. *岩石学报*, 2009, 25(8): 1863–1871.
Zhao Zi-ran, Song Hui-xia, Shen Qi-han, Song Biao. Geochemistry and age of a metapelite rock in the Yishui complex, Shandong Province [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2009, 25(8): 1863–1871 (in Chinese with English abstract).
- [48] 沈其韩, 赵子然, 宋彪, 宋会侠. 山东沂水新太古代马山和雪山岩体的地质, 岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代研究[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 180–186.
Shen Qi-han, Zhao Zi-ran, Song Biao, Song Hui-xia. Geology, petrology and SHRIMP zircon U-Pb dating of the Mashan and Xueshan granitoids in Yishui county, Shandong Province [J]. *Geol Rev*, 2007, 53(2): 180–186 (in Chinese with English abstract).
- [49] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据[J]. *地学前缘*, 2001, 8(3): 183–191.
Jian Ping, Cheng Yu-qi, Liu Dun-yi. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks [J]. *Earth Sci Front*, 2001, 8(3): 183–191 (in Chinese with English abstract).
- [50] Slagstad T, Hamilton M A, Jamieson R A. Timing and duration of melting in the mid orogenic crust: Constraints from U-Pb (SHRIMP) data, Muskoka and Shawanaga domains, Grenville Province, Ontario [J]. *Can J Earth Sci*, 2004, 41(11): 1339–1365.
- [51] 耿元生, 沈其韩, 任留东. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 1945–1966.
Geng Yuan-sheng, Shen Qi-han, Ren Liu-dong. Late Neoproterozoic to early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China Craton [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(7): 1945–1966 (in Chinese with English abstract).
- [52] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 沂水青龙峪超镁铁质岩石和基性麻粒岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 551–563.
Zhao Zi-ran, Song Hui-xia, Shen Qi-han, Song Biao. Zircon SHRIMP U-Pb dating of ultramafic rock and mafic granulite from Qinglongyu in Yishui County, Shandong Province [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(2): 551–563 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [53] Belousova E, Griffin W L, O'reilly S Y, Fisher N. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143(5): 602–622.
- [54] Wang W, Zhai M G, Li T S, Santosh M, Zhao L, Wang H Z. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the eastern North China Craton: Zircon U-Th-Pb and Lu-Hf evidence from the Jiaobei terrane [J]. *Precambrian Research*, 2014, 241: 146–160.
- [55] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 252–255.
- [56] Kinny P D, Maas R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53(1): 327–341.
- [57] 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 唐俊, 赵子福, 吴元保. 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[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 317–330.
Zheng Yong-fei, Chen Ren-xu, Zhang Shao-bing, Tang Jun, Zhao Zi-fu, Wu Yuan-bao. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogeny [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(2): 317–330 (in Chinese with English abstract).
- [58] Patchett P J. Importance of the Lu-Hf isotopic system in studies of planetary chronology and chemical evolution [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1983, 47(1): 81–91.
- [59] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 159–162.
- [60] Coleman D S, Gray W, Glazner A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California [J]. *Geology*, 2004, 32(5): 433–436.
- [61] Corfu F, Noble S R. Genesis of the southern Abitibi greenstone belt, Superior Province, Canada: Evidence from zircon Hf isotope analyses using a single filament technique [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(5): 2081–2097.
- [62] 刘敏, 赵志丹, 管琪, 董国臣, 莫宣学, 刘勇胜, 胡兆初. 西藏聂荣微陆块早侏罗世中期花岗岩及其包体的岩浆混合成因: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 1931–1937.
Liu Min, Zhao Zhi-dan, Guan Qi, Dong Guo-chen, Mo Xuan-xue, Liu Yong-sheng, Hu Zhao-chu. Tracing magma mixing genesis of the middle Early-Jurassic host granites and enclaves in Nyainrong microcontinent, Tibet from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(7): 1931–1937 (in Chinese with English abstract).
- [63] 冯佐海, 王春增, 王葆华. 花岗岩侵位机制与成矿作用[J]. *桂林工学院学报*, 2009, 29(2): 183–194.
Feng Zuo-hai, Wang Chun-zeng, Wang Bao-hua. Granite magma ascent and emplacement mechanisms and their relation to mineralization process [J]. *J Guilin Univ Technol*, 2009, 29(2): 183–194 (in Chinese with English abstract).
- [64] Tang M, Wang X L, Shu X J, Wang D, Yang T, Gopon P. Hafnium isotopic heterogeneity in zircons from granitic rocks: Geochemical evaluation and modeling of “zircon effect” in crustal anatexis [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 389: 188–199.
- [65] Farina F, Stevens G, Gerdes A, Frei D. Small-scale Hf isotopic variability in the Peninsula pluton (South Africa): The processes that control inheritance of source $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ diversity in S-type granites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2014, 168(4): 1–18.
- [66] 路凤香, 桑隆康, 邬金华, 廖群安. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–398.
Lu Feng-xiang, Sang Long-kang, Wu Jin-hua, Liao Qun-an. *Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1–398 (in Chinese).
- [67] Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li X H, Li Z X, Wu F Y. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust [J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 127–150.
- [68] Wu F, Zhao G, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 523–545.
- [69] 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 钱祥麟. 鲁西地块早前寒武纪构造-岩浆活动区划及演化的新认识[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(2): 239–248.
Hou Gui-ting, Li Jiang-hai, Jin Ai-wen, Qian Xiang-lin. New comment on the early Precambrian tectono-magmatic subdivision and evolution in the Western Shandong block [J]. *Geol J China Univ*, 2004, 10(2): 239–248 (in Chinese with English abstract).
- [70] 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[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 818–825.
Peng Peng, Zhai Ming-guo. Two major Precambrian geological events of north China block (NCB): Characteristics and property [J]. *Adv Earth Sci*, 2002, 17(6): 818–825 (in Chinese with English abstract).
- [71] Wang Y J, Zhang Y Z, Zhao G C, Fan W M, Xia X P, Zhang F F, Zhang A M. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic subduction in the Eastern Block, North China Craton [J]. *Precamb Res*, 2009, 174(3/4): 273–286.
- [72] Peng T P, Wilde S A, Fan W M, Peng B X. Neoproterozoic siliiceous high-Mg basalt (SHMB) from the Taishan granite-greenstone terrane, Eastern North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precamb Res*, 2013, 228: 233–249.