华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据：巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成

董春艳 刘敦一 李俊建 万渝生 周红英 李承东
杨岳衡 谢烈文

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 北京离子探针中心, 北京 100037; 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. E-mail: dongchunyan@sina.com)

摘要 对华北克拉通西部孔兹岩带西段巴彦乌拉-贺兰山地区片麻状花岗岩和贺兰山岩群石榴云母二长片麻岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Hf 同位素组成研究. 片麻状花岗岩岩浆锆石年龄为 (2323 ± 20) Ma, 两期变质锆石年龄分别为 (1923 ± 28) 和 (1856 ± 12) Ma. 锆石核、幔和边 Hf 同位素组成相近, 19 个数据点 T_{DM1} (单阶段亏损地幔模式年龄)变化范围为 2455~2655 Ma. 石榴云母二长片麻岩中大多数残余锆石年龄集中分布, 平均年龄为 (1978 ± 17) Ma, 另有少量更老残余锆石(2871~2469 Ma)存在. 变质锆石由于 U 含量很高导致强烈铅丢失, 未能获得准确年龄. 锆石 Hf 同位素组成变化范围较大, T_{DM1} 为 1999~3047 Ma. 结合前人研究成果, 可得出如下结论: (1) 贺兰山岩群孔兹岩系形成于古元古代, 而不是以往认为的太古宙; (2) 研究支持了华北克拉通西部鄂尔多斯陆块和阴山陆块之间存在一规模巨大的古元古代孔兹岩带的认识; (3) 孔兹岩带内大量存在的古元古代早期地质体可能是孔兹岩系碎屑沉积物物源区之一; (4) 鄂尔多斯地块、阴山地块和东部地块大致在同时发生相互碰撞拼合, 导致华北克拉通最终形成.

关键词 孔兹岩带 古元古代 SHRIMP定年 贺兰山 华北克拉通

近年来华北克拉通早前寒武纪研究取得重要进展, 其中之一是构造区划的研究. Zhao等人 [1-4]认为古元古代晚期“中部造山带”发生陆陆碰撞, 西部陆块和东部陆块的相互碰撞, 导致华北克拉通最终成为统一的整体. 最近, Zhao等人 [5]在西部陆块划分出一孔兹岩带, 认为其南部鄂尔多斯地块与北部阴山地块于 2.0~1.9 Ga期间沿该带相互碰撞, 西部陆块和东部陆块碰撞拼合的时间更晚, 大致为~1.85 Ga. Wan等人 [6]认为鄂尔多斯地块、阴山地块和东部地块相互碰撞的时间大致相同, 鄂尔多斯地块和阴山地块之间的碰撞可能稍早一些. Wan等人 [7]对孔兹岩带中部大青山地区乌拉山群两个变泥砂质岩石样品进行了锆石SHRIMP年代学研究, 确定其形成时代分别为 2.5~2.4 和 2.1~1.9 Ga, 表明很可能存在不同时代的变泥砂质岩石组合. 本文对该带西端巴彦乌拉地区片麻状花岗岩和贺兰山地区贺兰山岩群石榴云母二长片麻岩进行了锆石SHRIMP U-Pb年代学和Hf同位素组成研究, 不但有助于查清贺兰山岩群和花岗

质岩石形成时代, 对深化孔兹岩带构造演化研究也具有重要意义.

1 地质背景和样品特征

巴彦乌拉位于内蒙古西部阿拉善盟境内 [8,9], 孔兹岩带西段(图 1). 该区大面积出露片麻状花岗质岩石, 其中存在少量斜长角闪岩及大理岩. 内蒙古地层清理意见将其归属于太古宙乌拉山群 [10]. 但是, 根据大范围内岩石组成均匀的特征, 李俊建等人 [11]认为它们是变形的花岗闪长岩, 把获得的 (2082 ± 22) Ma单颗粒锆石TIMS U-Pb年龄解释为岩体形成时代. 本文研究样品片麻状花岗岩(AD115TW1)的地理坐标位置为北纬 $39^{\circ}36'29''$, 东经 $105^{\circ}10'4''$, 距李俊建等人 [11]测年样品(99D3TW1)北东约 30 km. 岩石呈片麻状, 露头上组成均匀(图 2), 主要由斜长石(48%)、石英(27%)、微斜长石(18%)和黑云母(7%)组成. 按组成矿物颗粒大小, 可把其分为两个部分. 主体为粒度较粗的斜长石+石英+微斜长石集合体. 斜长石具聚片

图1 华北克拉通早前寒武纪构造区划

据Zhao等人^[11]修改. 图中给出了本文及李俊建等人^[11]的样品位置

图2 巴彦乌拉地区片麻状花岗岩(AD115TW1)岩石外貌

双晶, 部分绢云母化. 石英呈条带状, 具亚颗粒结构, 波状消光. 另一部分由细小片状棕色黑云母和细粒斜长石、石英组成. 两者呈条带状定向分布, 构成岩石的片麻理. 结构构造表明岩石曾遭受过后期强烈改造.

贺兰山位于宁夏北部, 距巴彦乌拉东约 120 km (图 1). 该区出露贺兰山岩群, 主要岩石类型为富铝片麻岩、石榴黑云变粒岩、石榴黑云斜长变粒岩和大理岩, 变质程度达高角闪岩相-麻粒岩相. 它们构成华北克拉通西部陆块孔兹岩带的重要组成部分. 胡

能高等人^[12]获得该区贺兰山岩群含夕线石堇青石片麻岩和黑云二长变粒岩共 7 组锆石蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 2.10~1.85 Ga, 石榴石花岗岩 2 组锆石蒸发法 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ 年龄 1.98~1.89 Ga. 他们认为贺兰山岩群形成于新太古代, 这些年龄为古元古代变质作用的年龄记录. 本文研究样品石榴云母二长片麻岩 (HD01TW1) 采自贺兰山岩群, 其地理坐标位置为北纬 $39^{\circ}23'20''$, 东经 $105^{\circ}30'49''$. 岩石呈片麻状, 主要由石英(27%)、钾长石(29%)、斜长石(26%)、云母(10%)和一些石榴石组成. 石榴石含量变化较大, 呈粒状或不规则状集合体定向分布, 黑云母也定向分布, 多蚀变为绿泥石.

2 分析方法

全岩常量元素含量用 X 荧光光谱法测定, 稀土和微量元素用等离子质谱测定. 测定由国家地质实验测试中心完成.

锆石分选在北京离子探针中心按标准程序完成. 锆石定年在该中心 SHRIMP 上完成^[13]. 流程及样品靶制备参见 Williams^[14]. 一次离子流 O^{2-} 强度为 9 nA, 束斑大小为 25~30 μm . 对于碎屑锆石, 测年为 3~4 组扫描, 标准样和待测样测年之比为 1:5; 而对

岩浆锆石和增生变质锆石, 测年为 5 组扫描, 标准样和待测样测年之比为 1:3~4. 标准样用于校正 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄, SL13 校正 U-Th-Pb 的含量. 标准锆石(TEM)测年都为 5 组扫描. 用 ^{204}Pb 进行普通铅年龄校正 [15]. 数据处理采用 SQUID11.03d 和 ISOPLOT 程序 [16]. 单个数据的误差为 1σ , 加权平均年龄误差为 2σ .

Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成. 仪器为 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪和 Geolas-193 nm 准分子激光取样系统 (LA-MC-ICP-MS), 分析原理及流程见文献 [17, 18] 激光频率为 8 Hz, 能量密度为 $100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 激光束斑直径为 $63 \mu\text{m}$, 信号采集时间为 26 s. 标准锆石为 91500 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282306$) [19]. 8 个标准锆石(91500)分析, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{(\text{corr})}$ 的变化范围和平均值分别为 $0.000333\sim0.000359$ 和 0.000344 , $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(\text{corr})}$ 的变化范围和平均值分别为 $0.282253\sim0.282327$ 和 0.282287 . 计算参数如下: ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ [20], 球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.0332 和 0.282772 [21], 现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28325 [22]. 按照 Zheng 等人 [23~25] 的方法, 以变质岩中锆石的核、幔、边不同年龄分别计算了其初始 Hf 同位素比值. Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM1} 以亏损地幔为参考计算, 两阶段模式年龄 T_{DM2} 依据大陆地壳平均组成计算.

3 地球化学

片麻状花岗岩(AD115TW1)高 SiO_2 (70.86%)、 K_2O (4.48%) 和低 Na_2O (3.14%) (表 1), 稀土总量低 ($\Sigma\text{REE} = 80.7 \mu\text{g}/\text{g}$), 轻重稀土分离较强 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 34.7$), 出现强烈正铈异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 4.0$) (表 1, 图 3(a)). 在 Pearce 图解上, 大离子亲石元素相对富集, 相容元

素 Cr 亏损, 高场强元素 Nb, P 存在弱的亏损(图 3(b)). 片麻状花岗闪长岩(99D3TW1)相对低 SiO_2 (63.43%), K_2O (3.80%) 和 Na_2O (3.67%) 含量相近(表 1), 稀土总量较高 ($\Sigma\text{REE}=154.9 \mu\text{g}/\text{g}$), 轻重稀土分离相对较弱 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 21.6$), 无明显铈异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=1.1$) (表 1, 图 3(a)). 片麻状花岗岩(AD115TW1)和片麻状花岗闪长岩(99D3TW1)地球化学组成上存在较大区别, 可能表明它们并非采自同一岩体.

石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)高 SiO_2 (73.09%)、高 K_2O (3.86%) 低 Na_2O (1.98%) (表 1). 稀土总量较高 ($\Sigma\text{REE}=188.3 \mu\text{g}/\text{g}$), 轻重稀土分离不强 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.2$), 出现微弱负铈异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.73$) (表 1, 图 3(a)). 在 Pearce 图解上, 大离子亲石元素富集, Nb, P 和 Ti 相对亏损(图 3(b)). 其总体特征与太古宙之后的泥砂质岩相近, 显示出较高的成熟度 [26].

4 锆石特征及年龄

片麻状花岗岩(AD115TW1)的锆石呈柱状或近等轴状, 阴极发光图像中锆石普遍具核-幔-边结构(图 4(a), (b)), 但其宽窄不一. 核部锆石通常具岩浆环带, 部分核部锆石环带结构不明显. 根据内部结构及与幔、边部相互关系, 部分核部锆石显示碎屑成因的特点. 幔部锆石结构均匀, 在阴极发光中呈灰色, 它们蚕食核部锆石, 显示出重结晶的特点. 边部锆石结构均匀, 阴极发光下与幔部锆石相比发光性更弱, 为变质成因. 共在 18 颗锆石上进行了 27 个点分析. 8 个核部锆石测定, U, Th 含量和 Th/U 比值分别为 $37\sim307$, $13\sim107 \mu\text{g}/\text{g}$ 和 $0.26\sim0.89$ (表 2). 锆石普遍存在强烈铅丢失, 但数据点 6.2C 呈反向分布. 去掉铅丢失最强的 1.2C, 其余 7 个数据点给出 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ 加权平均年龄为 $(2323 \pm 20) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.9$), 大致代表了花岗岩的形成时代. 7 个幔部锆石测

图 3 巴彦乌拉-贺兰山地区岩石稀土模式和 Pearce 图解

AD115TW1: 片麻状花岗岩; 99D3TW1: 片麻状花岗闪长岩; HD01TW1: 石榴云母二长片麻岩

表1 巴彦乌拉-贺兰山地区岩石元素组成^{a)}

序号	1	2	3
样品号	AD115TW1	99D3TW1	HD01TW1
岩石名称	片麻状花岗岩	片麻状花岗闪长岩	石榴云母二长片麻岩
采样位置	巴彦乌拉	巴彦乌拉	贺兰山
SiO ₂	70.86	63.43	73.09
TiO ₂	0.33	0.57	0.51
Al ₂ O ₃	13.69	17.32	13.12
Fe ₂ O ₃	0.96	0.99	0.38
FeO	1.83	2.75	2.91
MnO	0.04	0.09	0.04
MgO	0.99	1.34	1.57
CaO	2.03	2.85	0.48
Na ₂ O	3.14	3.67	1.98
K ₂ O	4.48	3.80	3.86
P ₂ O ₅	0.08	0.11	0.05
H ₂ O ⁺	1.06	1.74	1.40
CO ₂	0.73	0.73	0.21
总量	100.22	99.39	99.60
Cr	16		52
Sc	3.3		7.1
Rb	77		130
Ba	950		949
Sr	524		207
Nb	7.0		16
Ta	0.30		0.72
Hf	3.4		7.5
Zr	130		274
Y	3.1		20
Th	2.0		13
U	0.58		0.95
La	20.0	39.7	41.5
Ce	29.8	65.26	79.7
Pr	3.08	7.17	9.51
Nd	21.6	25.22	35.5
Sm	1.46	4.39	5.82
Eu	1.84	1.63	1.31
Gd	1.30	4.45	5.02
Tb	0.13	0.59	0.69
Dy	0.55	2.97	3.72
Ho	0.10	0.56	0.71
Er	0.35	1.38	2.14
Tm	0.05	0.2	0.29
Yb	0.38	1.21	2.07
Lu	0.06	0.19	0.32
ΣREE	80.7	154.9	188.3
(La/Yb) _N	34.7	21.6	13.2
Eu/Eu*	4.0	1.1	0.73

a) 样品 99D3TW1 数据引自李俊建等人^[11]; 氧化物含量单位为%, 稀土和微量元素含量单位为μg/g

定, U, Th 含量和 Th/U 比值分别为 134~272, 33~81 μg/g 和 0.23~0.36。它们的 ²⁰⁷Pb/^{Pb}²⁰⁶ 年龄存在较大变化, 其加权平均年龄为(1923 ± 28) Ma (MSWD = 4.2)。

一些数据点测试时一次流束斑部分打在了锆石核部或边部使其为混合年龄, 加之幔部锆石普遍存在强烈铅丢失, (1923 ± 28) Ma 看来并不能完全代表其形成的真实年龄。12 个边部锆石测定, U, Th 含量和 Th/U 比值分别为 209~1239, 50~299 和 0.20~0.52 μg/g。它们也普遍存在强烈铅丢失, 取 5 个铅丢失最弱的数据点 (1.1R, 5.1R, 13.1R, 18.1R 和 21.1R) 计算, 获得 Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁶ 加权平均年龄为(1856 ± 12) Ma (MSWD = 1.0) (图 5(a)), 代表了变质增生边的形成时代。

石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)的锆石呈短柱状或等轴状。在阴极发光图像中, 锆石具核-边结构(图 4(c), (d)), 但增生边不发育, 仅个别宽度足够大, 可进行 SHRIMP 年龄测定。内部结构和外形的不协调关系表明核部锆石为碎屑成因, 与石榴云母二长片麻岩变质原岩为碎屑沉积相吻合。14 个碎屑锆石数据点测定, U, Th 含量和 Th/U 比值分别为 57~477, 58~233 μg/g 和 0.25~0.93(表 2)。除 5.1C 和 11.1C 的 Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁶ 年龄分别为 2871 和 2469 Ma 外, 其余数据点大致分布于~2.0 Ga 不一致线上。其中 9 个锆石铅丢失较弱的数据点 Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁶ 加权平均年龄为(1978 ± 17) Ma (MSWD = 1.1)(图 5(b)), 代表了碎屑锆石物源区主体的形成时代, 也给出了变质原岩碎屑沉积岩沉积时代的下限。由于变质增生边 U 含量很高, 导致强烈铅丢失, 仅进行了 3 个数据点分析, 未能获得准确变质年龄(图 5(b))。增生边 Th/U 比值低(0.01~0.08), 具变质锆石的组成特征。

5 锆石 Hf 同位素组成

片麻状花岗岩(AD115TW1)共在 14 颗锆石上进行了 20 个数据点 Hf 同位素分析(表 3)。其中 8 个数据点位于核部, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t = 2323$ Ma, 核部锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄), T_{DM1} 和 T_{DM2} 变化范围分别为 0.21~2.02, 2585~2652 和 2658~2812 Ma; 4 个数据点位于幔部, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t = 1923$ Ma, 幔部锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄), T_{DM1} 和 T_{DM2} 变化范围分别为 -8.31~-3.67, 2455~2631 和 2623~2854 Ma; 8 个数据点位于边部, 除 03R 外, 其余数据点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t = 1856$ Ma, 边部锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄), T_{DM1} 和 T_{DM2} 变化范围分别为 -10.47~-5.55, 2472~2655 和 2516~2908 Ma。大部分锆石核、幔和边的 Hf 同位素组成十分相近, 在 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图上大致呈线性关系(图 6(a))。但是, 个别数据点 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf

图 4 巴彦乌拉-贺兰山地区片麻状花岗岩(AD115TW1)和石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)的锆石阴极发光图
图中小圈(~30 μm)和大圈(~60 μm)分别为锆石 SHRIMP 测年和 Hf 同位素分析位置, 其编号分别与表 2 和 3 的一致, 括号内分别为相应的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄和 Hf 同位素亏损地幔模式年龄

表 2 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^{a)}

点位	²⁰⁶ Pb _c /%	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /mg·g ⁻¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	误差	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄	%
巴彦乌拉地区片麻状花岗岩(AD115TW1)																
1.1R	0.03	247	61	0.25	65.2	0.1137	1.5	4.81	2.4	0.3069	1.8	0.759	1725±27	1859±28	1673±36	7
1.2C	0.08	76	45	0.61	21.2	0.1291	1.1	5.78	2.0	0.3245	1.7	0.836	1812±27	2086±20	1817±53	13
2.1C	0.06	100	76	0.79	33.6	0.1453	0.81	7.86	1.8	0.3926	1.6	0.890	2135±29	2291±14	2155±39	7
2.2R	0.21	369	105	0.30	91.6	0.11247	0.66	4.467	1.6	0.2881	1.5	0.914	1632±21	1840±12	1640±35	11
3.1M	0.02	220	55	0.26	55.3	0.1165	1.3	4.694	2.0	0.2922	1.5	0.773	1653±23	1903±23	1704±34	13
3.2C	0.23	37	16	0.44	13.2	0.1457	1.5	8.41	2.4	0.4185	1.9	0.781	2253±36	2296±26	2074±77	2
4.1R	0.02	390	119	0.32	93.5	0.11152	0.58	4.29	2.5	0.2787	2.4	0.973	1585±34	1824±10	1681±47	13
4.2C	0.13	48	42	0.89	18.0	0.1487	1.2	8.87	2.1	0.4326	1.8	0.820	2317±34	2331±21	2419±53	1
5.1R	0.02	457	231	0.52	125	0.11231	0.72	4.94	2.2	0.3188	2.0	0.943	1784±32	1837±13	1888±40	3
5.2C	0.03	307	107	0.36	128	0.14920	0.48	9.93	1.6	0.4829	1.5	0.954	2540±32	2337±8.2	2822±76	-9
6.1M	0.03	265	60	0.23	66.6	0.11665	0.65	4.700	1.7	0.2922	1.5	0.920	1653±22	1905±12	1656±37	13
6.2C	0.11	69	37	0.55	22.1	0.1468	1.1	7.49	2.1	0.3702	1.7	0.839	2031±30	2308±19	2182±74	12
7.1R	0.02	386	105	0.28	93.8	0.11372	0.59	4.434	1.6	0.2828	1.5	0.929	1606±21	1860±11	1675±29	14
7.2M	0.03	272	60	0.23	74.5	0.11643	0.64	5.121	1.6	0.3190	1.5	0.920	1785±23	1902±11	1861±35	6
8.1R	0.07	314	62	0.20	75.1	0.11310	0.70	4.340	1.7	0.2783	1.5	0.907	1583±21	1850±13	1730±35	14
8.2C	0.08	54	18	0.35	18.1	0.1497	1.1	8.01	2.3	0.3882	2.0	0.866	2114±36	2342±20	2133±63	10
9.1R	0.05	279	68	0.25	62.9	0.11265	0.71	4.074	1.7	0.2623	1.5	0.905	1502±20	1843±13	1498±29	18
9.2C	0.11	52	13	0.26	15.7	0.1459	1.6	7.07	2.4	0.3515	1.7	0.727	1942±29	2298±28	1894±64	16

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-16-1913>

表 2(续)

点位	²⁰⁶ Pb _c /%	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /mg·g ⁻¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	误差	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄	%
10.1M	0.05	208	52	0.26	49.7	0.11696	0.77	4.494	1.7	0.2787	1.5	0.892	1585±21	1910±14	1600±32	17
11.1M	0.04	196	54	0.28	48.2	0.11946	0.78	4.696	1.7	0.2851	1.6	0.895	1617±22	1948±14	1693±34	17
12.1M	0.08	134	33	0.25	33.8	0.1183	1.8	4.79	2.5	0.2938	1.6	0.661	166±24	1931±33	1734±45	14
13.1R	0.06	209	50	0.25	53.3	0.1142	0.96	4.668	1.8	0.2966	1.6	0.853	1674±23	1866±17	1734±41	10
14.1R	0.01	542	170	0.32	123	0.1123	1.6	4.089	2.2	0.2642	1.5	0.695	1511±20	1836±28	1608±28	18
15.1R	0.00	381	120	0.32	84.2	0.11247	0.68	3.985	1.7	0.2569	1.6	0.916	1474±21	1840±12	1503±28	20
16.1R	0.07	245	59	0.25	53.0	0.11186	0.79	3.890	1.7	0.2522	1.5	0.888	1450±20	1830±14	1476±31	21
17.1M	0.14	230	81	0.36	59.9	0.1216	0.83	5.072	1.7	0.3025	1.5	0.879	1703±23	1980±15	2029±58	14
18.1R	0.00	336	97	0.30	96.2	0.11421	0.56	5.248	1.6	0.3332	1.5	0.938	1854±24	1867±10	1925±33	1
巴彦乌拉地区片麻状花岗岩(AD115TW1)																
1.1R	2.70	2276	182	0.08	215	0.0880	2.9	1.291	6.6	0.1065	5.9	0.898	652±37	1381±56	915±180	53
2.1R	0.18	1522	19	0.01	131	0.07843	0.89	1.085	6.1	0.1003	6.0	0.989	616±35	1158±18	687±170	47
3.1R	4.00	1368	22	0.02	85.8	0.0801	3.6	0.771	7.1	0.0699	6.2	0.866	435±26	1199±71	2877±500	64
4.1C	0.04	136	99	0.75	54.0	0.1217	1.4	7.77	6.0	0.463	5.9	0.974	2455±120	1981±25	2297±140	-24
5.1C	0.12	57	29	0.53	23.9	0.2056	1.4	13.88	6.1	0.490	5.9	0.972	2569±130	2871±23	2603±160	11
6.1C	0.17	114	75	0.68	32.0	0.1214	1.7	5.47	6.1	0.327	5.9	0.960	1822±93	1976±31	1925±120	8
7.1C	0.14	162	102	0.65	39.7	0.1206	1.5	4.73	6.0	0.285	5.8	0.968	1615±84	1965±27	1526±94	18
8.1C	0.00	185	167	0.93	52.3	0.1211	1.2	5.49	6.0	0.329	5.9	0.981	1833±93	1972±21	1986±120	7
9.1C	0.00	95	58	0.63	28.8	0.1245	1.6	6.04	6.1	0.352	5.9	0.965	1943±98	2022±28	2061±130	4
10.1C	0.01	477	233	0.51	62.8	0.1098	1.1	2.32	5.9	0.1533	5.8	0.982	919±50	1797±21	705±54	49
11.1C	0.01	239	175	0.76	92.5	0.1613	1.6	9.99	6.1	0.449	5.9	0.963	2392±120	2469±28	2356±140	3
12.1C	0.06	149	110	0.76	46.6	0.1238	1.4	6.19	6.0	0.363	5.9	0.974	1995±100	2012±24	2138±130	1
13.1C	0.35	237	115	0.50	48.3	0.1228	1.9	4.00	6.1	0.236	5.8	0.953	1368±72	1998±33	1912±120	32
14.1C	0.25	177	142	0.83	39.3	0.1150	1.8	4.08	6.1	0.258	5.9	0.957	1478±78	1880±32	1464±91	21
15.1C	0.14	319	78	0.25	63.9	0.1192	1.3	3.82	6.0	0.233	5.8	0.975	1348±71	1945±24	1477±95	31
16.1C	0.09	428	226	0.55	71.4	0.1098	1.2	2.93	6.0	0.194	5.8	0.980	1142±61	1796±22	1738±100	36
17.1C	0.00	161	50	0.32	37.1	0.1193	1.4	4.40	6.0	0.268	5.9	0.972	1529±80	1946±25	1736±110	21

a) Pb*表示放射性成因铅, 对片麻状花岗岩(AD115TW1), C, M 和 R 分别代表锆石的核部(岩浆成因)、幔部(变质成因)和边部(变质成因); 对石榴云母二长片麻岩(HD01TW1), C 和 R 分别代表锆石的核部(碎屑成因)和边部(变质成因)

图 5 巴彦乌拉-贺兰山地区片麻状花岗岩(AD115TW1)(a)和石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)(b)的锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-16-1913>

表 3 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 Hf 同位素组成^{a)}

No.	样品	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _(c)	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i> ₁)	ε _{Hf} (<i>t</i> ₂)	ε _{Hf} (<i>t</i> ₃)	2s	<i>T</i> _{DM1}	<i>T</i> _{DM2}	<i>f</i> _{Lu/Hf}
巴彦乌拉地区片麻状花岗岩(AD115TW1)														
01C	1.2C	2086	0.025486	0.000449	0.281333	0.000018	-50.90	-4.93	0.44	0.44	0.65	2643	2812	-0.99
02R	1.1R	1859	0.024874	0.000607	0.281370	0.000021	-49.58	-8.91	1.52	-8.97	0.76	2603	2825	-0.98
03R			0.027513	0.000744	0.281604	0.000032	-41.30		9.63	-0.83	1.12	2294	2285	-0.98
04R	2.2R	1840	0.016352	0.000317	0.281341	0.000023	-50.62	-10.02	0.93	-9.66	0.82	2623	2865	-0.99
05C	2.1C	2291	0.030440	0.000581	0.281332	0.000021	-50.92	-0.51	0.21	0.21	0.74	2652	2761	-0.98
06C	3.2C	2296	0.021771	0.000362	0.281351	0.000020	-50.24	0.62	1.24	1.24	0.69	2612	2709	-0.99
07M			0.024706	0.000498	0.281360	0.000023	-49.92		1.35	-7.68	0.83	2609	2695	-0.99
08C	4.2C	2331	0.021358	0.000372	0.281347	0.000019	-50.39	1.26	1.08	1.08	0.67	2618	2706	-0.99
09C	5.2C	2337	0.045610	0.000803	0.281393	0.000018	-48.77	2.34	2.02	2.02	0.63	2585	2658	-0.98
10R	5.1R	1837	0.025356	0.000567	0.281399	0.000023	-48.56	-8.33	2.60	-7.90	0.83	2561	2779	-0.98
11C	6.2C	2308	0.019363	0.000339	0.281353	0.000024	-50.20	0.98	1.32	1.32	0.87	2609	2701	-0.99
12M	6.1M	1905	0.022530	0.000426	0.281471	0.000028	-46.02	-4.08	5.38	-3.67	1.00	2455	2623	-0.99
13C			0.017114	0.000308	0.281325	0.000019	-51.16		0.40	0.40	0.67	2643	2742	-0.99
14M	7.2M	1902	0.021900	0.000391	0.281339	0.000017	-50.69	-8.78	0.75	-8.31	0.59	2631	2854	-0.99
15C	8.2C	2342	0.014406	0.000306	0.281351	0.000017	-50.27	1.73	1.30	1.30	0.61	2609	2692	-0.99
16R	8.1R	1850	0.022854	0.000548	0.281347	0.000021	-50.39	-9.85	0.80	-9.71	0.74	2630	2864	-0.98
17R			0.026894	0.000576	0.281465	0.000023	-46.20		4.96	-5.55	0.82	2472	2516	-0.98
18R	16.1R	1830	0.019540	0.000375	0.281320	0.000018	-51.36	-11.06	0.10	-10.47	0.65	2655	2908	-0.99
19M	17.1M	1980	0.032398	0.000644	0.281380	0.000022	-49.23	-5.89	1.82	-7.17	0.77	2592	2774	-0.98
20R	18.1R	1867	0.016419	0.000310	0.281382	0.000022	-49.16	-7.94	2.41	-8.19	0.77	2567	2784	-0.99
No.	样品	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _(c)	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i> ₁)	ε _{Hf} (<i>t</i> ₂)		2s	<i>T</i> _{DM1}	<i>T</i> _{DM2}	<i>f</i> _{Lu/Hf}
贺兰山地区石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)														
01R	1.1R	1381	0.304466	0.008042	0.281827	0.000056	-33.41	-10.21		0.06	2.00	2456	2502	-0.76
02C			0.071115	0.001372	0.281761	0.000037	-35.75			6.62	1.32	2114	2151	-0.96
03C	5.1C	2871	0.054848	0.001084	0.281068	0.000029	-60.26	2.29	-17.62		1.03	3047	3097	-0.97
04C	7.1C	1965	0.079192	0.001697	0.281637	0.000029	-40.12	1.52	1.80		1.04	2305	2394	-0.95
05C	6.1C	1976	0.066027	0.001105	0.281573	0.000030	-42.39	0.26	0.31		1.05	2358	2466	-0.97
06C			0.127243	0.001934	0.281790	0.000023	-34.74		6.89		0.83	2105	2137	-0.94
07C			0.089367	0.001657	0.281513	0.000037	-44.53		-2.57		1.33	2477	2608	-0.95
08C			0.022109	0.000336	0.281149	0.000022	-57.39		-13.73		0.79	2881	3159	-0.99
09C			0.035791	0.000636	0.281253	0.000024	-53.73		-10.45		0.85	2763	2997	-0.98
10C			0.062065	0.001125	0.281834	0.000026	-33.18		9.54		0.93	1999	2005	-0.97
11C	11.1C	2469	0.033864	0.000588	0.281133	0.000029	-57.95	-3.57	-14.63		1.02	2921	3056	-0.98
12C	13.1C	1998	0.090571	0.002105	0.281707	0.000038	-37.65	4.17	3.74		1.35	2232	2290	-0.94
13C			0.031738	0.000718	0.281554	0.000025	-43.06		0.15		0.88	2360	2473	-0.98
14C	14.1C	1880	0.135735	0.002797	0.281592	0.000033	-41.72	-3.32	-1.27		1.19	2440	2565	-0.92
15C			0.044575	0.000786	0.281783	0.000032	-34.99		8.17		1.14	2052	2074	-0.98
16C			0.057303	0.001243	0.281608	0.000032	-41.16		1.37		1.15	2318	2412	-0.96
17C	10.1C	1797	0.036306	0.000742	0.281652	0.000032	-39.62	-0.46	3.58		1.14	2229	2356	-0.98
18C	9.1C	2022	0.072834	0.001194	0.281667	0.000029	-39.08	4.48	3.51		1.02	2234	2294	-0.96
19C			0.077094	0.001223	0.281577	0.000033	-42.27		0.27		1.17	2361	2467	-0.96

a) ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf_(c) 为标准 95100 校正后的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值。第 2 列中的编号为离子探针测定编号, 与表 2 的一致。年龄单位为 Ma。ε_{Hf}(*t*₁) 中 *t*₁ 为 Hf 同位素测试位置的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 即表中第 3 列年龄值。对于片麻状花岗岩(AD115TW1), ε_{Hf}(*t*₂) 中 *t*₂ 为锆石核部年龄(2323 Ma), ε_{Hf}(*t*₃) 中 *t*₃ 分别为锆石核(2323 Ma)、幔(1923 Ma)、边部(1856 Ma)的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄, 对于石榴云母二长片麻岩(HD01TW1), ε_{Hf}(*t*₂) 中的 *t*₂ 为碎屑锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄(1978 Ma)。T_{DM1} 和 T_{DM2} 分别为单阶段和两阶段亏损地幔模式年龄。

图6 巴彦乌拉-贺兰山地区片麻状花岗岩(AD115TW1)(a)和石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)(b)的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄位置与Hf同位素分析点位置相同

比值明显偏高, 其中AD115TW1-03R的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{c}}$ 高达0.281604.

石榴云母二长片麻岩(HD01TW1) 共在19颗锆石上进行了19个数据点Hf同位素分析(表3). 18个位于核部的数据点中, 除HD01TW1-03C和HD01TW1-11C外, 其余16个核部锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (t 为碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄1978 Ma), T_{DM1} 和 T_{DM2} 变化范围分别为-13.6~9.54, 1999~3047和2005~3159 Ma. 在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图上, 石榴云母二长片麻岩(HD01TW1) 碎屑锆石数据点分布变化较大(图6(b)). 6个 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为~2.0 Ga的数据点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (t 为Hf同位素测试位置的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)变化范围为-3.32和4.48. 碎屑锆石HD01TW1-03C和HD01TW1-11C的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为2871和2469 Ma, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (t 为分析位置锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄), T_{DM1} 和 T_{DM2} 分别为-3.57和2.29, 3047和2921及3097和3056 Ma. 本次研究仅测定了一个边部, 其 T_{DM1} 和 T_{DM2} 分别为2453和2500 Ma.

6 讨论和结论

李俊建等人^[11]获得巴彦乌拉片麻状花岗闪长岩(99D3TW1)单颗粒锆石稀释法U-Pb年龄为2.08 Ga, 提出该区大面积分布的片麻状花岗闪长岩形成时代为古元古代, 而不是以往认为的太古宙. 该研究进一步支持了这一认识, 但实际情况更为复杂. 片麻状花岗岩(AD115TW1)核部和幔部锆石年龄分别为 (2.32 ± 0.02) 和 (1.92 ± 0.03) Ga. 尽管部分核部锆石被幔部锆石切割, 结构上显示出碎屑锆石的某些特征, 但也可解释

为核部锆石发生重结晶. 幔部锆石无明显环带, 具变质锆石的结构特征, 尽管其Th/U比值大于0.1. 所以, 我们倾向于认为 (2.32 ± 0.02) 和 (1.92 ± 0.03) Ga分别代表了花岗岩的形成时代和变质时代. 而变质增生边年龄 (1.86 ± 0.01) Ga则记录了更晚期的一次重要构造热事件时代. 由于该区存在古元古代晚期强烈改造, 李俊建等人^[11]获得的片麻状花岗闪长岩(99D3TW1)年龄2.08 Ga可能为岩浆锆石和变质锆石的混合年龄. 片麻状花岗岩(AD115TW1)锆石的核、幔、边U-Pb年龄虽存在较大区别, 但它们的Hf同位素组成十分相近, 这和大别地区三叠纪超高压岩石中的锆石十分不同. 在后一情况下, 与核部锆石相比, 边部锆石Lu/Hf比值降低, 含有更多的放射性成因Hf, 这被认为与富重稀土的石榴石形成有关, 因为这可导致 $^{186}\text{Hf}/^{187}\text{Hf}$ 比值高而Lu/Hf比值低的变质流体介质的形成, 进而导致边部锆石放射性成因Hf增高和Lu/Hf比值降低^[23]. 与之不同, 巴彦乌拉地区片麻状花岗岩变质作用过程中无石榴石或其他富重稀土矿物形成, 因此核部和边部锆石通常不会出现明显的Hf同位素组成变化. 然而, 数据点AD115TW1-03R的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{c}}$ 高达0.281604, $\varepsilon_{\text{Hf}}(2323 \text{ Ma})$, T_{DM1} 和 T_{DM2} 分别为9.63, 2294和2285 Ma, 表明变质作用影响的存在^[24]. 岩浆锆石核部普遍具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(2.32 \text{ Ga})$ 值(0.21~2.02), T_{DM1} 和 T_{DM2} 变化范围分别为2585~2652和2658~2812 Ma, 比锆石形成年龄大~300 Ma. 结合岩石地球化学组成特征, 推测花岗岩形成于有一定地壳滞留时间陆壳物质的部分熔融^[27].

贺兰山地区的贺兰山岩群具孔兹岩系性质, 曾

认为形成于太古宙^[12]。但本次测定的石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)碎屑锆石年龄主要为 1.98 Ga。变质锆石存在强烈铅丢失,未能获得准确的变质年龄。然而从地质上分析,变质作用很可能发生在古元古代晚期(1.85~1.95 Ga)。显然,贺兰山岩群孔兹岩系形成于古元古代,而非以往认为的太古宙^[12]。胡能高等人^[12]获得的变泥砂质岩石 1.85 Ga 锆石蒸发法年龄有可能为变质作用年龄记录。

孔兹岩带东段集宁地区孔兹岩系变泥砂质岩石变质锆石和最年轻碎屑锆石年龄分别为 1.85 和 2.0 Ga^[6]或 1.81 和 1.84 Ga^[28]。中段大青山地区孔兹岩系变泥砂质岩石变质锆石和最年轻碎屑锆石年龄分别为 1.9 和 2.1 Ga^[7]。Xia 等人^[28,29]认为该区孔兹岩系变泥砂质岩石中年龄为 2.01~1.84 Ga 的所有锆石都为碎屑成因。西段巴彦乌拉-贺兰山地区孔兹岩系变泥砂质岩石变质锆石和最年轻碎屑锆石年龄分别为 1.86 和 1.98 Ga。尽管不同研究者所获结果和认识有所不同,但都表明华北克拉通西部鄂尔多斯陆块和阴山陆块之间确实存在一规模巨大的古元古代孔兹岩带^[5]。

长达 1200 km 以上的孔兹岩带中,许多地区古元古代碎屑沉积岩中都有大量 2.3~2.0 Ga 碎屑锆石存在,其比例甚至远大于太古宙碎屑锆石^[6,7,28,29]。最近, Darby 和 Gehrels^[30]对千里山新元古代到奥陶纪沉积岩进行碎屑锆石年龄分布模式研究,其中 2.00~2.06 Ga 也构成了一个主要的年龄峰值。所有这些都表明孔兹岩带或其附近存在一个巨大的古元古代物源区为沉积盆地提供碎屑物质。Xia 等人^[29]认为鄂尔多斯陆块为可能的物源区。但是,孔兹岩带内广泛分布的 2.3~2.0 Ga 地质体^[31,32]可能也是孔兹岩系碎屑沉积物的物源区之一。孔兹岩系中大多数碎屑锆石都显示出较好的磨圆度^[6,7,28,29],有可能反映了较长距离搬运的特点。如是这样,这些不同时代的地质体空间上在一起,应是古元古代晚期构造作用叠置的结果。

石榴云母二长片麻岩(HD01TW1)中,虽仅有 6 个年龄为~2.0 Ga 的碎屑锆石进行了 Hf 同位素分析,其组成也显示出较大的变化, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$, T_{DM1} 和 T_{DM2} 分别为 -0.46~4.48, 2234~2440 和 2294~2565 Ma。数据点 HD01TW1-08 和 HD01TW1-09 有更大的 T_{DM1} 值(2881~2763 Ma)和 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 值(3159 和 2997 Ma),但未进行锆石年龄测定,不能排除为更老碎屑锆石的可能。然而,数据点 HD01TW1-10 的 T_{DM1} 和 T_{DM2} 仅为 2.0~2.0 Ga,而 $\varepsilon_{\text{Hf}}(1.97 \text{ Ga})$ 高达 9.54,显然来自刚从亏损地幔分异

出来的物源区。尽管分析数据有限,年龄为~2.0 Ga 的碎屑锆石 Hf 同位素组成显示它们主要来自新的地幔添加物源区。这与 Xia 等人^[29]在大青山地区的研究结果完全相同。老的碎屑锆石存在可能表明部分碎屑物质来自更古老的物源区。

巴彦乌拉花岗闪长质片麻岩(99D3TW1)变质锆石年龄测定,表明该孔兹岩带也发育与中部带相同的~1.85 Ga 构造热事件,但是孔兹岩带广泛发育的更早期(1.9~1.95 Ga)构造热事件^[6,7]在中部带中还很少发现^[33]。我们认为,鄂尔多斯地块、阴山地块和东部地块发生碰撞拼合的时间应大致相同,其中鄂尔多斯地块和阴山地块相互碰撞的时间可能略早一些^[7]。

致谢 研究中得到赵国春、夏小平、吴福元和郭敬辉的帮助,两位匿名评审人和编辑部的建设性意见对提高原稿质量起了重要作用,深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Zhao G C, Peter A C, Simon A W, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55—88[DOI]
- 2 Zhao G C, Simon A W, Peter A C, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2001, 107: 45—73[DOI]
- 3 Zhao G C, Peter A C, Simon A W, et al. High-Pressure Granulites (Retrograded Eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and Tectonic Implications. *J Petrol*, 2001, 42(6): 1141—1170[DOI]
- 4 赵国春, 孙敏. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(7): 538—549
- 5 Zhao G C, Sun M, Simon A W, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177—202[DOI]
- 6 Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Res*, 2006, 149: 249—271[DOI]
- 7 Wan Y S, Liu D Y, Wang Z J, et al. Poly-Metamorphism and Interdigitation of Tectonic Slices With Different Ages: Evidence From the Precambrian Khondalite Belt in the Daqingshan Area, North China Craton. *Am Geophy Union Con Abs*, 2006. 120
- 8 沈保丰, 骆辉, 李双保, 等. 华北地台太古宙绿岩带地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1994. 1—202
- 9 白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 中国前寒武纪地壳演化. 第二版. 北京: 地质出版社, 1996. 49—50
- 10 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 114—120

- 11 李俊建, 沈宝丰, 李惠民, 等. 内蒙古西部巴彦乌拉山地区花岗闪长质片麻岩的单颗粒锆石 U-Pb 法年龄. 地质通报, 2004, 23(12): 1243—1245
- 12 胡能高, 杨家喜, 王志博, 等. 贺兰山变质杂岩的组成及演化. 西安: 西安地图出版社, 1994. 1—59
- 13 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26—30
- 14 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C, Ridley W I, eds. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Rev Econ Geol, 1998, 7: 1—35
- 15 Cumming G L, Richarda J R. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. Earth Planet Sci Lett, 1975, 28: 155—171
- 16 Ludwig K R. Squid 1.02: A User's Manual. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication 2, 2001. 19
- 17 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chem Geol, 2006, 234: 105—126[DOI]
- 18 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 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, 2005, 21(6): 1633—1644
- 19 Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. Chem Geol, 2004, 209: 121—135[DOI]
- 20 Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock. Science, 2001, 293: 683—687[DOI]
- 21 Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth Planet Sci Lett, 1997, 148: 243—258[DOI]
- 22 Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, et al. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionization mass spectrometry: Insights into the depleted mantle. Chem Geol, 1998, 149: 211—233[DOI]
- 23 Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, et al. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. Earth Planet Sci Lett, 2005, 240: 378—400[DOI]
- 24 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. Chem Geol, 2006, 231: 135—158[DOI]
- 25 Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China. Precambrian Res, 2006, 151: 265—288[DOI]
- 26 McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59(6): 1153—1177[DOI]
- 27 Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. Precambrian Res, 2006, 146: 179—212[DOI]
- 28 Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance. Precambrian Res, 2006, 144: 199—212[DOI]
- 29 Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of the Ordos Terrane, Western Block of the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2006, 241: 581—593[DOI]
- 30 Darby B J, Gehrels G. Detrital zircon reference for the North China block. J Asian Earth Sci, 2006, 26(6): 637—648[DOI]
- 31 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 内蒙古大青山埃达克质花岗岩-赞岐状岩-Closepet 花岗岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄及其构造意义. 北京离子探针中心年报, 北京: 地质出版社, 2005. 27—29
- 32 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 华北克拉通北缘古元古代造山作用的岩浆记录: 强过铝花岗岩岩石化学特征及锆石 SHRIMP 年龄. 北京离子探针中心年报, 北京: 地质出版社, 2005. 30—31
- 33 李基宏, 杨崇辉, 杜利林. 河北平山深熔伟晶岩锆石成因及 SHRIMP U-Pb 年龄. 自然科学进展, 2004, 14(7): 774—781