

中条山涑水杂岩中 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素特征及其形成环境*

郭丽爽 刘树文** 刘玉琳 田伟 余盛强 李秋根 吕勇军

GUO LiShuang, LIU ShuWen**, LIU YuLin, TIAN Wei, YU ShengQiang, LI QiuGen and LÜ YongJun

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2007-04-23 收稿, 2007-12-06 改回.

Guo LS, Liu SW, Liu YL, Tian W, Yu SQ, Li QG and Lü YJ. 2008. Zircon Hf isotopic features of TTG gneisses and formation environment of Precambrian Sushui complex in Zhongtiao mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1):139–148

Abstract The Precambrian Sushui Complex in Zhongtiao Mountain is composed principally of Xiyao and Zhaizi TTG gneisses, Henglingguan and Beiyu calc-alkaline granitoids. SHRIMP zircon U-Pb dating for Xiyao TTG gneiss yield the weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of $2536 \pm 8\text{Ma}$, revealing that it was formed in the Neoproterozoic. In-situ zircon Lu-Hf isotopic analyses of Xiyao and Zhaizi TTG gneisses and Henglingguan-Beiyu calc-alkaline granitoids show that the magmatic zircons have positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, and these $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are plotted within the evolution areas of the 2600 ~ 3100Ma old continental crust in the age vs. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagrams. The analytical spots of three inherited zircon cores from the Beiyu calc-alkaline granitoid yield a weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of $2633 \pm 84\text{Ma}$, and the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of these inherited cores of magmatic zircon grains are, $-2.0 \sim +5.6$. The characteristics of zircon SHRIMP U-Pb ages and Hf isotope compositions of these TTG gneisses and calc-alkaline granitoids from the Precambrian Sushui Complex indicate that they were possibly formed in the Neoproterozoic to Paleoproterozoic tectonic settings of Andes-type continent margin, and the magmas could be derived from the partial melting of juvenile crust materials from the depleted mantle and more older continental crust materials.

Key words Sushui Complex, Granitoids gneisses, SHRIMP zircon U-Pb age, Zircon Hf isotopes, Petrogenesis, Formation environment

摘要 中条山前寒武纪涑水杂岩主要由西姚和寨子英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩、横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石组成。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明,西姚石英闪长质片麻岩 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2536 \pm 8\text{Ma}$, 是新太古代的产物;西姚和寨子 TTG 片麻岩及横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石岩浆锆石 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 全为正值,且在 t - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上,落在 2.6 ~ 3.1Ga 地壳演化线范围内。北峪钙碱性花岗质岩石中三个继承锆石核的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2633 \pm 84\text{Ma}$, 其锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.0 \sim +5.6$ 。前寒武纪涑水杂岩中花岗质岩石的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和锆石 Hf 同位素特征揭示它们最可能形成于新太古代到古元古代,岩浆主要来源于约 2650Ma 初生地壳的部分熔融,并有更古老的地壳物质的加入。

关键词 涑水杂岩; 花岗质片麻岩; SHRIMP 锆石年代学; 锆石 Hf 同位素; 岩石成因; 形成环境

中图法分类号 P597.3

* 国家自然科学基金重大国际合作项目(资助号: 40412012035)、国家自然科学基金面上项目(资助号: 40472096)和国家自然科学基金青年基金(资助号: 40602022)联合资助。

第一作者简介: 郭丽爽, 女, 1983 年生, 博士研究生, 从事岩石地球化学研究, E-mail: guolsh02@163.com

** 通讯作者: 刘树文, 男, 1958 年生, 博士, 教授, 从事岩石学和前寒武纪地质学研究, E-mail: swliu@pku.edu.cn

1 引言

中条山前寒武纪变质杂岩位于华北克拉通南缘,是华北克拉通中部带的一个重要组成部分,主要由新太古代到古元古代的涑水杂岩及其上覆的绛县群、中条群、担山石群变质层状岩系和未变质的西洋河群沉积-火山岩系组成(图1),其中涑水杂岩分布于中条山的西北侧,主要由英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩(西姚石英闪长质片麻岩、寨子英云闪长质片麻岩)、变质钙碱性花岗岩(横岭关花岗岩和北峪奥长花岗岩)、变质亚碱性花岗岩以及变质火山岩组成。尽管前人已经做过部分地质年代学研究,但是由于地质条件复杂,目前可靠的地质年代学数据仍然不能建立清楚的地质事件序列,导致涑水杂岩的成因和时代归属存在很大的争论(白瑾等,1997,1996;孙大中和胡维兴,1993;邓晋福等,1999;Yu *et al.*,2006;Tian *et al.*,2006;田伟等,2005;赵凤清和唐敏,1994;赵凤清等,2006),仍然需要进行大量的地质年代学的研究。此外,目前对华北克拉通中部带的研究,大部分还集中在中部的恒山-太行-五台、吕梁、辽东和内蒙地区,对于南缘的研究相对滞后,制约了对中部带的整体分布和演化的认识,因此有必要对涑水杂岩做进一步的研究。

尽管近年来对涑水杂岩的岩石组合、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学,Sm-Nd 同位素和岩石地球化学的研究已经取得了一

些明显的进展(Yu *et al.*,2006;Tian *et al.*,2006;田伟等,2005),但是因为可靠的年代学数据依然较少,一些岩体的年代并不清楚,特别是由于先前的岩石成因示踪技术的限制,使得一些岩石成因问题存留了许多不确定性(Yu *et al.*,2006;Tian *et al.*,2006;田伟等,2005;真允庆,2001;赵凤清和唐敏,1994;赵凤清等,1997)。锆石是各类酸性岩石中常见的副矿物,是 U-Pb 同位素定年的重要对象,锆石离子探针(SHRIMP)和激光探针(LA-ICPMS)成为目前 U-Pb 同位素定年和 Lu-Hf 同位素测定的重要手段。因为锆石中具有较高的 Hf 含量,低 Lu 的含量,锆石在形成后基本上没有放射成因 Hf 的积累,而且锆石抗风化,Hf 同位素体系封闭温度高,所以我们可以利用锆石形成时的 Hf 同位素组成对岩石成因进行示踪。近年来的研究表明,锆石 Hf 同位素示踪是目前最可靠的示踪方法,我们可以用其单阶段模式年龄和两阶段模式年龄分别计算源区的形成时代,有利于我们更好的示踪源区特征(陈斌等,2006;汪相等,2003;Wu, *et al.*,2005;Griffin,2004;杨进辉等,2005,2006;岳岳衡等,2006;于津海等,2005;Yang *et al.*,2007,2006a,2006b;Amelin *et al.*,2000;郑建平,2005;郑建平等,2004)。

本文对西姚 TTG 片麻岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学分析并对西姚和寨子 TTG 片麻岩及横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石的锆石进行了 Lu-Hf 同位素的综合研究,重点讨论了涑水杂岩的中太古代—古元古代的花岗质岩石成因、地质事件演化序列和形成环境。

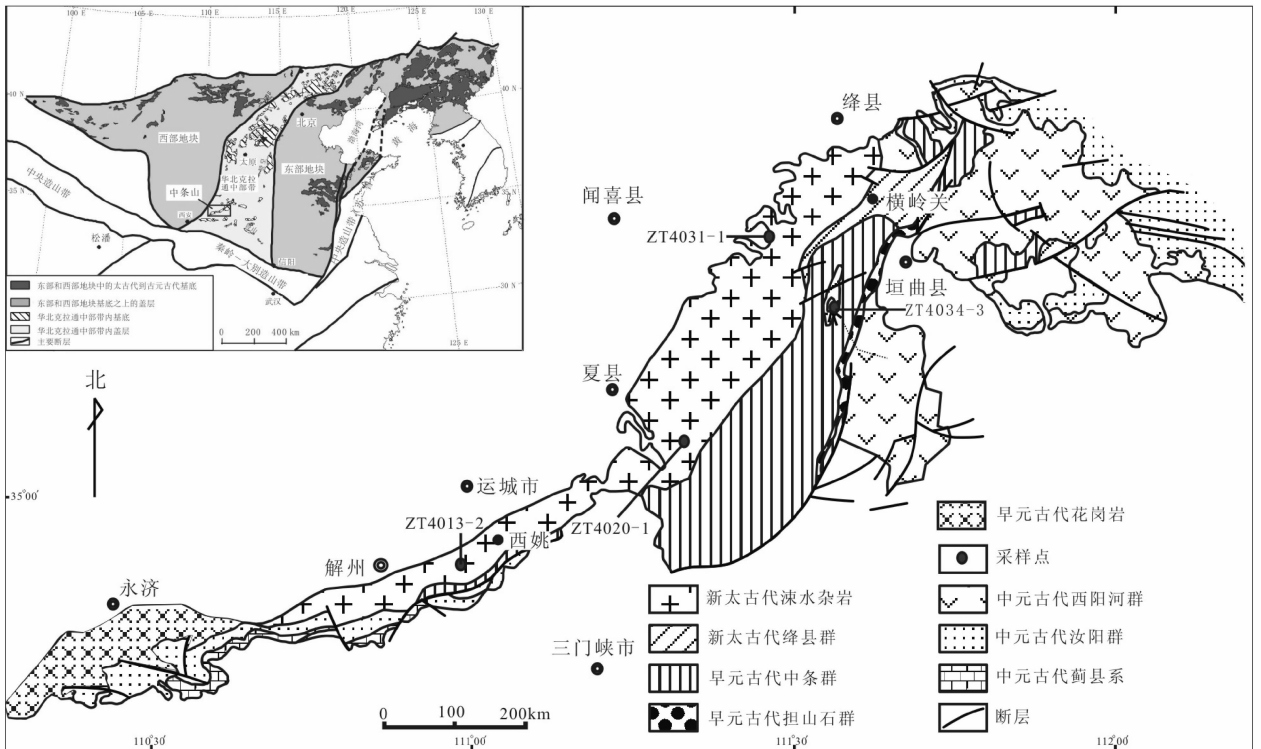


图1 中条山地区前寒武纪地质简图(根据白瑾等(1996)修改,左上角位置图根据刘树文等(2007)修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Precambrian Zhongtiao Complex(revised after Bai *et al.*,1996; the insert after Liu *et al.*,2007)

2 地质特征

涑水杂岩分布于中条山的西北部,是中条山前寒武纪杂岩最下部的一个岩性构造单元,呈北东向分布于绛县—闻喜—夏县—解州—永济一带,以变质的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩套为主,其中含有大小不等的变质表壳岩包体,并见有少量的变质基性岩墙群,遭受低角闪岩相至麻粒岩相的区域变质作用。古元古代绛县群、中条群,中元古代西阳河群、汝阳群变质层状岩系与涑水杂岩的太古宙花岗质片麻岩呈角度不整合接触(图1)。

古元古代绛县群分布于横岭关—上天井和黑岩底—铜矿峪一带,由变质泥质-半泥质岩、变质火山岩和变质凝灰质沉积岩组成,与涑水杂岩呈构造接触,局部表现为角度不整合。

古元古代中条群主要分布于杨家池—胡家峪—曹家庄—神仙岭一带,为一套碳酸盐沉积变质岩系,含有少量的变质火山岩和变质碎屑岩,与涑水杂岩、绛县群均呈角度不整合接触;担山石群主要是一套粗碎屑沉积岩、石英岩和变质粉砂岩组成,与下伏的绛县群和中条群以角度不整合接触,局部可见断层接触关系,一般认为中条群与担山石群同属于中条构造层(白瑾等,1997)。

中元古代的西阳河群主要分布于西桑池—刘张—朱家庄—架桑一带,是一套以未变质的双峰式火山岩为主体的沉积-火山岩系,与古元古代变质岩层为明显角度不整合接触和断层接触,并与上覆汝阳群红色粉砂岩呈低角度不整合接触;汝阳群是一套以砂质泥质碎屑岩和碳酸盐岩为主的沉积岩系(白瑾等,1997)。

涑水杂岩中的花岗质岩石主要分布在涑水杂岩的中部和东北部,包括西姚和寨子 TTG 片麻岩、横岭关花岗岩和北峪奥长花岗岩等,其中西姚片麻岩以石英闪长质-英云闪长质-奥长花岗质片麻岩为主,与寨子英云闪长片麻岩具有一致的岩石组合和变形特征,横岭关花岗岩与北峪花岗岩的岩石组合和变形特征类似。

西姚片麻岩和寨子片麻岩是涑水杂岩的主要组成部分,位于中条山东段,呈不规则镶嵌状分布于泗交大庙、蔡家岩头、尚家坪、捻掌幅马家庙及“短轴背斜西部”,在中条山西段以及解州幅西南大面积出露。主要岩石类型有黑云英云闪长质片麻岩、角闪石石英闪长质片麻岩为主体,含有少量的黑云角闪二长片麻岩,变形强烈,片麻理及条带构造发育,含有较多的变质表壳岩包体。张兆琪等(2003)获得西姚片麻岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 2453 ~ 2618Ma; 田伟等(2005)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得寨子英云闪长质片麻岩的年龄为 2560 ± 6Ma。

横岭关花岗岩分布于冷口—烟庄—横岭关一带,侵入于涑水杂岩中的寨子-西姚灰色片麻岩中以及北边的冷口变质火山岩中(图1),主要有两个岩性组合,早期为奥长花岗岩,

晚期为钙碱性二长花岗岩,二长花岗岩侵入于奥长花岗岩中。发育有变质表壳岩和寨子-西姚 TTG 片麻岩的包体。北峪奥长花岗岩出露于胡家峪背斜核部,出露面积约为 2.5km²,侵入于降县群铜矿峪组变质酸性火山岩中,主要为有一套中粗粒块状奥长花岗岩和奥长花岗质片麻岩,含有方柱黑云片岩等包体。Yu *et al.* (2006)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得横岭关二长花岗岩和北峪奥长花岗岩的年龄分别为 2436 ± 12Ma 和 2477 ± 8Ma。

解州以南至永济一带的涑水杂岩中存在大量古元古代亚碱性花岗质岩石,被汝阳群不整合覆盖(图1)。其岩石组合主要为正长花岗岩,并有少量的二长闪长岩和石英二长岩。通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法,获得了 1943 ~ 1968Ma 的成岩年龄(Tian *et al.*, 2006; 田伟等, 2005)。

3 岩石学特征

本文对涑水杂岩中西姚片麻岩(ZT4013-2)进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素分析,结合前人的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究,对四个样品(ZT4013-2、ZT4020-1、ZT4031-1 和 ZT4034-3)(取样位置见图1)进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析。各样品岩石学特征描述如下:

样品 ZT4013-2,为西姚石英闪长质片麻岩,取自解州南。岩石具花岗结构,弱片麻状构造;主要矿物组合为斜长石(60%)、角闪石+黑云母(25%)、石英(15%),含有很少量的楣石。石英呈他形粒状,斜长石的绢云母化强烈,黑云母角闪石有一定程度的绿泥石化。

样品 ZT4020-1,属于寨子英云闪长质片麻岩,取自涑水杂岩中部。岩石具不等粒结构,片麻状构造;主要矿物组合为:斜长石(65%)+石英(30%)、角闪石+黑云母(15%),含有很少量的楣石;斜长石沿双晶面蚀变强烈。

样品 ZT4031-1,为横岭关花岗岩体的二长花岗岩。岩石具花岗结构,弱片麻状构造;主要矿物组合为斜长石(40%)、微斜长石(30%)、云母(15%)、石英(15%)。微斜长石发育格子双晶,斜长石发育聚片双晶,黑云母普遍绿泥石化,表现为弱的定向排列,构成片麻理。

样品 ZT4034-3,为北峪奥长花岗岩。岩石具似斑状结构,片麻状构造;主要矿物组合为斜长石(60%)、石英(30%)、黑云母(10%)。其中石英颗粒很大,呈他形斑晶,也有少量的较小颗粒在基质中出现。斜长石绢云母化强烈,颗粒较小,呈基质分布。黑云母弱定向排列,构成片麻理。

4 实验方法

对西姚片麻岩(样品 ZT4013-2)进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年,对西姚和寨子片麻岩(样品 ZT4013-2、ZT4020-1)及横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石(样品 ZT4031-1 和 ZT4034-3)进行 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测定。

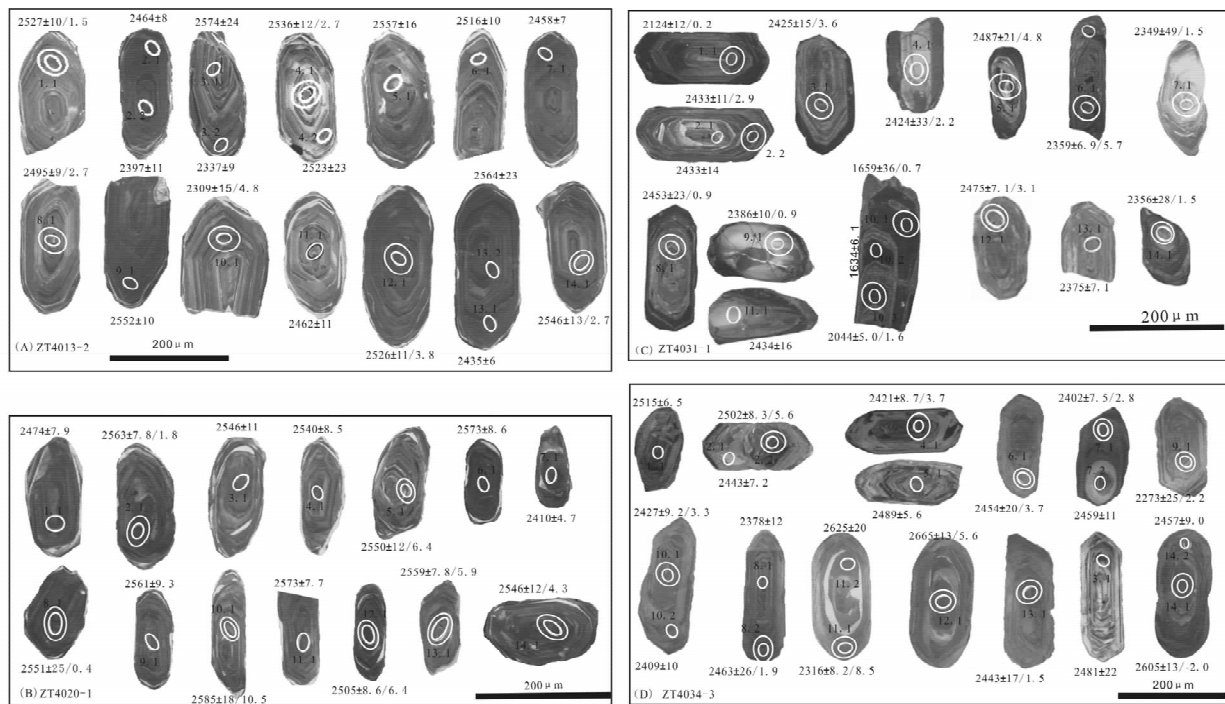


图2 锆石阴极发光图像(图C和D据 Yu *et al.* (2006)修改)

标注的年龄为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄(Ma),小椭圆为SHRIMP分析点,大椭圆为LA-MC-ICPMS分析点

A-西姚片麻岩; B-横岭关钙碱性花岗岩; C-寨子片麻岩; D-北岭钙碱性花岗岩

Fig.2 Cathodoluminescence images of zircons(the C and D revised after Yu *et al.* (2006))

其中SHRIMP锆石U-Pb同位素定年的样品制备过程为:将重约5kg的新鲜岩石样品粉碎至60~100目,用水将颗粒表面的灰尘洗净,烘干,然后用磁选和重液法分离出锆石颗粒,并在双目镜下手选挑纯,与标准锆石(TEM)一起粘结在树脂柱上制成靶,并打磨、抛光和镀金。锆石的阴极发光(CL)图像分析在北京大学电子学系的FEI PHILIPS XL30型扫描电镜上进行,实验条件为12kV,12A,图像特征见图2。U-Th-Pb同位素分析在北京离子探针中心采用SHRIMP II进行,分析流程见宋彪等(2002)和Williams(1998)。应用参考样TEM(417Ma)进行分馏校正,应用SL13(年龄为572Ma;U质量分数为 238×10^{-6})标定样品的U、Th和Pb的质量分数。普通铅校正采用 ^{204}Pb ,数据处理采用Ludwig的SQUID1.0及ISOPLOT程序(Ludwig,1996)完成,其置信度为 2σ ,置信水平为95%。分析结果列于表1。

LA-MC-ICPMS锆石Lu-Hf同位素原位测量在中国科学院地质与地球物理所的Neptune多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上进行,激光斑束直径为 $63\mu\text{m}$ 或 $31\mu\text{m}$,激光剥蚀时间为26s,脉冲频率4~8Hz,脉冲能量100mJ,测定时采用锆石国际标样91500做外标。详细的分析流程见Xu *et al.* (2004)。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄时采用以下参数: $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000),

$(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$ (Veevers *et al.*, 2005), $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Soderlund *et al.*, 2004)。锆石Lu-Hf同位素分析和计算结果列于表2。

5 分析结果

5.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学

锆石SHRIMP年代学分析数据和计算参数列于表1,计算结果见图3。

样品ZT4013-2(西姚石英闪长质片麻岩)分析了14个锆石颗粒的18个点。锆石颗粒较大,200 μm 左右,CL图像(图2A)表明锆石具有明显的振荡环带,如1、3、4、6、8、10和14号锆石;2、9、12和13号锆石阴极发光较弱,表明其U、Th含量较高。3和13号锆石核部(3.1和13.2)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值比边部(3.2和13.1)高,表明发生了一定程度的Pb丢失。5和11号锆石环带形状不规则,可能遭受了后期地质事件的影响。锆石Th/U比值较高(0.2~0.4)。但6号和9号锆石的边部的Th/U比值很低,小于0.1,分别为0.09和0.05。从图2A不难看出,这两个锆石分析位置均在岩浆振荡环带之内,尽管表现了低的Th/U比值,但仍具火成成因的特点,可能是岩浆期后再生长的产物,属于变质锆石。在U-Pb谐和图上(图3),锆石的谐和性较好,获得其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2536 \pm 8\text{Ma}$,MSWD=1.72,代表了岩浆结晶年龄

表 1 西姚石英闪长质片麻岩(样品 ZT4013-2)的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 Analyzed SHRIMP zircon U-Pb isotopic results of Xiyao quartz-dioritic gneiss (ZT4013-2)

| 分析点号 | U ($\times 10^{-6}$) | Th ($\times 10^{-6}$) | $\frac{Th}{U}$ | $\frac{^{232}Th}{^{238}U}$ | $^{206}Pb^*$ ($\times 10^{-6}$) | $\left(\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}\right)^*$ | 1σ | $\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U}$ | 1σ | $\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$ | 1σ | 误差 | $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma) | 1σ |
|---------|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------------------|--|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|-------|-------------------------------|-----------|
| 1.1 | 290 | 68 | 0.23 | 0.24 | 120 | 0.1669 | 10 | 11.05 | 34 | 0.480 | 14 | 0.980 | 2527 | 10 |
| 2.1 | 483 | 132 | 0.27 | 0.28 | 138 | 0.16074 | 74 | 7.34 | 21 | 0.3312 | 96 | 0.988 | 2464 | 8 |
| 2.2(核) | 458 | 147 | 0.32 | 0.33 | 128 | 0.15452 | 95 | 6.93 | 21 | 0.3254 | 95 | 0.893 | 2397 | 11 |
| 3.1(核) | 345 | 115 | 0.33 | 0.34 | 119 | 0.1717 | 25 | 9.53 | 31 | 0.403 | 12 | 0.974 | 2574 | 24 |
| 3.2 | 580 | 115 | 0.20 | 0.20 | 129 | 0.14918 | 75 | 5.32 | 16 | 0.2584 | 75 | 0.985 | 2337 | 9 |
| 4.1(核) | 227 | 101 | 0.45 | 0.46 | 85.9 | 0.1678 | 12 | 10.17 | 33 | 0.439 | 14 | 0.979 | 2536 | 12 |
| 4.2 | 251 | 79 | 0.31 | 0.32 | 104 | 0.1666 | 23 | 11.07 | 35 | 0.482 | 14 | 0.906 | 2523 | 23 |
| 5.1(核) | 197 | 69 | 0.35 | 0.36 | 84 | 0.1699 | 17 | 11.62 | 38 | 0.496 | 15 | 0.953 | 2557 | 16 |
| 6.1 | 302 | 26 | 0.09 | 0.09 | 145 | 0.16582 | 93 | 12.75 | 53 | 0.558 | 23 | 0.991 | 2516 | 10 |
| 7.1 | 557 | 90 | 0.16 | 0.17 | 167 | 0.16025 | 66 | 7.72 | 23 | 0.350 | 10 | 0.990 | 2458 | 7 |
| 8.1(核) | 302 | 69 | 0.23 | 0.24 | 103 | 0.1638 | 82 | 8.99 | 27 | 0.398 | 12 | 0.986 | 2495 | 9 |
| 9.1 | 310 | 16 | 0.05 | 0.05 | 131 | 0.16946 | 96 | 11.46 | 34 | 0.490 | 14 | 0.981 | 2552 | 10 |
| 10.1 | 764 | 160 | 0.21 | 0.22 | 194 | 0.1468 | 12 | 5.98 | 18 | 0.2957 | 86 | 0.959 | 2309 | 15 |
| 11.1(核) | 304 | 116 | 0.38 | 0.39 | 105 | 0.1606 | 10 | 8.91 | 27 | 0.403 | 12 | 0.977 | 2462 | 11 |
| 12.1(核) | 339 | 87 | 0.26 | 0.26 | 127 | 0.1668 | 11 | 10.01 | 30 | 0.435 | 13 | 0.975 | 2526 | 11 |
| 13.1 | 589 | 98 | 0.17 | 0.17 | 176 | 0.15804 | 60 | 7.57 | 22 | 0.3474 | 10 | 0.991 | 2435 | 6 |
| 13.2(核) | 349 | 63 | 0.18 | 0.19 | 120 | 0.1707 | 24 | 9.43 | 31 | 0.401 | 12 | 0.965 | 2564 | 23 |
| 14.1 | 168 | 43 | 0.26 | 0.26 | 66.5 | 0.1688 | 14 | 10.73 | 33 | 0.461 | 14 | 0.903 | 2546 | 13 |

Pb* 是指采用 ^{204}Pb 对普通铅进行校正的结果; 1σ 均为绝对误差,其数值与相应测试值的尾数相同。

表 2 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测量数据

Table 2 LA-MC-ICPMS in-situ analyses of zircon Lu-Hf isotopic compositions

| 点号 | t (Ma) | $^{176}Yb/^{177}Hf$ | $^{176}Lu/^{177}Hf$ | $^{176}Hf/^{177}Hf$ | 2σ | $\epsilon_{Hf}(0)$ | $\epsilon_{Hf}(t)$ | 2σ | t_{DM} (Ma) | t_{CC} (Ma) | $f(Lu/Hf)$ |
|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|---------------|---------------|------------|
| ZT4013-2 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 2536 | 0.020845 | 0.000445 | 0.281227 | 0.000024 | -54.6 | 1.5 | 0.8 | 2782 | 2953 | -0.99 |
| 4.1(核) | 2536 | 0.033299 | 0.000716 | 0.281272 | 0.000030 | -53.0 | 2.7 | 1.1 | 2740 | 2880 | -0.98 |
| 8.1(核) | 2536 | 0.035969 | 0.000778 | 0.281277 | 0.000036 | -52.9 | 2.7 | 1.3 | 2737 | 2875 | -0.98 |
| 10.1 | 2536 | 0.025857 | 0.000564 | 0.281324 | 0.000032 | -51.2 | 4.8 | 1.1 | 2659 | 2745 | -0.98 |
| 12.1(核) | 2536 | 0.038176 | 0.000929 | 0.281314 | 0.000047 | -51.6 | 3.8 | 1.7 | 2699 | 2806 | -0.97 |
| 14.1 | 2536 | 0.029011 | 0.000825 | 0.281273 | 0.000059 | -53.0 | 2.7 | 2.1 | 2746 | 2889 | -0.98 |
| ZT4020-1 | | | | | | | | | | | |
| 2.1 | 2560 | 0.035008 | 0.001226 | 0.281258 | 0.000037 | -53.5 | 1.8 | 1.3 | 2796 | 2952 | -0.96 |
| 5.1 | 2560 | 0.039017 | 0.001393 | 0.281394 | 0.000044 | -48.7 | 6.4 | 1.6 | 2621 | 2661 | -0.96 |
| 8.1 | 2560 | 0.025045 | 0.001110 | 0.281211 | 0.000076 | -55.2 | 0.4 | 2.7 | 2851 | 3045 | -0.97 |
| 10.1(核) | 2560 | 0.036156 | 0.001588 | 0.281519 | 0.000058 | -44.3 | 10.5 | 2.1 | 2461 | 2396 | -0.95 |
| 12.1(核) | 2560 | 0.062323 | 0.002432 | 0.281446 | 0.000082 | -46.9 | 6.4 | 2.9 | 2621 | 2659 | -0.93 |
| 13.1(核) | 2560 | 0.028898 | 0.001255 | 0.281375 | 0.000062 | -49.4 | 5.9 | 2.2 | 2638 | 2690 | -0.96 |
| 14.1(核) | 2560 | 0.031369 | 0.000873 | 0.281311 | 0.000046 | -51.7 | 4.3 | 1.6 | 2698 | 2792 | -0.97 |
| ZT4031-1 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 2436 | 0.051358 | 0.001388 | 0.281297 | 0.000025 | -52.2 | 0.2 | 0.9 | 2754 | 2962 | -0.96 |
| 2.2 | 2436 | 0.013123 | 0.000413 | 0.281328 | 0.000027 | -51.1 | 2.9 | 0.9 | 2644 | 2789 | -0.99 |
| 3.1 | 2436 | 0.041229 | 0.001319 | 0.281390 | 0.000051 | -48.9 | 3.6 | 1.8 | 2622 | 2744 | -0.96 |
| 4.1(核) | 2436 | 0.021735 | 0.000827 | 0.281402 | 0.000050 | -48.5 | 2.2 | 1.3 | 2673 | 2833 | -0.97 |
| 5.1(核) | 2436 | 0.058022 | 0.002108 | 0.281486 | 0.000049 | -45.5 | 4.8 | 1.8 | 2572 | 2664 | -0.98 |
| 6.1 | 2436 | 0.024484 | 0.000702 | 0.281303 | 0.000032 | -52.0 | 5.7 | 1.8 | 2543 | 2609 | -0.94 |
| 7.1(核) | 2436 | 0.051730 | 0.001600 | 0.281326 | 0.000047 | -51.2 | 1.5 | 1.2 | 2697 | 2876 | -0.98 |
| 8.1 | 2436 | 0.04649 | 0.001467 | 0.281321 | 0.000031 | -51.3 | 0.9 | 1.7 | 2730 | 2919 | -0.95 |
| 9.1 | 2436 | 0.09021 | 0.002943 | 0.281383 | 0.000044 | -49.1 | 0.9 | 1.1 | 2727 | 2916 | -0.96 |
| 10.1 | 2436 | 0.060556 | 0.001872 | 0.28136 | 0.000033 | -49.9 | 0.7 | 1.6 | 2749 | 2931 | -0.91 |
| 10.3(核) | 2436 | 0.036694 | 0.001324 | 0.281375 | 0.000146 | -49.4 | 1.6 | 1.2 | 2702 | 2870 | -0.94 |
| 12.1 | 2436 | 0.052612 | 0.001802 | 0.281354 | 0.000050 | -50.1 | 3.1 | 5.2 | 2642 | 2777 | -0.96 |
| 14.1(核) | 2436 | 0.051358 | 0.001388 | 0.281297 | 0.000025 | -52.2 | 1.5 | 1.8 | 2705 | 2875 | -0.95 |
| ZT4034-3 | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | 2633 | 0.025843 | 0.000770 | 0.281296 | 0.000027 | -52.2 | 5.6 | 1.0 | 2711 | 2764 | -0.98 |
| 4.1(核) | 2477 | 0.026446 | 0.000764 | 0.281342 | 0.000043 | -50.6 | 3.7 | 1.5 | 2649 | 2766 | -0.98 |
| 6.1 | 2477 | 0.037723 | 0.001251 | 0.281364 | 0.000051 | -49.8 | 3.7 | 1.8 | 2653 | 2769 | -0.96 |
| 7.1 | 2477 | 0.021249 | 0.000719 | 0.281315 | 0.000042 | -51.5 | 2.8 | 1.5 | 2683 | 2824 | -0.98 |
| 8.2 | 2477 | 0.028099 | 0.000922 | 0.281298 | 0.000039 | -52.1 | 1.9 | 1.4 | 2720 | 2884 | -0.97 |
| 9.1 | 2477 | 0.027595 | 0.000861 | 0.281302 | 0.000087 | -52.0 | 2.2 | 3.1 | 2710 | 2867 | -0.97 |
| 10.1(核) | 2477 | 0.026893 | 0.000688 | 0.281326 | 0.000055 | -51.1 | 3.3 | 2.0 | 2666 | 2795 | -0.98 |
| 11.1 | 2477 | 0.023260 | 0.000843 | 0.281480 | 0.000111 | -45.7 | 8.5 | 4.0 | 2467 | 2460 | -0.97 |
| 12.1(核) | 2633 | 0.029012 | 0.000739 | 0.281295 | 0.000046 | -52.2 | 5.6 | 1.6 | 2711 | 2765 | -0.98 |
| 13.1(核) | 2477 | 0.019770 | 0.000578 | 0.281312 | 0.000052 | -51.6 | 1.5 | 1.9 | 2782 | 2953 | -0.98 |
| 14.1(核) | 2633 | 0.039185 | 0.001231 | 0.281106 | 0.000067 | -58.9 | -2.0 | 2.4 | 3003 | 3250 | -0.96 |

t_{DM} 代表亏损地幔模式年龄, t_{CC} 代表平均地壳模式年龄. 计算 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 的加权平均年龄; 计算锆石 Hf 同位素采用如下参数: $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.0332$, $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997), $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.0384$, $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000), $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{平均地壳} = 0.015$ (Veevers *et al.*, 2005), $\lambda(^{176}Lu) = 1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$ (Soderlund *et al.*, 2004)。

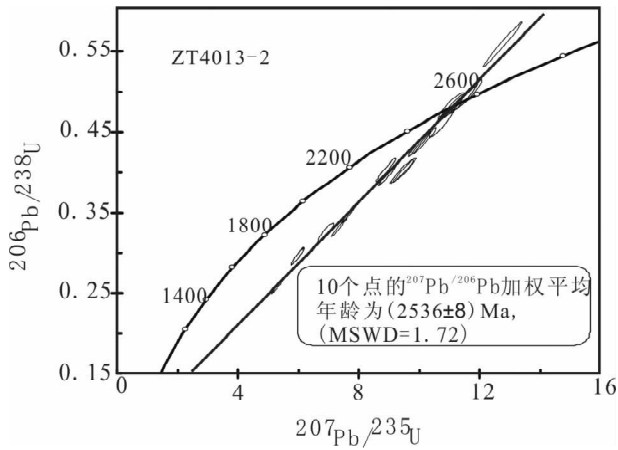


图3 锆石 U-Pb 谐和线图

Fig. 3 Concordia diagram of zircon U-Pb isotopes

(Belousova *et al.*, 2002)。田伟等(2005)对样品 ZT4020-1 (寨子英云闪长质片麻岩)进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学测试,共分析了 14 个锆石颗粒的 14 个点。该样品锆石颗粒长为 $150\mu\text{m}$ 左右,CL 图像(图 2B)显示了大多数锆石具有明显的振荡环带,为典型的岩浆锆石。在 U-Pb 谐和图上,锆石的谐和性较好, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2559.6 \pm 5.9\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.72$,为岩体结晶年龄,与西姚 TTG 片麻岩(样品 ZT4013-2)为同期岩浆作用的产物。

Yu *et al.* (2006)对样品 ZT4031-1 (横岭关二长花岗岩)和样品 ZT4034-3 进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学测试。对样品 ZT4031-1 分析了 14 个锆石颗粒的 17 个点。锆石自形程度较好,颗粒大小不等, $100 \sim 200\mu\text{m}$,CL 图像(图 2C)显示部分锆石振荡环带明显,为典型的岩浆锆石。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2435.9 \pm 12.0\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.51$,代表岩体结晶年龄。样品 ZT4034-3 (北峪奥长花岗岩)分析了 14 个锆石颗粒的 20 个点,其颗粒较大, $200\mu\text{m}$ 左右,自形程度好。CL 图像(图 2D)显示锆石可以分成两类:一类具有明显的核边结构,如第 1、2、6、11、12、14 号锆石,核部可以看到熔蚀现象,说明核部(1.1、2.2、11.2、12.1、14.1)和边部(2.1、11.1、14.2)形成于不同的时间,核部为继承锆石。据 Yu *et al.* (2006)的分析数据,其中继承锆石内核三个点(11.2、12.1、14.1)的加权平均年龄为 $2633 \pm 84\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 5.4$,为继承锆石的结晶年龄;另一类是没有核边结构的锆石具有清楚的韵律环带,为新生岩浆锆石。在 U-Pb 谐和图上,新生岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2477.1 \pm 8.0\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.51$ (Yu *et al.*, 2006),为岩体结晶年龄,同样为新太古代末到古元古代初的产物。

5.2 锆石 Hf 同位素数据

所测定的四个样品锆石 Lu-Hf 同位素数据列于表 2,计算结果见图 4。

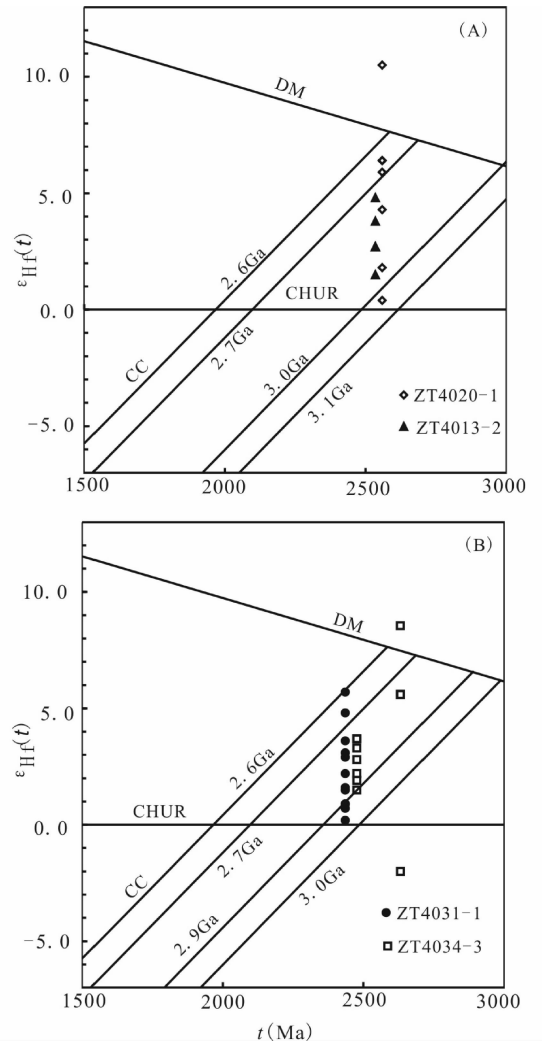


图4 TTG 系列岩石中锆石 Hf 同位素特征

CC-平均地壳; DM-亏损地幔; CHUR-球粒陨石

A-西姚和寨子 TTG 片麻岩; B-横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石

Fig. 4 Zircon Hf isotopic features of TTG series rocks

样品 ZT4013-2 (西姚英云闪长质片麻岩)的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.281227 \sim 0.281324$,用加权平均年龄 ($t = 2536\text{Ma}$) 计算得到的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 有一定的变化范围(表 2), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +1.5 \sim +4.8$,平均值为 $+3.0$,落在 3.0Ga 和 2.7Ga 平均地壳演化线范围内(图 4A)。Hf 同位素亏损地幔单阶段模式年龄 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 的变化范围为 $2659 \sim 2782\text{Ma}$,平均值为 2727Ma ,其最年轻的模式年龄与锆石继承内核的 SHRIMP U-Pb 年龄接近。平均地壳模式年龄 $t_{\text{CC}}(\text{Hf})$ (Veevers *et al.*, 2005)变化范围为: $2745 \sim 2953\text{Ma}$,平均值为 2859Ma ,表明源区可能存在约 2650Ma 的初生地壳物质,来源于亏损地幔,同时有更老的地壳物质加入。

样品 ZT4020-1 (寨子英云闪长质片麻岩)锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.281211 \sim 0.281446$,10 号锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定值偏大(0.281519),在以下分析中将不做讨论。用加权平均

年龄 ($t = 2560\text{Ma}$) 计算得到的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围比较大 (表 2), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +0.4 \sim +6.4$, 平均值为 $+4.2$, 主要落在 3.1Ga 和 2.6Ga 平均地壳演化线范围内。 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 变化范围为 $2621 \sim 2851\text{Ma}$, 平均值为 2704Ma ; t_{CC} 变化范围为 $2659 \sim 3045\text{Ma}$, 平均值为 2800Ma , 同样表明源区可能存在约 2650Ma 的来源于亏损地幔的初生地壳物质, 同时有更老的地壳物质加入。

样品 ZT4031-1 (横岭关二长花岗岩) 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.281297 \sim 0.281486$, 用加权平均年龄 ($t = 2436\text{Ma}$) 计算得到的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围比较大 (表 2), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +0.2 \sim +5.7$, 平均值为 $+2.3$, 落在 3.0Ga 和 2.6Ga 平均地壳演化线范围内 (图 4B); $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 变化范围为 $2543 \sim 2754\text{Ma}$, 平均值为 2674Ma ; t_{CC} 变化范围为: $2609 \sim 2962\text{Ma}$, 平均值为 2828Ma 。表明源区物质可能是约 2550Ma 来源于亏损地幔初生地壳或者有同期的幔源岩浆物质注入, 同时存在更老的地壳物质。

样品 ZT4034-3 为北峪奥长花岗岩, 其继承锆石 (2、12 和 14 号古老锆石核) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.281106 \sim 0.281296$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 ($t = 2633\text{Ma}$) 计算得到古老锆石核的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 $+5.6$ 、 $+5.6$ 、 -2.0 (表 2), 2 号和 12 号锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值落在 2.8Ga 平均地壳演化线上, 14 号锆石落在 3.2Ga 平均地壳演化线上 (图 4B), 3 个古老锆石核的 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 分别为 2711Ma 、 2711Ma 、 3003Ma ; t_{CC} 分别为: 2764Ma 、 2764Ma 、 3250Ma 。新生岩浆锆石 (4、6、7、8、9、10 和 13 号锆石) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.281298 \sim 0.281480$, 用加权平均年龄 ($t = 2477\text{Ma}$) 计算得到的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围为: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +1.5 \sim +8.5$ (表 2), 其中 11 号锆石计算值异常, 是由于测试过程中分析误差过大 ($2\sigma = 0.000111$) 造成的, 其计算值不在讨论范围内。其余颗粒的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 $+2.7$, 落在 2.9Ga 和 2.7Ga 平均地壳演化线范围内 (图 4B); $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 变化范围为 $2649 \sim 2782\text{Ma}$, 平均值为 2695Ma ; t_{CC} 变化范围为: $2766 \sim 2953\text{Ma}$, 平均值为 2837Ma 。表明源区物质可能是约 2650Ma 来源于亏损地幔的初生地壳, 并有古老地壳物质的加入。

6 讨论

6.1 花岗质片麻岩年龄讨论

6.1.1 西姚和寨子 TTG 片麻岩

涑水杂岩中最古老的岩石是运城-冷口变质表壳岩, 寨子-西姚 TTG 片麻岩侵入于冷口变质火山岩内 (白瑾等, 1997)。张兆琪等 (2003) 用单颗粒锆石法测定西姚片麻岩的 U-Pb 年龄为 $2457 \pm 14\text{Ma}$ 、 $2453 \pm 74\text{Ma}$ 、 $2507 \pm 26\text{Ma}$ 和 $2618 \pm 26\text{Ma}$, 认为西姚片麻岩中的 TTG 侵位在 $2.6 \sim 2.5\text{Ga}$ 左右。李惠民用单颗粒锆石 U-Pb 法测得的寨子英云闪长质片

麻岩 U-Pb 年龄为 $2321 \pm 2\text{Ma}$ (孙大中和胡维兴, 1993; 赵凤清等, 1992, 2006)。西姚片麻岩与寨子英云闪长岩具有一致的岩石组合和变形特征, 而从前人所测得数据发现它们的形成年龄有明显的差异。本文采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年技术测得西姚片麻岩 (样品 ZT4013-2) 年龄为 $2536 \pm 8\text{Ma}$, 寨子英云闪长岩 (样品 ZT4020-1) 成岩年龄为 $2560 \pm 6\text{Ma}$, 二者年龄相近, 即涑水杂岩中 TTG 片麻岩主体形成于新太古代而不是古元古代。

6.1.2 横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石

对横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石的时代归属, 尽管前人已经做过一些研究, 但是由于测年方法不同, 得到的结果差别也较大。前人的研究获得横岭关花岗岩体成岩年龄为 $2231 \pm 36\text{Ma}$, 北峪奥长花岗岩体成岩年龄为 $2107 \pm 60\text{Ma}$ (白瑾等, 1997, 1996; 孙大中等, 1993;)。Yu *et al.* (2006) 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法获得的横岭关二长花岗岩 (样品 ZT4031-1) 和北峪奥长花岗岩 (样品 ZT4034-3) 成岩年龄分别为 $2435.9 \pm 12.0\text{Ma}$ 和 $2477.1 \pm 8.0\text{Ma}$, 同时还获得了北峪奥长花岗岩继承锆石的年龄为 $2633 \pm 84\text{Ma}$ 。由此可见, 横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石岩浆侵位时间为新太古代末期和古元古代初期, 样品 ZT4034-3 锆石核部记录了 $2633 \pm 84\text{Ma}$ 老地壳的再循环, 证明其源区年龄为 2633Ma , 与上述 Hf 模式年龄证明该区存在约 2650Ma 初生地壳的认识完全一致。

涑水杂岩西南段永济粉红色细粒二长花岗岩样品, 细粒花岗结构, 弱的片麻状构造, Tian *et al.* (2006) 用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年, 给出岩浆成岩年龄分别为 $1944 \sim 2064\text{Ma}$ 。

以上新的年代学数据表明涑水杂岩经历了三个阶段的形成演化, 早期石英闪长岩-英云闪长岩形成于 $2536 \sim 2560\text{Ma}$, 横岭关和北峪钙碱性花岗岩形成于 $2436 \sim 2477\text{Ma}$, 晚期红色正长花岗岩形成于 $1944 \sim 2064\text{Ma}$, 基本建立了中条山地区涑水杂岩的年代学格架。

6.2 花岗片麻岩成因讨论

6.2.1 西姚和与寨子 TTG 片麻岩

张兆琪等 (2003) 分析西姚片麻岩的化学成分特点为高铝型, Na_2O 明显大于 K_2O , 显示出较早期岩浆成分特点。寨子英云闪长质片麻岩发育透入性片麻理, 在地球化学上具强烈的轻重稀土分异和 Sr 含量高, 与太古宙 TTG 岩石的化学特点相似 (赵凤清等, 2006)。田伟等 (2005) 通过岩石主量和微量元素岩石地球化学分析, 认为新太古代具有岛弧特征的 TTG 类岩石为新太古代岛弧体系中洋壳在高温条件下的重熔产物。

西姚和寨子 TTG 片麻岩 (样品 ZT4013-2 和 ZT4020-1) 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t = 2536\text{Ma}$, 2560Ma) 均为正值 (最高达 $+6.4$), 表明其源区有相当比例的来自于初生地壳物质; 同时两个样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 数据点几乎都落在亏损地幔 Hf 同位素演化线之下,

位于 2.6 ~ 3.1 Ga 平均地壳演化范围内,说明有一定量的古老陆壳物质的加入。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学数据显示这些岩石形成于 2550 Ma 左右,其 Hf 亏损地幔单阶段模式年龄为 2621 ~ 2851 Ma,表明源区大约在 2600 ~ 2800 Ma 左右形成;其 t_{CC} 模式年龄为 2659 ~ 3045 Ma,说明其源区可能存在更古老地壳物质。

6.2.2 横岭关北峪钙碱性花岗质岩石

横岭关花岗岩主要存在两个岩性组合,早期为奥长花岗岩,晚期为钙碱性二长花岗岩。北峪奥长花岗岩的岩石学特征与横岭关花岗岩中早期的奥长花岗岩相似,锆石 U-Pb 年龄接近,它们都是涑水杂岩的一部分。Yu *et al.* (2006) 对横岭关花岗岩和北峪奥长花岗岩进行了详细的地球化学数据分析,认为横岭关奥长花岗岩和北峪奥长花岗岩为在大陆岛弧背景下由新生的玄武质地壳部分熔融产生,并受到了古老大陆地壳物质的混染;而横岭关二长花岗岩则为岛弧环境下古老大陆地壳物质重熔的产物,源区中可能含有少量的初生地壳物质。

样品 ZT4031-1 的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ ($t = 2436$ Ma) 均为正值(最高达 +5.7),表明其源区有相当比例的来自于亏损地幔的物质,而这些数据点又都落在亏损地幔演化线之下,位于 3.0 ~ 2.6 Ga 平均地壳演化线范围内,说明其源区可能有 3.0 Ga 的玄武质地壳物质的加入;其 Hf 单阶段模式年龄为 2543 ~ 2754 Ma,结合约 2633 Ma 继承锆石内核的存在,进一步证明其源区存在 2650 Ma 的初生地壳,并有老地壳物质加入。

样品 ZT4034-3 的岩浆锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ ($t = 2477$ Ma) 均为正值,这些数据点几乎都落在亏损地幔演化线之下,位于 2.9 ~ 2.7 Ga 平均地壳演化线范围内,说明有源区也有地壳物质的加入;其 Hf 单阶段模式年龄为 2653 ~ 2720 Ma,与样品中三个继承锆石年龄 (2633 ± 84 Ma) 一致,反映了源区部分物质的年龄,即源区存在来源于亏损地幔的初生地壳 (Juvenile crust) 物质。另一些老于 2800 Ma 的 Hf 平均地壳模式年龄说明源区存在更古老的老地壳物质,三个继承锆石核,其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ ($t = 2633$ Ma) 分别为 +5.6、+5.6、-2.0,进一步说明了岩浆源区既有新生下地壳物质的加入,也有古老陆壳物质的加入,因此最有可能形成于安地斯型大陆边缘弧构造背景 (Liu *et al.*, 2000, 2002a, 2002b, 2004)。

7 结论

本文通过对涑水杂岩中西姚片麻岩、寨子片麻岩、横岭关二长花岗岩和北峪奥长花岗岩的锆石 SHRIMP 年代学和 Hf 同位素地球化学的研究,得出以下结论:

(1) 西姚 TTG 片麻岩形成时代为: 2536 ± 8 Ma 为太古宙末到古元古代初的产物。

(2) 西姚和寨子 TTG 片麻岩及横岭关和北峪钙碱性花岗质岩石的锆石 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 均为正值,但又都位于

亏损地幔演化线之下,结合北峪奥长花岗岩三个继承锆石核 (2633 Ma) 的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为 +5.6、+5.6、-2.0,说明岩浆源区既有来源于亏损地幔的初生地壳,又有古老的大陆地壳物质,即这些新太古代到古元古代的花岗质岩浆起源于安地斯型活动大陆边缘环境下初生地壳和老的大陆地壳物质的部分熔融。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所吴福元教授和杨进辉副研究员在论文撰写过程中给予的指导和帮助!本研究得到了国家自然科学基金重大国际合作研究项目(资助号: 40412012035)、国家自然科学基金项目(资助号: 40472096, 40472118)和国家自然科学基金青年基金(资助号: 40602022)的联合资助。

References

- Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205 - 4225
- Bai J, Dai FY and Yan YY. 1997. Precambrian crust evolution of Zhongtiao Mountain. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 4(3-4): 281 - 288 (in Chinese with English abstract)
- Bai J, Huang XG, Huang HC, Guo JJ, Yan YY, Xiu QY, Xu WY and Wang GF. 1996. Evolution of China Precambrian Crust (second edition). Beijing: Geological Publishing House, 259 (in Chinese)
- Belousova EA, Griffin WL, O' Reilly SY *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602 - 622
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 - 258
- Chen B, Liu SW, Geng YS and Liu CQ. 2006. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and significance of the late Archean-Paleoproterozoic granitoids from the Wutai-Luliang terrain, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 296 - 304 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Wu ZX, Zhao GC, Zhao HL, Luo ZH and Mo XX. 1999. Precambrian granitic rocks, continental crustal evolution and formation of the North China Platform. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 190 - 198 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Achterbergh EV, O' Reilly Suzanne Y and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133 - 147
- Griffin WL. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131: 231 - 282
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone. North China craton: constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutaishan complexes. *Precambrian Res.*, 130: 229 - 249
- Liu SW, Li JH, Pan YM, Zhang J and Li QG. 2002a. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry. *Prog. Natural Sci.*, 12: 568 - 576

- Liu SW, Pan YM, Li JH, Zhang J and Li QG. 2002b. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Res.*, 117: 41 – 56
- Liu SW, Liang HH., Zhao GC, Hua YG and Jian AH. 2000. Isotopic chronology and geological events of Precambrian complex in Taihangshan region. *Sci. Chin. (Ser. D)*, 43: 386 – 393
- Ludwig RK. 1996. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data (Version. 2. 90). US Geological Survey. Open File Rept., 91(445): 1 – 47
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311 – 324
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of SHRIMP dating. *Geol. Rev.*, 48(supp): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Sun DZ and Hu WX. 1993. Precambrian Chronotectonic Framework and Chronological Crust Texture of Zhongtiao Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 107 (in Chinese)
- Tian W, Liu SW and Zhang HF. 2006. Paleoproterozoic potassic granitoids in the Sushui complex from the Zhongtiao Mountains, northern China: Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 875 – 885
- Tian W, Liu SW, Liu CH, Yu SQ, Li QG and Wang YR. 2005. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of TTG rocks in Sushui Complex from Zhongtiao Mountains with its geological implications. *Progress in Nature Science*, 16(5): 492 – 500 (in Chinese with English abstract)
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA *et al.* 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn craton. *Earth-Science Reviews*, 68: 245 – 279
- Wang X, Griffin WL, Wang ZC, Zhou XM and Wang CS. 2003. Zircon Hf isotope geochemistry of granite in Ya Jiangqiao, Hunan. *Chin. Sci. Bull.*, 48(4): 379 – 382 (in Chinese)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In McKibben MA *et al.* (eds.), *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology*, 7: 1 – 35
- Wu FY, Yang JH, Liu XM, Li TS, Xie LW and Yang YH. 2005. Hf isotopes of the 3. 8Ga zircons in eastern Hebei Province, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton. *Chinese Sci. Bull.*, 50: 2473 – 2480
- Yang JH, Wu FY, Simon A Wilde, Xie LW, Yang YH and Liu XM. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis; In situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 177 – 190
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Simon A. Wilde, Xie LW and Liu XM. 2006a. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246: 336 – 352
- Yang JH, Wu FY, Sun LC, Simon A. Wilde and Chu MF. 2006b. Origin for the Qianshan A-type granite, northeast China; Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89 – 106
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Xie LW and Liu XM. 2006. In-Situ U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of the Houcheng and Zhangjiakou Formation in the Zhang-Xuan Area, Northeast China. *Earth Science (Journal of China University of Geoscience)*, 31(1): 71 – 80 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Liu XM and Xie LW. 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1633 – 1644 (in Chinese with English abstract)
- Yang YH, Zhang HF, Xie LW, Liu Y, Qi CS and Tu XL. 2006. Petrogenesis of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the North China Craton; New evidence from Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1665 – 1671 (in Chinese with English abstract)
- Yu SQ, Liu SW, Tian W, Li QG and Feng YG. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of the Henglingguan and Beiyu Granitoids in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 912 – 922
- Yu JH, Zhou XM, Zhao L, Jiang SY, Wang LJ and Ling HF. 2005. Mantle-crust interaction generating the Wuping granites: Evidenced from Sr-Nd-Hf-U-Pb isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 651 – 664 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Xue WY, Chai JZ and Wei YF. 2003. The geology characters of basement rocks in southwestern Zhongtiao Mountains. *Geology Survey and Research*, 26(4): 193 – 198 (in Chinese)
- Zhao FQ, Li HM, Zuo YC and Xue KQ. 2006. Zircon U-Pb ages of Paleoproterozoic granites in the Zhongtiao Mountains, Southern Shanxi, China. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 442 – 447 (in Chinese with English abstract)
- Zhao FQ and Tang M. 1994. Petrology and Geochemistry of Beiyu trondhjemites in Zhongtiao Mountains, South Shanxi. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 9(3): 271 – 280 (in Chinese)
- Zhao FQ, Lin YX and Li HM. 1992. Geology and dating evidence for Sushui Complex in Northern Zhongtiao Mountains, Shanxi. *Shanxi Geology*, 7(4): 423 – 433 (in Chinese)
- Zhen YQ. 2001. Geology and geochronology of Beiyu trondjemite in Zhongtiao Mountain. *Journal of Guilin Institute of Technology*. 21(4): 309 – 317 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP. 2005. The U-Pb Dating ages and Hf isotopic composition of Zircon from various granulitic xenoliths; The formation and reworking of the lower crust beneath the North China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 7 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Lu FX, Yu CM and Tang HY. 2004a. Zircon Hf isotopes, U-Pb dating and trace element in granulitic xenoliths of basalt in Hannuoba; The note of lower crust early evolution in North China. *Chin. Sci. Bull.*, 49: 375 – 383 (in Chinese)

附中文参考文献

- 白瑾, 戴凤岩, 颜耀阳. 1997. 中条山前寒武纪地壳演化. *地学前缘*, 4(3 – 4): 281 – 288
- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩等. 1996. 中国前寒武纪地壳演化(第二版). 北京: 地质出版社, 80 – 90
- 陈斌, 刘树文, 耿元生, 刘超群. 2006. 吕梁-五台地区晚太古宙-古元古代花岗岩质锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. *岩石学报*, 22: 296 – 304
- 邓晋福, 吴宗繁, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 莫宣学. 1999. 华北地台前寒武花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成. *岩石学报*, 15(2): 190 – 198
- 宋彪, 张玉海, 万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 制靶、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26 – 30
- 孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社, 107
- 田伟, 刘树文, 刘超辉, 余盛强, 李秋根, 王月然. 2005. 中条山涑水杂岩中 TTG 系列岩石的锆石 SHRIMP 年代学和地球化学及其地质意义. *自然科学进展*, 15(12): 1476 – 1483
- 汪相, Griffin WL, 王志成, 周新民, 汪传胜. 2003. 湖南丫江桥花岗岩

- 中锆石的 Hf 同位素地球化学. 科学通报, 48(4): 379 - 382
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 2006. 冀北张-宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素. 地球科学(中国地质大学学报), 31(1): 71 - 80
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 岩石学报, 21(6): 1633 - 1644
- 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 刘颖, 祁昌实, 涂湘林. 2006. 华北克拉通中、新生代典型火山岩的岩石成因: Hf 同位素新证据. 岩石学报, 22: 1665 - 1671
- 于津海, 周新民, 赵蕾, 蒋少涌, 王丽娟, 凌洪飞. 2005. 壳幔作用导致武平花岗岩形成: Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据. 岩石学报, 21: 651 - 664
- 张兆琪, 薛文彦, 柴金钟, 魏云峰. 2003. 中条山西南段基底岩系的地质特征. 地质调查与研究, 26(4): 193 - 198
- 赵凤清, 李惠民, 左义成, 薛克勤. 2006. 晋南中条山古元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 25(4): 442 - 446
- 赵凤清, 唐敏. 1994. 晋南中条山北峪奥长花岗岩的岩石地球化学. 华北地质矿产杂志, 9(3): 271 - 280
- 赵凤清, 林源贤, 李惠民. 1992. 山西中条山北段涑水杂岩地质及年代学证据. 山西地质, 7(4): 423 - 433
- 真允庆. 2001. 中条山北峪奥长花岗岩地质学及其地质年代学. 桂林工学院学报, 21(4): 309 - 317
- 郑建平. 2005. 捕虏体麻粒岩锆石 U-Pb 年龄和铅同位素: 华北地块下地壳的形成与再造. 矿物岩石地球化学通报, 24(1): 7 - 16
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 汤华云. 2004. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体锆石 Hf 同位素、U-Pb 定年和微量元素研究: 华北下地壳早期演化的记录. 科学通报, 49: 375 - 383