

华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩的 Hf-Nd 同位素特征及其地壳演化意义

王 雪^{1,2}, 黄小龙¹, 马金龙¹, 钟军伟³, 杨启军⁴

(1.中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院 大学, 北京 100049; 3.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 4.桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 太华群和登封群变质杂岩的锆石 U-Pb 定年结果统计表明, 华北克拉通中部造山带南段地区在新太古代-古元古代期间存在至少四阶段岩浆活动(2.85~2.72 Ga, 2.57~2.48 Ga, 2.34~2.30 Ga 和 2.20~2.07 Ga)。与中部造山带中、北段地区相比, 南段地区的新太古代早期的岩浆活动略早, 并具有相对较强烈的古元古代早期(~2.3 Ga)岩浆活动。新太古代早期(2.85~2.72 Ga)的 TTG 质岩石整体具有正的全岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 并且有 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏高的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 其源区形成与地幔交代作用相关。新太古代末期-古元古代初期(2.57~2.48 Ga)的 TTG 质片麻岩主要为正的全岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 部分样品具有 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏低的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 为锆石效应的结果, 其岩石成因以初生地壳物质部分熔融为主, 存在少量古老地壳物质的再循环作用。古元古代早期(2.34~2.30 Ga)TTG 质岩石和古元古代中期(2.20~2.07 Ga)的富钾岩及 TTG 质岩石的全岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为负值, 并具 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏低的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 均为锆石效应的结果, 其岩石成因以古老地壳物质的再循环作用为主。太华群和登封群片麻岩的全岩 Hf-Nd 同位素解耦主要与其源区形成过程存在地幔交代作用或者锆石效应有关, 而与石榴子石效应关系不大, 表明各阶段 TTG 质岩石的高 Sr/Y、(La/Yb)_N 比值和低重稀土含量等特征不是继承自源区, 而确实反映了较大压力深度的岩浆活动过程。总体上, 新太古代早期-古元古代初期为华北克拉通中部造山带南段地区主要的地壳生长阶段, 而古元古代早-中期主要为地壳再循环阶段。

关键词: TTG; Hf-Nd 同位素解耦; 太华群; 登封群; 中部造山带南段; 华北克拉通

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)06-1108-011

0 引 言

华北克拉通作为我国最古老的克拉通地块, 已有研究表明其在古太古代就已开始形成陆核(~3.8 Ga; Liu et al., 1992; Wu et al., 2008), 之后微陆块在不同时期进行了不同规模的碰撞拼合而形成了较大的陆块(Liu et al., 1992; 孙大中和胡维兴, 1993; 沈

其韩等, 1995; 陆松年等, 1996; 耿元生等, 1997; 李江海等, 1997; 伍家善等, 1998; Guan et al., 2002; Zhao et al., 2002; Zhai and Liu, 2003; 翟明国, 2006, 2008; Zhai et al., 2010; Zhao and Cawood, 2012; Zhao and Zhai, 2013)。前人研究对于华北克拉通微陆块之间在早前寒武纪期间的碰撞时间、碰撞机制及碰撞过程均存在较大分歧, 并提出了不同的构造模型

收稿日期: 2014-02-24; 改回日期: 2014-05-06

项目资助: 国家自然科学基金项目(41373032, 41130314, 91214202)联合资助。

第一作者简介: 王雪(1988-), 女, 博士研究生, 从事岩石地球化学方向研究。Email: wangxue@gig.ac.cn

通信作者: 黄小龙(1972-), 研究员, 博士生导师, 从事岩石地球化学方向研究。Email: xlhuang@gig.ac.cn

(Zhao, 2001; Kusky and Li, 2003; Zhai and Liu, 2003; Zhao et al., 2008; Kusky and Santosh, 2009; Zhai et al., 2010; Zhao and Zhai, 2013), 主要可以归纳为 TNCO (Trans-North China Orogen) 模式 (Zhao et al., 2005, 2008, 2012; Zhao and Cawood, 2012; Zhao and Zhai, 2013) 和 COB (Central Orogenic Belt) 模式 (Kusky and Li, 2003; Kusky, 2011)。两种构造模型都将华北克拉通划分为东、西块体和中间的中部造山带(图 1), 但对中部造山带的性质以及形成时间和构造特征仍存在较大争议。因此, 中部造山带是探讨华北克拉通早前寒武纪地质演化的一个关键研究区域。

中部造山带的组成复杂, 从北往南, 包括了怀安、恒山、五台、阜平、赞皇、吕梁、中条、登封、太华等变质杂岩体。长期以来, 前人对中部造山带的研究主要集中在中、北段的怀安、恒山、吕梁、阜平、五台等地区 (Liu et al., 2004; Zhao et al., 2008), 而对南段地区的相关研究较少。近年来, 一些研究者在中部造山带的南段地区开展了有关太华群和登封群变质杂岩年代学和岩石地球化学特征的一系列工作 (第五春荣等, 2007, 2008; Liu et al., 2009; 周艳艳等, 2009a, 2009b; Huang et al., 2010, 2012, 2013; Diwu et al., 2011)。已有研究发现, 中部造山带南段不同地区的变质杂岩的原岩结晶年龄具有较大差异, 在新太古代-古元古代期间至少存在四阶段岩浆活动 (Huang et al., 2013), 但对各阶段岩浆活动之间的相互关系和出现岩石地球化学特征差异的原因还不甚清楚。详细的地球化学研究是认识相关岩石的性质及其地质意义的重要途径, 有益于系统认识华北克拉通南缘早前寒武纪的地质构造演化过程。

Lu-Hf 与 Sm-Nd 元素体系有很大的相似性而使得 Hf-Nd 同位素之间常呈现正相关性 (Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Chauvel et al., 2008), 但一些岩浆作用和变质作用过程造成了 Hf-Nd 同位素解耦现象, 即 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间并不存在预想的相关性。造成体系 Hf-Nd 同位素解耦的原因主要包括了石榴子石效应 (Patchett et al., 1981, 2004; Schmitz et al., 2004)、锆石效应 (Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Patchett et al., 1984, 2004; Vervoort et al., 2000)、地幔交代作用 (Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Bizimis et al., 2003; Yu et al., 2009)、地幔中的大洋沉积物组分再循环作用 (Chauvel et al., 2008) 和地表的风化作用 (Vervoort et al., 2011) 等。因此, Hf-Nd 同位素体系的联合运用将为认识壳-幔分异和地壳演化过程提供重要依据。

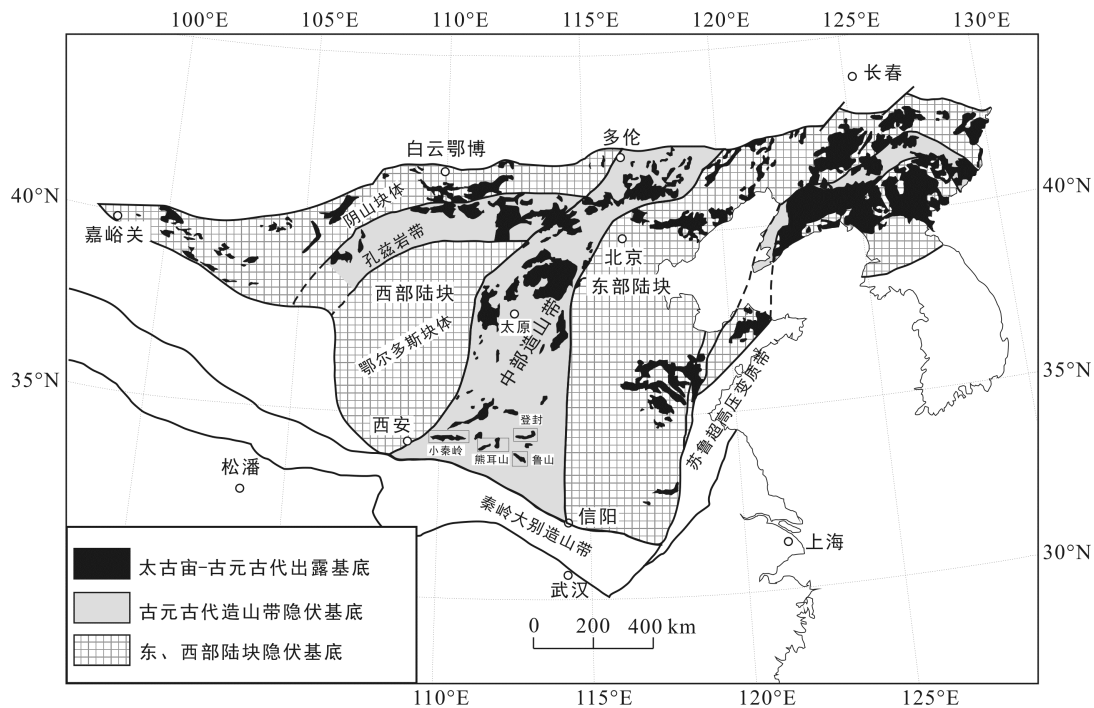
目前, 在我国乃至全球均已经积累了大量的年代学和 Hf-Nd 同位素数据, 其中 Nd 同位素主要来自

于全岩组成, 但 Hf 同位素主要为来自于锆石的数据。由于锆石的高稳定性、强抗风化能力, 在岩浆作用过程中再循环地壳物质的参与将产生大量继承锆石, 因此锆石的 Hf 同位素组成并不能完全反映全岩体系的 Hf 同位素特征, 也无法与全岩 Nd 同位素进行匹配。本文尝试对鲁山、华山、小秦岭、熊耳山地区的太华群变质杂岩和嵩山地区的登封群变质杂岩进行初步的全岩 Hf 同位素特征的研究, 结合前期研究所获得的锆石 Hf 同位素、全岩 Nd 同位素和地球化学资料 (Huang et al., 2010, 2012, 2013), 深入了解新太古代-古元古代期间华北克拉通南缘的岩浆活动机制, 为系统探讨华北克拉通中部造山带南段新太古代-古元古代的地壳演化历史提供新约束。

1 地质背景和研究样品

华北克拉通总体上由东部陆块、西部陆块和介于其间的中部造山带组成。其中, 西部陆块又细分为阴山陆块和鄂尔多斯陆块, 两者在 ~1.95 Ga 沿东西展布的孔兹岩带拼合 (Zhao et al., 2005; Xia et al., 2006a, 2006b, 2008; Yin et al., 2009, 2011; Li et al., 2011; Wang et al., 2011)。太华群和登封群变质杂岩是华北克拉通中部造山带南段大规模出露的最古老岩石。太华群从西至东主要出露在华山、小秦岭、崤山、熊耳山、鲁山和舞阳等地区 (图 1), 其中以河南鲁山地区出露最为典型; 登封群则出露于河南登封、临汝境内的嵩山和箕山地区。

前人根据构造特征和岩石类型将太华群划分为上太华群和下太华群 (Zhang et al., 1985; 齐进英, 1992; 沈福农, 1994; 关保德, 1996; 涂绍雄, 1996)。在鲁山地区, 下太华群以 TTG 质片麻岩为主, 广泛发育混合岩化, 斜长角闪岩常常以包体的形式存在于片麻岩中 (Zhang et al., 1985; 沈福农, 1994; 涂绍雄, 1996); 上太华群以表壳岩系为主, 岩石类型复杂, 有富铝质副片麻岩、斜长角闪岩、大理岩、石英岩等 (Diwu et al., 2010)。在熊耳山地区, 下太华群主要为变酸性岩浆岩和变基性-中性岩浆岩 (如黑云斜长片麻岩、含角闪石片麻岩和角闪岩等), 上太华群主要为变酸性火山岩和沉积岩 (劳子强, 1989a; Huang et al., 2012)。在华山-小秦岭地区, 下太华群主要有变基性火山岩和中性到酸性片麻岩 (黑云角闪片麻岩和斜长角闪片麻岩) 以及少量的麻粒岩, 且混合岩化发育广泛, 角闪岩常以包体的形式存在于片麻岩中; 上太华群则主要为石英岩、变泥质片麻岩、片岩、大理岩等 (Huang et al., 2013)。



东部陆块、西部陆块、中部造山带及太古宙-古元古代出露基底范围据 Zhao et al. (2005, 2012)。

图 1 华北克拉通构造框架图

Fig.1 Tectonic framework of the North China Craton

登封群是一套典型的变火山沉积系列岩石, 具有花岗绿岩带特征, 在岩石组合、岩性变化和变质岩原岩性质等方面具有明显的分层性。下部为混合杂岩, 包括片麻状花岗岩、混合岩和片麻岩, 中部为基性-中酸性火山岩, 夹有基性-超基性岩体, 包括麻粒岩、斜长角闪(片)岩和云母石英片岩, 上部为浅变质沉积岩, 包括云母石英片岩、云母片岩, 夹大理岩, 且具有复理石建造特征(Zhang et al., 1985; 劳子强, 1989a, 1989b)。

整体上, 太华群变质杂岩的变质级别相对较高, 从麻粒岩相到高角闪岩相, 部分麻粒岩退变质为角闪岩相(劳子强, 1989a); 登封群变质杂岩主要为角闪岩相, 经历两次退变质为绿片岩相(Zhang et al., 1985; 劳子强, 1989a, 1989b)。

由于太华群和登封群变质杂岩在华北南缘的分布较为广泛, 前期研究表明太华群和登封群变质杂岩的原岩形成时间跨度较大、岩石类型丰富, 为了更好地考察早前寒武纪演化过程中 Hf 同位素变化特征, 本文选择已有较好研究基础的鲁山、熊耳山、华山-小秦岭等地区的太华群变质杂岩和嵩山地区登封群变质杂岩作为研究对象, 岩石类型主要为角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、花岗质片麻岩和片麻状花岗岩(Huang et al., 2010, 2012, 2013)。

2 分析方法

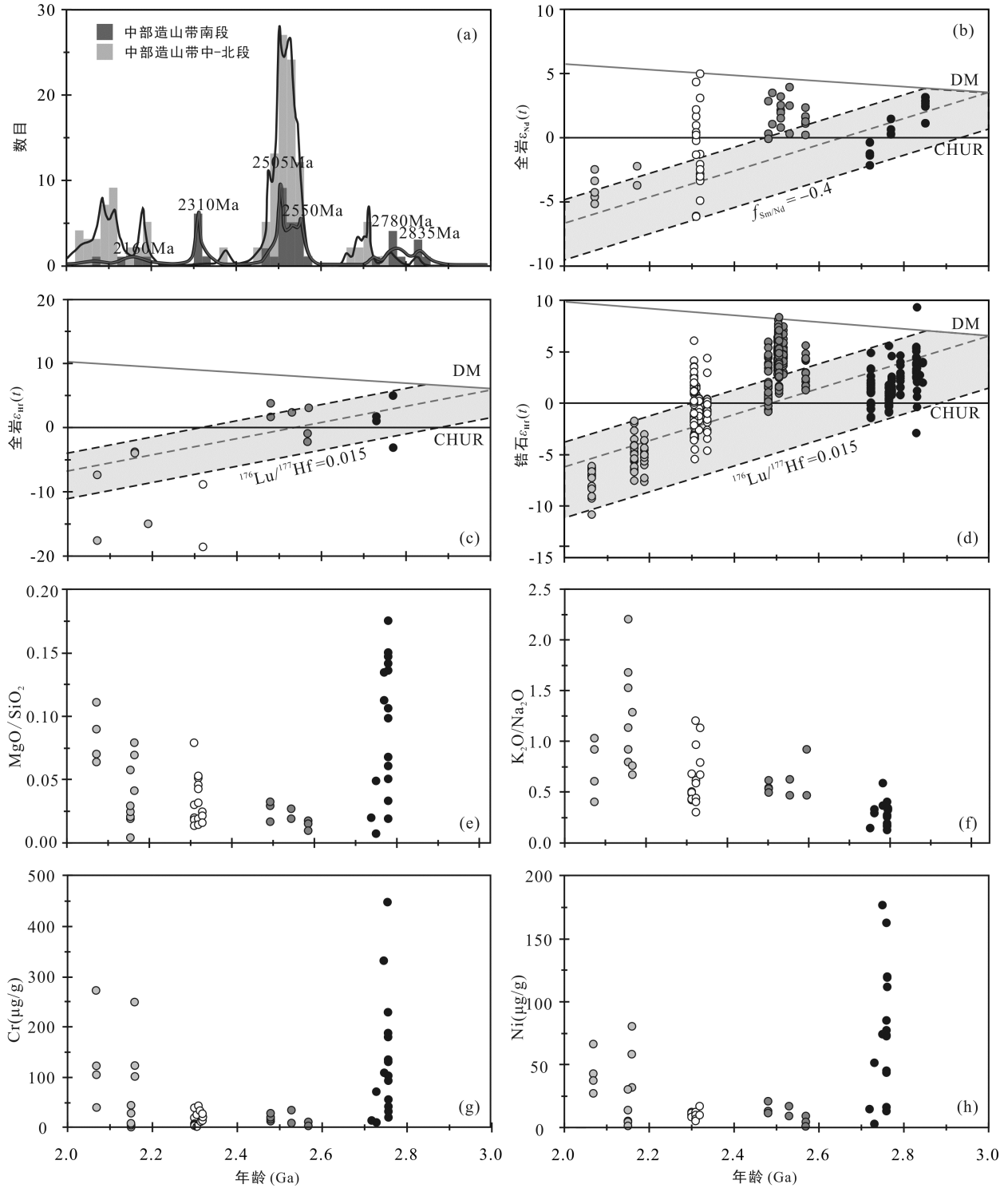
样品全岩地球化学分析前处理在中国科学院广州地球化学研究所完成。样品用岩石切片机切除表层部分, 再手工将这些样品砸成粒径约 0.5~1 cm 的小块体, 用去离子水反复冲洗样品, 并放入超声振荡器超声振荡清洗三次, 将洗净的样品在 100 °C 电炉上烘干, 选取约 100 g 的烘干样品在刚玉碾磨机上机械碾碎至 200 目粉末。将约 100 mg 样品粉末和 200 mg 的 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合均匀后, 放置在铂金坩埚中, 用 Rigaku 高频全自动熔样机在 1200 °C 条件下熔融并快速冷却成玻璃片, 然后用 2 mol/L 的 HCl 将样品玻璃片溶解, 采用 HCl-单柱 Ln-Spec 提取色谱方法将 Hf 和基体元素及干扰元素分离。分离后的 Hf 同位素测试在厦门大学高分辨率多接收等离子体质谱仪上进行, 使用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$ 和标样 IMC-475 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282160$) 进行质量分馏和外部校正, 与本文样品同时分析的国际标样 BHVO-2 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.283095 \pm 18(2\sigma, n=4)$ 。

3 全岩 Hf 同位素分析结果

太华群和登封群变质杂岩记录了新太古代-古

元古代至少四阶段岩浆活动(2.85~2.72 Ga, 2.57~2.48 Ga, 2.34~2.30 Ga 和 2.20~2.07 Ga; Huang et al., 2013; 图 2a), 从早阶段至晚阶段具有变化的

全岩 Hf 同位素组成(表 1、图 2), 本文结合前期研究结果将各阶段岩石的全岩 Hf、Nd 同位素特征描述如下。



资料来源: Zhang and Li, (1988); 王泽九等(2004); Wan et al. (2006); 第五春荣等(2007); 万渝生等(2009); 周艳艳等(2009a); Liu et al. (2009); Huang et al. (2010, 2012, 2013); Diwu et al. (2011); Zhou et al. (2011); Zhang et al. (2013); Zhao and Zhai (2013)。

图 2 华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩年龄分布及其地球化学特征变化

Fig.2 Age distribution and geochemical variations of the Early Precambrian metamorphic complexes in the southern segment of the Trans-North China Orogen

表 1 中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩全岩 Hf-Nd 同位素组成

Table 1 Whole-rock Hf and Nd isotope results for the Early Precambrian metamorphic complexes in the southern segment of Trans-North China Orogen (TNCO)

样品号	岩石类型	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	t (Ga)
登封杂岩								
DF05-4	黑云斜长片麻岩	0.0042	0.281439±7	0.281235	2.45	0.509387	0.61	2.53
DF05-8	黑云斜长片麻岩	0.0018	0.281203±14	0.281117	-0.87	0.509390	1.63	2.57
DF05-9	黑云斜长片麻岩	0.0020	0.281176±13	0.281080	-2.18	0.509318	0.23	2.57
华山-小秦岭地区太华杂岩								
THH05-97	黑云斜长片麻岩	0.0030	0.281391±6	0.281247	1.71	0.509437	0.30	2.48
THH05-98	黑云斜长片麻岩	0.0055	0.281569±8	0.281306	3.82	0.509567	2.85	2.48
THQ05-77	黑云斜长片麻岩	0.0044	0.281446±6	0.281227	3.10	0.509431	2.50	2.57
THB05-103	角闪黑云斜长片麻岩	0.0069	0.281577±7	0.281293	-4.00	0.509643	-3.85	2.16
THB05-106	角闪黑云斜长片麻岩	0.0071	0.281594±5	0.281300	-3.76	0.509721	-2.33	2.16
鲁山地区太华杂岩								
THL05-15	黑云角闪斜长片麻岩	0.0043	0.281154±10	0.280927	-3.19	0.509066	0.21	2.77
THL05-21	黑云斜长片麻岩	0.0027	0.281229±12	0.281088	1.84	0.509031	-1.24	2.73
THL05-9	黑云斜长片麻岩	0.0008	0.281106±8	0.281067	1.09	0.508994	-1.98	2.73
THL05-2	黑云角闪斜长片麻岩	0.0138	0.281885±18	0.281155	5.18	0.509075	0.63	2.77
熊耳地区太华杂岩								
THX05-41	角闪黑云斜长片麻岩	0.0052	0.281173±25	0.280969	-17.57	0.509724	-4.57	2.07
THX05-42	角闪黑云斜长片麻岩	0.0127	0.281758±15	0.281258	-7.32	0.509865	-1.81	2.07
THX05-45	钾质花岗岩片麻岩	0.0051	0.281179±16	0.280966	-14.93	0.509652	-2.92	2.19
THX05-49	黑云斜长片麻岩	0.0020	0.280871±13	0.280780	-18.57	0.509465	-3.24	2.32
THX05-53	黑云斜长片麻岩	0.0036	0.281214±27	0.281055	-8.80	0.509382	-4.89	2.32

注: THQ05-77 样品的原岩结晶年龄以及全岩微量元素含量和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值等数据均为作者未发表资料, 其他样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值以及年龄 t 引自 Huang et al. (2010, 2012, 2013); $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值根据全岩 Lu 和 Hf 含量(Huang et al., 2010, 2012, 2013)与实测 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值计算。

第一阶段(2.85~2.72 Ga)片麻岩样品具有变化的全岩 Hf、Nd 同位素组成, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-3.19~+5.18)的变化范围明显高于 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-1.98~+0.63)。除了样品 THL05-15 具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-3.19; 表 1)外, 其他样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值(表 1)。第二阶段(2.57~2.48 Ga)片麻岩除了登封的两个样品(DF05-8, DF05-9)具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值外, 其他样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值(分别为+1.71~+3.82 和+0.23~+2.85; 表 1)。第三阶段(2.34~2.30 Ga)的片麻岩本文研究仅分析了两个样品的 Hf 同位素, 两个样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为负值, 但它们的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相近(-4.89~ -3.24; 表 1)而 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化很大(-18.57~-8.80; 表 1)。第四阶段(2.20~2.07 Ga)片麻岩也具有较低的 Hf、Nd 同位素组成, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均表现为负值, 其中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也具有很大的变化范围(-17.57~-3.76; 表 1)。

4 讨论

4.1 Hf-Nd 同位素解耦现象及其机制

Lu-Hf 和 Sm-Nd 同位素体系行为类似, 因此 Hf

同位素和 Nd 同位素在一些岩石中存在强烈的正相关性($\varepsilon_{\text{Hf}}=1.55\varepsilon_{\text{Nd}}+1.21$; Vervoort et al., 2011)。由于 ^{176}Lu 的半衰期(36 Ga)差不多是 ^{147}Sm 半衰期(108 Ga)的三分之一, 所以在相同的时间内 Hf 同位素比值的的变化大于 Nd 同位素比值的的变化, 将更有益于岩浆作用过程的表征。另一方面, 由于 Sm 和 Nd 为相邻的稀土元素, 具有非常相似的地球化学性质, 而 Lu、Hf 的地球化学性质存在差异(Lu 为重稀土元素, Hf 不是稀土元素), 这就有可能使得 ε_{Hf} 和 ε_{Nd} 之间缺少良好的线性关系, 即发生 Hf-Nd 同位素解耦。

地质作用过程中, 石榴子石效应(Patchett et al., 1981, 2004; Schmitz et al., 2004)和锆石效应(Patchett et al., 1984, 2004; Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Vervoort et al., 2000)是造成体系 Hf-Nd 同位素解耦的重要原因。由于稀土元素在石榴子石中的相容性随着元素序数增大而增大, 因此重稀土元素 Lu 在石榴子石中的分配系数远大于轻稀土元素 Sm 和 Nd, 也明显高于高场强元素 Hf; 在部分熔融过程中, 如果源区残留石榴子石, 所形成熔体将具有较低的 Lu/Hf 和 Sm/Nd 比值, 经时间积累后的 ε_{Hf} 和 ε_{Nd} 值

均将朝负值方向演化, 但 ϵ_{Hf} 的变化更明显, 整体将位于 Hf-Nd 地球演化线的下方。因此, 石榴子石常常被作为造成 Hf-Nd 解耦的主要矿物相, 即石榴子石效应(Patchett et al., 1981, 2004; Schmitz et al., 2004)。另外, Hf^{4+} 与 Zr^{4+} 具相似的离子半径, 常发生类质同像置换使得锆石富集 Hf 并具有很低的 Lu/Hf 比值和放射成因 Hf; 地壳物质再循环过程中的残留老锆石将导致体系的放射成因 Hf 偏低, 即具有较低的 ϵ_{Hf} 值; 但锆石对体系的 ϵ_{Nd} 值并没有明显影响。因此, 再循环的残留老锆石也将造成体系的 Hf-Nd 解耦, 即锆石效应(Patchett et al., 1984, 2004; Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Vervoort et al., 2000)。存在锆石效应时, 岩石样品也将处于 Hf-Nd 地球演化线下方, 即具有偏低的 ϵ_{Hf} 值, 但其趋势线主要沿 ϵ_{Hf} 值降低方向变化, 明显不同于石榴子石效应所产生的同时沿 ϵ_{Hf} 和 ϵ_{Nd} 值降低方向变化的趋势(图 3)。

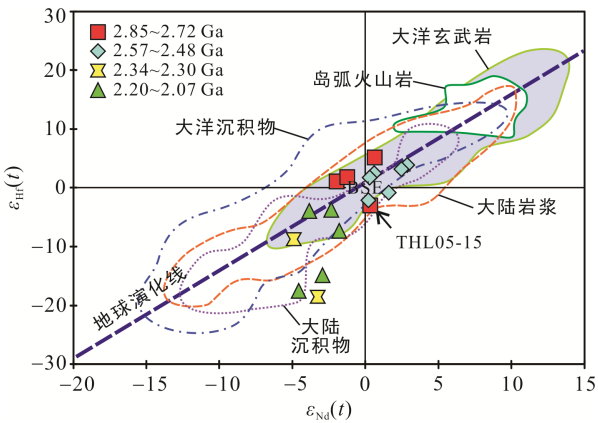


图 3 中部造山带早前寒武纪片麻岩的全岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 协变图(地球演化线及各组成范围参照 Vervoort et al., 2011)

Fig.3 Whole rock $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for the Early Precambrian metamorphic complexes in the southern segment of TNCO

源区残留石榴子石或地壳物质再循环过程都是造成岩石样品出现偏低 ϵ_{Hf} 值的 Hf-Nd 同位素解耦, 并不能解释偏高 ϵ_{Hf} 值的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 后者与地幔交代作用(Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Bizimis et al., 2003; Yu et al., 2009)、大洋沉积物再循环作用(Chauvel et al., 2008)或风化作用过程(Vervoort et al., 2011)密切相关。在风化作用过程中, 低 Lu/Hf 的锆石为抗风化矿物相, 而一些相对较易被风化的矿物如磷灰石等具有相对较高的 Lu/Hf 比值, 被分解后进入大洋, 因此大洋沉积物往往产生较高的放射成因 Hf, 具有较高的 ϵ_{Hf} 值。所以当大洋

沉积物循环进入地幔后, 使得岩石源区具有较高的 ϵ_{Hf} 值。此外, 由于 Hf 和 Nd 相对 Lu 和 Sm 更加不相容, 因此 Lu/Hf 和 Sm/Nd 比值在残余相中高于熔体中, 长期亏损的地幔将具有较高的 ϵ_{Hf} 和 ϵ_{Nd} 值, 受到亏损地幔组分交代的源区也将有较高的 ϵ_{Hf} 和 ϵ_{Nd} 值, 并且由于 Nd 在地幔流体中的活动性更强一些, ϵ_{Nd} 变化更为显著。

4.2 华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩 Hf-Nd 同位素解耦及其成因意义

根据锆石 U-Pb 年龄结果, 华北克拉通中部造山带早前寒武纪主要存在四期岩浆活动(~ 2.1 Ga, ~ 2.3 Ga, ~ 2.5 Ga, ~ 2.7 Ga; 图 2a), 其中以 ~ 2.5 Ga 的岩浆活动最为强烈, 而更具全球特征的 ~ 2.7 Ga 的岩浆活动记录相对较少。另外, 中部造山带不同地区的岩浆活动亦有所差别, 南段地区(太华群和登封群)显示出相对较强的古元古代早期(~ 2.3 Ga)岩浆活动, 其新太古代早期的岩浆活动也略早于中、北段地区(图 2a)。

中部造山带南段第一阶段(新太古代早期)的岩石出露在鲁山地区, 主要为 TTG 片麻岩和斜长角闪岩。该阶段早期(2.77Ga)样品的全岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值总体上较高(图 2c, d), 并且具有较高的 MgO/SiO₂ 比值和 Cr、Ni 含量, 而 K₂O/Na₂O 比值较低(图 2e, f, g, h), 表明其源区以初生物质为主, 可能由俯冲洋壳部分熔融形成(Huang et al., 2010); 该阶段晚期(2.73 Ga)样品具有相对较高的 SiO₂ 含量和相对较低的 MgO、Cr、Ni 含量和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 被认为是加厚大陆下地壳部分熔融成因(Huang et al., 2010)。除了样品 THL05-15 外, 该阶段样品的 Hf-Nd 同位素高于地球演化线(图 3), 存在一定程度的 Hf-Nd 同位素解耦现象。发生 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏高的 Hf-Nd 同位素解耦不是石榴子石效应或锆石效应的结果, 而很可能反映了其源区有亏损地幔组分的参与, 或者是源区受到了再循环大洋沉积物组分的影响。在板块俯冲、碰撞造山的作用过程中, 大洋沉积物随着板块俯冲再循环至地幔, 地幔源区部分熔融产物作为新生地壳物质在碰撞造山作用过程中保留下来, 之后与先存古老地壳物质发生部分熔融而产生了 Hf-Nd 同位素解耦(Chauvel et al., 2008)。样品 THL05-15 明显地偏离地球演化线, 则很可能是局部存在锆石效应即古老地壳物质组分参与的体现, 与其较高的 Hf 同位素含量结果一致。以上分析表明, 该阶段 TTG 质片麻岩具有高 Sr/Y、(La/Yb)_N 比值和低重稀土含量等特征不是继承自源区, 而是岩浆形成于较大压力深

度的结果。

第二阶段(新太古代末期-古元古代初期; 2.57~2.48 Ga)的岩石主要有嵩山地区的登封群和华山-小秦岭地区的太华群, 岩石类型包括了花岗质片麻岩、英云闪长质片麻岩、变闪长岩、角闪岩和片岩等(Diwu et al., 2011; Huang et al., 2013)。该阶段片麻岩的大部分全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 少部分为负值(图 2b, c, d, 表 1), 表明其原岩主要由初生物质的部分熔融形成。该阶段有两个样品(DF05-4, THH05-97)位于地球演化线上, 但其他样品不同程度地偏离地球演化线(图 3), 指示其全岩 Hf-Nd 同位素解耦现象, 这种 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏低的 Hf-Nd 同位素解耦可能是石榴子石效应或锆石效应的结果。但发生解耦的样品与未发生解耦的样品相比, 其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值并没有明显偏低, 部分样品甚至高于未发生解耦的样品, 表明锆石效应是造成部分样品发生 Hf-Nd 同位素解耦的主因。因此, 这些 TTG 质片麻岩的原岩具有高 Sr/Y、(La/Yb)_N 比值和低重稀土含量等特征也不是继承自源区, 而是岩浆形成于较大压力深度的结果; 由于该阶段的 TTG 质片麻岩均具有相对低 MgO、Cr 和 Ni 的特征, 应来源于加厚下地壳的部分熔融作用。

第三阶段(古元古代早期; 2.34~2.30 Ga)的岩石主要有熊耳山、华山-小秦岭地区的太华群和嵩山地区的登封群, 以英云闪长质片麻岩为主(第五春荣等, 2007; Huang et al., 2012, 2013)。该阶段的全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均变化较大(图 2b, d), 显示出其原岩形成过程中存在古老地壳物质的再循环和初生物质组成的加入(Huang et al., 2012, 2013)。但分析全岩 Hf 同位素的两个样品具有明显较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 与地球演化线和 BSE 比较, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都明显低, 以 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值最为显著, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化不大(图 2c, 3), 因此其 Hf-Nd 同位素解耦也不是其原岩源区存在石榴子石效应的结果, 而主要反映了源区存在明显的锆石效应; 结合该阶段的 TTG 质片麻岩均具有低 MgO、Cr 和 Ni 的特征(图 2e, f, g; 第五春荣等, 2007; Huang et al., 2012, 2013), 表明研究区在古元古代早期确实存在碰撞造山作用, 形成了以古老地壳物质组成为主的加厚下地壳。

第四阶段(古元古代中期; 2.20~2.07 Ga)的岩石主要有出露在华山-小秦岭和熊耳山的太华群, 岩石类型主要有英云闪长质片麻岩、富钾花岗质片麻岩和石英岩等。华山-小秦岭灞源地区的英云闪长质片麻岩具有低 SiO₂、高 MgO、Cr 和 Ni 的特征(Huang

et al., 2013), 但全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为负值(图 2b, c), 表明其原岩主要为古老地壳物质的再造, 但存在少量地幔物质的加入。熊耳山干树沟富钾花岗质片麻岩的全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为负值, 表明其原岩以古老的地壳物质再循环为主。该阶段岩石也具有明显的 Hf-Nd 同位素解耦, 所有样品均具有明显偏低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值而位于地球演化线的下方(图 3); 部分样品远离了地球演化线, 但与其他样品具有相类似的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 表明其 Hf-Nd 同位素解耦主要归因于其原岩源区存在明显的锆石效应, 与锆石年代学研究过程中发现大量继承锆石(Huang et al., 2012, 2013)的现象一致。另外, 该阶段出现钾质岩浆活动(Huang et al., 2012)或低 SiO₂、高 MgO、Cr 和 Ni 的 TTG 质岩浆活动(Huang et al., 2013), 其 Hf-Nd 同位素解耦特征表明这些岩浆活动也以古老地壳物质再循环作用为主。

总体上, 华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪片麻岩的全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 总体上表现出一定的正相关性, 但不同阶段的样品不同程度地存在 Hf-Nd 同位素解耦现象(图 3)。在新太古代早期具有 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值偏高的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 这与亏损地幔的交代作用有关。在新太古代末期-古元古代的三阶段岩浆活动中均具有 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值偏低的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 主要由锆石效应造成, 但不同阶段的锆石效应强度不同。新太古代末期-古元古代初期(第二阶段)的样品不存在 Hf-Nd 同位素解耦或者 Hf-Nd 同位素解耦现象较弱, 反映其源区仍主要以新生地壳物质为主, 少部分为老地壳物质组分的再循环。古元古代早中期(第三、第四阶段)样品的 Hf-Nd 同位素解耦现象较强, 具有较为明显的锆石效应, 反映其源区以再循环的古老地壳物质组分为主。

华北克拉通中部造山带南段地区在早前寒武纪期间(新太古代早期-古元古代早期)经历了板块俯冲、碰撞造山作用(程素华和汪洋, 2011; Huang et al., 2013); 由太华群和登封群变质杂岩的全岩 Hf-Nd 同位素变化表明, 新太古代早期-古元古代初期为该地区主要的陆壳生长阶段, 而古元古代早期主要为地壳再循环阶段。

5 结 论

华北克拉通中部造山带南段地区与中、北段地区相比, 其新太古代早期的岩浆活动略早, 并具有

相对较强烈的古元古代早期(~2.3 Ga)岩浆活动。根据太华群与登封群片麻岩的全岩 Hf-Nd 同位素组成特征进一步获得如下认识:

(1) 新太古代-古元古代期间四阶段岩浆活动都具有 Hf-Nd 同位素解耦现象。新太古代早期的岩浆活动具有 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏高的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 其源区形成与交代地幔部分熔融过程相关。新太古代末期-古元古代的三阶段岩浆活动均具有 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏低的 Hf-Nd 同位素解耦现象, 主要由锆石效应造成。

(2) 华北克拉通中部造山带南段地区各阶段 TTG 质岩浆活动均形成于较大压力深度。

(3) 新太古代早期-古元古代初期为华北克拉通中部造山带南段地区主要的陆壳生长阶段, 而古元古代早期主要为地壳再循环阶段。

参考文献(References):

程素华, 汪洋. 2011. TTG岩系Nb-Ta-La分馏特征的地球化学模拟: 对太古宙板块俯冲与大陆地壳生长机制的约束. 大地构造与成矿学, 35(1): 95-104.

第五春荣, 孙勇, 林慈鉴, 柳小明, 王洪亮. 2007. 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. 岩石学报, 23(2): 253-262.

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.

耿元生, 刘敦一, 宋彪. 1997. 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, 71(4): 316-327.

关保德. 1996. 前寒武纪地层层序 // 河南华北地台南缘前寒武纪-早寒武世地质和成矿. 武汉: 中国地质大学出版社: 1-11.

劳子强. 1989a. 太古界 // 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社: 12-32.

劳子强. 1989b. 登封群剖面特征及其划分. 河南地质, 7(3): 20-26.

李江海, 钱祥麟, 翟明国. 1997. 华北北部麻粒岩相带的构造区划与早期构造演化. 地质科学, 32(3): 254-266.

陆松年, 杨春亮, 蒋明媚, 李怀坤, 李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社: 1-156.

齐进英. 1992. 东秦岭太华群变质岩系及其形成条件. 地质科学, 27(增刊): 94-107.

沈福农. 1994. 河南鲁山太华群不整合的发现和地层层序厘定. 中国区域地质, 13(2): 135-140.

沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分

和演化. 地球学报, 16(2): 113-120.

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: 165-170.

涂绍雄. 1996. 河南鲁山太华变质杂岩原岩建造及时代二分的新认识. 华南地质与矿产, (4): 22-31.

万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化-地球化学和锆石SHRIMP U-Pb年代学制约. 地质学报, 83(7): 982-999.

王泽九, 沈其韩, 万渝生. 2004. 河南登封石牌河“变闪长岩体”的锆石SHRIMP年代学研究. 地球化学, 25(3): 295-298.

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: 211.

翟明国. 2006. 新太古代全球克拉通事件与太古宙-元古宙分界的地质涵义. 大地构造与成矿学, 30(4): 419-421.

翟明国. 2008. 华北克拉通破坏前的状态——对讨论华北克拉通破坏问题的一个建议. 大地构造与成矿学, 32(4): 516-520.

周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑锋. 2009a. 河南嵩山地区新太古代TTG质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331-347.

周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎. 2009b. 河南嵩山地区新太古代斜长角闪岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 25(11): 3043-3056.

Bizimis M, Sen G and Salters V J M. 2003. Hf-Nd isotope decoupling in the oceanic lithosphere: Constraints from spinel peridotites from Oahu, Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, 213: 43-58.

Chauvel C, Lewin E, Carpentier M, Arnst N T and Marini J C. 2008. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array. *Nature Geoscience*, 1(1): 64-67.

Diwu C R, Sun Y, Guo A L, Wang H L and Liu X M. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149-170.

Diwu C R, Sun Y, Lin C L and Wang H L. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 55: 2557-2571.

Guan H, Sun M, Wilde S A, Zhou X H and Zhai M G. 2002.

- SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implication for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 113(1–2): 1–18.
- Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, Yang Q J and Zhong J W. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1–2): 43–56.
- Huang X L, Wilde S A and Zhong J W. 2013. Episodic crustal growth in the southern segment of the Trans-North China Orogen across the Archean-Proterozoic boundary. *Precambrian Research*, 233: 337–357.
- Huang X L, Wilde S A, Yang Q J and Zhong J W. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. *Lithos*, 134–135: 236–252.
- Kusky T M. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20: 26–35.
- Kusky T M and Li J. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397.
- Kusky T M and Santosh M. 2009. The Columbia Connection in North China. *Geological Society, London, Special Publication*, 323: 49–71.
- Li X P, Yang Z Y, Zhao G C, Grapes R and Guo J H. 2011. Geochronology of khondalite-series rocks of the Jining Complex: Confirmation of depositional age and tectonometamorphic evolution of the North China Craton. *International Geology Review*, 53(10): 1194–1211.
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S and Shen Q H. 1992. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese Part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342.
- Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, Wang S Y, Valley J W, Kita N, Dong C Y, Xie H Q, Yang C X, Zhang Y X and Gao L Z. 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late-Mesoarchean-Early Neoproterozoic. *Chemistry and Geology*, 261(1–2): 339–342.
- Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, Zhang J and Li Q G. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutan complexes. *Precambrian Research*, 130: 229–249.
- Patchett P J, Kouvo O, Hefge C H and Tatsumoto M. 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotope. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3): 279–297.
- Patchett P J, Vervoort J D, Söderlund U and Salters V J M. 2004. Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systematics in chondrites and their constraints on the Lu-Hf properties of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 29–41.
- Patchett P J, White W M, Feldmann H, Kielinczuk S and Hofmann A W. 1984. Hafnium/rare earth element fractionation in the sedimentary system and crustal recycling into the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 69: 265–378.
- Schmitz M D, Vervoort J D, Bowring S A and Patchett P J. 2004. Decoupling of the Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems during the evolution of granulitic lower crust beneath southern Africa. *Geology*, 32(5): 405–408.
- Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3/4): 533–556.
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarède F, Blichert-Toft J, Rudnick R and Downes H. 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 181: 115–129.
- Vervoort J D, Plank T and Prytulak J. 2011. The Hf-Nd isotopic composition of marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 5903–5926.
- Wan Y S, Wilde S A, Liu D Y, Yang C X, Song B and Yin X Y. 2006. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9: 189–197.
- Wang F, Li X P, Chu H and Zhao G C. 2011. Petrology and metamorphism of khondalites from Jining Complex in the North China Craton. *International Geology Review*, 53(2): 212–229.
- Wu F Y, Zhang Y B, Yang Y H, Xie L W and Yang Y H. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3–4): 339–362.
- Xia X P, Sun M, Zhao G C and Luo Y. 2006b. LA-ICP-MS

- U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance. *Precambrian Research*, 144(3-4): 199-212.
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, Wu F Y, Xu P and Zhang J S. 2008. Paleoproterozoic crustal growth events in the Western Block of the North China Craton: Evidence from detrital zircon Hf and whole rock Sr-Nd isotopes of the khondalites in the Jining Complex. *American Journal of Science*, 308(3): 304-327.
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, Wu F Y, Xu P, Zhang J H and Luo Y. 2006a. 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 and Planetary Science Letters*, 241(3-4): 581-593.
- Yin C Q, Zhao G C, Guo J H, Sun M, Xia X P, Zhou X W and Liu C H. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons of the Helanshan Complex: Constraints on the evolution of the Khondalites Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*, 122: 25-38.
- Yin C Q, Zhao G C, Sun M, Xia X P, Wei C J, Zhou X W and Leung W H. 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constraints on the evolution of the Khondalites Belt in the Western Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 174(1-2): 78-97.
- Yu S Y, Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Ge W C, Zhang H H and Qin X F. 2009. Hf-Nd isotopic decoupling in continental mantle lithosphere beneath Northeast China: Effects of pervasive mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(6): 554-570.
- Zhai M G and Liu W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 122(1-4): 183-199.
- Zhai M G, Li T S, Peng P and Hu B, Liu F and Zhang Y B. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China craton. *Geological Society, London, Special Publications*, 338(1): 235-262.
- Zhang G W, Bai Y B, Sun Y, Guo A L, Zhou D W and Li T H. 1985. Composition and evolution of the Archaean crust in Central Henan, China. *Precambrian Research*, 27: 7-35.
- Zhang J, Zhang H F and Lu X X. 2013. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotope constraints on Precambrian evolution of continental crust in the Songshan area, the south-central North China Craton. *Precambrian Research*, 226: 1-20.
- Zhang Z Q and Li S M. 1988. Sm-Nd, Rb-Sr age and its geological significance of Archean Taihua Group in Xiongershan, western Henan Province // Chen Y Q. Contributions of Early Precambrian Geology in North China Craton. Beijing: Geological Publishing House: 123-132.
- Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54.
- Zhao G C and Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207-1240.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H and Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A and Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191-226.
- Zhao G C, Wilde S A, Sun M, Li S Z, Li X P and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3-4): 213-226.
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geological Magazine*, 138(1): 89-91.
- Zhou Y Y, Zhao T P, Wang C Y and Hu G H. 2011. Geochronology and geochemistry of 2.5 to 2.4 Ga granitic plutons from the southern margin of the North China Craton: Implications for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Gondwana Research*, 20(1): 171-183.

Hf-Nd Isotopes of the Early Precambrian Metamorphic Complexes in the Southern Segment of the Trans-North China Orogen: Implications for Crustal Evolution

WANG Xue^{1,2}, HUANG Xiaolong¹, MA Jinlong¹, ZHONG Junwei³ and YANG Qijun⁴

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 4. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: There are at least four episodes of magmatism in the southern segment of the Trans-North China Orogen (TNCO) in the Late Archean and early Paleoproterozoic (2.85–2.72 Ga, 2.57–2.48 Ga, 2.34–2.30 Ga, 2.20–2.07 Ga) based on the zircon U-Pb geochronology of the Taihua and Dengfeng Complexes. The early Neoproterozoic magmatism in the Southern Segment of the TNCO predates that in the Central and Northern Segments of the TNCO. Additionally, the early Paleoproterozoic magmatism in the Southern Segment (2.34–2.30 Ga) is much stronger than that in the Central and North Segments. TTG rocks of the first episode (2.85–2.72 Ga) have overall positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values, and show weak Hf-Nd isotope decoupling above the Terrestrial Hf-Nd Array, indicative of a genetic relationship with metasomatism mantle. TTG rocks at the end of Neoproterozoic and the beginning of Paleoproterozoic (2.57–2.48 Ga) have mostly positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values. Some samples show weak Hf-Nd isotope decoupling under the Terrestrial Hf-Nd Array, which is attributed to zircon effect. So the protolith of the gneisses is proposed to be the result of partial melting of dominantly juvenile crust with minor ancient continental crust. TTG rocks or the potassium-rich igneous in the early and middle Paleoproterozoic (2.34–2.30 Ga and 2.20–2.07 Ga, respectively) have all negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values, and show notable Hf-Nd isotope decoupling under the Terrestrial Hf-Nd Array due to zircon effect. The last two episodes of magmatism were derived from partial melting of dominantly ancient continental crustal materials. Therefore, the Hf-Nd isotope decoupling of the gneisses in the Taihua and Dengfeng Complexes might have been inherited from their source related to the mantle metamorphism or zircon effect rather than produced by garnet effect. This suggests that the geochemical characteristics, such as high Sr/Y and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ratios and low concentrations of heavy REE in the TTG rocks, could not have been inherited from their sources, but are attributed to magmatism under high-pressure condition. In conclusion, the earlier two episodes of magmatism (early Neoproterozoic and the end of Neoproterozoic to beginning of Paleoproterozoic, respectively) recorded two main episodic crustal growth, while the later two episodes of magmatism (early and middle early Paleoproterozoic, respectively) were attributed to crustal reworking.

Keywords: TTG; Hf-Nd isotope decoupling; Taihua complex; Dengfeng complex; the southern segment of the Trans-North China Orogen; North China craton