

华北克拉通古老物质记录

——焦作地区太古宙变质岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 LA-MC-ICPMS Hf 同位素分析

殷小艳¹⁾, 周红英²⁾, 刘敦一^{3,4)}, 高林志³⁾, 董春艳^{3,4)}, 万渝生^{3,4)}

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津, 300170;

3) 中国地质科学地质研究所, 北京, 100037; 4) 北京离子探针中心, 北京, 100037

内容提要: 本文报道了华北克拉通中部焦作地区太古宙变质岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析结果。二云钾长片麻岩的碎屑锆石和变质锆石年龄分别为 $3.3 \sim 3.4$ Ga 和 2.47 ± 0.02 Ga, 碎屑锆石的 ε_{Hf} (3.40Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 值分别为 $-2.4 \sim +13.9$ 和 $2.89 \sim 3.84$ Ga, 变质锆石的 ε_{Hf} (2.47Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 值分别为 $-18.8 \sim -6.4$ 和 $3.38 \sim 4.13$ Ma。黑云角闪片麻岩中只存在变质锆石, 年龄为 2.49 ± 0.01 Ga, 变质锆石的 ε_{Hf} (2.49Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 值分别为 $-15.0 \sim -3.8$ 和 $3.23 \sim 3.91$ Ga。结合地球化学和前人研究成果, 可得出如下结论: ① 碎屑物质来自以 3.4 Ga 花岗质岩浆岩为主的物源区, 物源区岩石具有相当的规模, 是壳幔混合作用的产物, 形成过程中有更古老 (始太古代) 陆壳物质参与; ② 岩石遭受约 2.5 Ga 强烈构造热事件作用, 深熔作用导致花岗质脉体形成; ③ 可把变质碎屑沉积岩形成 (沉积) 时代限制在 2.5 ~ 3.3 Ga 之间; ④ 变质锆石的 Hf 同位素组成与核部锆石的十分类似, 变质增生边主要形成于核部锆石的溶解—再沉淀作用。

关键词: 古太古代; 变质沉积岩; SHRIMP 定年; Hf 同位素; 华北克拉通

早期陆壳物质的寻找和鉴别一直是地球科学的重要课题。华北克拉通具有很长的地质演化历史, >3.2 Ga 岩石和锆石在许多地区被发现 (第五春荣等, 2008, 2010; 万渝生等, 2009; 王洪亮等, 2007; 伍家善等, 1998; Gao Linzhi et al., 2004, 2006; Liu Dunyi et al., 1992, 2008, 2013; Song Biao et al., 1996; Wan Yusheng et al., 2005, 2012; Wu Fuyuan et al., 2005; Zheng Jianping et al., 2004)。其中, 第五春荣等 (2008) 在登封地区古元古代嵩山石英岩中发现 3.4 Ga 碎屑锆石, Gao Linzhi 等 (2006) 在登封北部的焦作地区早前寒武纪变质沉积岩中也发现了 3.4 Ga 碎屑锆石。这是华北克拉通中部地区获得的最古老物质记录。全球范围内, 约 3.4 Ga 构造岩浆作用仅在少数地区 (例如西澳、鞍山) 被发现 (Nutman et al., 1992; Wan Yusheng et al., 2012)。所以, 确定焦作地区变质沉积岩物源区性质对于研究华北克拉通早期地壳组成和演化具有重要的意义。此外, 焦作地区早前寒武纪变质沉积岩的形成时代还不清楚 (太古宙或古元古代)。为此, 在已有

工作基础上, 我们对焦作地区变质沉积岩开展了进一步的锆石定年, 同时补充了锆石 Hf 同位素研究。

1 地质背景

该区早前寒武纪变质岩出露面积很小, 仅 $1 \sim 2 \text{ km}^2$, 但在其西部的王屋山地区有更大范围分布 (图 1)。样品采自沁阳紫陵镇北八一水库。该处早前寒武纪变质基底被古生代碳酸盐岩不整合覆盖 (图 2a)。从出露的上百平方米露头看, 变质基底主要由长英质片麻岩及少量斜长角闪岩组成, 被红色花岗岩脉切割。长英质片麻岩遭受钾化 (图 2b), 局部发育平卧褶皱 (图 2c)。尽管遭受强烈变质变形, 局部的层状构造可能仍代表了原沉积层理。斜长角闪岩呈条带状、透镜状分布。根据区域对比, 它们被认为形成于新太古代 (河南省地质矿产局, 1989; Gao Linzhi et al., 2006), 但无可靠年代学证据。

样品 QY0403 为二云钾长片麻岩, 采自水库溢洪道 (图 2a), 与 Gao Linzhi 等 (2006) 的样品 04516-1 位置相距 20 余米。岩石新鲜, 呈灰色 (图 2d), 主

注: 本文为中国地质调查局项目 (编号 12120114021301, 12120113013700, 1212010811033) 的成果。

收稿日期: 2014-02-18; 改回日期: 2014-11-30; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 殷小艳, 女, 1981 年生。硕士。地球化学专业。Email: xy_yin@cags.ac.cn。通讯作者: 万渝生, 男, 1958 年生。博士, 研究员。主要从事早前寒武纪地质和年代学研究。Email: wanyusheng@bjshrimp.cn。

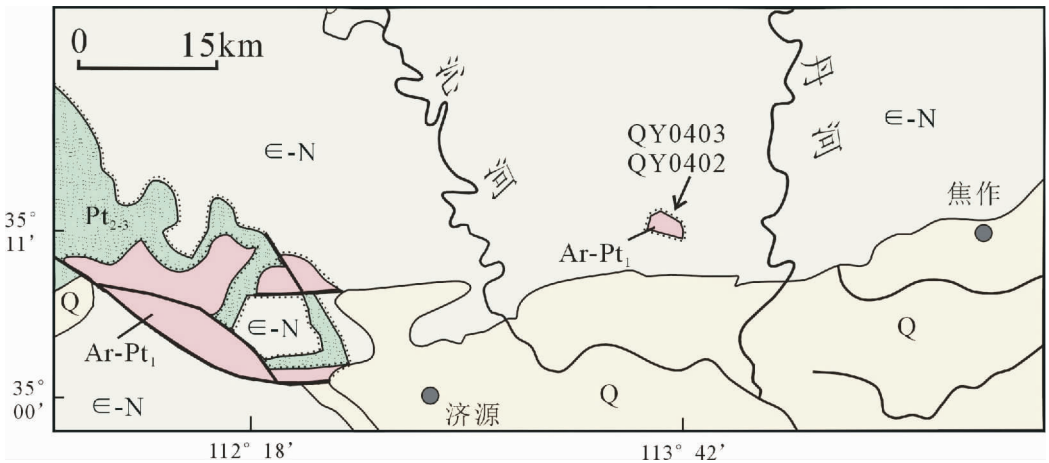


图 1 河南焦作地区地质简图及样品位置(据 Gao Linzhi et al. , 2006 修改)

Fig. 1 Geological map of Jiaozuo, Henan (modified after Gao et al. , 2006) and sample locations

Ar—Pt₁—太古宇—古元古界; Pt₂₋₃—中—新元古界; ε—N—寒武系—新近系; Q—第四系

Ar—Pt₁—Early Precambrian; Pt₂₋₃—Meso—Neopaleoproterozoic;

ε—N—Cambrian—Neogene; Q—Quaternary

要由石英(约 40%)、钾长石(约 35%)、斜长石(约 10%)和黑云母(约 10%)组成,另有少量白云母(约 5%)。粒状矿物钾长石、斜长石和石英之间局部构成三连点结构。一些细粒微斜长石集合体定向分布,可能是深熔作用产物。斜长石发生绢云母化和帘石化。黑云母定向分布,构成片麻理,黑云母普遍遭受蚀变,转变为绿泥石和暗色矿物。白云母呈片状,定向或不定向分布,部分白云母可能形成于变形作用之后。

黑云角闪片麻岩(QY0402)取自水库坝头,被红色花岗岩脉切割(图 2e)。岩石呈灰绿色(图 2f),片状一片麻状,主要由黑云母(约 35%)、角闪石(约 35%)组成,另有少量长石和石英(总量约 25%),还存在碳酸盐矿物。角闪石呈细小柱状分布,定向一半定向排列,部分蚀变为黑云母等矿物。黑云母为绿色—黄绿色,一些为棕红色,多数呈大片状不定向分布,部分转变为不透明矿物+白云母或不透明矿物+绿泥石,一些黑云母中存在针状暗色矿物集合体,呈三角状交叉分布,可能为脱水熔融或蚀变作用过程中形成的钛铁矿。长石遭受强烈绢云母(或白云母)蚀变,一些呈三连点结构。碳酸盐矿物也为蚀变产物。

2 分析方法

全岩元素分析在中国地质科学院国家地质分析中心完成。主量元素和微量元素分别由 XRF 和

表 1 河南焦作地区太古宙变质岩的元素组成
(常量元素:%;微量元素:×10⁻⁶)

Table 1 Element compositions of Archean metamorphic rocks in Jiaozuo, Henan
(major elements:%; trace elements:×10⁻⁶)

样品号	QY0403	QY0402	样品号	QY0403	QY0402
岩石名称	二云钾长片麻岩	黑云角闪片麻岩	岩石名称	二云钾长片麻岩	黑云角闪片麻岩
SiO ₂	73.61	41.90	Hf	14.9	3.28
TiO ₂	0.42	1.00	Zr	521	98.3
Al ₂ O ₃	11.69	13.56	Y	44.8	29.6
Fe ₂ O ₃	2.55	11.02	Th	30.6	0.33
FeO	1.80	6.23	U	1.05	1.51
MnO	0.02	0.14	La	78.8	16.1
MgO	1.36	8.21	Ce	138	33.8
CaO	0.19	4.73	Pr	15.4	5.03
Na ₂ O	1.22	0.61	Nd	54.2	19.7
K ₂ O	6.27	4.70	Sm	10.5	5.67
P ₂ O ₅	0.05	0.34	Eu	1.72	1.29
H ₂ O ⁺	1.16	4.76	Gd	9.28	5.81
CO ₂	0.17	2.84	Tb	1.53	1.04
烧失	1.12	7.15	Dy	9.58	6.93
总量	100.5	100.0	Ho	2.10	1.44
Cr	7.60	201	Er	6.16	4.13
Sc	7.90	26.5	Tm	0.89	0.61
Rb	112	144	Yb	5.46	3.88
Ba	1393	388	Lu	0.83	0.59
Sr	58.8	53.8	TREE	334.5	106.0
Nb	14.7	11.9	(La/Yb) _n	9.5	2.7
Ta	0.49	0.32	Eu/Eu*	0.53	0.69



图 2 河南焦作地区太古宙基底岩石野外照片

Fig. 2 Field photos of rocks in the Archean basement in Jiaozuo, Henan

(a) 古生代碳酸盐岩不整合在太古宙基底之上, 样品 QY0403 位置; (b) 遭受钾化的长英质片麻岩; (c) 长英质片麻岩呈平卧褶皱; (d) 二云钾长片麻岩 (QY0403); (e) 和 (f) 黑云角闪片麻岩 (QY0402)

(a) Paleozoic carbonate unconformably covering Archean basement; (b) K-altered felsic gneiss; (c) felsic gneiss showing a recumbent fold; (d) two mica K-feldspar gneiss (QY0403); (e) and (f) biotite hornblende gneiss (QY0402)

ICP-MS 方法完成。XRF 和 ICP-MS 方法的分析误差通常分别为 3% ~ 5% 和 3% ~ 8%, 分析误差与

样品中元素含量有关。
锆石年龄测定在北京离子探针中心 SHRIMP 上

完成。测定原理和流程见 Williams (1998)。一次离子流 O^{2-} 强度为 4 nA。一次离子流束斑直径为 25 ~ 30 μm 。每个数据点测定由 5 次扫描构成。标准为 SL13 和 TEM。用 ^{204}Pb 作普通铅年龄校正。数据处理程序为 SQUID1.03c 和 ISOPLOT (Ludwig, 2001)。采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 单个数据误差为 1σ 。

锆石 Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC2ICPMS) 和 193 nm 激光取样系统上进行的。分析方法见 Wu Fuyuan 等 (2006) 和谢烈文等 (2008)。采用静态信号采集模式, 背景采集时间 30 s, 激光能量密度为 $15\text{ J}/\text{cm}^2$, 频率为 8 ~ 10 Hz, 束斑直径为 $60\mu\text{m}$, 剥蚀速率 6 Hz。计算参数如下: ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001), 球粒陨石的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值分别为 0.0336 和 0.282785 (Bouvier and others, 2008), 现今亏损地幔的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 分别为 0.28325 和 0.0384 (Nowell et al., 1998), 用于计算 2 阶段亏损地幔模式年龄 ($t_{\text{DM2}(\text{CC})}$) 的平均大陆壳 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 为 0.015 (Griffin et al., 2002)。

3 地球化学

二云钾长片麻岩 (QY0403) 高 SiO_2 (73.61%)、 K_2O (6.27%), 低 CaO (0.19%)、 Na_2O (1.22%) (表 1)。稀土总量高 ($\text{TREE} = 334.5 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分异不明显 [$(\text{La}/\text{Yb})_n = 9.5$], 存在较强负铕异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.53$) (图 3a), 富集大离子亲石元素, 高场强元素 Nb、P 和 Ti 相对亏损, Cr 含量低 (图 3b)。与之相比, 黑云角闪片麻岩 (QY0402) 低 SiO_2 (41.90%), 高 CaO (4.74%)、 TFeO (16.15%) 和 MgO (8.21%), 但高 K_2O (4.70%) 低 Na_2O

(0.61%) (表 1)。稀土总量相对较低高 ($\text{TREE} = 106.0 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分异很弱 [$(\text{La}/\text{Yb})_n = 2.7$], 存在一定负铕异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.69$) (图 3a), 富集大离子亲石元素, 高场强元素 Nb、P 和 Ti 无明显亏损, Cr 含量很高 (201×10^{-6}) (图 3b)。

4 锆石定年

4.1 二云钾长片麻岩 (QY0403)

锆石呈紫色, 短柱状或椭圆状, 阴极发光图像中普遍具有核一边结构 (图 4a—f)。核部锆石形态多数不规则, 封闭环带多数已模糊, 显示出强烈重结晶作用叠加改造。变质增生边宽窄不等。一些锆石中, 核部锆石与边部变质增生边之间存在 U 含量高的成分域, 在阴极发光下为暗色, 它们可能为锆石重结晶过程中 U、Th 重新分配的缘故。一些情况下, 变质增生边与重结晶域难以区别。共在 37 颗锆石上进行了 49 个数据点分析 (表 2)。根据数据点在谐和图上的分布, 可把重结晶锆石划分为两组。大多数重结晶锆石数据点分布在年龄为 3.3 ~ 3.4 Ga 的不一致线上 (共 24 个数据点, 图 5a)。U 含量和 Th/U 比值分别为 $174 \times 10^{-6} \sim 604 \times 10^{-6}$ 和 0.29 ~ 1.02。选择铅丢失程度相对较低的数据点计算, 获得两组 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ 加权平均年龄, 分别为 $3328 \pm 10\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.57$, 3 个数据点, 14.1RC, 16.1RC, 23.2RC) 和 $3396 \pm 16\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 5.0$, 7 个数据点, 6.2RC, 11.1RC, 12.1RC, 15.2RC, 18.1RC, 31.1RC, 32.1RC)。另一部分重结晶锆石沿年龄为约 2.5 Ga 的不一致线分布, 也显示明显的铅丢失 (图 5a、b)。U 含量和 Th/U 比值分别为 $410 \times 10^{-6} \sim 929 \times 10^{-6}$ 和 0.07 ~ 0.85 (9 个数据点)。由于这些重结晶碎屑锆石与变质增生边的数据点在谐和图上分布特征十分类

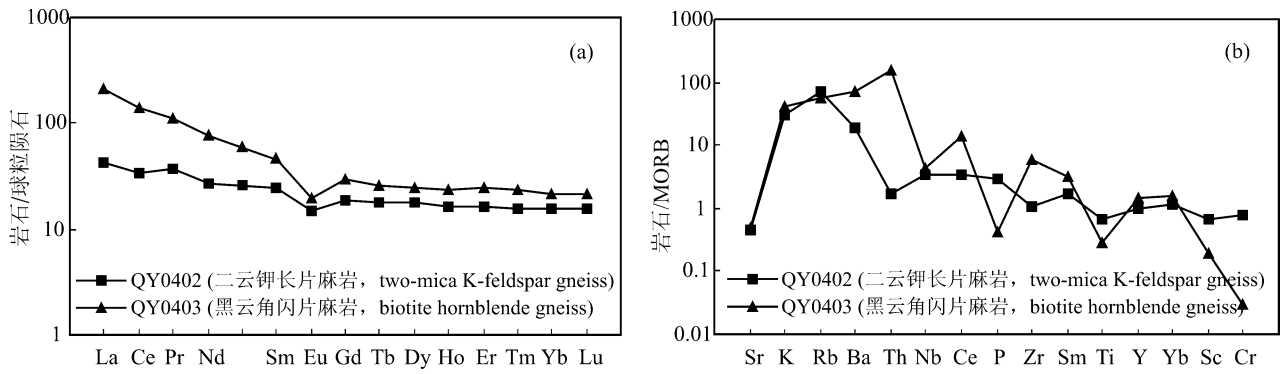


图 3 河南焦作地区太古宙变质岩的地球化学图解 (a) 稀土模式; (b) 微量元素图解
Fig. 3 Geochemical diagrams of Archean metamorphic rocks in Jiaozuo, Henan (a) REE pattern; (b) trace element diagram

似,位于同一不一致线上,表明 U—Th—Pb 体系已完全重置,为完全重结晶锆石(称之为变质锆石)。增生边锆石 18 个数据点分析,U 含量和 Th/U 比值分别为 $528 \times 10^{-6} \sim 1249 \times 10^{-6}$ 和 $0.04 \sim 0.17$,与完全重结晶锆石相比,U 含量增高而 Th/U 比值降低。它们也普遍存在强烈铅丢失,大多数位于上交点年龄为 3.3 ~ 3.4 Ga 和约 2.5 Ga 两条不一致

线相交的位置或其附近。铅丢失最弱的 4 个完全重结晶锆石和 1 个增生边锆石数据点[4.1ME(RC), 29.1 ME(RC), 33.1 ME(RC), 37.1 ME(RC), 15.1ME(R)]构成的不一致线上交点年龄为 2473 ± 21 Ma (MSWD = 1.0),解释为新太古代晚期—古元古代早期构造热事件年龄记录。

表 2 河南焦作地区太古宙变质岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 2 SHRIMP U-Pb zircon data for Archean metamorphic rocks in Jiaozuo, Henan

点号	含量及比值				同位素比值								同位素年龄 (Ma)				
	U	Th	²⁰⁶ Pb *	Th U	$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{206}\text{Pb}^*)}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb}^*)}{n(^{238}\text{U})}$		误差 相关 系数	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{206}\text{Pb}^*)}$		不谐 和度 (%)	
					测值	±%	测值	±%	测值	±%		测值	±1σ	测值	±σ		
(×10 ⁻⁶)				测值	±%	测值	±%	测值	±%	测值	±1σ	测值	±σ				
二云钾长片麻岩 (QY0403)																	
1. 1RC	365	265	132	0.75	0.2664	0.46	15.42	2.3	0.4199	2.3	0.98	2260	±44	3285	±7	31	
2. 1ME(R)	648	107	78	0.17	0.1168	1.60	2.22	2.7	0.1382	2.2	0.82	834	±18	1907	±28	56	
3. 1RC	347	315	144	0.94	0.2577	0.42	17.16	2.3	0.483	2.3	0.98	2541	±47	3233	±7	21	
4. 1ME(RC)	499	154	122	0.32	0.15242	0.61	5.94	2.3	0.2826	2.3	0.97	1604	±32	2373	±10	32	
5. 1RC	210	113	94	0.56	0.2697	0.58	19.31	2.4	0.519	2.3	0.97	2696	±52	3304	±9	18	
6. 1ME(R)	1249	43	159	0.04	0.1258	1.80	2.55	2.9	0.1471	2.3	0.78	885	±19	2040	±32	57	
6. 2RC	281	221	159	0.81	0.2892	0.48	26.24	2.4	0.658	2.3	0.98	3259	±59	3413	±7	5	
7. 1RC	251	152	123	0.63	0.2794	0.83	21.91	2.4	0.569	2.3	0.94	2902	±54	3360	±13	14	
8. 1ME(RC)	867	218	87	0.26	0.1105	1.2	1.78	3.1	0.1165	2.9	0.92	711	±19	1807	±22	61	
8. 2RC	604	476	84	0.81	0.1819	0.87	4.04	2.5	0.1610	2.3	0.94	963	±21	2670	±14	64	
9. 1RC	338	95	91	0.29	0.2382	1.10	10.25	2.6	0.3121	2.4	0.91	1751	±36	3108	±17	44	
9. 2ME(RC)	676	555	76	0.85	0.1263	0.96	2.26	2.4	0.1299	2.2	0.92	787	±17	2047	±17	62	
10. 1RC	227	137	121	0.62	0.2808	0.44	23.91	2.3	0.618	2.3	0.98	3100	±57	3367	±7	8	
11. 1RC	221	153	139	0.72	0.2909	1.60	29.31	2.8	0.731	2.3	0.82	3537	±62	3422	±25	-3	
12. 1RC	181	102	98	0.58	0.2895	0.48	25.00	2.4	0.626	2.3	0.98	3135	±57	3415	±7	8	
13. 1RC	470	269	122	0.59	0.2339	0.47	9.72	2.3	0.3015	2.3	0.98	1699	±34	3079	±8	45	
14. 1RC	191	117	110	0.63	0.2748	0.50	25.42	2.4	0.671	2.3	0.98	3309	±60	3334	±8	1	
15. 1ME(R)	528	77	94	0.15	0.1435	0.80	4.07	2.4	0.2059	2.3	0.94	1207	±25	2270	±14	47	
15. 2RC	222	111	124	0.52	0.2817	0.50	25.15	2.4	0.647	2.3	0.98	3218	±59	3372	±8	5	
16. 1RC	174	82	101	0.48	0.2735	0.63	25.35	2.4	0.672	2.4	0.97	3315	±61	3326	±10	0	
17. 1ME(R)	552	61	62	0.11	0.1177	2.20	2.10	3.1	0.1295	2.3	0.72	785	±17	1922	±39	59	
18. 1RC	238	133	113	0.58	0.2839	0.51	21.56	2.4	0.551	2.3	0.98	2828	±53	3385	±8	16	
18. 2ME(R)	784	92	87	0.12	0.1061	1.40	1.86	2.6	0.1273	2.2	0.85	772	±16	1734	±25	55	
19. 1RC	193	103	104	0.55	0.2784	0.59	23.87	2.5	0.622	2.4	0.97	3117	±59	3354	±9	7	
19. 2ME(R)	652	79	71	0.13	0.1224	1.30	2.12	2.7	0.1257	2.3	0.87	763	±17	1990	±24	62	
20. 1ME(R)	885	56	117	0.07	0.1500	1.20	3.18	2.5	0.1535	2.2	0.89	920	±19	2346	±20	61	
21. 1RC	282	137	124	0.50	0.2660	0.46	18.73	2.3	0.511	2.3	0.98	2659	±49	3283	±7	19	
22. 1ME(R)	547	54	45	0.10	0.1188	3.00	1.56	5.0	0.0951	4.0	0.80	586	±22	1938	±54	70	
23. 1ME(R)	570	63	69	0.11	0.1368	2.70	2.66	3.5	0.1410	2.2	0.64	850	±18	2187	±47	61	
23. 2RC	176	105	97	0.62	0.2727	0.54	23.89	2.6	0.636	2.5	0.98	3172	±63	3321	±9	5	
24. 1ME(R)	863	54	70	0.06	0.1102	1.60	1.40	2.8	0.0923	2.3	0.82	569	±12	1801	±29	68	
25. 1ME(R)	823	42	90	0.05	0.1357	2.20	2.37	3.2	0.1267	2.3	0.72	769	±16	2172	±39	65	
26. 1ME(RC)	506	84	53	0.17	0.1245	1.30	2.08	2.6	0.1212	2.3	0.87	737	±16	2022	±23	64	
26. 2ME(R)	826	96	71	0.12	0.1038	1.50	1.42	2.7	0.0994	2.3	0.84	611	±13	1694	±27	64	
27. 1RC	527	164	62	0.32	0.1313	0.97	2.45	2.5	0.1351	2.3	0.92	817	±17	2116	±17	61	
28. 1ME(R)	733	39	46	0.05	0.0959	2.00	0.96	3.0	0.0726	2.3	0.76	452	±9.9	1546	±37	71	
28. 2RC	370	204	137	0.57	0.2478	0.47	14.69	2.3	0.4298	2.3	0.98	2305	±44	3171	±8	27	
29. 1ME(RC)	609	148	97	0.25	0.1389	0.88	3.53	2.4	0.1842	2.3	0.93	1090	±23	2213	±15	51	

点号	含量及比值				同位素比值								同位素年龄(Ma)				
	U	Th	²⁰⁶ Pb *	Th/U	$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{206}\text{Pb}^*)}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb}^*)}{n(^{238}\text{U})}$		误差 相关 系数		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb}^*)}{n(^{206}\text{Pb}^*)}$		不谐 和度 (%)
	(×10 ⁻⁶)				测值	±%	测值	±%	测值	±%			测值	±1σ	测值	±σ	
30.1ME(RC)	546	58	62	0.11	0.1294	1.20	2.34	2.5	0.1311	2.3	0.89		794	±17	2090	±20	62
30.2ME(R)	648	65	46	0.10	0.1035	1.50	1.16	2.7	0.0812	2.3	0.83		504	±11	1687	±28	70
31.1RC	275	168	152	0.63	0.2838	0.40	25.05	2.5	0.640	2.4	0.99		3190	±61	3384	±6	6
32.1RC	293	288	158	1.02	0.2876	0.39	24.82	2.3	0.626	2.3	0.99		3134	±56	3405	±6	8
33.1ME(RC)	410	225	152	0.57	0.16023	0.56	9.50	2.4	0.4300	2.3	0.97		2306	±45	2458	±10	6
34.1RC	328	95	104	0.30	0.2643	0.99	13.44	3.3	0.369	3.2	0.95		2025	±55	3272	±16	38
35.1RC	584	422	70	0.75	0.1642	0.79	3.15	2.4	0.1390	2.3	0.94		839	±18	2499	±13	66
36.1ME(R)	1240	131	109	0.11	0.1088	1.40	1.52	2.7	0.1016	2.3	0.84		624	±13	1780	±26	65
37.1ME(RC)	636	54	118	0.09	0.14684	0.63	4.35	2.3	0.2148	2.2	0.96		1254	±26	2309	±11	46
37.2ME(RC)	929	65	73	0.07	0.1034	2.50	1.29	3.3	0.0903	2.2	0.67		557	±12	1686	±45	67
37.3ME(R)	774	74	79	0.10	0.1145	1.30	1.86	2.6	0.1177	2.2	0.86		717	±15	1872	±24	62

黑云角闪片麻岩(QY0402)

1.1ME(RC)	167	114	68	0.70	0.1630	0.77	10.60	2.6	0.472	2.5	0.96		2491	±52	2486	±13	0
2.1ME(RC)	108	77	43	0.74	0.1629	0.98	10.35	2.7	0.461	2.5	0.93		2443	±51	2486	±17	2
3.1ME(RC)	36	17	15	0.49	0.1617	1.70	10.68	3.3	0.479	2.7	0.85		2525	±57	2473	±29	-2
4.1ME(RC)	107	38	43	0.36	0.1659	0.95	10.62	2.8	0.464	2.6	0.94		2459	±54	2517	±16	2
4.2ME(R)	234	75	96	0.33	0.1616	0.68	10.58	2.4	0.475	2.3	0.96		2504	±48	2473	±12	-1
5.1ME(RC)	31	18	13	0.58	0.1642	1.80	10.80	3.3	0.477	2.8	0.84		2515	±57	2499	±31	-1
6.1ME(RC)	45	13	19	0.30	0.1610	1.50	10.83	3.0	0.488	2.6	0.87		2562	±56	2466	±25	-4
8.1ME(R)	494	166	108	0.35	0.14791	0.61	5.15	2.3	0.253	2.3	0.97		1452	±29	2322	±11	37
8.2ME(RC)	249	97	97	0.40	0.16227	0.60	10.12	6.4	0.452	6.3	1.0		2406	±130	2479	±10	3
9.1ME(R)	271	68	64	0.26	0.1511	1.10	5.69	2.6	0.273	2.3	0.91		1555	±32	2359	±18	34
9.2ME(RC)	57	16	24	0.30	0.1605	1.90	10.94	3.3	0.494	2.7	0.82		2590	±58	2460	±32	-5
10.1ME(R)	194	69	76	0.37	0.1641	0.76	10.23	2.5	0.452	2.3	0.95		2405	±47	2498	±13	4
11.1ME(RC)	40	18	15	0.47	0.1712	1.70	10.35	3.4	0.438	2.9	0.86		2343	±57	2570	±29	9
11.2ME(R)	193	70	72	0.37	0.1627	0.98	9.75	2.6	0.435	2.4	0.93		2327	±47	2484	±16	6
12.1ME(RC)	193	97	75	0.52	0.1640	0.65	10.25	2.4	0.453	2.3	0.96		2409	±46	2497	±11	4
12.2ME(RC)	24	12	9	0.49	0.1554	3.40	8.61	4.6	0.402	3.1	0.67		2178	±56	2406	±57	9
13.1ME(RC)	24	11	10	0.48	0.1608	2.80	10.30	4.2	0.464	3.1	0.74		2459	±64	2464	±48	0
14.1ME(RC)	28	13	11	0.47	0.1622	2.30	10.33	3.8	0.462	3.0	0.80		2449	±62	2478	±39	1
15.1ME(R)	76	35	33	0.47	0.1631	1.20	11.34	2.9	0.505	2.6	0.90		2634	±57	2487	±21	-6
16.1ME(RC)	190	68	74	0.37	0.1630	0.80	10.13	2.5	0.451	2.4	0.95		2398	±48	2487	±14	4
17.1ME(RC)	29	12	11	0.45	0.1645	2.00	10.17	3.4	0.449	2.8	0.81		2389	±56	2502	±34	5
18.1ME(RC)	39	12	15	0.31	0.1650	1.70	9.82	3.3	0.432	2.8	0.85		2314	±55	2507	±29	8
19.1ME(R)	25	10	10	0.44	0.1655	1.90	10.54	3.5	0.462	3.0	0.84		2447	±60	2513	±32	3
20.1ME(RC)	172	62	60	0.37	0.1589	0.82	8.95	2.5	0.409	2.4	0.94		2209	±44	2444	±14	10

注:(1)*代表放射性成因Pb,测定²⁰⁴Pb值作普通铅校正;(2)计算不谐和度的公式为 $D = \frac{(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_{\text{年龄}} - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})_{\text{年龄}}}{(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_{\text{年龄}}}$;
(3)RC、ME(RC)和ME(R)分别代表重结晶锆石、完全重结晶锆石和变质增生锆石。

4.2 黑云角闪片麻岩(QY0402)

锆石的形态和结构特征与样品QY0402的类似(图6a—f)。但是,所有重结晶锆石与变质增生边锆石的年龄一致,表明它们已遭受完全重结晶。17个完全重结晶锆石的U含量和Th/U比值分别为24×10⁻⁶~249×10⁻⁶和0.30~0.74,7个变质增生边的U含量和Th/U比值分别为25×10⁻⁶~494×10⁻⁶和0.26~0.47。除去铅丢失较强和偏离较大的数据点,其余19完全重结晶锆石和变质增生边数

据点的Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁶加权平均年龄为2488±8Ma(MSWD=0.59),解释为新太古代晚期—古元古代早期构造热事件年龄记录(图7)。

5 Hf同位素组成

表3和图8给出了锆石Hf同位素组成。二云钾长片麻岩(QY0403)15个部分重结晶锆石数据点分析, ε_{Hf} (3.40Ga)和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 值为-2.4~+13.9和2.89~3.84Ga,3个完全重结晶锆石数据点分

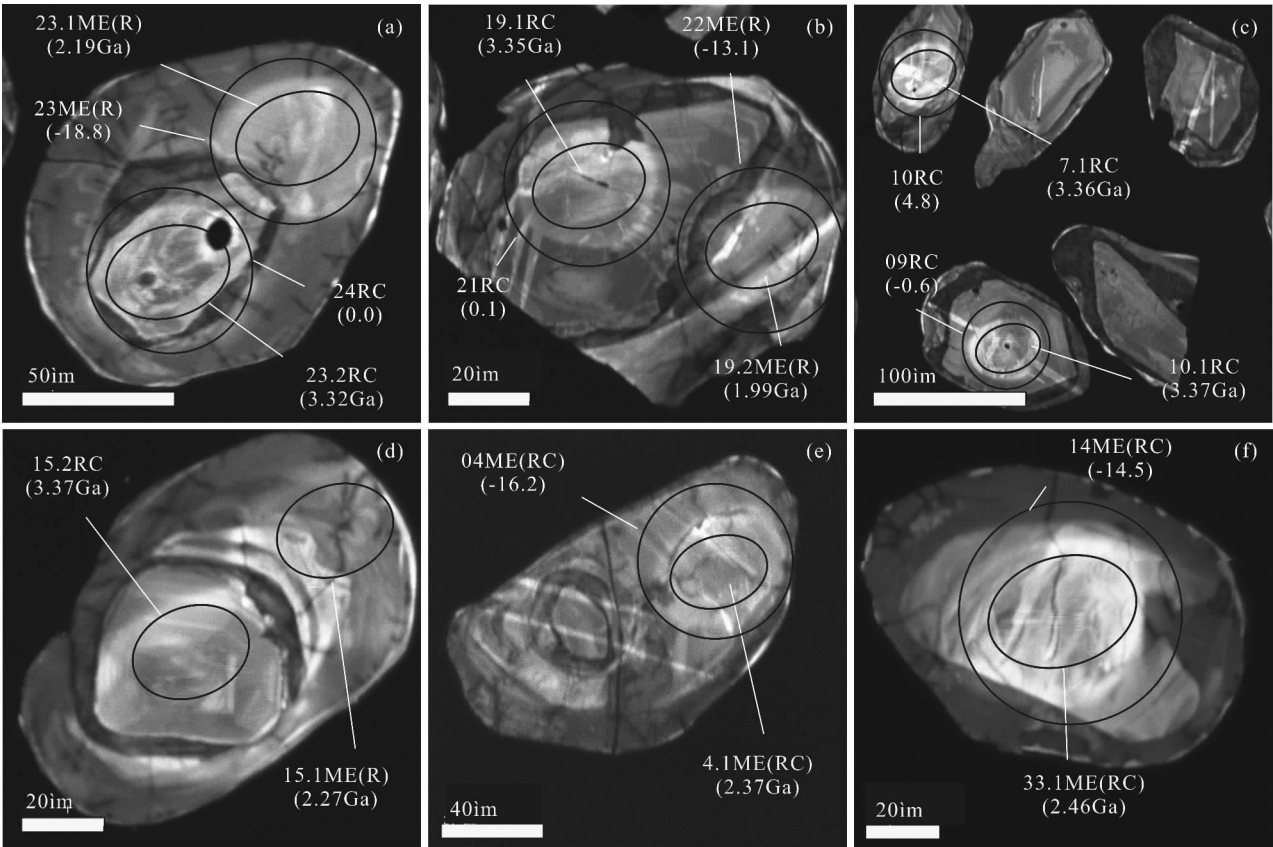


图 4 河南焦作地区太古宙二云钾长片麻岩 (QY0403) 的锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons from Archean two-mica K-feldspar gneiss (QY0403) in Jiaozuo, Henan

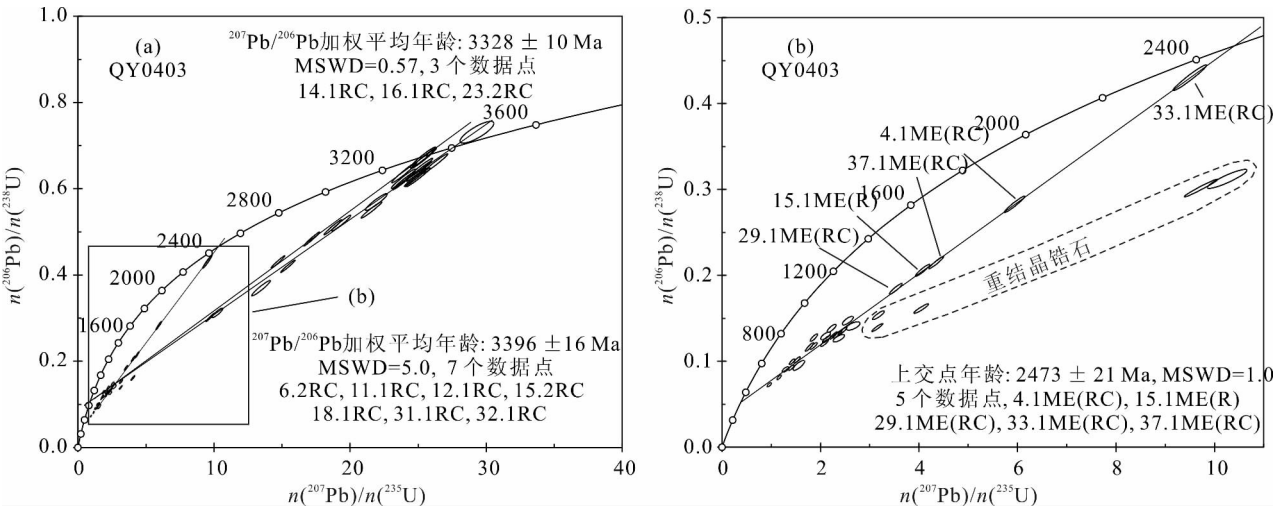


图 5 河南焦作地区太古宙二云钾长片麻岩 (QY0403) 的锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 5 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from Archean two-mica K-feldspar gneiss (QY0403) in Jiaozuo, Henan

析, ε_{Hf} (2.47Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别为 -16.2 ~ -9.8 和 3.59 ~ 3.97 Ga。5 个变质增生边数据点分析, ε_{Hf} (2.47Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别为 -18.8 ~ -6.4 和

3.38 ~ 4.13 Ga。

黑云角闪片麻岩 (QY0402) 6 个完全重结晶锆石数据点分析, ε_{Hf} (2.49Ga) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别为

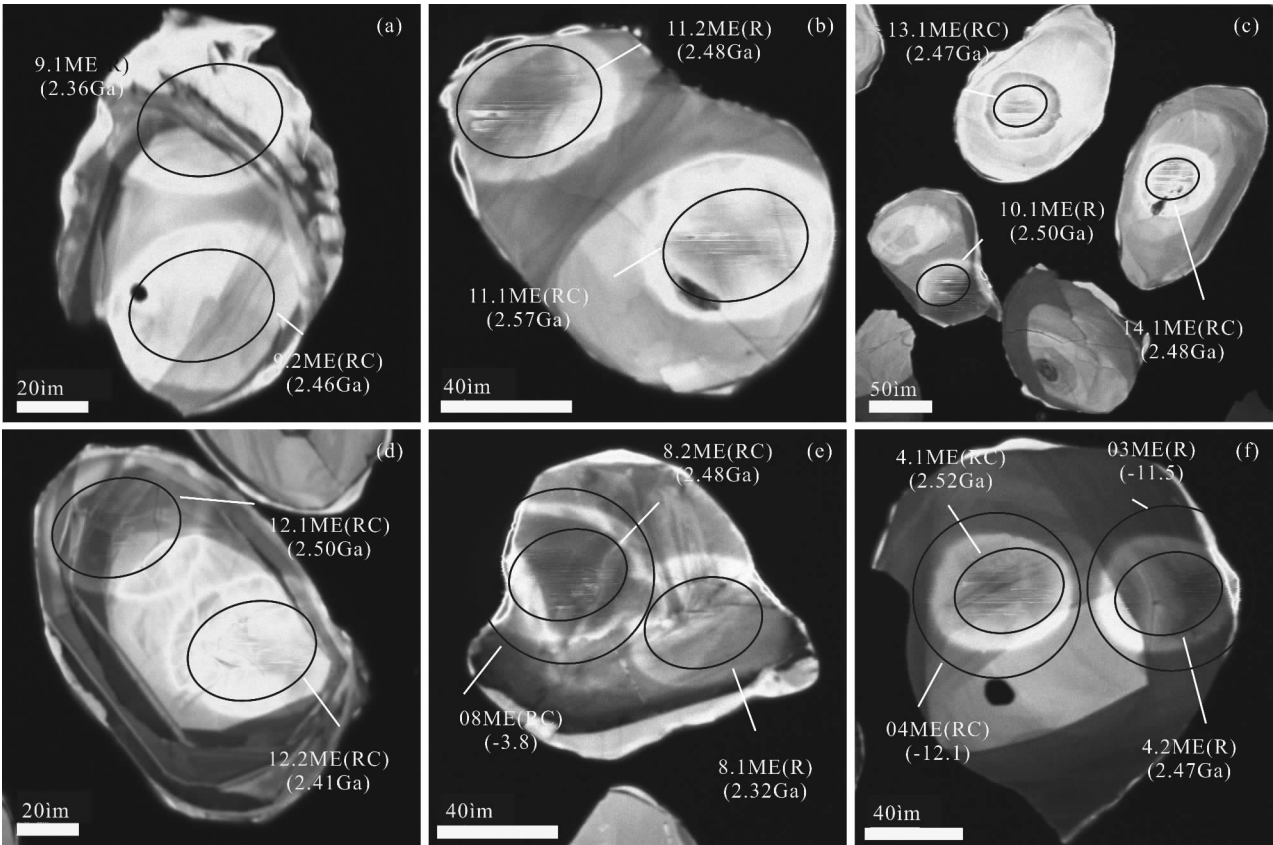


图 6 河南焦作地区太古宙黑云角闪片麻岩 (QY0402) 的锆石阴极发光图像

Fig. 6 Cathodoluminescence images of zircons from Archean biotite hornblende gneiss (QY0402) in Jiaozuo, Henan

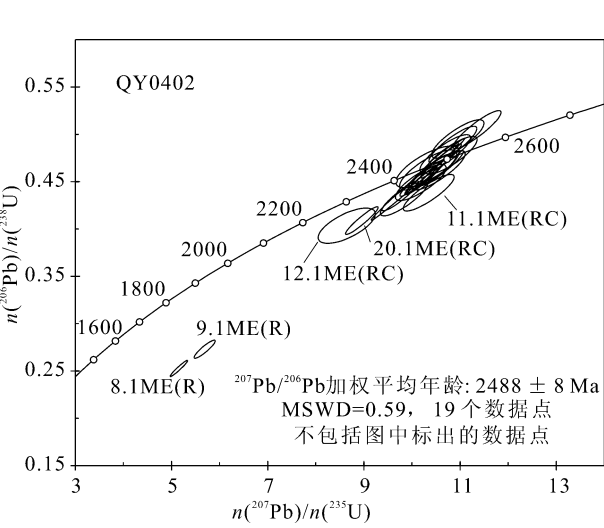


图 7 河南焦作地区太古宙黑云角闪片麻岩 (QY0402) 的锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 7 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from Archean biotite hornblende gneiss (QY0402) in Jiaozuo, Henan

-15.0 ~ -3.8 和 3.23 ~ 3.91 Ga, 1 个变质增生边的 ε_{Hf} (2.49 Ma) 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别为 -11.5 和 3.70 Ga。

6 讨论

变质锆石成因十分复杂,但可划分为变质新生锆石(变质增生边或以单独颗粒形式存在)和重结晶锆石(可进一步划分为固态重结晶和流体参与下的重结晶,也可进一步划分为部分重结晶和完全重结晶)两大类。本文中,两个岩石样品的核部锆石都遭受不同程度变质重结晶改造,并有变质新生锆石形成。遭受重结晶的锆石在阴极发光下虽结构发生了变化,但原有环带仍模糊可见。二云钾长片麻岩样品 QY0403 中的大多数核部重结晶锆石的数据点位于 3.3 Ga 和 3.4 Ga 两条不一致线上,3.3 ~ 3.4 Ga 仍大致代表了核部锆石的形成年龄。少部分重结晶锆石的年龄变化很大,数据点位于上交点年龄为 2.47 Ga 的不一致线上,表明重结晶过程中锆石的 U—Th—Pb 体系发生了完全重置,属于完全

表 3 河南焦作地区太古宙变质岩的锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Hf isotope data for zircons from Archean metamorphic rocks in Jiaozuo, Henan

Hf 分析点	年龄分析点	计算参数使用的 年龄 (Ga)	$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$[n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})](\text{c})$		$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$		$t_{\text{DMI}}(\text{Hf})$ (Ga)		$t_{\text{DM2(CC)}}(\text{Hf})$ (Ga)		$f_{\text{Lu/Hf}}$
					测值	2σ		测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ	
二云钾长片麻岩 (QY0403)														
01 RC	1.1RC	3.40	0.1228	0.0022	0.281012	0.000028	-62.7	10.1	1.0	3.22	0.08	3.12	0.12	-0.93
03 RC	3.1RC	3.40	0.1168	0.0024	0.281135	0.000045	-58.3	13.9	1.6	3.06	0.13	2.89	0.19	-0.93
04 ME(RC)	4.1ME(RC)	2.47	0.0610	0.0011	0.280796	0.000024	-70.3	-16.2	0.8	3.42	0.06	3.97	0.10	-0.97
05 RC	5.1RC	3.40	0.0764	0.0016	0.280809	0.000031	-69.9	4.3	1.1	3.44	0.08	3.47	0.13	-0.95
06 RC	6.2RC	3.40	0.1949	0.0035	0.281077	0.000034	-60.4	9.4	1.2	3.24	0.10	3.16	0.15	-0.90
07 ME(RC)	8.1ME(RC)	2.47	0.0997	0.0019	0.281013	0.000030	-62.7	-9.8	1.1	3.19	0.08	3.59	0.13	-0.94
08 RC	8.2RC	3.40	0.0832	0.0014	0.280752	0.000024	-71.9	2.7	0.9	3.50	0.07	3.56	0.10	-0.96
09 RC	10.1RC	3.40	0.0964	0.0018	0.280689	0.000032	-74.1	-0.6	1.1	3.63	0.09	3.76	0.14	-0.94
10 RC	7.1RC	3.40	0.1436	0.0033	0.280934	0.000037	-65.4	4.8	1.3	3.42	0.11	3.44	0.16	-0.90
11 RC	9.1RC	3.40	0.0447	0.0007	0.280734	0.000020	-72.5	3.6	0.7	3.47	0.05	3.51	0.08	-0.98
12 RC	11.1RC	3.40	0.1173	0.0025	0.280756	0.000025	-71.8	0.2	0.9	3.60	0.07	3.71	0.11	-0.92
13 ME(R)	6.1ME(R)	2.47	0.3468	0.0077	0.281385	0.000095	-49.5	-6.4	3.4	3.17	0.31	3.38	0.41	-0.77
14 ME(RC)	33.1ME(RC)	2.47	0.0440	0.0008	0.280829	0.000027	-69.2	-14.5	1.0	3.34	0.07	3.87	0.12	-0.98
15 RC	14.1RC	3.40	0.0996	0.0022	0.280713	0.000031	-73.3	-0.5	1.1	3.63	0.09	3.75	0.13	-0.93
16 RC	16.1RC	3.40	0.0537	0.0011	0.280600	0.000020	-77.3	-2.0	0.7	3.68	0.05	3.84	0.09	-0.97
17 ME(R)	17.1ME(R)	2.47	0.0422	0.0009	0.280850	0.000022	-68.4	-13.9	0.8	3.32	0.06	3.83	0.10	-0.97
18 RC	35.1RC	3.40	0.1177	0.0025	0.280906	0.000030	-66.4	5.5	1.1	3.39	0.08	3.39	0.13	-0.92
19 RC	18.1RC	3.40	0.0615	0.0011	0.280858	0.000017	-68.2	7.2	0.6	3.33	0.05	3.29	0.07	-0.97
20 ME(R)	18.2ME(R)	2.47	0.0958	0.0019	0.280957	0.000038	-64.7	-11.8	1.4	3.26	0.11	3.70	0.17	-0.94
21 RC	19.1RC	3.40	0.0571	0.0010	0.280656	0.000022	-75.3	0.1	0.8	3.60	0.06	3.71	0.09	-0.97
22 ME(R)	19.2ME(R)	2.47	0.0536	0.0010	0.280879	0.000033	-67.4	-13.1	1.2	3.30	0.09	3.79	0.14	-0.97
23 ME(R)	23.1ME(R)	2.47	0.0551	0.0013	0.280732	0.000040	-72.6	-18.8	1.4	3.52	0.11	4.13	0.17	-0.96
24 RC	23.2RC	3.40	0.0774	0.0014	0.280680	0.000023	-74.4	0.0	0.8	3.60	0.06	3.72	0.10	-0.96
黑云角闪片麻岩 (QY0402)														
01 ME(RC)	2.1ME(RC)	2.49	0.0685	0.0017	0.280852	0.000067	-68.4	-14.9	2.4	3.40	0.18	3.91	0.29	-0.95
02 ME(RC)	1.1ME(RC)	2.49	0.1286	0.0029	0.281038	0.000068	-61.8	-10.2	2.4	3.24	0.19	3.62	0.29	-0.91
03 ME(R)	4.2ME(R)	2.49	0.0445	0.0011	0.280920	0.000081	-66.0	-11.5	2.9	3.25	0.22	3.70	0.35	-0.97
04 ME(RC)	4.1ME(RC)	2.49	0.0265	0.0007	0.280882	0.000052	-67.3	-12.1	1.9	3.27	0.14	3.74	0.22	-0.98
05 ME(RC)	3.1ME(RC)	2.49	0.0498	0.0012	0.280822	0.000082	-69.4	-15.0	2.9	3.39	0.22	3.91	0.35	-0.96
07 ME(RC)	5.1ME(RC)	2.49	0.0791	0.0019	0.281002	0.000076	-63.1	-10.0	2.7	3.21	0.21	3.61	0.33	-0.94
08 ME(RC)	8.2ME(RC)	2.49	0.1455	0.0030	0.281226	0.000072	-55.1	-3.8	2.6	2.98	0.21	3.23	0.31	-0.91

注: (1) $[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}] (\text{e})$ 为校正后的 $\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$ 值。(2) 第二列中的编号为离子探针定年编号, 与表 2 的一致。(3) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 中 t 为核部锆石和变质锆石年龄, 为比较, 3.3 Ga 核部锆石在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算时年龄也定为了 3.40 Ga。(4) $t_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ 和 $t_{\text{DM2(CC)}}(\text{Hf})$ 分别为单阶段和两阶段模式年龄。

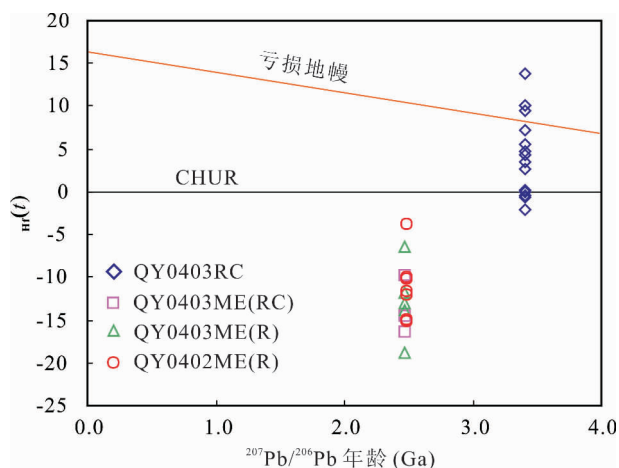


图8 河南焦作地区太古宙变质岩的锆石年龄— $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

Fig. 8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age for zircons from Archean metamorphic rocks in Jiaozuo, Henan

重结晶。与二云钾长片麻岩(QY0403)相比,黑云角闪片麻岩(QY0402)中的核部锆石遭受更强烈的重结晶作用,U—Th—Pb体系都重新设置,很可能与岩石中含水矿物更高有关。而锆石铅丢失相对较弱,则是U含量相对较低的缘故。两个样品中,重结晶锆石与核部锆石的Hf同位素组成十分类似,这可能是重结晶锆石的普遍特征,表明重结晶作用未对核部锆石的Hf同位素组成造成明显影响;而变质新生锆石与核部锆石的Hf同位素组成类似,则表明物质主要来自岩石体系本身,并很可能形成于核部锆石的溶解—再沉淀作用(董春艳等,2009)。

岩石遭受强烈变质变形,变质原岩类型较难确定。但是,二云钾长片麻岩(QY0403)具有异常高 SiO_2 和 K_2O 含量和低 CaO 和 Na_2O 含量的组成特征,加之核部锆石的年龄存在一定变化,它们应为碎屑成因,变质原岩为碎屑沉积岩。岩石具较强的负铕异常,显示出较高的成熟度。碎屑锆石具封闭环带,普遍存在强烈铅丢失,年龄为3.3 ~ 3.4 Ga,以3.4 Ga为主。本次研究与Gao等(2006)的样品来自相距较远的不同露头,但结果一致,表明古太古代碎屑锆石在该区变质碎屑沉积岩中广泛存在,碎屑物质来自以3.4 Ga花岗质岩浆岩为主的物源区,并具有相当的规模。碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(3.40\text{Ga})$ 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别为-2.0 ~ 13.9和2.89 ~ 3.84 Ga(个别数据点具有明显高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(3.40\text{Ga})$ 值,是测试的缘故、与变质作用改造有关或其它原因,需进一步确定),Hf同位素组成这种大的变化表明物源区岩石为壳幔混

合作用产物,形成过程中有更古老(始太古代)陆壳物质参与。根据碎屑锆石和变质锆石年龄,目前只能把变质碎屑沉积岩形成(沉积)时代限制在2.5 ~ 3.3 Ga之间。结合区域上存在约2.5 Ga侵入岩(Gao Linzhi et al., 2006),我们倾向于认为碎屑沉积岩形成于新太古代晚期。

黑云角闪片麻岩(QY0402)低 SiO_2 ,高 CaO 、 TFeO 、 MgO 和Cr,轻重稀土分异不强,岩相学和组成特征表明,岩石可能为变质基性岩或长英质岩石遭受部分熔融之后的残余物,并遭受富钾流体交代作用。该样品中都为变质锆石,包括完全重结晶锆石和变质增生边。它们的Hf同位素组成与二云钾长片麻岩(QY0403)的碎屑锆石和变质锆石的类似,也具有大的 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 年龄值,很可能表明核部锆石(捕获锆石或碎屑锆石)与二云钾长片麻岩(QY0403)的碎屑锆石形成时代相同。变质锆石年龄为 2.49 ± 0.01 Ga,与二云钾长片麻岩(QY0403)的变质锆石年龄(2.47 ± 0.02 Ga)年龄相近,但误差更小。一些红色花岗岩脉的形成应与这一强烈变质导致的深熔作用有关。2.5 Ga构造热事件在华北克拉通广泛分布,导致同时代壳源花岗岩形成,标志了华北克拉通在太古宙末期一次重要的克拉通化(Wan Yusheng et al., 2012)。

在华北克拉通, ≥ 3.8 Ga岩石只在鞍山地区发现(Liu Dunyi et al., 1992, 2008; Song Biao et al., 1996; Wan Yusheng et al., 2005, 2012),但 > 3.0 Ga岩石在更多地区存在(Zheng Jianping et al., 2004; Nutman et al., 2011)。特别是,冀东曹庄地区变质沉积岩中存在大量3.35 ~ 3.88 Ga碎屑锆石(Liu Shoujie et al., 2013; Nutman et al., 2011; Wilde et al., 2008; Wu Fuyuan et al., 2005)。本次研究提供了华北克拉通存在古老陆壳物质新的证据,在华北克拉通中部地区进一步寻找到古太古代乃至始太古代古老陆壳岩石是十分可能的。

7 结论

(1)焦作地区新太古代晚期变质碎屑沉积岩中存在3.3 ~ 3.4 Ga碎屑锆石,其南部登封地区古元古代嵩山石英岩也存在3.4 Ga碎屑锆石,表明在华北克拉通中部存在古太古代陆壳岩石。

(2)碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(3.40\text{Ga})$ 和 $t_{\text{DM2(CC)}}$ 分别主要为-2.0 ~ 13.9和2.89 ~ 3.84 Ga,物源区岩石为壳幔混合作用产物。变质新生锆石与核部锆石Hf同位素组成类似,很可能形成于核部锆石的溶

解—再沉淀作用。

(3)岩石中存在 2.47 ~ 2.48 Ga 变质锆石,约 2.5 Ga 变质构造热事件在华北克拉通广泛发育,是太古宙末期克拉通化地质记录的一个重要方面。

致谢:陶华制作样品靶,杨淳进行锆石阴极发光照相,张玉海和杨之青保障 SHRIMP 仪器正常工作,Hf 同位素分析中得到谢烈文帮助。锆石标准由 Ian Williams 和 Lance Black 博士提供。第五春荣教授对论文进行了评审,使论文质量得到很大提高。深表谢意。

参 考 文 献 / References

第五春荣,孙勇,董增产,王洪亮,陈丹玲,陈亮,张红. 2010. 北秦岭西段冥古宙锆石(4.1~3.9Ga)年代学新进展. 岩石学报, 26(4): 1171~1174.

第五春荣,孙勇,袁洪林,王洪亮,钟兴平,柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 科学通报, 53(16): 1923~1934.

董春艳,刘敦一,万渝生,徐仲元,王伟,颜炳强. 2009. 内蒙大青山地区早前寒武纪变质岩的锆石 Hf 同位素组成和稀土模式. 地质论评, 55: 509~520.

河南省地质局矿产局, 1989. 河南省区域地质志, 中华人民共和国地质矿产部. 地质专报, 一区域地质, 第 19 号, 北京: 地质出版社, 12~32.

万渝生,刘敦一,董春艳, Nutman A, Wilde SA, 王伟, 颜炳强, 殷小艳, 周红英. 2009. 中国最老岩石和锆石. 岩石学报, 25(08): 1793~1807.

王洪亮,陈亮,孙勇,柳小明,徐学义,陈隽璐,张红,第五春荣. 2007. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1 Ga 的捕虏锆石. 科学通报, 52(14): 1685~1693.

伍家善,耿元生,沈其韩,万渝生,刘敦一,宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京:地质出版社, 1~211.

谢烈文,张艳斌,张辉煌,孙金凤,吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定, 科学通报, 53(2): 220~228.

Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system. Earth Planetary Science Letter, 148: 243~258.

Gao Linzhi, Zhao Ting, Ma Yinsheng Zhao Xun, Ma Yinsheng, Yang Shouzheng. 2004. Geological Historical remains and Geological Background in Yuntaishan World Geopark. Proceedings of the First International Conference on Geoparks, 30~35.

Gao Linzhi, Zhao Ting, Wan Yusheng, Zhao Xun, Ma Yinsheng, Yang Shouzheng. 2006. Report on 3.4 Ga SHRIMP Zircon Age from the Yuntaishan Geopark in Jiaozuo, Henan Province. Acta Geologica Sinica, 80(1): 53~57.

Griffin WL, Wang Xiang, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly Suzanne Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237~269.

Liu Dunyi, Nutman A P, Williams I S, Compston W, Wu Jiashan, Shen

Qihan. 1992. Remnants of >3800 Ma crust in the Chinese portion of the Sino—Korean Craton. Geology, 20: 339~342.

Liu Dunyi, Wilde Simon A, Wan Yusheng, Wu Jiashan, Zhou Hongying, Dong Chunyan, Yin Xiaoyan. 2008. New U-Pb and Hf Isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. American Journal of Science, 308: 200~231.

Liu Shoujie, Wan Yusheng, Sun Huiyi, Nutman A P, Xie Hangqiang, Dong Chunyan, Ma Mingzhu, Du Lilin, Liu Dunyi. 2013. Paleo-to Eoarchean crustal materials in eastern Hebei, North China Craton: New evidence from SHRIMP U-Pb dating and in-situ Hf isotopic studies in detrital zircons of supracrustal rocks. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 4~17.

Ludwig K R. 2001. Squid 1. 02: a user's manual. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication 2, 19.

Nutman A P, Bennett V C, Kinny P D, Price R. 1992. Large-scale structure of the Northwest Yilgarn craton, Western Australia: Evidence from Nd isotopic data and zircon geochronology. Tectonics, 12: 971~981.

Nutman Allen P, Wan Yusheng, Du Lilin, Friend Clark RL, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Wang Wei, Sun Huiyi, Liu Dunyi. 2011. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. Precambrian Research, 189: 43~65.

Schere E, Munker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium—hafnium clock. Science, 293: 683~687.

Song Biao, Nutman A P, Liu Dunyi, Wu Jiashan. 1996. 3800 to 2500 Ma crust in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. Precambrian Research, 78: 79~94. Wan Yusheng, Dong Chunyan, Liu Dunyi, Kröner A, Yang Chonghui, Wang Wei, Du Lilin, Xie Hangqiang, Ma Mingzhu. 2012. Zircon ages and geochemistry of late Neoproterozoic syenogranites in the North China Craton: A review. Precambrian Research, 222~223: 265~289.

Wan Yusheng, Liu Dunyi, Song Biao, Wu Jiashan, Yang Chonghui, Zhang Zongqing, Geng Yuansheng. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 563~575.

Williams I S. 1998. U—Th—Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C, Ridley W I (eds.), Applications of micro analytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology, 7: 1~35.

Wu Fuyuan, Yang Jinghui, Liu Xiaoming, Li Tiesheng, Xie Liewen, Yang Yueheng. 2005. Hf isotopes of the 3.8 Ga zircons in eastern Hebei Province, China: implications for early crustal evolution of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 50: 2473~2480.

Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, Yang Jinghui, Xu Ping. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chemical Geology, 2006, 234: 105~126.

Zheng Jianping, Griffin WL, O'Reilly SY. 2004. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. Geology, 32(3): 229~232.

Ancient Material Records in the North China Craton: SHRIMP U-Pb Dating and LA-MC-ICPMS Hf analysis of zircons from Archean Metamorphic Rocks in the Jiaozou Area, Henan

YIN Xiaoyan¹⁾, ZHOU Hongying²⁾, LIU Dunyi^{3,4)}, GAO Linzhi³⁾, DONG Chunyan^{3,4)}, WAN Yusheng^{3,4)}

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Geological Survey, Tianjin, 300170;

3) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

4) Beijing SHRIMP Center, Beijing, 100037

Abstract: We present an integrated study of zircon U-Pb dating and O—Hf isotopic analysis on metamorphic rocks in the Jiaozuo area, Henan, central North China Craton. A two-mica K-feldspar gneiss sample contains 3.3 ~ 3.4 Ga detrital zircon and 2.47 ± 0.02 Ga metamorphic zircon. The detrital zircon has ε_{Hf} (3.40Ga) and $t_{\text{DM2(CC)}}$ ranging from -2.4 to 13.9 and 2.89 to 3.84 Ga, respectively; whereas the metamorphic zircon has ε_{Hf} (2.47Ga) and $t_{\text{DM2(CC)}}$ ranging from -18.8 to -6.4 and 3.38 to 4.13 Ga, respectively. A biotite hornblende gneiss sample only contains metamorphic zircon with an age of 2.49 ± 0.01 Ga and ε_{Hf} (2.49Ga) of -15.0 to -3.8 and $t_{\text{DM2(CC)}}$ of 3.23 to 3.91 Ga. Combined with geochemical data and early studies, some conclusions can be drawn as follows. (1) Detrital sediments were derived from a source region where 3.4 Ga granitoidic rocks widely occurred, formed as a result of mixture of mantle and crustal material; (2) the sedimentary rocks underwent a strong tectono—thermal event at the end of the Neoarchean (~2.5 Ga), with anatexis resulting in the formation of granite veins; (3) the formation (deposition) time of the metasedimentary rocks can be limited to between 2.5 ~ 3.3 Ga; (4) metamorphic zircon is similar in Hf isotope composition to the detrital zircon, suggesting that the overgrowth rims were formed through the dissolution—reprecipitation of zircon cores.

Keywords: Paleoarchean; metasedimentary rock; SHRIMP dating; Hf isotope; North China Craton

(上接第 171 页) 剖面中都发现有相同高度的湖相沉积层,说明这里是古湖的出口,但并不通畅,湖面降低时,出口被来自两侧山坡的砂土充填,出口堵塞。湖面上升时,湖水重新从垭口流出。

(4) 泥河湾盆地西南端为宁武县地区,桑干河与汾河的分水岭则位于宁武县南部山区,地名为分水岭村。调查发现分水岭为一平坦台地,其上覆盖桑干河河床相砾石层,厚约 5 m。分水岭以北为桑干河,左岸连续分布从分水岭逐渐降低的最高阶地,其上都覆盖桑干河河床相砾石层,砾石层之上覆盖第一层古土壤和马兰黄土。分水岭以南为汾河,其右岸分布一系列从分水岭逐渐降低的最高阶地,其上也都覆盖桑干河河床相砾石层,因此推测分水岭以南为原来桑干河的倒淌河,长度约 7.5 km,可称为宁武县的地景奇观。倒淌河的中段还可见到倒淌河水流不畅时形成的返流湖的湖相沉积物。分水岭以东为桑干河与汾河分水岭山地,地形平坦,其上至今保存约 15 个发育在分水岭的湖泊群,20 世纪 50 ~ 70 年代有学者研究,认为它们是恒山—雁门关断裂掀揭运

动所造成。据此判断,桑干河分水岭的倒淌河是同一构造运动过程的产物。由于分水岭的桑干河河床砾石层之上覆盖第一层古土壤,推测倒淌河形成的时间约为距今 200 ka 左右。

(5) 上述发现和研究说明,大约在距今 200 ka 左右,华北地区有一次剧烈的构造运动,它使大同一阳原地区火山猛烈喷发;桑干河源头形成倒淌河;泥河湾盆地东端的油坊断裂活动强烈,泥河湾古湖湖水沿断裂下泄,侵蚀出桑干河大峡谷;泥河湾古湖消失。这次构造运动称为“清水侵蚀期”,它使北京西山强烈隆起,大同一阳原—宣化—怀来—延庆的一系列古湖因侵蚀下切而消失,华北平原向海扩展,现今地貌景观得以出现,这一幕可称为“华北新生代发育史的辉煌一页”。

与会专家认为,上述发现十分重要,具有广阔的研究前景和较大的旅游价值,对此大家展开热烈讨论,并酝酿开展深入的后续研究。