华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例

刘富, 郭敬辉, 路孝平, 第五春荣

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

吉林省区域地质矿产调查所, 长春 130022;

西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

E-mail: liufu16888@yeah.net

2009-01-08 收稿, 2009-03-05 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 40730315, 40721062, 40372089)

摘要 怀安片麻岩地体是华北克拉通中部代表性的晚太古代 TTG 片麻岩地体之一, 主体是形成于 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩. TTG 片麻岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(2.7 ~ 4.3)和大部分岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(2.0 ~ 8.3)分别与同期 2.5 Ga 的亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相近, 并且较年轻的 Hf 模式年龄 2.44 ~ 2.73 Ga 和锆石 U-Pb 年龄一致. 与 TTG 片麻岩共生的闪长质片麻岩, 由于老地壳物质加入, 其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(0.8 ~ 1.7)略低于亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值; 但多数岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(2.0 ~ 7.9)也与同期亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相当, 部分 Hf 模式年龄 2.49 ~ 2.75 Ga 也和锆石 U-Pb 年龄一致. 这些特征显示 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩代表 2.5 Ga 来自亏损地幔的新生地壳, 该期岩浆活动是华北克拉通一次重要的地壳生长事件.

关键词

华北克拉通

太古代

TTG 片麻岩

锆石

Nd-Hf 同位素

地壳生长

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 其最早的陆壳生长事件可追溯至 3.8 Ga^[1~5]. 但众多同位素年龄数据, 特别是近 10 年来锆石微区 U-Pb 年龄结果显示, 其最主要的岩浆热事件时代在 2.5 Ga^[6~12]. 沈其韩等人^[13]对中国早前寒武纪地质演化的总结发现, 华北克拉通最强烈的岩浆事件发生在 2.50 ~ 2.55 Ga. 甚至有学者强调, 与全球许多其他古老大陆的主要生长时代不同, 2.5 Ga 是华北克拉通一次陆壳生长的事件, 这是华北克拉通特殊性之所在^[14].

与锆石 U-Pb 年龄结果有所不同, Nd 同位素特征揭示了另一种可能性, 即 2.7 ~ 2.8 Ga 才是华北克拉通地壳生长的主要阶段^[15], 而 2.5 Ga 的陆壳生长可能居于次要地位, 或者主要表现为 2.7 ~ 2.8 Ga 形成的老地壳的重熔或分异事件. 但由于 Nd 同位素亏损

地幔模式年龄精度有限, 古老地壳和年轻物质的混合会造成全岩 Nd 模式年龄在很多情况下不能反映地壳生长的真实年龄^[16], 以及太古宙亏损地幔和富集地幔对陆壳生长的相对物质贡献难以确定, 我们认为, 将 2.7 ~ 2.8 Ga 作为华北克拉通地壳生长时代的推论存在很大的不确定性. 因此特别需要针对典型地区开展具体细致的分析研究.

一般认为, TTG 成分岩石的大量出现, 代表了大陆地壳的生长事件. 近年来, 锆石原位 Hf 同位素分析技术取得了突破, 为研究早期地壳生长的阶段性提供了更为便捷可靠的方法^[17~24]. 因此, 本文主要采用这种方法, 选择华北克拉通中北部的怀安片麻岩地体为研究对象, 在充分了解其主、微量元素地球化学特征和形成时代的基础上, 重点进行了锆石 Hf 同位素分析和研究, 并结合 Nd 同位素资料, 探讨华

引用格式: 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. 科学通报, 2009, 54: 2517~2526
Liu F, Guo J H, Lu X P, et al. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0288-y

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-17-2517>

北克拉通晚太古代地壳生长的规律.

1 地质背景及岩石学和地球化学特征

在华北克拉通的中央构造带,从北到南出露一系列高级变质的片麻岩地体,规模较大的有建平地体、承德地体、怀安地体、恒山地体、阜平地体等等,它们主要由TTG成分的片麻岩组成.华北克拉通的高压麻粒岩大多分布于这些片麻岩地体的边缘或者内部,指示了中部带的大陆碰撞带性质^[25-29].这些片麻岩地体的另一个共同特点是,它们的岩浆锆石U-Pb年龄集中于2.5 Ga^[6-12],并或多或少含有年龄更老的继承锆石;而变质锆石的U-Pb年龄集中于1.8~1.9 Ga^[10-12,30].

怀安片麻岩地体是上述片麻岩地体的典型代表.它的南部是恒山片麻岩地体,西部是孔兹岩系麻粒岩相变质沉积岩组合,北部以尚义-赤城大断裂为界与角闪岩相的红旗营子群变质表壳岩组合相接(图1).

怀安片麻岩地体的内部构造略呈穹窿状^[27,31,32],

穹窿的中心大致在该片麻岩地体的中心瓦窑口-新平堡一带.根据野外考察和系统采样分析,怀安片麻岩地体主要由TTG成分占80%以上的片麻岩组成,其中大部分是英云闪长质片麻岩,其次的岩石类型是闪长质片麻岩(图2).两者在空间上密不可分,很多部位显示厚条带状构造,构成了TTG+闪长质片麻岩组合.根据野外地质调查,结合前人的研究资料,可以大致划分出,怀安片麻岩地体的中心地区,闪长质片麻岩的比例略高,可达20%;而其他地区闪长质片麻岩所占的比例相对较低,一般小于10%(图1).此外,还有辉长质的透镜体,以磁铁石英岩为标志的火山沉积岩透镜体,和以夕线石榴片麻岩为标志的变质沉积岩透镜体,零星分布片麻岩中.怀安片麻岩地体几乎全部经历了麻粒岩相变质作用.

我们的系统采样分析显示,怀安片麻岩的主体是英云闪长质和奥长花岗质片麻岩(图2),具有埃达克岩的地球化学特征, $\text{SiO}_2=62.8\text{wt}\%\sim 70.6\text{wt}\%$, MgO

图1 怀安片麻岩地体地质简图及采样点

据文献[30]修改;插图为华北克拉通中部带早前寒武纪基底(据参考文献[28])

图2 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩 Ab-An-Or 长石标准矿物分类图解(数据另文发表)

<4wt%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1\sim 6$, Nb 的含量 $1.2\sim 5.7$ ppm ($1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), Sr 的含量高, 为 $435\sim 938$ ppm, HREE 明显亏损, $\text{Yb}_\text{N} = 0.8\sim 5.8$, $\text{Y}_\text{N} = 0.6\sim 2.6$, 轻重稀土分异强烈, $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N} = 10\sim 54$, $\text{Sr}/\text{Y} = 48\sim 261$, Eu 无异常或弱正异常。这些特征与典型的高硅埃达克岩非常一致[33]。与之共存的闪长质片麻岩具有极为不同的地球化学性质, $\text{SiO}_2 = 52.8\text{wt}\%\sim 64.0\text{wt}\%$, MgO 变化比较大, 最高可达 $6.4\text{wt}\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2\sim 4.6$, Nb 的含量 $3.5\sim 11.6$ ppm, Sr 含量高变化大, 为 $360\sim 1065$ ppm, HREE 大约是球粒陨石的 10 倍左右, 轻重稀土分异不强, $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N} = 5\sim 23$, $\text{Sr}/\text{Y} = 18\sim 64$, Eu 无异常或弱负异常。上述岩石地球化学数据将另文发表。

2 分析方法

2.1 Sm-Nd 同位素

用 Teflon 溶样罐称取约 100 mg 的全岩粉末样品, 加入适量的 $^{149}\text{Sm}-^{150}\text{Nd}$ 混合稀释剂, 再加入纯化的 $\text{HF} + \text{HNO}_3$ 混合酸溶解, 利用 AG50 $\times$ 12 交换树脂分离稀土元素, 然后采用 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Sm 和 Nd。在 MAT-262 质谱计上完成测试。最后采取 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 来校正 Nd 同位素比值。全岩 Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成, 详细的实验流程可参见文献[34~36]。

2.2 锆石原位 Hf 同位素和 U-Pb 同位素分析

样品 05LF75 和 05LF117 的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素是利用配有激光剥蚀系统的 Neptune 多接收等离

子体质谱仪(MC-ICPMS)和 Agilent 7500a 四极杆等离子体质谱仪(Q-ICPMS)进行同时原位分析。实验在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室完成。相关的仪器运行条件和分析流程可参阅谢烈文等人[37]。

其余 4 个样品(05LF38, 05LF77, 05LF86 和 05LF96)的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测试是分开进行的。锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序完成, 详细的实验原理、流程及仪器情况请参阅柳小明等人[38]。锆石 Hf 同位素原位分析在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室配有 193 nm 激光剥蚀系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上完成。激光斑束直径为 $63 \mu\text{m}$, 所用的激光脉冲频率为 $8\sim 10 \text{ Hz}$, 激光束脉冲能量为 100 mJ , 每个分析点的气体背景采集时间为 30 s , 信号采集时间为 30 s 。测定时用国际标样 91500 作外标, 每测定 5 个样品点, 测定一个锆石 91500。采用静态测定模式, 不使用 Neptune 的虚拟放大器功能。干扰校正取推荐值 $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu} = 0.02655$, $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$, β_{Yb} 值根据平均 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 比值计算[39], 用 β_{Yb} 平均值来校正 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的影响[40]。仪器的运行条件和分析流程可参阅文献[40]。

3 分析结果

3.1 Nd 同位素

分别选取 TTG 和闪长质片麻岩各 5 个全岩样品进行 Sm-Nd 同位素分析(表 1)。TTG 片麻岩的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 变化范围为 $0.0730\sim 0.0950$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(2.5 \text{ Ga})$ 的变化范围为 $2.7\sim 4.3$, 平均为 3.3 ± 1.3 , 单阶段 Nd 模式年龄在 $2.52\sim 2.63 \text{ Ga}$ 之间, 平均为 $(2.53 \pm 0.04) \text{ Ga}$ 。闪长质岩石的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 变化范围为 $0.1116\sim 0.1311$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(2.5 \text{ Ga})$ 的变化范围为 $0.8\sim 1.7$, 平均为 1.5 ± 1.7 , 单阶段 Nd 模式年龄变化在 $2.72\sim 2.85 \text{ Ga}$ 之间, 平均为 $(2.75 \pm 0.05) \text{ Ga}$ 。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

针对 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩, 分别选取了 3 个代表性的样品进行锆石 U-Pb 年龄分析。TTG 片麻岩样品: 英云闪长岩 05LF75($40^\circ 34' 42.1''\text{N}$, $114^\circ 05' 36.9''\text{E}$), 英云闪长岩 05LF86($40^\circ 44' 43.4''\text{N}$, $114^\circ 20' 41.2''\text{E}$), 奥长花岗岩 05LF96($40^\circ 43' 31.0''\text{N}$, $114^\circ 20' 56.8''\text{E}$)。闪长质片麻岩: 05LF38($40^\circ 34' 05''\text{N}$,

表 1 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩全岩 Sm-Nd 同位素组成^{a)}

样品编号	岩性	Sm/ppm	Nd/ppm	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (2σ)	$\epsilon_{Nd}(t) = 2.5\text{ Ga}$	$f_{Sm/Nd}$	T_{DM1}/Ga	T_{DM2}/Ga
05LF04	英云闪长岩	0.807	5.920	0.0825	0.510971±13	4.3	-0.6	2.52	2.52
05LF49	英云闪长岩	2.104	13.398	0.0950	0.511124±13	3.2	-0.5	2.59	2.61
05LF72	花岗闪长岩	2.824	18.228	0.0940	0.511075±13	2.7	-0.5	2.63	2.66
05LF96	奥长花岗岩	2.078	13.676	0.0920	0.511038±14	2.5	-0.5	2.63	2.67
05LF103	花岗闪长岩	0.627	5.189	0.0730	0.510782±13	3.6	-0.6	2.56	2.58
05LF38	闪长质片麻岩	6.566	34.927	0.1137	0.511357±13	1.7	-0.4	2.72	2.73
05LF40	闪长质片麻岩	6.510	32.721	0.1203	0.511450±14	1.4	-0.4	2.76	2.76
05LF41	闪长质片麻岩	12.070	65.100	0.1121	0.511327±13	1.6	-0.4	2.72	2.74
05LF45	闪长质片麻岩	4.623	25.045	0.1116	0.511316±14	1.6	-0.4	2.73	2.74
05LF78	闪长质片麻岩	4.317	19.914	0.1311	0.511598±17	0.8	-0.3	2.85	2.81

a) 计算公式: $\epsilon_{Nd}(t) = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s \times (e^{2t} - 1)) / ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} \times (e^{2t} - 1)) \times 10000$; $f_{\text{Sm/Nd}} = [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}] - 1$; $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] \}$; $T_{\text{DM2}} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s] + [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{cc}}] \times (e^{2t} - 1) / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{cc}}] \}$; T_{DM2} 是按照 $t = 2.5\text{ Ga}$ 计算的两阶段模式年龄。计算采用的参数: 平均大陆地壳的 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{cc}} = 0.12$; 球粒陨石均一库的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$; 亏损地幔的 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$

114°06'09"E), 05LF77(40°33'10.3"N, 114°09'58.3"E) 和 05LF117(40°36'38"N, 114°13'58"E)。在进行 U-Pb 同位素分析之前, 对锆石进行了详细的 CL 图像分析

(图 3), 锆石 U-Pb 分析结果见图 4。从锆石的 CL 图像可以发现, 除了 05LF117 样品的锆石主要为变质锆石以外, 其他片麻岩大量的锆石都保留了岩浆锆

图 3 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩锆石 CL 图像

实心圆圈为 U-Pb 年龄分析, 虚线圆圈为 Hf 同位素分析; 05LF75 和 05LF117 的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素为同时分析。锆石年龄值为 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 括弧内数据为 Th/U 比值

图4 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩锆石 LA-ICPMS 年龄谱和图

石的韵律环带特征, 少量锆石发育明显的变质增生边。

样品 05LF75 为英云闪长岩, 对 24 颗锆石进行了 24 个点分析的分析。在 24 个可用的分析点中, 有 15 个分析点获得的上交点年龄为 (2503 ± 14) Ma (MSWD = 2.2)(图 4(a)), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围 $(2464 \pm 11) \sim (2544 \pm 9)$ Ma, 加权平均年龄为 (2502 ± 11) Ma (MSWD = 4.1)。

样品 05LF86 也是英云闪长岩, 对 33 颗锆石进行了 35 个点的分析。大部分锆石是反向不谐和, 而且年龄变化范围很大。其中 4 分析点获得 (2471 ± 44) Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 上交点年龄; 其余的数据由于受到 1.8 ~ 1.9 Ga 变质作用和后期的 Pb 丢失影响, 没有获得有意义的年龄(图 4(b))。

05LF96 是奥长花岗岩, 对 18 颗锆石进行了 19 个点的分析。大部分的锆石 U-Pb 年龄同样也是不谐和, 其中 8 个分析点构成的不一致线获得的上交点年龄为 (2506 ± 13) Ma (MSWD = 0.47)(图 4(c)), 但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的加权平均年龄略低一些, 为 (2479 ± 13) Ma (MSWD = 8.4)。

闪长质片麻岩样品 05LF38 的 25 个分析点是在 25 颗锆石完成的。如图 4(d)所示, 锆石的年龄多不谐和, 其中的 16 个分析点获得 (2494 ± 41) Ma (MSWD = 8.5) 的上交点年龄, 但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的加权平均年龄为 (2399 ± 26) Ma, MSWD = 136。

对样品 05LF77 的 29 颗锆石进行了 30 个点的分析, 锆石年龄多数也是不谐和。其中 9 个分析点构成不一致线获得的上交点年龄为 (2507 ± 17) Ma (MSWD = 1.9)(图 4(e)), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的加权平均年龄为 (2504 ± 12) Ma (MSWD = 2.6)。

样品 05LF117 的锆石主要为变质锆石, 对 25 颗锆石进行了 25 个点的分析。除了 3 个分析点以外, 其余 22 个分析点获得了一个变质年龄 (1785 ± 14) Ma (MSWD = 1.4)(图 4(f)), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的加权平均年龄为 (1786 ± 12) Ma (MSWD = 2.3)。

结合前人的资料, 我们确认, 怀安片麻岩地体的形成时代在 2.5 Ga, 之后经历了 1.8 ~ 1.9 Ga 的麻粒岩相的变质作用。

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素是在年龄点的同一位置进行原位微区分析。如图 5 所示, TTG 片麻岩和闪长质片麻岩的岩浆锆石具有类似的 Hf 同位素组成特征, 低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值, 几乎都是小于 0.001, 集中分布在

图 5 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 关系

0.0003 ~ 0.0009 之间。初始 Hf 的比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 都小于 0.2815, 绝大部分都是集中在 0.2813 ~ 0.2814 之间。相对于岩浆锆石, 变质锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值更低, 大部分小于 0.0001, 但 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 大于 0.2814。

如图 6 和 7 所示, TTG 片麻岩中岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围在 -2.7 ~ 8.3 之间, 对应的单阶段 Hf 亏损地幔模式年龄为 2440 ~ 2731 Ma, 峰值为 (2618 ± 9.6) Ma。但大部分都是高正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (2.0 ~ 8.3)。而变质锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为明显的负值, -10.0 ~ -4.3, 单阶段模式年龄为 2414 ~ 2538 Ma, 峰值为 (2521 ± 13) Ma。闪长质片麻岩的岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除了两个点以外, 变化范围类似于 TTG 片麻岩的值, 为 -2.2 ~ 7.9 之间, 绝大部分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都是正的, 对应的单阶段 Hf 亏损地幔模式年龄为 2492 ~ 2749 Ma, 峰值为 (2620 ± 12) Ma。大部分的锆石也都是高正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (2.0 ~ 7.9)。闪长质片麻岩的变质锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围大,

图 6 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与年龄相关图

图7 怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩锆石 Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM} 直方图

为 $-11.0 \sim -6.9$ 。模式年龄变化范围很大, 没有明显的峰值。

4 讨论

近年来, 针对怀安地体的各类片麻岩, 报道了大量的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。这些年龄大都集中于 2.5 Ga [6,12,41], 同时, 年龄更老的继承锆石也零星存在。这些结果表明怀安片麻岩地体形成于 2.5 Ga。

将我们获得的 Sm-Nd 同位素数据展示在 T_{DM} - $f_{Sm/Nd}$ 相关图中(图 8), 结合表 1, 可以看出, 怀安片麻岩地体两类主要片麻岩的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄集中于 2.5 ~ 2.8 Ga。其中, TTG 片麻岩的亏损地幔模式年龄集中于 2.5 ~ 2.6 Ga, 相应的 $\epsilon_{Nd}(2.5 \text{ Ga})$ 值极为接近同时期亏损地幔值; 相比之下, 闪长质片麻岩的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄普遍地略高于 TTG 成分的片麻岩, 集中于 2.7 ~ 2.8 Ga, $\epsilon_{Nd}(2.5 \text{ Ga})$ 值也略低于 TTG 片麻岩的值。上述 Nd 同位素特征显示, TTG 片麻岩类主要来源于 2.5 ~ 2.6 Ga 从亏损

地幔衍生出的基性地壳, 而闪长质片麻岩则可能有较多古老地壳物质的贡献。

锆石的 U-Pb 年龄代表的是锆石结晶或变质作用的时间; 而锆石的 Hf 同位素模式年龄则代表原岩物质从亏损地幔提取的时间, 也就是地壳的生长时代 [21]。怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩的岩浆锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值绝大部分为正值, 且相当一部分接近同时期的亏损地幔值(图 6), 并且锆石的 Hf 同位素沿着锆石演化线($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.001$)变化。如果把具有谐和 U-Pb 年龄的岩浆锆石 Hf 同位素回算到 2.5 Ga, 可以看到, TTG 片麻岩锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 2.1 ~ 10.4, 闪长质片麻岩锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 1.6 ~ 8.4, 二者都集中在 3.0 ~ 7.0 之间。其中, 锆石 U-Pb 年龄与高 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的锆石 T_{DM} 年龄相近, 指示 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩的源区物质为新生地壳, 同时说明在比较短的时间内再造, 或称为即时再造(prompt reworking)。另外, 部分锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值相对较低, 可能反映了古老物质的加入。

图8 怀安片麻岩地体的 Nd 模式年龄和 $f_{Sm/Nd}$ 相关图

华北克拉通 2.5 Ga 的地壳生长事件在其他地区也有类似的记录, 比如五台地区的片麻状花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 $(2509 \pm 7) \text{ Ma}$, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值可达 4.7 [42]。此外, 五台绿岩带 [43,44] 和固阳绿岩带(陈亮, 未发表数据)应该都是 2.5 Ga 新生地壳。河南嵩山石英岩中 85% 的碎屑锆石是 ~2.5 Ga, 而且锆石的 Hf 同位素组成显示其岩浆成因以新太古代地壳再造为主 [45]。因此可以认为, 2.5 Ga 的岩浆作用是华北克拉通重要的地壳生长事件。

虽然 Nd 同位素显示出闪长质片麻岩中古老陆壳物质的贡献较多, 但是 Hf 同位素并没有相应的数据

支持. 这可能是由于古老地壳和年轻物质的混合, 造成全岩Nd模式年龄在很多情况下不能反映地壳生长的真实年龄^[16].

闪长质片麻岩的变质锆石高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 6), 应该是在 1.8 ~ 1.9 Ga麻粒岩相变质过程中吸收了岩石中的更多放射性成因的Hf 同位素. 这说明, 在变质作用过程中生长或重结晶的锆石, 从岩石中获得了更多放射性成因的Hf 同位素^[46,47]. 这一点, 与文献中报道的其他地区高级变质作用引起变质锆石Hf 同位素明显升高的实例是相似的^[46,48,49].

TTG岩石组合按照 Al_2O_3 含量可以分为高铝和低铝两种类型(以 $\text{SiO}_2 = 70\text{wt}\%$ 时 Al_2O_3 含量 15wt%为界线). 虽然人们都赞同高铝的TTG 岩石是由玄武质的岩石在高压的条件下部分熔融形成, 但对TTG岩石组合产出的构造背景还是有不同的理解. 目前主要有两种观点: 一种观点认为TTG 岩石是加厚地壳发生部分熔融产生^[50,51], 另一种观点则认为TTG是俯冲板片发生部分熔融形成^[33,52-57]. 怀安TTG 片麻岩和闪长质片麻岩的形成时代都是 2.5 Ga, 野外关系也显示出密切的共存关系, 指示它们是在同一构造背景下形成的. 部分学者认为晚太古代华北克拉通中部带是活动大陆边缘的构造背景^[44,58,59], 也有学者认为是岛弧环境^[12]. 怀安TTG 片麻岩具有高Si埃

达克岩的地球化学特征, 同时, Nd和Hf同位素也显示有古老地壳物质加入到岩浆作用的信息, 结合古老锆石的存在^[6], 我们认为, 怀安片麻岩地体形成于活动大陆边缘, TTG 片麻岩是俯冲板片熔融产物. 与TTG 片麻岩有所不同的是, 闪长质片麻岩的MgO和Nb含量更高, 可能是板片熔体与地幔楔相互作用之后形成.

5 结论

对怀安 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩全岩 Nd 和锆石 Hf同位素研究表明, TTG 片麻岩的 Nd 同位素反映出 2.5 Ga 的地壳生长时间, 而闪长质片麻岩由于源岩有古老物质的加入, 使其 Nd 同位素反映不出真正的地壳生长时间. 与 Nd 同位素相比, 锆石的 Hf 同位素却能很好的反映出地壳生长时间, 不管是TTG 片麻岩, 还是闪长质片麻岩, 部分岩浆锆石 Hf模式年龄与锆石 U-Pb 年龄一致, 并且 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与同期亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相近, 揭示出新生地壳生长时间为 2.5 Ga. 此外, 变质锆石还记录了 1.8 ~ 1.9 Ga 的麻粒岩相变质作用.

TTG 片麻岩为俯冲板片熔融的产物, 闪长质片麻岩则可能是受到地幔楔影响的板片熔体的产物, 并有明显的古老物质加入.

致谢 感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士、弓虎军博士和张红同学以及中国科学院地质与地球物理研究所张艳斌博士、储著银博士和胡波博士在实验测试方面提供的帮助, 感谢郑永飞教授和万渝生研究员对本文初稿提出的许多建设性意见, 感谢翟明国、陈福坤研究员与作者进行的有益讨论.

参考文献

- 1 Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 1992, 20: 339—342[DOI]
- 2 Liu D Y, Wan Y S, Wu J S, et al. Eoarchean rocks and zircons in the North China Craton. In: Van Kranendonk M J, Smithies R H, Bennett V, eds. *Earth's Oldest Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 251—273
- 3 Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78: 79—94[DOI]
- 4 Wan Y S, Liu D Y, Song B, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 563—575[DOI]
- 5 万渝生, 刘敦一, 殷小艳, 等. 鞍山地区铁架山花岗岩及表壳岩的锆石 SHRIMP 年代学和 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 2007, 23: 241—252
- 6 刘敦一, 耿元生, 宋彪. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造——同位素年代学证据. *地球学报*, 1997, 18: 226—232
- 7 Guan H, Sun M, Wilde S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2002, 113: 1—18[DOI]

- 8 Wilde A S, Cawood P A, Wang K Y, et al. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 597—613^[DOI]
- 9 Kröner A, Wilde S A, O'Brien P J. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a late Archean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of Northern China. *Acta Geol Sin*, 2005, 79: 605—629
- 10 张华锋. 华北克拉通桑干地区早前寒武纪花岗岩与基性麻粒岩的时代、成因及其对地壳演化的制约. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005. 1—138
- 11 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for late archean to paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *Am J Sci*, 2002, 302: 191—226^[DOI]
- 12 Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an complex: Constraints on late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. *Am J Sci*, 2008, 308: 270—303^[DOI]
- 13 沈其韩, 耿元生, 宋彪, 等. 华北和扬子陆块及秦岭-大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息. *地质学报*, 2005, 79: 616—627
- 14 Windley B F. *The Evolving Continents*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons. 1995. 1—526
- 15 Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523—545^[DOI]
- 16 Kemp A I S, Hawkesworth C J, Paterson B A, et al. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, 2006, 439: 580—583^[DOI]
- 17 Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 1999, 399: 252—255^[DOI]
- 18 Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 4205—4225^[DOI]
- 19 Hawkesworth C J, Kemp A I S. Evolution of the continental crust. *Nature*, 2006, 443: 811—817^[DOI]
- 20 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 2007, 23: 185—220
- 21 张少兵, 郑永飞. 扬子陆核的生长和再造: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 2007, 23: 393—402
- 22 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. *岩石学报*, 2007, 23: 317—330
- 23 Harrison T M, Schmitt A K, McCulloch M T, et al. Early (≥ 4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$, and Ti thermometry results for Hadean zircons. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 268: 476—486^[DOI]
- 24 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 2008, 163: 351—383^[DOI]
- 25 翟明国, 郭敬辉, 闫月华, 等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. *中国科学 B 辑*, 1992, 12: 1325—1330
- 26 刘树文, 沈其韩, 耿元生. 冀西北两类石榴基性麻粒岩的变质演化及 Gibbs 方法分析. *岩石学报*, 1996, 12: 261—275
- 27 李江海, 翟明国, 钱祥麟, 等. 华北中北部晚太古代高压麻粒岩的地质产状及其出露的区域构造背景. *岩石学报*, 1998, 14: 176—189
- 28 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, 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]
- 29 Guo J H, O'Brien P J, Zhai M G. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: Metamorphic evolution, P - T paths and geotectonic significance. *J Metamorph Geol*, 2002, 20: 741—756^[DOI]
- 30 Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 629—642^[DOI]
- 31 Zhang J S, Dirks P H G M, Passchier C W. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Palaeoproterozoic of north China. *Precambrian Res*, 1994, 67: 37—57^[DOI]
- 32 Dirks P H G M, Zhang J S, Passchier C W. Exhumation of high-pressure granulites and the role of lower crustal advection in the North China Craton near Datong. *J Struct Geol*, 1997, 19: 1343—1358^[DOI]
- 33 Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 2005, 79: 1—24^[DOI]
- 34 Wasserburg G J, Jacobsen S B, DePaolo D J, et al. Precise determinations of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45: 2311—2323^[DOI]
- 35 Chen F K, Hegner E, Todt W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany—evidence for a Cambrian magmatic arc. *Int J Earth Sci*, 2000, 88: 791—802^[DOI]
- 36 Chen F K, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *Int J Earth Sci*, 2002, 91: 469—481^[DOI]
- 37 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 等. 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*, 2008, 53: 220—228

- 38 柳小明, 高山, 第五春荣, 等. 单颗粒锆石的 20 μm 小斑束原位微区 LA-ICP-MSU-Pb 年龄和微量元素的同时测定. 科学通报, 2007, 52: 228—235
- 39 Iizuka T, Hirata T. Improvements of precision and accuracy in *in-situ* Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique. Chem Geol, 2005, 220: 121—137[DOI]
- 40 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]
- 41 耿元生, 刘敦一, 宋彪. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架. 地质学报, 1997, 71: 316—327
- 42 陈斌, 刘树文, 耿元生, 等. 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, 2006, 22: 296—304
- 43 Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. Determining Precambrian crustal evolution in China: A case study from Wutaishan, Shanxi Province, demonstrating the application of precise SHRIMP U-Pb geochronology. J Geol Soc Lond, 2004, 226: 5—25[DOI]
- 44 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. J Asian Earth Sci, 2005, 24: 577—595[DOI]
- 45 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 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, 2008, 53: 1923—1934
- 46 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]
- 47 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. 科学通报, 2007, 52: 1—10
- 48 Flowerdew M J, Millar I L, Vaughan A P M, et al. The source of granitic gneisses and migmatites in the Antarctic Peninsula: A combined U-Pb SHRIMP and laser ablation Hf isotope study of complex zircons. Contrib Mineral Petrol, 2006, 151: 751—768[DOI]
- 49 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]
- 50 Smithies R H. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. Earth Planet Sci Lett, 2000, 182: 115—125[DOI]
- 51 Condie K C. TTGs and adakites: Are they both slab melts? Lithos, 2005, 80: 33—44[DOI]
- 52 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. J Geophys Res, 1990, 95: 21503—21521[DOI]
- 53 Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. Geology, 1986, 14: 753—756[DOI]
- 54 Martin H. The mechanisms of petrogenesis of the Archean continental crust, comparison with modern processes. Lithos, 1993, 30: 373—388[DOI]
- 55 Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids? Lithos, 1999, 46: 411—429[DOI]
- 56 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 1990, 347: 662—665[DOI]
- 57 Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. Geology, 1993, 21: 547—550[DOI]
- 58 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. 岩石学报, 2000, 16: 1—10
- 59 Kusky T M, Li J H, Tucker R D. The archean Dongwanzi ophiolite complex, North China Craton: 2.505-billion-year-old oceanic crust and mantle. Science, 2001, 292: 1142—1145[DOI]