

豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学^{*}

第五春荣 孙勇 林慈銮 柳小明 王洪亮

DIWU ChunRong, SUN Yong, LIN CiLuan, LIU XiaoMing and WANG HongLiang

西北大学地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2006-09-28 收稿, 2006-12-20 改回.

Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):253–262

Abstract Large volumes of gray gneisses of tonalite trondhjemite granodiorite (TTG) occur in the southern margin of the North China Craton (NCC). The data of geochemistry, zircon chronology and Hf isotopic composition for TTG gneisses in the Yiyang area are reported in this paper, and then the geological significances are discussed. The gneisses are high in SiO_2 (59 ~ 73%) and Al_2O_3 (>15%). The concentrations of CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 decrease with the increasing of SiO_2 , showing negative correlation, whereas the P_2O_5 , $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios display positive correlations, indicating the department of mafic-mineral, apatite and plagioclase. The REE patterns of the gneisses are characterized by strongly fractionated REE patterns ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9 \sim 23$) and without Eu anomalies, and the HREEs are flatter compared with the LREE contents. The concentrations of incompatible trace elements such as Rb, Ba, Sr are enriched, whereas the high field strength element (e. g. Nb and Ta) contents are low. The rocks have typical low Y (13.25 ~ 25.27 $\mu\text{g/g}$) and Yb (1.27 ~ 1.98 $\mu\text{g/g}$) contents, and exhibit high Sr (507.14 ~ 606.85 $\mu\text{g/g}$) contents, resembling the geochemical characteristics of high-Al TTG suite. In this case, hornblende is required to retain in the restite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields 2.3Ga, representing the formation age of the TTG gneisses. Most zircons in the TTG gneisses have negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value, which suggests that the protoliths of the gneisses were mainly derived from ancient crustal rocks at the southwestern margin of NCC. While a few zircons show positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value, indicting juvenile materials, probably from depleted mantle, were added to the protoliths of the gneisses. The oldest two-stage Hf model ages of the TTG gneisses are about 2.8Ga, suggesting that the source rocks of the gneisses in the Yiyang are at least as old as 2.8Ga. Although the 2500Ma is the significant time of crustal growth in the NCC, there was also new crust formation during the paleoproterozoic as we show in this study, together with some former researches.

Key words TTG gneisses, Zircon U-Pb chronology, Hf isotope, Crustal growth

摘 要 本文报道对华北地块南缘、豫西宜阳穆册 TTG 质片麻岩的地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究。宜阳穆册 TTG 质片麻岩 SiO_2 含量为 59 ~ 73%, Al_2O_3 > 15%、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 与 SiO_2 的含量呈负相关, 表明在岩浆演化中有镁铁矿物和斜长石的分离, 岩浆成分随着分异而富钾。 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈正相关, 反映出磷灰石的分离。轻重稀土分异明显 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9 \sim 23$); 重稀土相对于轻稀土轻度分异; 无明显的 Eu 异常 ($\text{Eu}^* = 0.95 \sim 1.07$)。岩石富 Rb、Sr、Ba、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素。低 Y (13.25 ~ 25.27 $\mu\text{g/g}$) 和 Yb (1.27 ~ 1.98 $\mu\text{g/g}$); 高 Sr (507.14 ~ 606.85 $\mu\text{g/g}$) 及 Sr/Y (34.15 ~ 39.97), 上述地球化学特征一致表明, 研究区片麻岩为一套高铝的 TTG 质岩石。这套片麻岩可能是在角闪岩相条件下部分熔融的产物。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得 TTG 质片麻岩的年龄为 2.3Ga。片麻岩中的锆石大部分具负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (最高达 -4.95), 揭示其源区可能主要为古老陆壳物质; 部分锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, 说明在其形成过程中有一定比例的亏损地幔物质的加入。宜阳 TTG 质片麻岩的 Hf 同位素数据表明, 其两阶段模式年龄主要 2.57 ~ 3.01Ga 之

* 本工作受教育部科学技术研究重大项目 (批准号 306021)、国家自然科学基金 (批准号 40472099) 资助。

第一作者简介: 第五春荣, 男, 1977 年生, 在职博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: diwuchunrong@163.com

间,平均值为 2.82Ga,所以说穆册灰色片麻的源区可能存在年龄为 2.8Ga 左右(或更老)的地壳物质,说明代表该区基底的太华杂岩形成时代可能为 2.8Ga(或更老)。虽然华北地块陆壳最主要的增生时代被认为发生在 2500Ma,但宜阳 TTG 质片麻岩的研究结果和其他研究者的研究成果都说明华北地块大陆地壳在元古代早期仍然存在相当规模的陆壳增生。

关键词 TTG 质岩; 锆石; U-Pb 年代学; Hf 同位素; 地壳增生

中图法分类号 P588.345; P597.3

1 引言

英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩(TTG)不仅是太古宙大陆地壳的主要组成部分,同时也是后太古宙大陆造壳作用的主要组成物质(Martin, et al., 2005; Condie, 2005)。因此,TTG 岩套的研究是揭示大陆地壳形成与演化的关键。

目前认为 TTG 岩浆是由镁铁质岩石部分熔融而形成的观点已被大多数人接受,但对于形成时的构造背景却存在着较大分歧。一种观点认为是通过俯冲洋壳的板片部分熔融而成(Drummond, et al., 1990),另一种观点认为是通过底侵作用于地壳的镁铁质岩石的部分熔融而成(Smithies, et al., 2000)。两者是正在经历俯冲作用或是陆壳增厚之前经历过俯冲作用。

在我国华北地块南缘广泛出露 TTG 质片麻岩,以原太华群的 TTG 质片麻岩为代表,这些 TTG 质片麻岩占整个地块的 70~80%,是本区晚太古代地壳的主要组成部分(孙勇, 1982a, 1985),对于研究华北地块的前寒武纪的构造格局、地壳增生和演化具有重要的意义。河南省宜阳地区也广泛地

出露太华杂岩,岩石主要为 TTG 质片麻岩,本文试图通过研究宜阳地区 TTG 质片麻岩的地球化学,锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素探讨其岩浆源区,并讨论其地质意义。

2 地质背景

采样区位于河南宜阳县以南,熊耳山北侧,大地构造位置属于中朝准地块南缘。出露的地层主要为太古代的太华杂岩以及下元古嵩山群,其上为华北地块的盖层沉积,中元古熊耳群呈角度不整合覆盖于太华杂岩之上(图 1)(河南省区域地质志,1989)。

研究区内的太华杂岩主要分布在上宫、程子以西,张舞-穆册(木柴关)一带,太华杂岩经历了多期构造-热事件改造,变质作用和混合岩化强烈,变质程度为角闪岩相(孙勇, 1982b)。主要岩性为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、黑云变粒岩、石英岩等,这些岩石普遍遭受强烈的变质变形改造,岩石片麻理发育呈近东西向展布,与区域构造线一致(张国伟等,1985)。

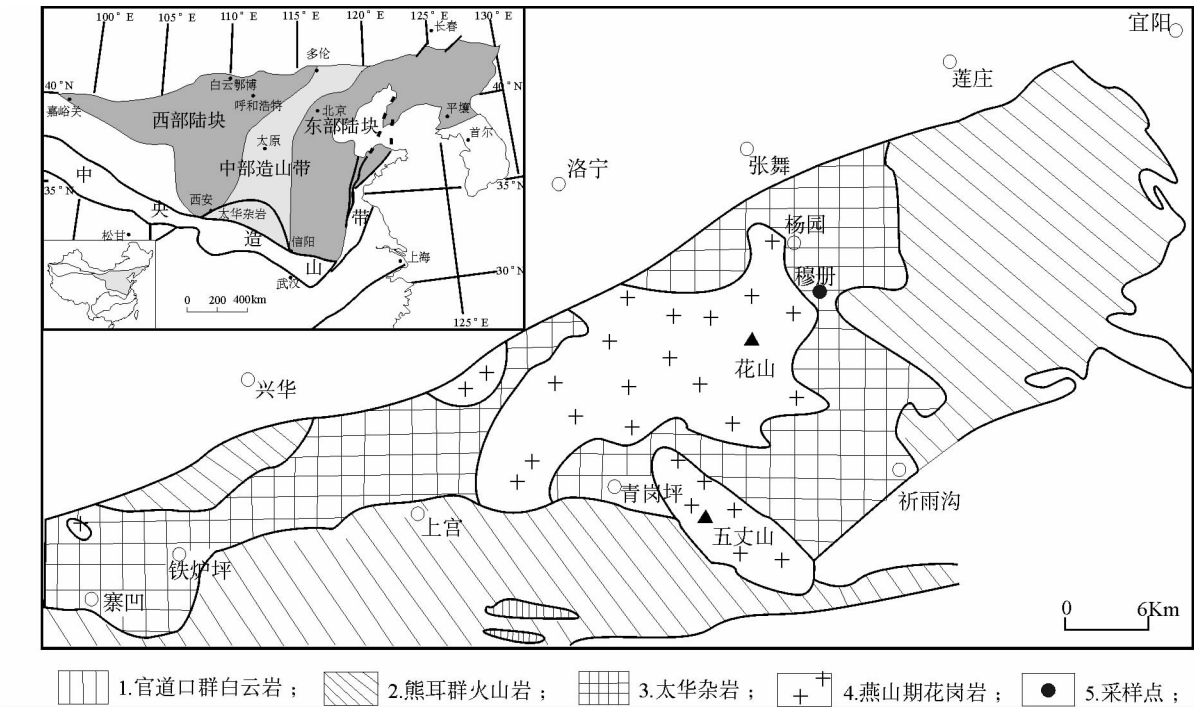


图1 宜阳地区地质简图(据河南省地质图,1981)

Fig.1 The Simplified geological map of YiYang area

TTG 质片麻岩主要为黑云斜长片麻岩,条带状构造,中粒粒状鳞片变晶结构,暗色矿物主要为黑云母(10 ~ 15%),含少量的普通角闪石(1 ~ 5%),浅色矿物为石英(25 ~ 30%),斜长石(50 ~ 55%),斜长石是他形粒状,双晶不发育,一般为 An = 27 ± 的更长石,副矿物为磁铁矿、磷灰石和自形,半自形的锆石。

3 分析方法

本文主量和微量元素以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。主量元素分析采用 XRF (Rigaku RIX 2100) 玻璃熔饼法完成。微量元素采用 ICP-MS (Perkin Elmer 公司具动态反应池的 Elan 6100 DRC) 法完成,样品溶解在 Teflon 高压溶样弹中进行。

锆石 U-Pb 年龄测定在 LA-ICPMS 仪器上进行,测定时采用 10Hz 的激光频率、80mJ 的激光强度和 30μm 的激光束斑直径,并以 91500 作为外部标样,普通铅校正采用 Anderson 的方法 (Andersen,2002),其年龄采用 ISOPLOT 程序计算 (Ludwig,2003)。详细实验过程、U-Pb 年龄和元素含量计算可参见文献具体测试过程见 Yuan (2004)

锆石 Lu-Hf 同位素测试在北京中科院地质与地球物理研究所完成,采用配有 193nm 激光的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICPMS) 进行分析,分析过程中采用 8Hz 的激光频率、100mJ 的激光强度和 63μm 的激光束斑直径。实验中以 He 作为剥蚀物质的载气,采用 91500 作为外部标样,具体测试过程见徐平等 (2004)。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学特征

样品主量元素和微量元素分析结果列于表 1。片麻岩 SiO₂ 含量变化范围较大 (59 ~ 73%),相当于中酸性岩岩浆成分,Al₂O₃ 质量分数 > 15%,为高铝型,Na₂O/K₂O 比值的变化范围为 1.0 ~ 4.7,以富钠质系列为主,其里特曼指数变化于 1.3 ~ 3.1 之间,为钙碱性系列。镁指数偏高 Mg[#] (Mg[#] = 46.8 ~ 50.1)。随着 SiO₂ 含量的增加,CaO、MgO、Al₂O₃、TiO₂ 含量减少,呈负相关,表明有镁铁矿物和斜长石的分离,同时 Na₂O/K₂O 比值随着 SiO₂ 含量的增高而降低 (图略),说明岩浆成分向钾质方向演化,P₂O₅ 也随着 SiO₂ 含量的减少,表明有磷灰石的分离,由于磷灰石的分离可以抵消因斜长石分离而产生 Eu 的亏损,上述的变化特点也说明片麻岩为正常岩浆岩结晶成分演化趋势。根据标准矿物分子计算,在 An-Ab-Or 三角图上,片麻岩的大部分投影落在英云闪长岩区,少数落在花岗闪长岩和奥长花岗岩区 (图 2)。

穆册片麻岩稀土元素丰度较低,为 115 ~ 199μg/g,轻重稀土分异明显, (La/Yb)_N = 9 ~ 23,在稀土配分模式图上重

表 1 宜阳 TTG 质片麻岩的主量元素 (wt%) 和微量元素 (10⁻⁶) 分析结果

Table 1 Major (wt%) and trace element (10⁻⁶) compositions of the YiYang TTG gneisses

sample	MC10	MC11	MC12	MC22	MC23	MC03
SiO ₂	59.00	65.75	65.28	60.66	61.83	73.16
TiO ₂	0.52	0.26	0.28	0.40	0.33	0.19
Al ₂ O ₃	17.53	17.12	17.33	17.53	17.28	14.99
Fe ₂ O ₃ T	6.95	3.37	3.48	4.86	4.11	1.24
MnO	0.09	0.05	0.05	0.06	0.06	0.01
MgO	3.43	1.60	1.75	2.14	1.94	0.60
CaO	5.11	4.19	4.32	4.61	3.99	2.54
Na ₂ O	4.06	4.44	4.62	4.57	3.93	5.32
K ₂ O	1.88	2.38	2.27	2.46	3.77	1.13
P ₂ O ₅	0.14	0.08	0.09	0.10	0.11	0.05
LOI	1.64	1.10	0.89	3.06	2.53	0.38
Total	100.35	100.34	100.36	100.45	99.88	99.61
Ma ₂ O/K ₂ O	2.16	1.87	2.04	1.86	1.04	4.71
里特曼指数	2.21	2.04	2.13	2.80	3.15	1.38
Mg [#]	49.67	48.71	50.14	46.83	48.56	49.18
Sc	16.67	4.94	4.75	9.54	6.79	1.96
V	57.73	39.19	38.88	69.68	50.02	18.80
Cr	19.51	11.70	16.85	15.15	14.41	14.92
Co	83.19	119.19	156.28	81.47	73.27	132.84
Ni	13.52	15.92	18.22	15.99	17.62	13.24
Cu	5.82	2.21	2.54	8.29	4.49	2.00
Zn	77.07	43.86	45.65	47.41	41.31	38.58
Ga	17.47	17.27	17.29	18.05	16.82	22.20
Ge	1.25	1.30	1.23	1.11	1.14	1.76
Rb	48.50	66.52	52.60	137.06	156.06	149.46
Sr	507.14	517.73	526.56	542.90	606.85	597.08
Y	14.85	13.99	13.25	15.04	15.27	14.94
Zr	139.73	106.82	127.41	110.37	157.92	114.57
Nb	7.57	8.00	7.36	9.83	5.72	9.72
Cs	0.55	0.51	0.45	1.03	1.35	0.73
Ba	1487.05	967.50	1011.56	598.36	2354.68	1457.48
La	28.24	25.88	27.58	26.35	32.86	48.93
Ce	53.10	50.03	52.97	53.16	61.66	88.85
Pr	5.60	5.30	5.48	5.85	6.27	9.23
Nd	22.56	20.36	20.88	23.65	23.54	33.92
Sm	3.81	3.37	3.25	4.24	3.57	5.19
Eu	1.14	1.05	1.06	1.25	1.21	1.55
Gd	3.49	3.09	2.96	3.81	3.32	4.67
Tb	0.46	0.40	0.38	0.54	0.42	0.54
Dy	2.52	2.26	2.09	3.09	2.22	2.66
Ho	0.50	0.46	0.42	0.64	0.44	0.49
Er	1.37	1.31	1.17	1.81	1.22	1.33
Tm	0.21	0.21	0.19	0.29	0.19	0.20
Yb	1.43	1.39	1.27	1.98	1.28	1.42
Lu	0.23	0.23	0.21	0.33	0.21	0.25
Hf	3.71	2.98	3.49	3.05	4.10	6.36
Ta	0.36	0.60	0.57	0.73	0.40	0.50
Pb	13.39	15.55	15.92	12.18	15.72	15.50
Th	7.04	7.78	9.14	7.03	8.48	8.07
U	0.62	0.66	0.90	0.61	0.72	0.65
REE	124.65	115.13	119.72	126.66	138.37	199.02
La _N /Yb _N	13.30	12.56	14.67	9.00	17.29	23.31
Sr/Y	34.15	37	39.73	36.11	39.73	39.97
Eu *	0.95	1.00	1.05	0.95	1.07	0.96
Ce *	1.14	1.19	1.16	1.12	1.17	1.20

Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺), Fe²⁺ 据全铁计算

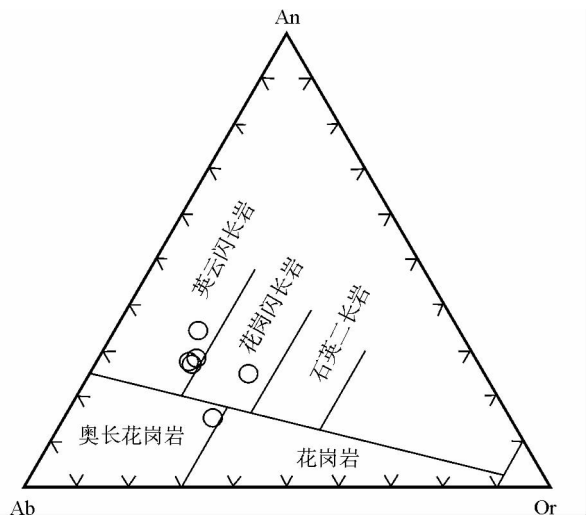


图2 片麻岩 An-Ab-Or 图解

Fig. 2 Rock classification based on normative feldspar variation

稀土相对于轻稀土平坦, Eu 无异常或轻微的正异常 ($Eu/Eu^* = 0.95 \sim 1.07$) (图3)。岩石富集 Rb、Sr、Ba、K 等大离子亲石元素, 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 亏损 Nb、Ta、P 等高场强元素以及 Ti 具有明显的负异常, Ce 具有微弱的正异常 $Ce^* = 1.12 \sim 1.2$ (图3), Y ($13.25 \sim 25.27 \mu\text{g/g}$) 和 Yb ($1.27 \sim 1.98 \mu\text{g/g}$) 含量较低, Sr/Y 比值较高 ($34.15 \sim 39.97$) (图4), 这些岩石地球化学数据表明, 宜阳灰色片麻岩为一套高铝的 TTG 质岩石。

4.2 锆石 U-Pb 年代学

TTG 质片麻岩中的锆石为半自形到自形, 可以看到明显的核, 具有特征的岩浆锆石震荡环带结构 (图5)。对样品的锆石 LA-ICP-MS 分析结果如图6和表2所示。锆石的 Th、U 含量较高, Th 含量为 $132 \sim 1164 \mu\text{g/g}$, U 的含量为 $198 \sim 906 \mu\text{g/g}$ 。激光剥蚀等离子体质谱同位素组成分析表明, 绝大多数样品锆石中普通铅含量不到锆石总铅含量的 1%, 表明锆石中普通铅的份额是很低的。锆石的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 常用来指示其成因, 一般认为岩浆成因锆石具有较高的 Th/U 比值。通常大于 0.4, 而变质成因锆石的该比值相对较低 (小于 0.1); 因为在变质结晶过程中, 由于离子半径的差异和化学性质的不同, 锆石中的 Th^{4+} 优先 U^{4+} 被逐出晶格, 使得变质锆石区域的 Th/U 降低。样品锆石的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 范围为 $0.41 \sim 1.34$, 都大于 0.4, 表明为岩浆成因锆石 (Belousova, *et al.*, 2002; Hoskin, *et al.*, 2002)。

MC-12 样品中 20 颗锆石的 20 个点几乎都沿一致线分布, 对于不谐和的年龄数据, 其年龄关系表现为 $t_{207/206} > t_{207/235} > t_{206/238}$, 这说明锆石年龄的不一致性是由于不同程度的放射性成因铅丢失造成, 不一致线的上交点年龄为 $2336 \pm 13 \text{ Ma}$ (图6), 样品 MC19 样品中 31 颗锆石的 31 个分析点

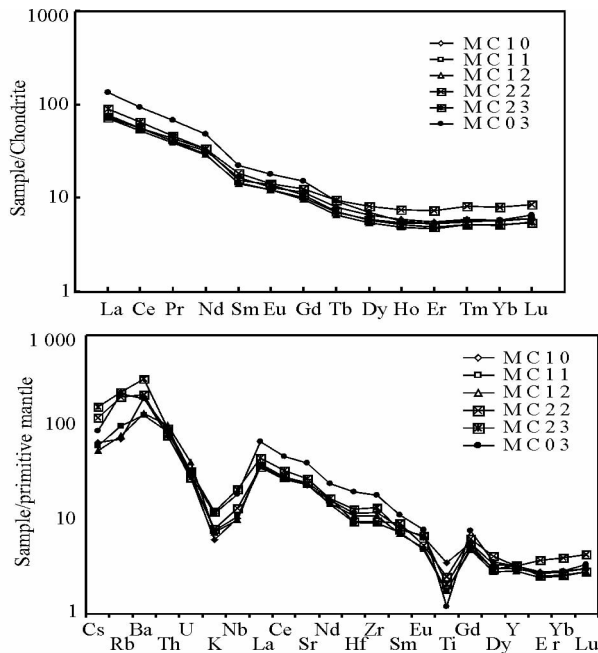


图3 宜阳 TTG 质片麻岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图和原始地幔不相容元素蛛网图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergrams of YiYang TTG gneisses

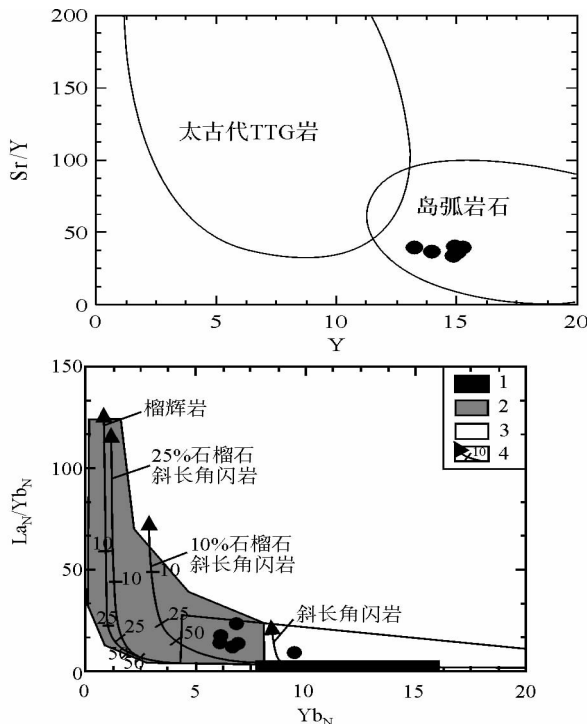


图4 宜阳 TTG 质片麻岩的 Y-Sr/Y (据 Defant *et al.*, 2002) 和 $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 图 (据 Drummond *et al.*, 1990)

图 $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 中 1-大洋中脊玄武岩 (MORB), 2-adakite 型高铝 TTG, 3-低铝 TTG, 4-部分熔融曲线

Fig. 4 Y-Sr/Y (and $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ diagrams for YiYang TTG gneisses

表 2 宜阳 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 同位素 LA-ICP-MS 方法定年

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data for the YiYang TTG gneisses

编 号	组成(ppm)				比值						年龄(Ma)					
	Pb *	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ	
Mc12-01-02	400	482	782	0.62	0.15	0.002	8.775	0.091	0.424	0.004	2347	18	2315	9	2279	19
Mc12-01-04	158	185	306	0.6	0.146	0.002	8.594	0.094	0.427	0.004	2299	19	2296	10	2293	19
Mc12-03-07	178	211	340	0.62	0.149	0.002	8.893	0.098	0.433	0.004	2333	19	2327	10	2321	20
Mc12-03-08	222	218	429	0.51	0.148	0.002	8.782	0.094	0.431	0.004	2319	19	2316	10	2312	19
Mc12-03-09	430	1076	803	1.34	0.148	0.002	8.218	0.085	0.403	0.004	2320	18	2255	9	2185	18
Mc12-03-11	269	343	505	0.68	0.147	0.002	8.759	0.094	0.431	0.004	2317	19	2313	10	2309	19
Mc12-05-12	165	220	330	0.67	0.145	0.002	8.186	0.091	0.408	0.004	2292	20	2252	10	2207	19
Mc12-05-13	268	283	484	0.58	0.149	0.002	9.246	0.098	0.449	0.004	2337	19	2363	10	2392	20
Mc12-05-15	238	292	425	0.69	0.15	0.002	9.239	0.098	0.447	0.004	2345	19	2362	10	2382	20
Mc12-05-16	275	278	613	0.45	0.148	0.003	7.522	0.137	0.368	0.004	2328	32	2176	16	2018	21
Mc12-05-17	196	253	389	0.65	0.147	0.002	8.262	0.087	0.408	0.004	2311	19	2260	10	2204	18
Mc12-06-18	237	442	422	1.05	0.152	0.002	8.743	0.096	0.416	0.004	2373	19	2312	10	2243	19
Mc12-06-20	257	432	502	0.86	0.149	0.002	8.137	0.085	0.395	0.004	2339	19	2246	9	2146	18
Mc12-06-21	189	219	337	0.65	0.151	0.002	9.225	0.101	0.444	0.004	2356	19	2361	10	2366	20
Mc12-06-22	133	183	243	0.75	0.151	0.002	8.833	0.103	0.424	0.004	2357	21	2321	11	2280	19
Mc12-06-23	155	189	328	0.57	0.148	0.002	7.792	0.094	0.383	0.004	2317	22	2207	11	2091	18
Mc12-07-25	565	1165	906	1.29	0.149	0.002	8.976	0.09	0.438	0.004	2331	18	2336	9	2341	19
Mc12-07-26	113	151	230	0.65	0.147	0.002	7.971	0.092	0.393	0.004	2315	21	2228	10	2134	18
Mc12-07-27	107	140	198	0.71	0.148	0.002	8.681	0.104	0.425	0.004	2326	21	2305	11	2282	19
Mc12-07-28	155	166	283	0.59	0.149	0.002	9.093	0.106	0.442	0.004	2339	21	2347	11	2358	20
Mc19-01-01	75	105	140	0.75	0.1505	0.0019	8.9368	0.1105	0.4307	0.0044	2352	22	2332	11	2309	20
Mc19-01-02	296	410	559	0.73	0.145	0.0016	8.7336	0.0944	0.4369	0.0043	2288	19	2311	10	2337	19
Mc19-01-03	178	142	355	0.4	0.141	0.0018	8.4927	0.1037	0.4367	0.0045	2240	22	2285	11	2336	20
Mc19-01-04	150	122	304	0.4	0.1483	0.0017	8.9024	0.1006	0.4353	0.0044	2327	20	2328	10	2330	20
Mc19-01-05	139	148	279	0.53	0.1453	0.0017	8.2409	0.0947	0.4113	0.0041	2291	20	2258	10	2221	19
Mc19-01-07	198	225	408	0.55	0.1464	0.0018	8.6761	0.1004	0.4297	0.0043	2305	20	2305	11	2305	20
Mc19-01-08	205	219	375	0.58	0.1553	0.0018	9.6924	0.1096	0.4527	0.0046	2405	20	2406	10	2407	20
Mc19-01-09	598	494	1173	0.42	0.1484	0.0016	9.2478	0.0941	0.4518	0.0044	2328	18	2363	9	2403	20
Mc19-03-10	106	120	201	0.6	0.1463	0.0018	8.9754	0.1043	0.445	0.0045	2303	20	2336	11	2373	20
Mc19-03-11	196	238	388	0.61	0.1479	0.0017	8.6764	0.0985	0.4254	0.0043	2322	20	2305	10	2285	19
Mc19-03-12	65	64	118	0.54	0.1538	0.0022	9.6622	0.1323	0.4556	0.0049	2389	24	2403	13	2420	22
Mc19-03-13	160	142	328	0.43	0.1447	0.0017	8.4239	0.0934	0.4223	0.0043	2284	19	2278	10	2271	19
Mc19-03-14	145	116	246	0.47	0.1492	0.0018	10.2265	0.1184	0.4971	0.0051	2337	20	2456	11	2601	22
Mc19-03-15	127	77	244	0.31	0.1471	0.0017	9.4716	0.1069	0.4669	0.0047	2313	20	2385	10	2470	21
Mc19-03-16	41	53	78	0.67	0.1484	0.0021	8.8962	0.1229	0.4348	0.0047	2327	24	2327	13	2327	21
Mc19-03-17	397	520	684	0.76	0.1455	0.0016	9.3847	0.0983	0.4677	0.0047	2294	18	2376	10	2474	20
Mc19-04-19	301	286	622	0.46	0.1488	0.0016	8.5094	0.0889	0.4148	0.0041	2332	18	2287	10	2237	19
Mc19-04-20	216	213	362	0.59	0.1548	0.0017	9.6088	0.103	0.4503	0.0045	2399	18	2398	10	2396	20
Mc19-04-21	595	588	1153	0.51	0.1499	0.0016	9.3481	0.0957	0.4523	0.0045	2345	18	2373	9	2405	20
Mc19-04-22	174	168	336	0.5	0.1481	0.0017	9.3421	0.1055	0.4574	0.0047	2324	20	2372	10	2428	21
Mc19-04-23	696	792	1273	0.62	0.1489	0.0015	9.4086	0.0951	0.4581	0.0046	2334	17	2379	9	2431	20
Mc19-04-24	124	144	241	0.6	0.1455	0.0017	8.6002	0.0974	0.4287	0.0044	2294	20	2297	10	2300	20
Mc19-06-25	91	108	192	0.56	0.1446	0.0018	8.0471	0.0991	0.4036	0.0042	2283	21	2236	11	2186	19
Mc19-06-26	212	227	447	0.51	0.1412	0.0017	7.6964	0.0887	0.3952	0.0041	2242	20	2196	10	2147	19
Mc19-06-27	260	181	517	0.35	0.1494	0.0018	9.1954	0.1062	0.4462	0.0046	2340	20	2358	11	2379	20
Mc19-11-28	168	239	328	0.73	0.1483	0.0017	8.7356	0.0992	0.4271	0.0044	2327	20	2311	10	2293	20
Mc19-11-29	398	575	768	0.75	0.1466	0.0016	8.6806	0.0908	0.4295	0.0043	2306	18	2305	10	2304	20
Mc19-11-30	851	2872	1467	1.96	0.1518	0.0016	9.1837	0.0938	0.4388	0.0044	2366	17	2357	9	2345	20
Mc19-11-31	119	111	225	0.49	0.1548	0.0019	9.4605	0.1148	0.4432	0.0047	2400	21	2384	11	2365	21
Mc19-11-32	152	198	315	0.63	0.1445	0.0017	8.0299	0.0917	0.403	0.0042	2282	20	2234	10	2183	19
Mc19-11-33	1380	1430	3306	0.43	0.1409	0.0014	7.3247	0.0739	0.3771	0.0038	2238	17	2152	9	2063	18

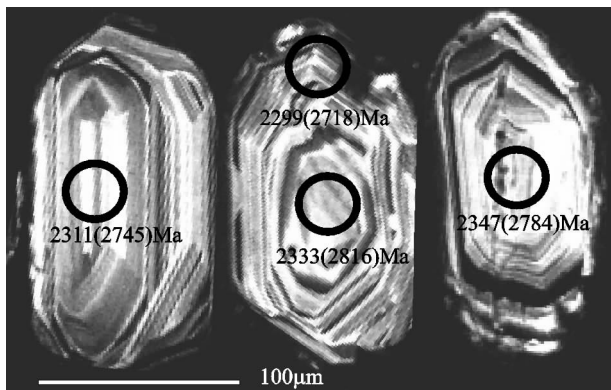


图5 宜阳 TTG 质片麻岩锆石 CL 图像

Fig. 5 CL image of zircon from YiYang TTG gneisses

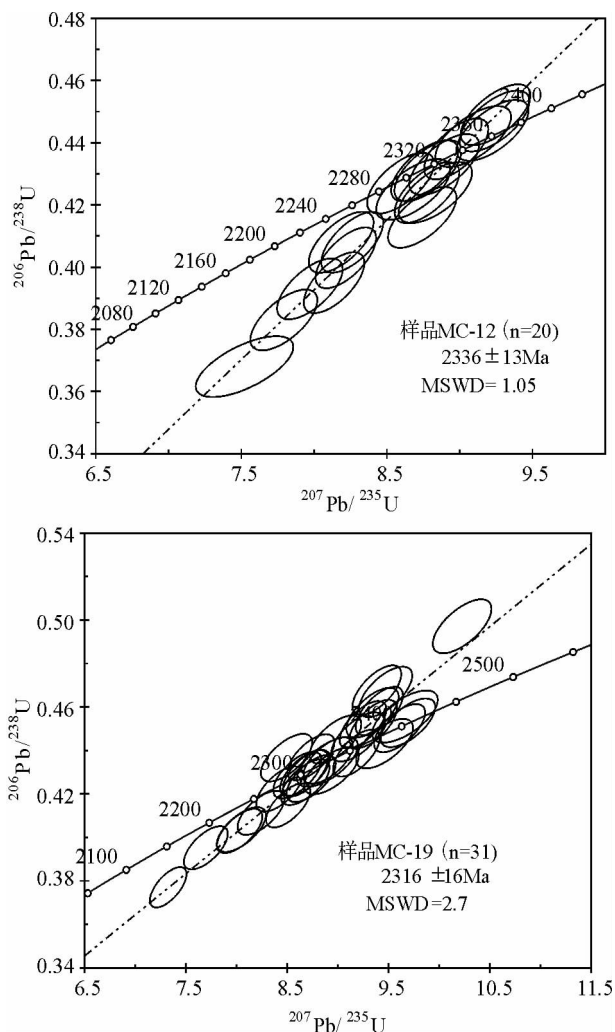


图6 宜阳 TTG 质片麻岩的 U-Pb 年龄

Fig. 6 The U-Pb ages of YiYang TTG gneisses

也大都沿不一致分布,其不一致线的上交点年龄为 $2316 \pm 16\text{Ma}$ (图6)。二者在误差范围内完全一致,代表了 TTG 岩石原岩的成岩年龄。

4.3 锆石 Hf 同位素

锆石的 Hf 同位素分析结果如表 3 所示。表 3 中还给出了 Hf 同位素一阶段模式年龄 $T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ 和二阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}}(\text{Hf})$, 后者分别用铁镁质地壳 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.34$; Amelin *et al.*, 2000) 和硅铝质地壳 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$; Vervoort *et al.*, 1996) 的 Lu/Hf 比分别计算。由于锆石的 Lu/Hf 比 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.96$) 显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比, 因此二阶段模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳的平均存留年龄)。

由于这些岩石主要是花岗质岩石, 所以用硅铝质大陆地壳的 Lu/Hf 可能更合理。所有颗粒锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 其平均值为 0.0013, 显示锆石在形成以后具有极低的放射性成因 Hf 的积累。所有分析点的 $^{76}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化在 0.281195 ~ 0.281497 之间, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值绝大多数为负值 ($-0.32 \sim 4.95$, 平均值为 -1.7), 只有 4 个锆石分析点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (0.61 ~ 3.68), 平均值为 2.0, 说明该岩石主要来自于地壳岩石的部分熔融, 并且有一定的地幔物质的加入。单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 变化范围为 2519 ~ 2858 Ma, 平均值为 2710 Ma, 对于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值的数值, 其 Hf 的两阶段模式年龄为 2569 ~ 3014 Ma, 平均值为 2815 Ma。

5 讨论

5.1 片麻岩的成因

随着岩石中 SiO_2 含量的增加, 主元素有规律地变化, 表明这套 TTG 质岩石经历了共同的岩浆阶段。低的 Y 及 HREE 表明其残留相中存在石榴子石或者角闪石, 由于石榴子石强烈富集 HREE, 而角闪石相对富集中稀土 (Green, 1994), 因此当石榴子石为主要残留相时, 熔体表现为 HREE 强烈亏损, 这时 $\text{Y}/\text{Yb} > 10$, $(\text{Ho}/\text{Yb})\text{N} > 1.2$; 当角闪石为主要残留相时, 熔体表现为 HREE 相对平坦, 这时的 $\text{Y}/\text{Yb} \approx 10$, $(\text{Ho}/\text{Yb})\text{N} \approx 1$ (葛小月等, 2002)。宜阳灰色片麻岩的 $\text{Y}/\text{Yb} = 7.6 \sim 11.8$, 平均值为 10.1; $(\text{Ho}/\text{Yb})\text{N}$ 值 = 0.96 ~ 1.01, 平均值为 0.98, 这些地球化学数据表明宜阳 TTG 质片麻岩的残留相可能主要为角闪石, 有少量的石榴子石。 $\text{Mg}^\#$ 的大小可以灵敏地反映基性岩熔融产物是否受到地幔物质的混染, 实验岩石学表明玄武质岩部分熔融产生熔体 $\text{Mg}^\# < 45$ (Rapp, *et al.*, 1997), 而宜阳 TTG 质片麻岩 $\text{Mg}^\#$ 为 46.8 ~ 50.1, 平均值为 48.84, 说明其熔体受到一定的地幔物质的混染。锆石少数分析点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, 高的可达 3.68, 也说明这一点因此宜阳 TTG 质片麻岩可能为在角闪岩相条件下部分熔融的产物 (图 5)。

宜阳 TTG 质片麻岩富集大离子亲石元素 Ba 和 K, 并且 LILE 富集和 Nb、Ta 亏损, 在 Pearce (1984) 的 Y-Nb, (Y + Nb)-Rb (图略) 以及 Y-Sr/Y 图解 (图 5) 中这些岩石的投图落入岛弧区域。片麻岩具有负的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (最高达 -4.95),

表 3 宜阳 TTG 质片麻岩 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测量数据

Table 3 LA-MC-ICPMS in-situ analysis of zircon Lu-Hf isotopic composition of the YiYang TTG gneisses

Sample	Age(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	T _{DM1} (Hf)	T _{DM2} (Hf-felsic)	T _{DM2} (Hf-mafic)	f _{Lu/Hf}
MC12-02 01	2347	0.062540	0.001147	0.281265	0.000023	-53.30	-2.75	0.42	2784	2905	3330	-0.97
MC12-02 03	2299	0.084714	0.001521	0.281332	0.000026	-50.91	-2.78	0.61	2718	2830	3234	-0.95
MC12-02 05	2333	0.067607	0.001186	0.281243	0.000027	-54.06	-4.95	0.81	2816	2951	3420	-0.96
MC12-02 07	2319	0.054756	0.001226	0.281336	0.000020	-50.80	-0.54	0.52	2693	2795	3157	-0.96
MC12-02 08	2320	0.056829	0.001128	0.281349	0.000021	-50.31	-0.18	0.52	2667	2764	3102	-0.97
MC12-02 10	2317	0.062542	0.001949	0.281497	0.000048	-45.10	3.68	1.33	2519	2569	2761	-0.94
MC12-02 11	2292	0.045340	0.000924	0.281338	0.000021	-50.70	-0.32	0.49	2668	2776	3144	-0.97
MC12-02 12	2337	0.043890	0.000930	0.281298	0.000021	-52.12	-2.29	0.58	2723	2833	3211	-0.97
MC12-02 13	2345	0.058166	0.001132	0.281316	0.000021	-51.48	-0.97	0.51	2712	2816	3173	-0.97
MC12-02 14	2328	0.070324	0.002115	0.281363	0.000031	-49.81	1.53	1.03	2718	2814	3184	-0.94
MC12-02 16	2311	0.049972	0.001042	0.281288	0.000022	-52.49	-2.06	0.50	2745	2867	3290	-0.97
MC12-02 18	2373	0.041713	0.001000	0.281253	0.000024	-53.70	-2.18	0.57	2789	2907	3314	-0.97
MC12-02 19	2339	0.045870	0.001063	0.281383	0.000020	-49.12	0.61	0.61	2616	2694	2965	-0.97
MC12-02 20	2356	0.043224	0.001095	0.281283	0.000020	-52.65	-2.04	0.59	2755	2867	3256	-0.97
MC12-02 21	2357	0.075185	0.001528	0.281310	0.000024	-51.69	-1.41	0.54	2749	2854	3231	-0.95
MC12-02 22	2317	0.046840	0.000861	0.281195	0.000022	-55.79	-4.42	0.62	2858	3014	3544	-0.97
MC12-02 23	2331	0.043371	0.001032	0.281417	0.000021	-47.92	2.33	0.70	2568	2635	2865	-0.97
MC12-02 24	2315	0.065074	0.001235	0.281320	0.000022	-51.35	-1.42	0.50	2715	2825	3212	-0.96
MC12-02 25	2326	0.069868	0.001312	0.281325	0.000021	-51.18	-1.10	0.48	2713	2819	3194	-0.96
MC12-02 26	2339	0.051389	0.001688	0.281366	0.000055	-49.71	-0.57	1.63	2683	2773	3103	-0.95
MC12-02 27	2347	0.054154	0.001390	0.281321	0.000020	-51.32	-1.48	0.49	2725	2826	3191	-0.96
MC12-02 28	2299	0.057533	0.001044	0.281330	0.000024	-51.00	-0.32	0.57	2688	2797	3176	-0.97

表中锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数：¹⁷⁶Lu 衰变常数 λ = 1.856 × 10⁻¹¹, 球粒陨石 Lu/Hf = 0.0332, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772 (Blichert-Toft J and Alberade F;1997); 亏损地幔¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.0384, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.28325(Griffin WL *et al.*, 2000); 铁镁质和硅铝质地壳的 f_{Lu/Hf} 分别是 -0.34 (Amelin T *et al.*, 2000) 和 -0.72 (Vervoort JD *et al.*, 2000)

表明其源区主要来自陆壳物质;部分锆石的 ε_{Hf} 为正值,表明其源区有相当比例的亏损地幔的物质加入,这正是岛弧岩浆应该有的同位素特征。锆石的 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 2635 ~ 3014Ma,平均年龄为 2815Ma,这与最新利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法测得鲁山杂岩的的形成年龄一致(出版中),而且如图 7 所示,宜阳 TTG 质片麻岩所有的投点,都位于 3.0TTG 地壳的上方,部分点位于亏损地幔以下,暗示其岩浆源区可能是由古老的下地壳和一定量的地幔物质共同组成,而且宜阳和鲁山不同时代的 TTG 杂岩的源区可能具有一定的相似性。

5.2 太华杂岩的形成年龄和地质意义

许多学者对太华杂岩进行年龄测定,但是利用 Ar-Ar 法(倪志耀,2003),单颗粒蒸发²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 法(Kroner,1988;sun,1994;倪志耀,2003),全岩 Rb-Sr 法(陈好寿,1980),磷

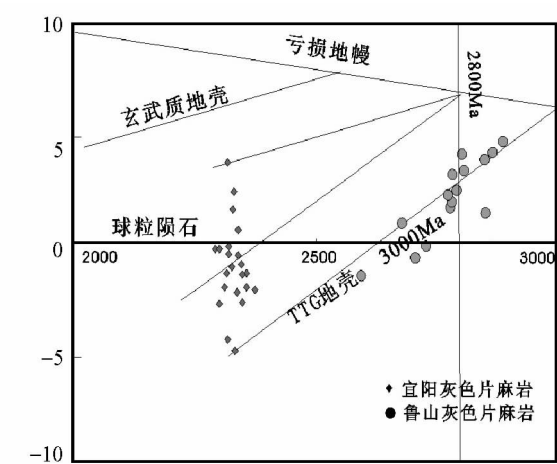


图 7 太华 TTG 质片麻岩的锆石 Hf 特征
Fig. 7 Zircon Hf isotopic of TaiHua TTG gneisses

表 4 太华杂岩同位素年龄
Table 4 Isotopic ages of Taihua complex

样品	同位素年龄 (Ma)	分析方法	资料来源
英云闪长片麻岩	2841 ± 6 2806 ± 7	Pb-Pb 蒸发法	Kroner1988
长英质片麻岩	2622	锆石 U-Pb 法	陈好寿 1980
钠长变粒岩	1975Ma	磷灰石 U-Pb 法	陈好寿 1980
斜长角闪岩	2766 ± 29	Sm-Nd 等时线	薛良伟 1995
片麻岩	2807 ± 4	Pb-Pb 蒸发法	SunYong1994
斜长角闪岩	2542 ± 57	Sm-Nd 等时线	周汉文 1998
斜长角闪岩	2914 ± 79	Sm-Nd 模式年龄	张宗清 1998
	2351 ± 103	Sm-Nd 等时线	
	1539 ± 46	Rb-Sr	
斜长角闪岩	2372. 98 ± 46	Ar-Ar 坪年龄	倪志耀 2003
	2349. 10 ± 46. 98	Ar-Ar 等时线	
	2675 ± 2	Pb-Pb	

灰石 U-Pb 法(陈好寿, 1980)以及全岩 Sm-Nd 法(薛良伟, 1995; 张宗清, 1998)所获得年龄结果变化较大(表 4)。这可能是由于太华杂岩作为早前寒武纪变质地体, 受到多期构造事件的影响而强烈再造(孙勇, 1982), 对于所获得的年龄数据, 没有分清楚其成岩年龄与变质年龄, 另一方面也可能是由于所选择同位素测年方法存在偏差, 因为锆石的蒸发法仅能提供²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 不能测定 U/Pb 年龄, 无法判断 U、Pb 同位素体系是否封闭; 太华杂岩变质程度高达角闪岩相-麻粒岩相, Rb-Sr、Sm-Nd 同位素体系可能已经开放。对于锆石 U-Pb 法而言, 该方法可以同时获得三个年龄数据, 即²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 这三个年龄值的差异可指示在同位素平衡之后体系受到干扰的程度, 从而可以进行体系内部的自检和校正。所以对前寒武纪岩石锆石 U-Pb 法都要大大优越于 Rb-Sr 或 K-Ar、Sm-Nd、Pb-Pb 法(江博明, 1989; 孙大中, 1990; 沈其韩, 2002)。而且锆石具有很高的 Hf 同位素体系封闭温度, 即使在麻粒岩相的变质条件下, 锆石仍可保留原始 Hf 同位素成分。这使得锆石可以记录岩浆源区不同性质的源岩特征, 成为讨论岩浆起源和探讨地壳演化以及壳幔相互作用过程的重要工具(Amelin, *et al.*, 1999; Griffin, *et al.*, 2002)。因此, 这使得本文得以在前人研究的基础上进一步探讨太华杂岩的形成年龄。

由于亏损地幔模式年龄(T_{DM})是利用测得的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值和相对当前亏损地幔的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值¹⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值计算得到的这些亏损地幔模式年龄(T_{DM})代表了锆石的寄主岩浆的源区物质的最小年龄(Veevers, *et al.*, 2005)。宜阳 TTG 质片麻岩的 Hf 同位素数据表明, 其两阶段模式年龄主要 2.57 ~ 3.01Ga 之间, 平均值为 2.82Ga, 所以说穆册灰色片

麻的源区可能存在年龄为 2.8Ga 左右(或更老)的地壳物质, 说明代表该区基底的太华杂岩形成时代可能为 2.8Ga。

已有研究表明, 世界各主要前寒武大陆陆壳最主要的时期为太古代(2800 ~ 2500Ma)和早元古代的晚期(2000 ~ 18000Ma), 地壳的增生具有幕式的特点(Condie *et al.*, 1998), 如 2400 ~ 2000 就是全球陆壳的沉静期, 但是发现我国华北地块在所谓的“沉寂期”有比世界上其它克拉通更强的火山活动和构造活动。”在我国的吕梁地区, 中条地区都存在大量的古元古代的岩浆作用(孙勇, 1988; 孙大中等, 1993; 万渝生等, 2000; Kroner, *et al.*, 2005; 陈斌等, 2006; 耿元生等, 2006)。锆石的 Hf 同位素表明宜阳灰色片麻岩的岩浆源区的可能来自于古老的下地壳以及亏损地幔物质。虽然华北地块陆壳最主要的时代在 2500Ma(Wu *et al.*, 2005), 主要是遍布华北地块各地的 TTG 岩类和部分沉积地层(吴福元, 1999), 然而有证据表明华北地块南缘也在 2400 ~ 2000 仍然是重要的地壳增长时期(孙大中等, 1993; 张宏飞等, 1995; 黄萱等, 1995), 而且在空间上显示出由北到南逐渐的生长过程(张宏飞等, 1995)。本文通过对宜阳地区太华杂岩的地球化学特征以及锆石 U-Pb 和 Hf 同位素地质学研究表明华北地块南缘大陆地壳在古元古代早期仍然发生有一定的陆壳增生。

6 结论

- 通过对豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成的研究, 可以得到如下结论:
- (1) 宜阳地区片麻岩为一套高铝的 TTG 质片麻岩石, 岩石可能为在角闪岩相条件下部分熔融的产物, TTG 岩的侵位时代为 2.3Ga。
 - (2) 片麻中的锆石大部分具有负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 说明其源区主要为古老的陆壳物质; 部分锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 表明在其形成过程中有相当比例的亏损地幔物质加入。锆石的 Hf 同位素数据表明灰色片麻的源区可能存在年龄为 2.8Ga 左右(或更老)的地壳物质, 说明代表该区基底的太华杂岩形成时代可能为 2.8Ga(或更老)。
 - (3) 虽然华北地块陆壳最主要的增生时代为 2500Ma, 依据前人的研究成果并通过宜阳灰色片麻岩的研究结果, 说明华北地块大陆地壳在古元古代早期仍然存在陆壳增生。

致谢 本工作受教育部科学技术研究重大项目(批准号 306021)、国家自然科学基金(批准号 40472099)资助。感谢高山教授、吴福元教授、杨进辉副研究员的指导; 感谢刘树文教授、范宏瑞研究员提出的宝贵意见; 感谢吴元保教授阅读了本文并提出了许多宝贵的修改意见; 感谢王建其工程师、刘晔讲师对样品主微量分析付出辛苦的劳动; 感谢张吉衡博士在 Hf 同位素分析中给予的帮助; 感谢龚虎军博士在锆石 CL 图像中给予的帮助。

References

- Amelin Y, Lee DC, Halliday AN, Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399: 252 – 255
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192: 59 – 79
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henani Province. 1989. Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 772 (in Chinese)
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY, Fisher NI. 2002. Igneous Zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602 – 622
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1998. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243 – 258
- Condie KC. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163: 97 – 108
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, 79: 33 – 44
- Chen B, Liu SW, Geng YS, 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)
- Drummond MS, Defant MJ. 1990. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95: 21503 – 21521
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665
- Ge XY, Li XH, Chen ZG, Li WP. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of Yanshanian high-Sr/low-Y intermediate-felsic igneous rocks from eastern China: constraints on crustal thickness of eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47 (6): 474 – 480 (in Chinese)
- Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417: 837 – 840
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE *et al.* 2002. Zircon Chemistry and Magma Genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61: 237 – 269
- Geng YS, Yang CH, Wan YS. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Luliang area, North China Craton: constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (2): 305 – 314 (in Chinese with English Abstract)
- Hoskin PWO. 2001. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28 (7): 627 – 630
- Huang X, Sun BS, Pan J, Zhang RG. 1995. The ages of igneous rocks from eastern Qinling of North China platform and the crustal growth and reworking of the terrance. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (2): 312 – 319 43 (in Chinese with English Abstract)
- Jahn BM. 1989. Dating of Archean rocks: a discussion of methodology and limitation. *Geochimica*, 6 (2): 103 – 120 (in Chinese with English Abstract)
- Kröner A, Compston W, Zhang GW, Guo AL. 1988. Todt W. Age and tectonic setting of late Archean greenstone-gneisses terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16: 211 – 215
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. 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.*, 24: 577 – 595
- Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.0 – A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Spec Pub: (4): 1 – 70
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF. 2005. Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemitic-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1 – 24
- Ni ZY, Wang RM, Tong Y, Yang C, Dai TM. 2003. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age of Zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar of Amphibole from Plagioclase Amphibolite in the Taihua Group, Luoning, Henan, China. *Geological Review*, 49 (4): 361 – 366 (in Chinese with English Abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, 25: 956 – 983
- Rapp PR, Shimizu N, Norman MD, Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem. Geol.*, 160: 335 – 356
- Shen QH. 2002. Review and deliberation of the researches on Early Precambrian metamorphic stratigraphy. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (4): 305 – 316 (in Chinese with English Abstract)
- Smithies RH, Champion DC. 2002. The Archean high-Mg diorite suite: links to tonalite-trondhjemitic-granodiorite magmatism and implications for early Archean crustal growth. *J. Petrol.*, 41 (12): 1653 – 1671
- Sun DZ. 1990. A discussion on precambrian geochronology. *Regional Geology of China*, 4: 289 – 300 (in Chinese with English Abstract)
- Sun DZ and Hu WX. 1993. Precambrian Chronotectonic Framework and Geochronological Crustal Structure of the Zhongtiao Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 117 (in Chinese with English Abstract)
- Sun Y. 1988. Geochemistry of Archean Shushui complex. *Geochemistry*, 4: 319 – 325 (in Chinese with English Abstract)
- Sun Y. 1982. Polymetamorphism of the Taihua Group at the Lushan, Henan. *J. NW Univ.* (special issue for Precambrian Geology), 44 – 65 (in Chinese with English Abstract)
- Sun Y. 1982. Petrochemical features of the early Precambrian metavolcanic series in the Lushan region, Henan. *J. NW Univ.* (special issue for Precambrian Geology), 31 – 43 (in Chinese with English Abstract)
- Sun y. 1985. Origin of metamorphic rocks and setting of Archean Taihua high-grade belt along the S-W margin of the North China Craton. *J. NW Univ.*, 15: 70 – 77 (in Chinese with English Abstract)
- Sun Y, Yu Zaiping and Kröner A. 1994. Geochemistry and single zircon geochronology of Archean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 10 (3/4): 227 – 233 (in Chinese with English Abstract)
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA, Griffin WL. 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
- Wu FY, Zhao GC, Simon A. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Asian Earth Sci.*, 24: 523 – 545
- Xue LW, Yuan ZL, Zhang YS, Qiang LZ. 1995. The Sm-Nd isotope age of Taihua group in Lushan area and their implication. *Geochemistry*, 24 (Suppl): 92 – 97 (in Chinese with English Abstract)
- Xu P, Wu FY, Xie LW. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Sci. Bull.*, 49: 1642 – 1648 (in Chinese)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostand Newsl.*, 28: 353 – 370
- Zhang GW, Bai YB, Sun Y, Guo AL, Zhou DW. 1985. Composition and evolution of the Archean crust in central Henan, China. *Precambrian Res.*, 27: 7 – 35 (in Chinese with English Abstract)
- Zhou HW, Qiu ZQ, Li WL, Zhong GL, Xu QD. 1998. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiaolinling area,

- western Henan and its geological implications. *Geochimica*, 73(4): 367–372 (in Chinese with English Abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D, Wu FY. 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370
- Zhang HF, Zhao ZD, Luo QC. 1995. Crustal growth and lower crust nature of north Qinling: study of Sm-Nd isotopic model ages. *Acta Petrologica Sinica*, 11: 166–170 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang ZQ, Li SM. 1998. Sm-Nd, Rb-Sr age and its geological significance of Archean Taihua Group in Xiongershan, western Henan province, Contributions of Early Precambrian Geology in North China Craton. Beijing: Geological Publishing House, 123–132 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈斌, 刘树文, 耿元生, 刘超群. 2006. 吕梁-五台地区晚太古宙—古元古代花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. *岩石学报*, 22(2): 296–304
- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志(区域地质). 北京: 地质出版社, 1–772
- 倪志耀, 王仁民, 童英, 杨淳, 戴潼漠. 2003. 河南洛宁太华岩群斜长角闪岩的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄. *地质论评*, 49(4): 361–366
- 黄莹, 孙宝山, 潘均. 1995. 东秦岭华北地块区岩浆活动的时代及地壳增生和改造. *岩石学报*, 11(2): 312–319
- 江博明. 1989. 太古代岩石的定年-方法学和局限性的探讨. *地球化学*, 6(2): 103–120
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474–480
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩的演化——来自同位素年代学的证据. *岩石学报*, 22(2): 305–314

- 沈其韩. 2002. 早前寒武纪变质地层学研究的回顾与思考. *岩石矿物学杂志*, 21(4): 305–316
- 徐平, 吴福元, 谢烈文. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素. *科学通报*, 49(14): 1403–1410
- 薛良伟, 原振雷, 张荫树, 强立志. 1995. 鲁山太华群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义. *地球化学*, 24(增刊): 92–97
- 孙勇. 1982a. 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)*, 31–43
- 孙勇. 1982b. 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)*, 44–65
- 孙勇. 1985. 华北地块西南缘太华高级变质带原岩恢复及其构造环境探讨. *西北大学学报*, (1): 70–77
- 孙勇. 1988. 涑水杂岩的地球化学特征. *地球化学*, (4): 319–325
- 孙大中. 1990. 前寒武纪地质年代学问题探讨. *中国区域地质*, 289–300
- 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, 1–108
- 吴福元. 1999. 大陆地壳的形成时间及增生机制. 见: 郑永飞主编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 224–261
- 张国伟, 白玉宝, 孙勇, 郭安林, 周鼎武. 1985. 河南中部太古代地壳的组成和演化. *前寒武地质研究*, 27: 7–35
- 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 钟国楼, 徐启东. 1998. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. *地球化学*, 73(4): 367–372
- 张宗清, 黎世美. 1998. 河南省西部熊耳山地区太古宙太华群变质岩的 Sm-Nd, Rb-Sr 年龄及其地质意义. 见: 程裕淇主编. *华北地块早前寒武纪地质研究论文集*. 北京: 地质出版社, 123–132
- 张宏飞, 赵志丹, 骆庭川等. 1995. 从岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄论北秦岭地壳增生和地壳深部性质. *岩石学报*, 11: 166–170