

doi:10.3799/dqkx.2011.050

华北克拉通东部及苏鲁造山带的地壳生长:来自现代河流碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据

耿显雷^{1,2}, 高山^{1,2,3*}, 陈晨¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 来自年轻沉积物或现代河流的碎屑锆石是研究大陆地壳生长演化的理想载体。为揭示华北克拉通东部和苏鲁造山带大陆地壳的生长演化, 采集了中国东部大清河、潮白河、辽河、大沽河和胶莱河的5个地方的河沙样品, 并对分选出来的碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS 和 MC-LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素微区原位分析, 获得了 396 个锆石 U-Pb 谐和年龄及其对应的 Hf 同位素组成。2.4~2.5 Ga 和 1.8~1.9 Ga 两个年龄特征峰指示大清河、潮白河和辽河的碎屑锆石来源于华北克拉通东部。辽河一部分 100~500 Ma 的锆石具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的 Hf 模式年龄, 显示出显生宙的地壳生长。苏鲁造山带大沽河和胶莱河的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布相对比较复杂, 但锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征表明其为华北克拉通和扬子克拉通的混合来源。来自大清河、潮白河和辽河的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据, 表明华北克拉通东部地壳生长的主要时期为 2.4~3.0 Ga, 并在 2.6~2.7 Ga 时处于生长的最高峰, 次一级的生长期为 1.3~2.3 Ga, 而在其他阶段几乎没有地壳的生长或者不明显。华北克拉通东部现存大陆地壳的 80% 来源于太古代和古元古代的生长, 而自古元古代开始大陆地壳的演化就以古老地壳的重熔再改造为主。此外, 大沽河碎屑锆石的 Hf 同位素组成揭示出苏鲁造山带在古生代(300~500 Ma)存在明显的地壳生长。

关键词: 华北克拉通; 苏鲁; 碎屑锆石; 地壳生长; U-Pb 定年; Hf 同位素; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2011)03-0483-17

收稿日期: 2010-12-28

Crustal Growth of the Eastern North China Craton and Sulu Orogen as Revealed by U-Pb Dating and Hf Isotopes of Detrital Zircons from Modern Rivers

GENG Xian-lei^{1,2}, GAO Shan^{1,2,3*}, CHEN Chen¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

Abstract: Detrital zircon from clastic sediment or sands of modern rivers is an ideal sample for studying the growth and evolution of the continental crust. In order to reveal the crustal growth of eastern North China craton and Sulu orogen, 396 concordant detrital zircons in three sand samples from the Daqing River, Chaobai River, Liao River, Dagu River and Jiaolai River in eastern North China were measured for U-Pb age and Hf isotopic compositions by excimer laser-ablation ICP-MS and MC-ICP-MS, respectively. The Daqing River, Chaobai River and Liao River are characterized by two age peaks of 2.4–2.5 Ga and 1.8–1.9 Ga, which indicate contributions from the eastern North China craton. Some 100–500 Ma zircons from the Liao River with positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and young Hf model ages, suggesting Phanerozoic crustal growth. In contrast, U-Pb ages of the Dagu River and Jiaolai River, which run through the Sulu orogen, are more complicated and characterized by age groups of 2.4–2.5 Ga, 1.8–1.9 Ga and 700–800 Ma, implying a mixed provenance of eastern North China craton and Yangtze craton. The Lu-Hf isotope compositions of the Daqing River, Chaobai River and Liao River demonstrate the dominant growth at 2.4–

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40973020, 0714010, 0821061); 教育部高等学校学科创新引智计划(No. B07039); 大陆动力学国家重点实验室和地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项基金; 霍英东教育基金(No. 121017)。

作者简介: 耿显雷(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石圈地球化学的研究。* 通讯作者: 高山, sgao@263.net

3.0 Ga, with a peak at 2.6–2.7 Ga and minor growth during 1.3–2.3 Ga. However, there is insignificant crustal growth during other periods. In addition, 80% of the existing crust in eastern North China craton was produced before Paleoproterozoic and reworking of preexisting continental crust became dominant since then. Meanwhile, a Paleozoic (300–500 Ma) crustal growth characterizes zircon Hf isotopes of the Dagu River of the Sulu orogen.

Key words: North China craton; Sulu orogen; detrital zircon; crustal growth; U-Pb dating; Hf isotope; geochemistry.

细粒沉积物和沉积岩(包括黄土、冰碛岩、泥岩、泥砂岩等)由于源区范围广阔,因此可以成为整个大陆上地壳的代表样品,是研究大陆上地壳化学组成、形成和演化的理想的天然样品(Goldschmidt, 1933; Taylor *et al.*, 1983; Taylor and McLennan, 1985; Taylor and McLennan, 1995; Jahn *et al.*, 2001; McLennan, 2001; Rudnick and Gao, 2003; Hu and Gao, 2008; Liu *et al.*, 2008; Hawkesworth *et al.*, 2010). 锆石作为副矿物广泛赋存于各种火成岩、沉积岩和变质岩中,并且具有非常稳固的物理化学属性. 即使后期经历了强烈的变质作用和扰动,它也能幸存下来并完好保存着原始的地球化学信息. 碎屑锆石作为沉积岩和沉积物中最稳定的副矿物相,能够给我们提供非常有用的地质信息. 另外,锆石往往具有不同的生长环带,这些环带的微量元素组成、U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素组成和氧同位素组成将记录锆石结晶时介质的状态,可揭示大陆地壳的形成和演化(Griffin *et al.*, 2004; Condie *et al.*, 2005; Iizuka *et al.*, 2005; Veevers *et al.*, 2005; Coogan and Hinton, 2006; Hawkesworth and Kemp, 2006a, 2006b; Kemp *et al.*, 2006; Weislogel *et al.*, 2006; Campbell and Allen, 2008; Condie *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Condie and Aster, 2010; Hawkesworth *et al.*, 2010). 锆石地质温度计在研究大陆地壳的形成演化过程中也发挥了重要作用(Watson and Harrison, 2005; Watson *et al.*, 2006; Ferry and Watson, 2007). 由于古老大陆地壳自形成后经历了长期的剥蚀风化作用,因此一些古老的岩石在现今的地壳中没有得以保存或者很少出露,使得这些地壳物质的信息很难获取. 然而这些在岩石中没有保存下来的地壳物质信息,却能被来自年轻沉积物或现代河流沉积物的碎屑锆石很好地记录下来. 综合上述各种原因,碎屑锆石成为了研究大陆地壳生长最为有效的工具(Griffin *et al.*, 2004; Condie *et al.*, 2005; Iizuka *et al.*, 2005; Cawood *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2008; Pietranik *et al.*, 2008).

目前为止,有关利用碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素来研究大陆地壳生长演化的例子已经有

很多了. Condie *et al.* (2005) 对全球一些典型的沉积层和现代河流碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的研究,发现在 2.5 Ga 和 1.65~1.4 Ga 期间大陆地壳有显著的生长. 密西西比河碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素表明 1.6~2.0 Ga 是年轻地壳物质形成的主要时期(Iizuka *et al.*, 2005). 扬子克拉通新元古代碎屑沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素揭示扬子克拉通在前寒武时有两个主要的生长阶段,即 3.2~3.8 Ga 和 720~910 Ma(Liu *et al.*, 2008). Yang *et al.* (2009) 对黄河、永定河和滦河碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的研究表明 2.7~2.8 Ga 是华北克拉通地壳生长的高峰期.

根据前人的计算,现存大陆地壳的 >50% 形成于太古代,而在前寒武结束时大陆地壳 >90% 的物质已经形成(Taylor and McLennan, 1995; Hawkesworth and Kemp, 2006a). 另外,一些显生宙造山带的资料表明在显生宙时也有显著的地壳生长(Samson *et al.*, 1989; DePaolo *et al.*, 1991; Samson *et al.*, 1995; Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Wu *et al.*, 2000; Meng *et al.*, 2010). 全球年轻地壳的锆石年龄资料显示在 2.7 Ga、1.9 Ga 和 1.2 Ga 附近有非常显著的年龄峰,这表明在地幔柱活动期间大陆地壳阶段式的快速生长(Condie, 1998, 2000). 最新的全球碎屑锆石 U-Pb 年龄资料显示的年龄峰为 2.75~2.6 Ga、1.95~1.6 Ga、1250~950 Ma、650~400 Ma 和 350~225 Ma, 分别与凯诺兰、哥伦比亚、罗迪尼亚、冈瓦纳和盘古超级联合大陆的汇聚时间相对应(Campbell and Allen, 2008). 然而,这些锆石年龄峰不一定能够反映大陆地壳的生长,因为很多岩浆锆石可以在地壳的重熔再改造过程中形成. 花岗岩类的 Nd 同位素组成表明在 2.7 Ga、2.55 Ga、2.12 Ga、1.9 Ga、1.7 Ga、1.65 Ga、800 Ma、570 Ma 和 450 Ma 时有大量的年轻地壳物质的加入(Condie *et al.*, 2009). 前寒武时期全球地壳生长的 4 个主要阶段分别为 4.4~4.5 Ga、3.8 Ga、3.4 Ga 和 2.7~2.8 Ga(Pietranik *et al.*, 2008). 前人的研究表明地壳的阶段式生长通常与超级大陆的形成有一定的关联(Condie, 1998, 2000).

作为全球典型的克拉通之一,华北克拉通与全球其他克拉通又存在十分不同的特征,即自中生代以来发生了强烈的活化作用(Gao *et al.*, 2009). 因此,研究华北克拉通的地壳生长和改造,对于揭示大陆地壳的形成演化具有非常重要的意义. 尽管 Yang *et al.* (2009)报道了黄河、滦河和永定河碎屑锆石的 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成,揭示出华北克拉通大陆地壳主要的生长阶段为 2.4~2.9 Ga,并且在 2.7~2.8 Ga 时达到最高峰. 然而,华北克拉通由东部块体、西部块体及中间的中部造山带组成(Zhao *et al.*, 1998, 2001). 东部块体和西部块体到古元古代晚期(~1.8 Ga)才并接在一起(Zhao *et al.*, 1999),所以在古元古代之前两个块体应该具有不同的演化历史. Wu *et al.* (2005)收集了前人报道的华北克拉通 3 个块体的全岩 Nd 同位素数据, Nd 模式年龄表明 3 个块体的地壳演化存在一些明显的差异. 然而,全岩分析的结果可能是多种地质过程的混合结果,其可靠性受到怀疑. 笔者对来自大沽河(胶东半岛)、胶莱河(胶东半岛)、大清河(山东西部)、潮白河(河北)和辽河(内蒙古、辽宁)的碎屑锆石进行了 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成分析. 这 5 条河流的汇聚盆地主要包括华北克拉通东部、大兴安岭造山带南部和胶东半岛的苏鲁造山带. 这些河流的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成将为揭示华北克拉通东部和苏鲁造山带的地壳生长和改造提供重要的理论依据.

1 地质背景及采样

大沽河位于胶东半岛内,起源于山东省招远市,自东北向西南流入胶州湾. 全长约 180 km,总的流域面积为 4.631 km². 大沽河的流经区域位于苏鲁造山带附近,其北部为华北克拉通的东部块体,而南部则为苏鲁超高压—高压变质带. 此河流所采集的河流沙样 DGH01 位置位于大沽河流入胶州湾的入口北面约 15 km 处的胶州镇(36°15′12.4″N, 120°4′53.1″E)(图 1).

胶莱河也起源于胶东半岛内,位于胶东半岛沂山脉与昆崙山脉之间. 胶莱河是一条南北分流的河流,分水岭位于平度市的姚家村,向南流入胶州湾,向北流入莱州湾. 洪水期时,当南胶莱河水流较大时流向北胶莱河,当北胶莱河水位高于南胶莱河的水位时则流向南胶莱河. 胶莱河的南部全长 30 km,流域面积 1 500 km²,而北部全长 100 km,流域面积

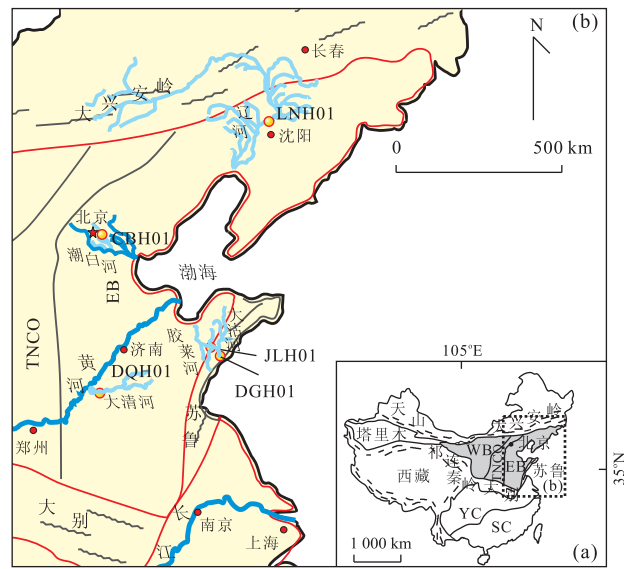


图 1 中国东部主要构造简图(a)及河流采样图(b)

Fig. 1 Simplified map of major tectonic units in China (a) and the drainage area of the Daqing River, Chaobai River, Liao River, Dagu River and Jiaolai River under this investigation and sample location (b)

EB. 华北克拉通东部块体, TNCO. 华北克拉通中部造山带; WB. 华北克拉通西部块体, YC. 扬子克拉通, SC. 华南造山带

3 978 km². 胶莱河大部分的流经区域位于华北克拉通东部块体内,但南部靠近或流经苏鲁超高压—高压变质带. 此河流所采集的河流沙样 JLH01 位置位于与大沽河交汇处前方的北王珠镇(36°55′28.6″N, 119°33′30.4″E)(图 1).

大清河作为大汶河的下流,起源于山东新泰市旋崙山北麓,自东向西流入东平湖,最后在东平县汇入黄河. 其全长为 208 km,总流域面积为 8 536 km². 大清河全部的流经区域都位于华北克拉通东部块体范围内. 此河流所采集的河流沙样 DQH01 位置位于东平湖的入口处即河流的最下游(35°54′0.7″N, 116°27′24.8″E)(图 1).

潮白河上游主要由潮河和白河组成,潮河起源于河北的丰宁县,白河则起源于河北的沽源县. 潮河与白河分别由北向南流入密云水库,出库后在河槽村汇合形成潮白河,并在靠近出海口处汇入永定河. 潮白河干流全长 90 km,流域面积 19 500 km²,其流经区域位于华北克拉通块体范围内. 所采集的河流沙样 CBH01 位置位于河北的香河县(39°46′34.3″N, 116°56′24.4″E)(图 1).

辽河主要由东辽河和西辽河两个水系组成,是中国东北南边最长的河流,全长 1 430 km,流域面积 229 000 km². 东辽河位于辽宁省北部和吉林省西南

部,发源于吉林东辽县小葱顶子山东南部;西辽河位于内蒙古东南部和辽宁北部,其支流主要有西拉木伦河、教来河、老哈河等,发源于内蒙古与河北交界的七老图山和大兴安岭造山带的南部.辽河上游流经大兴安岭造山带的南部,下游则流经华北克拉通东部块体.此河流所采集的河流沙样 LNH01 位置位于下游的辽宁铁岭市($42^{\circ}19'58.0''N, 123^{\circ}50'06.3''E$) (图 1).

由此可见,大清河和潮白河完全位于华北克拉通东部内,而辽河除上游经过中亚造山带外,其余部分均位于华北克拉通东部内.大沽河和胶莱河位于苏鲁超高压—高压带附近.

根据岩石学、构造学、变质学和地质年代学等各方面的综合证据,华北克拉通被划分为东部块体、西部块体和中部造山带 3 个部分(Zhao *et al.*, 1998, 1999, 2001).

华北克拉通东部块体结晶基底主要由早至晚太古代的高级至低级 TTG 片麻岩和 ~ 2.5 Ga 花岗质岩类组成,伴随有少量的早至晚太古代(3.8~3.0 Ga)花岗片麻岩(Zhao *et al.*, 1998, 2001),表壳岩石主要是超镁铁质到长英质的火山岩和沉积岩或沉积物(Zhao *et al.*, 1998, 2001; Wu *et al.*, 2005).华北克拉通东部 3.8 Ga 古老地壳残余体在河北东部和鞍山均有发现(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996),并被认为其代表了华北克拉通最初始的大陆地壳.

胶东半岛的苏鲁超高压—高压带一般被认为是秦岭—大别造山带在东部的延伸(Meng and Zhang, 2000; Oh and Kusky, 2007; Hacker *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010),形成于中生代扬子板块与华北板块的碰撞过程中.苏鲁超高压—高压带东西向横切胶东半岛,并主要分布在半岛的南部,主要由长英质的片麻岩组成,并伴随有大量的石榴石橄榄岩、大理岩等超镁铁质岩类和榴辉岩透镜体.苏鲁造山带以北是主要由太古宙和古元古代片麻岩组成的华北克拉通(Kusky and Santosh, 2009),而扬子克拉通位于其南部.

大兴安岭和七老图山在大地构造位置上均归属于中亚造山带(CAOB)东部,以大量出露晚古生代至中生代(280~120 Ma)的花岗岩和中酸性火山岩(Chen *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2003; Shi *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; 葛文春等, 2005; Liu *et al.*, 2005; 程瑞玉

等, 2006; Jian *et al.*, 2008; Miao *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009)作为其典型特征.这些花岗岩具有低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值、正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄(邵济安等, 1999; Chen *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000a; Wu *et al.*, 2002; Jahn *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2007),表明中亚造山带东部在显生宙具有一个明显的地壳生长过程,来自河流碎屑锆石原位 Hf 同位素的证据(Meng *et al.*, 2010)也证实了这一点.

2 分析方法

锆石经重砂分选、磁性分选等一系列过程从 >5 kg 的河沙样品中分离出来,并最终在双目显微镜下进行人工提纯分选.每个样品所挑选出的锆石颗粒为数千颗不等,笔者从中随机选取 >300 颗制成环氧树脂靶,并进行激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)微区原位分析.在分析前对锆石靶进行了表面抛光处理,并用 5% 的硝酸和纯酒精对其清洗,以降低普通铅的污染.根据阴极发光图像(CL),分析所选取的锆石颗粒均具有振荡环带,因为振荡环带基本上能指示锆石的岩浆或火成成因,而非变质成因.另外,在确定分析位置时通过反射光和透射光图像尽量避开包裹体和裂隙.

2.1 阴极发光

阴极发光图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成.仪器型号为 Quanta 400FEG 高分辨率场发射环境扫描电镜,并与 Oxford INCA350 能谱仪系统和 Gatan Mono CL3+CL 阴极发光系统联合.照相条件为 10 kv 的电压、6.7 nm 的照相直径和 8.4 mm 的工作距离.

2.2 U-Pb 定年

锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成.实验所采用的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a.激光剥蚀系统(LA)为德国 Lambda Physik AG 公司生产的 GeoLas 2005,该系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(波长 193 nm, 200 mJ 的最大能量和 20 Hz 的最大脉冲速率)与 MicroLas 公司的光学系统组成.氦气作为载气.

激光斑束大小和剥蚀频率分别为 $32 \mu m$ 和 10 Hz. Lu-Hf 同位素和微量元素的数据与 U-Pb 同位素的数据同时获得(Yuan *et al.*, 2004). U、Th 和

Pb的含量测定均以 ^{29}Si 作为内标,以NIST SRM 610作为外标.每个分析点具有30 s的空白背景和40 s的信号采集时间.由于采用了高纯度的Ar气和实验室内部开发的He气净化柱,使得 ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 的背景水平 <100 计数/s,因此 ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 的影响基本可以忽略不计,因而不需要再进行校正. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 同位素比值采用GLITTER 4.0(Macquarie University)程序计算,并采用国际标准锆石91500作为外标对仪器质量歧视和采样深度引起的元素和同位素分馏进行校正.年龄计算、谐和图及频谱图的绘制均采用ISOPLOT 3.0(Ludwig,2003).

在分析的过程中我们将标准物质GJ-01作为未知的样品进行测试,实验所给出该样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 602.2 ± 2.4 Ma,与ID-TIMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(598.5~602.7 Ma)(Jackson *et al.*,2004)一致.普通铅的校正参考文献Andersen(2002).由于分析所得的 ^{204}Pb 的含量在全Pb中的比例 $<0.3\%$,因此在大多数情况下普通铅的校正不明显.

2.3 Lu-Hf 同位素

Lu-Hf同位素的分析同样是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成.分析所采用的仪器为Nu Plasma HR MC-ICP-MS(Nu Instruments Ltd.,UK),并与GeoLas 2005 ArF准分子激光剥蚀系统联用.分析所采用的激光斑束和能量密度分别为 $44\ \mu\text{m}$ 和 $15\sim 20\ \text{J}/\text{cm}^2$,同样将He气作为载气.笔者采用了高纯度的Ar气(99.9995%)和高纯度的He气(99.9995%)净化柱,使 ^{208}Pb 和 ^{202}Hg 的背景水平分别降到 <100 和 400 计数/s(Yuan *et al.*,2008).

Yb和Lu元素的干扰校正对于锆石的Hf同位素原位分析尤为重要(Woodhead *et al.*,2004).笔者利用分析测试得到的 ^{175}Lu (对 ^{176}Hf 无干扰)强度和 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 的推荐值0.02669(De Bieve and Taylor,1993)来校正 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰.同样道理,采用对 ^{176}Hf 无干扰的 ^{172}Yb 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ 的推荐值0.5886(Chu *et al.*,2002)来校正 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰,从而最终计算 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值.与此同时,用分析点所得到的 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 平均值来计算 β_{Yb} 平均值(Iizuka and Hirata,2005),然后通过 ^{173}Yb 的信号强度和计算所得的 β_{Yb} 平均值来计算 ^{176}Yb 的信号强度.笔者采用四级杆多接受等离子体质谱与激光同时联机技术,同时测定锆石的U-Pb年龄、Hf同位素和微量元素的组成(Yuan *et al.*,2004).

初始的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值计算采用锆石生长时的球粒陨石均一库(CHUR)的值. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 定义为样品与球粒陨石均一库(CHUR)在岩浆结晶时 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的差异.计算中采用的 ^{176}Lu 衰变常数、球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 $1.865 \times 10^{-11}\ \text{a}^{-1}$ (Scherer *et al.*,2001)、0.282772和0.0332(Bichert-Toft and Albarède,1997).两阶段模式年龄是根据上地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0093$ (Vervoort and Patchett,1996)来计算的,并且假定锆石源区的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值与亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值一致.

3 结果

Vermeesch(2004)提出对于碎屑锆石的物源示踪研究,单个样品的锆石颗粒数要不少于117个,以便给出有统计意义的结果.对于每个样品,笔者测定了115~130个锆石颗粒,基本满足了上述要求.样品DQH01、CBH01、LNH01、DGH01和JLH01分别给出了42、95、82、110和67个谐和年龄(谐和度90%~110%).下面的讨论将仅限于这些谐和锆石的数据.当年龄值 ≥ 1.0 Ga时,选取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄作为锆石的结晶年龄;当年龄值 <1.0 Ga时,选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为锆石的结晶年龄.

3.1 U-Pb 年龄

如图2所示,样品CBH01和LNH01的谐和锆石具有相似的3个年龄组,即2.1~2.6 Ga(峰值为2.4~2.5 Ga)、1.6~2.0 Ga(峰值为1.8~1.9 Ga)和100~500 Ma.样品LNH01还有5个锆石颗粒的年龄分布在500~1300 Ma区间内,分别为511 Ma、631 Ma、859 Ma、1001 Ma和1297 Ma,而样品CBH01在这个年龄区间没有分布.另外,样品LNH01 100~500 Ma锆石颗粒数量占总数的45%,远多于样品CBH01(21%).样品CBH01和LNH01最老的年龄分别为2.5 Ga和2.6 Ga.

与样品CBH01和LNH01相比,样品DQH01只有一个年龄组,即2.3~2.7 Ga(峰值为2.4~2.5 Ga),而缺少1.6~2.0 Ga和100~500 Ma这两个年龄组(图2).除2.3~2.7 Ga年龄组之外,样品DQH01还有一个133 Ma的年龄.样品DQH01最老的年龄为2.7 Ga.

大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)的锆石年龄分布特征相似,与前面的3条河流相比也复杂了很多,其年龄组的数量和范围,特别是年龄峰,表现

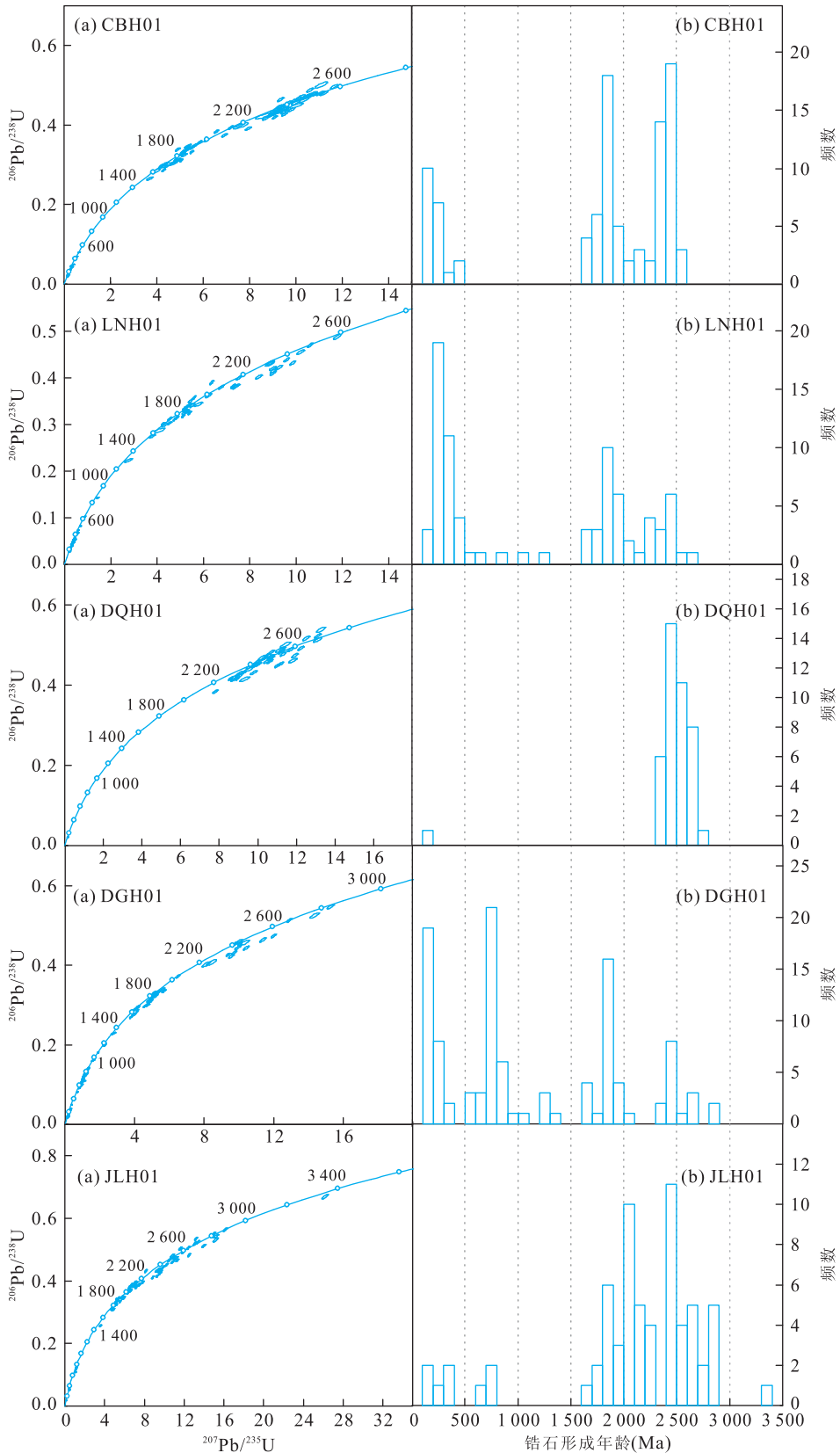


图 2 锆石 U-Pb 谐和图(a)和 U-Pb 年龄频谱图(b)

Fig. 2 U-Pb concordia plots of concordant detrital zircons (a) and corresponding relative probability plots of U-Pb ages for concordant detrital zircons (b)

出多而复杂的特征(图2). DGH01的年龄分布虽然比较复杂,但基本可以划分为4个主要年龄组:2.3~2.9 Ga(主峰为2.4~2.5 Ga,次峰为2.6~2.7 Ga和2.8~2.9 Ga)、1.6~2.1 Ga(主峰1.8~1.9 Ga,次峰1.6~1.7 Ga)、0.5~1.1 Ga(主峰为700~800 Ma)和100~400 Ma(主峰为100~200 Ma),另外还有一个由4个年龄组成的非常小的年龄组1.2~1.4 Ga. JLH01的年龄分布与DGH01相似,可以划分为4个年龄组:2.4~2.9 Ga(主峰为2.4~2.5 Ga,次峰为2.6~2.7 Ga和2.8~2.9 Ga)、1.6~2.3 Ga(主峰2.0~2.1 Ga,次峰1.8~1.9 Ga)、600~800 Ma(主峰为700~800 Ma)和100~400 Ma,此外还有一个3.4 Ga的古老年龄. 样品JLH01与DGH01相比,0.5~1.1 Ga和100~400 Ma两个年龄区间的锆石颗粒数少很多,相反位于老的年龄区间(即2.3~2.9 Ga和1.6~2.3 Ga)的锆石数量却占绝对的优势,并且具有一个3.4 Ga的古老年龄.

3.2 Lu-Hf 同位素

样品LNH01的82个谐和锆石同时进行了Lu-Hf同位素微区原位分析.如图3所示,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值对于不同的锆石U-Pb年龄组都有一个比较宽的分布范围,从负值到正值均有出现.2.1~2.6 Ga年龄组的锆石具有-10.5至2.6的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和3.1~2.5 Ga的地壳模式年龄(T_{DM2}),1.6~2.1 Ga年龄组的锆石具有-13.3至6.2的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和3.2~2.1 Ga的地壳模式年龄(T_{DM2}),而100~500 Ma年龄组的锆石具有-12.8至12.0的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和1.8~0.4 Ga的地壳模式年龄(T_{DM2}).

对样品CBH01的94个谐和锆石进行了Lu-Hf同位素微区原位分析.如图3所示,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值同样表现出比较宽的分布范围,正负值均有出现.但是与LNH01的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布却有些不同,主要表现在两个方面.其一,有相当数量的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值位于亏损地幔演化线的线上或上方,其接近于亏损地幔的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示年轻地壳物质的加入;其二,与LNH01不同,样品CBH01在区间100~500 Ma中的锆石其绝大部分的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都为负值,表明其古老地壳的重新改造熔融.具有接近或超过亏损地幔 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值锆石共有7个,其U-Pb年龄分别为2560 Ma、2551 Ma、2483 Ma、2464 Ma、2132 Ma、1825 Ma和275 Ma.与此同时,还有一颗2315 Ma的锆石颗粒位于3.5 Ga的地壳演化线上,表明源区>3.5 Ga的古老地壳的存在.

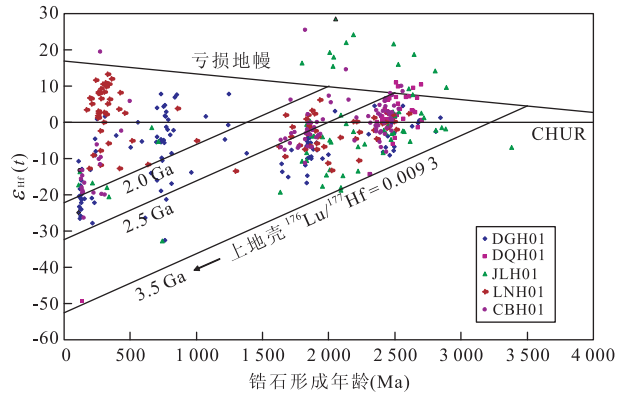


图3 谐和锆石的U-Pb年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

Fig. 3 U-Pb age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value plots of concordant detrital zircons

对样品DQH01共有42个谐和的锆石进行了Lu-Hf同位素微区原位分析.如图3所示,大部分的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在-6~10相对比较狭窄的区间.同时,绝大部分的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都为正值,还有相当数量的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值接近或超过了亏损地幔相对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值.另外还有两个2312 Ma和133 Ma的锆石位于3.5 Ga的地壳演化线上,同样指示了源区>3.5 Ga古老地壳的存在.

样品DGH01和JLH01分别共有110个和67个谐和的锆石进行了原位Lu-Hf同位素微区原位分析.如图3所示,这两个样品虽然具有相似的锆石U-Pb年龄分布(如前所述),但是相同年龄组的锆石却具有明显不同的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布特点.对于0.5~1.1 Ga和100~400 Ma这两个年轻年龄组,DGH01的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值虽然大部分都为负值,但也有相当数量的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值;而JLH01的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除个别锆石颗粒(即663 Ma)外其余都为负值.与此相反,对于2.3~2.9 Ga、1.6~2.3 Ga这两个老的年龄组,DGH01虽然有一些正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,但接近或超过亏损地幔演化线的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值数量却远少于JLH01.

4 讨论

如图4所示,大部分锆石的Th/U>0.30,代表其岩浆成因(Hanchar and Hoskin, 2003).具有典型变质成因Th/U比值特征(Th/U<0.10)的锆石非常少(10个).另外,几乎所有锆石的REE配分曲线也显示出岩浆锆石的典型特征(Hanchar and Hoskin, 2003),即富集HREE,亏损LREE,从LREE到HREE的球粒陨石归一化值呈逐步上升

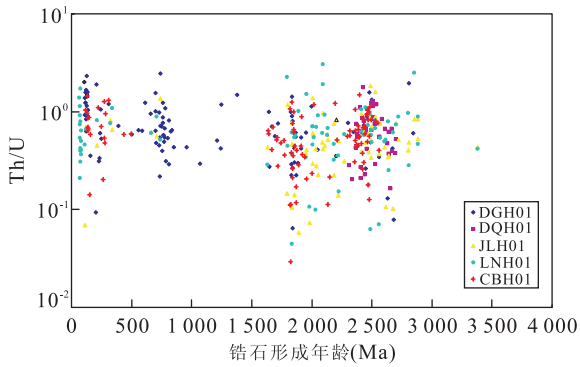


图 4 谐和锆石的 U-Pb 年龄—Th/U 分布

Fig. 4 Plots of Th/U ratios versus U-Pb ages of concordant detrital zircons

的趋势,并且具有 Ce 的正异常和 Eu 的负异常. 这些特征都与这些锆石具有振荡环带的特征相符合,共同表明锆石的岩浆成因.

4.1 物源示踪

本次研究所选取的 5 条河流的汇水盆地基本上都位于华北克拉通东部范围内,但也不是完全如此. 因为辽河(LNH01)的上游实际上是属于大兴安岭造山带的,而大兴安岭造山带在区域构造位置上归属于中亚造山带(CAOB)的东部而非华北克拉通,因此在物质来源上不能不考虑来自中亚造山带(CAOB)东部的贡献. 另外,胶东半岛的大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)流经的区域位于华北克拉通东部与苏鲁超高压—高压带接壤的位置,而苏鲁超高压—高压带的南部是扬子克拉通. 因此,对于这两条河流的物源分析必须考虑苏鲁超高压—高压带和扬子克拉通来源物质的加入.

潮白河(CBH01)和辽河(LNH01)相似的锆石年龄分布初步表明它们具有基本一致的物质来源. 它们都具有 2.4~2.5 Ga 和 1.8~1.9 Ga 两个特征年龄峰,而这两个年龄正好是华北克拉通的特征年龄(Gao *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009)(图 5). 2.4~2.5 Ga 的年龄被华北克拉通东部前寒武结晶基底大量的花岗岩类和长英质火山岩广泛记录(Zhao *et al.*, 1998, 2000, 2001, 2005; Wu *et al.*, 2005),而 1.8~1.9 Ga 的年龄记录代表华北克拉通在这一时期发生的一次大规模变质事件(Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2005). 前寒武 1.6 Ga 之后的年龄没有或者极少出现,可能是由于华北克拉通 1.9 Ga 之后就处于长期的稳定期,直到奥陶纪被金伯利岩侵入(Gao *et al.*, 2002)才开始重新活化. 与此相反,扬子克拉通以大量保存有 700~850 Ma

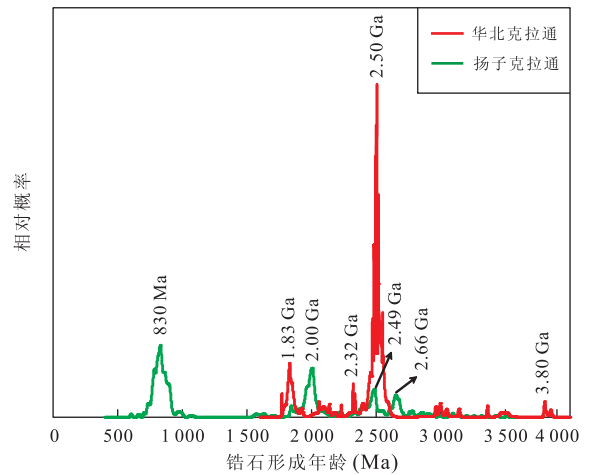


图 5 华北克拉通和扬子克拉通的年龄特征对比

Fig. 5 Comparison of zircon U-Pb age distributions of Yangtze craton and North China craton

华北克拉通的数据来自文献 Zhao *et al.* (2001)和 Gao *et al.* (2004)及其所引文献,扬子克拉通的数据来自文献 Liu *et al.* (2008)

的年龄为其典型特征(Li *et al.*, 2002, 2003; Liu *et al.*, 2008),而这两条河流的锆石在 700~850 Ma 没有或者极少有年龄分布. 如图 5 所示,华北克拉通与扬子克拉通在年龄分布上有非常明显的差异. 另外,这两条河流的汇水盆地基本上是在华北克拉通东部,而且远离扬子克拉通区域. 上述所有特征表明,潮白河(CBH01)和辽河(LNH01)的物质来源于华北克拉通东部,而没有扬子克拉通来源的物质加入. 与此同时,LNH01 位于年龄区间 100~500 Ma 的锆石数量(45%)远多于 CBH01 在这一区间的锆石数量(21%),这可能与辽河上游中亚造山带(CAOB)东部大量出露的晚古生代至中生代(280~120 Ma)的花岗岩和中酸性火山岩(Chen *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2003; Shi *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; 葛文春等, 2005; Liu *et al.*, 2005; 程瑞玉等, 2006; Jian *et al.*, 2008; Miao *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009)有关. 另外,如图 6 所示,辽河(LNH01)100~500 Ma 锆石的两阶段模式 Hf 模式年龄(T_{DM2})呈现出了两组完全不同的分布区间,即 1.4~1.9 Ga 和 0.4~1.3 Ga,与潮白河(CBH01)100~500 Ma 锆石的 T_{DM2} 分布相比,多出了 0.4~1.3 Ga 组. 同时, T_{DM2} 为 0.4~1.3 Ga 的锆石都具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,这与中亚造山带(CAOB)东部古生代至中生代花岗岩低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值、

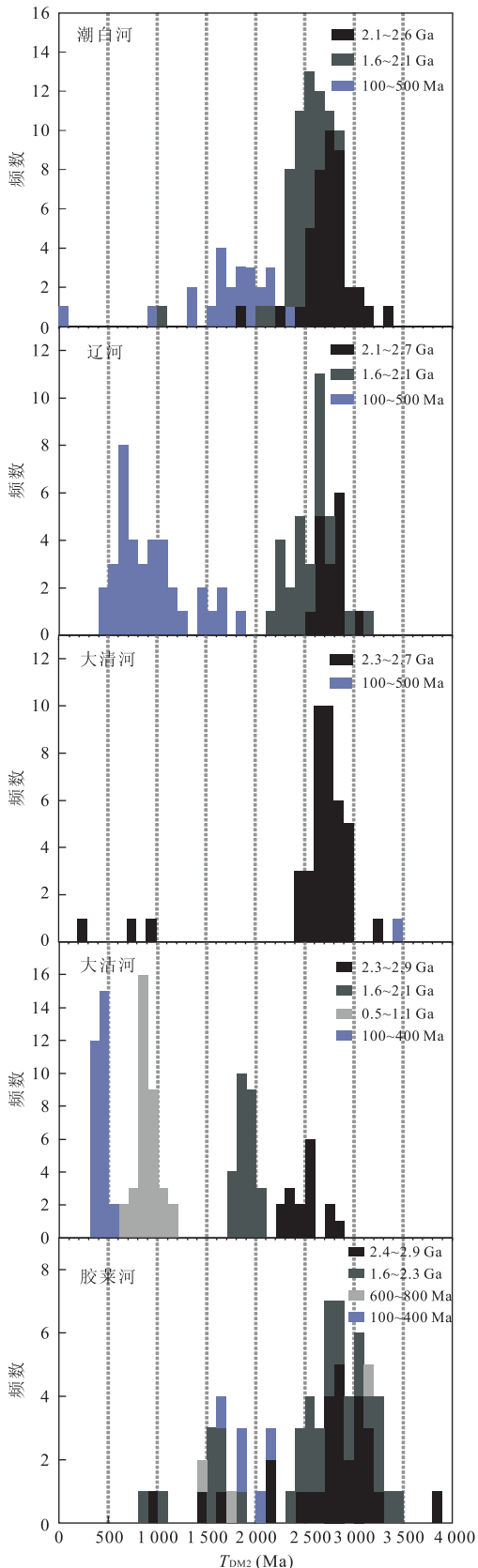


图 6 潮白河、辽河、大清河、大沽河和胶莱河不同年龄组锆石的 T_{DM2} (Hf) 分布

Fig. 6 Corresponding relative probability plots of T_{DM2} (Hf) for different age group zircons

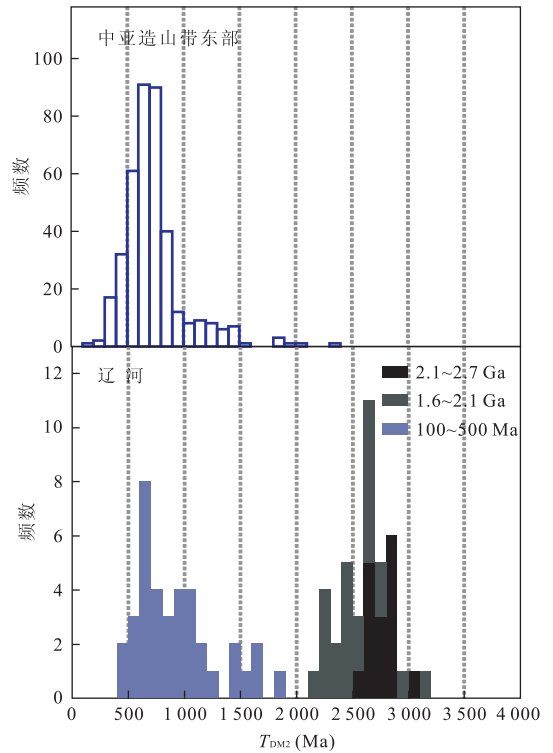


图 7 辽河及中亚造山带东部显生宙锆石的 T_{DM2} (Hf) 分布对比(中亚造山带东部的数据来自文献程瑞玉等, 2006; Chen *et al.*, 2009; Meng *et al.*, 2010)

Fig. 7 Comparison of two-stage Hf crust formation model ages of Phanerozoic zircons for the Liao River and eastern of the eastern Central Asian orogenic belt (CAOB)

正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄 (Chen *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000a; Wu *et al.*, 2002; Jahn *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2007) 及二叠纪到三叠纪 (260~220 Ma) 碎屑锆石正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的 Hf 模式年龄 (Meng *et al.*, 2010) 一致, 都指示中亚造山带 (CAOB) 东部显生宙的地壳增长。加之, 潮白河 (CBH01) 这些 100~500 Ma 锆石与中亚造山带 (CAOB) 东部具有非常相似的 T_{DM2} 分布 (图 7)。因此, 可以认为辽河 (LNH01) 这部分具有 T_{DM2} 为 0.4~1.3 Ga 的 100~500 Ma 锆石来源于中亚造山带 (CAOB) 东部, 而非华北克拉通东部。故而, 在研究华北克拉通东部的地壳生长演化时, 这部分来自中亚造山带 (CAOB) 东部的锆石数据应予以剔除。总体而言, 潮白河 (CBH01) 和辽河 (LNH01) 的物质基本上来源于华北克拉通东部。

大清河 (DQH01) 与潮白河 (CBH01) 和辽河 (LNH01) 相比, 在前寒武只有一个 2.4~2.5 Ga 年龄峰。出现此结果的原因可能来自两个方面, 其一可

能是因为 DQH01 所获得的谐和年龄太少(42 个),以至于其他区间的年龄没有机会出现;其二可能是由于大清河所流经的区域只有 2.3~2.7 Ga 的物质,而其他年龄的物质没有保存或记录.该河流的汇水盆地处于华北克拉通东部的中间位置,远离周围的构造单元.虽然只有一个能代表华北克拉通物质来源的特征峰(2.4~2.5 Ga)(Gao *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009),却足以认为大清河(DQH01)的物质完全来源华北克拉通东部.

大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)复杂的锆石年龄分布特征(图 3),初步表明这两条河流具有相对复杂的物质来源.尽管如此,2.4~2.5 Ga 和 1.8~1.9 Ga 两个特征峰揭示出华北克拉通的物质来源(Zhao *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2009),而 2.0~2.1 Ga 和 700~800 Ma 的年龄峰与扬子克拉通的特征年龄(Liu *et al.*, 2008)相对应,表明也有相当一部分的物质来源于扬子克拉通.因此,大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)的物质既有华北克拉通东部的供给也有扬子克拉通的供给.至于华北克拉通和扬子克拉通源区物质贡献的相对比例,大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)却存在较大的差异.如图 6 所示,胶莱河(JLH01)的锆石年龄大部分分布在 2.4~2.9 Ga(主峰为 2.4~2.5 Ga)、1.6~2.3 Ga(主峰 2.0~2.1 Ga,次峰 1.8~1.9 Ga)两个年龄组,而在 600~800 Ma(主峰为 700~800 Ma)组的分布较少,另外太古宙的老年龄较多.这些特征都指示出胶莱河(JLH01)的物质源区以华北克拉通为主,而扬子克拉通来源的物质相对较少.相反,大沽河(DGH01)的锆石虽然在 1.6~2.1 Ga(主峰 1.8~1.9 Ga)年龄组内分布较多,但在 2.3~2.9 Ga(主峰为 2.4~2.5 Ga)年龄组的分布却相对较少,年龄峰 2.4~2.5 Ga 也较小,而较多的出现在 0.5~1.1 Ga 和 100~400 Ma 两个年龄组内,并且具有一个很强的 700~800 Ma 和 100~200 Ma 的年龄峰.这些特征表明华北克拉通和扬子克拉通对大沽河(DGH01)的物质供给具有同等重要的贡献,或者扬子克拉通的源区物质贡献更多一些.也就是说,扬子克拉通源区物质对大沽河(DGH01)的供给比胶莱河(JLH01)更多一些,这与区域位置上大沽河比胶莱河更靠近扬子克拉通的事实一致.此外,又引出了一个存在很大争议的问题,即华北克拉通与扬子克拉通在胶东半岛或苏鲁地区的边界问题(Okay and

Sengör, 1992; Yin and Nie, 1993; Li, 1994; Gilder *et al.*, 1999; Zhai *et al.*, 2000; Faure *et al.*, 2001). 早期普遍认为五连一烟台断裂代表华北克拉通与扬子克拉通在胶东半岛的缝合带(Okay and Sengör, 1992; Yin and Nie, 1993; Li, 1994; Gilder *et al.*, 1999; Zhai *et al.*, 2000),也有学者认为缝合带的位置是比五连一烟台断裂更靠北的百尺河一烟台断裂(Zhou *et al.*, 2008).但 Faure *et al.* (2001)根据岩石学和构造学的证据认为华北克拉通与扬子克拉通的边界根本就不在胶东半岛内,而是位于比胶东半岛更靠北的位置.虽然本次研究不能确切的给出两者边界的位置,但是可以肯定它一定是在胶东半岛内部的.因为如果华北克拉通与扬子克拉通的边界在胶东半岛之外的北面,那么胶东半岛就不会记录有华北克拉通的物质,大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)也就不会存在记录华北克拉通 2.4~2.5 Ga 和 1.8~1.9 Ga 两个特征年龄峰的碎屑锆石.

4.2 华北克拉通东部的地壳生长演化

由于大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)的物质有很大一部分来源于扬子克拉通,为了避免不必要的源区混合.我们将只选取大清河(DQH01)、潮白河(CBH01)和辽河(LNH01)这 3 条具有华北克拉通东部单一源区的河流的碎屑锆石数据来分析讨论华北克拉通东部的地壳生长演化问题.需要说明的是,辽河(LNH01)的锆石数据中已经判明为中亚造山带(CAOB)东部来源的锆石部分将在讨论中予以剔除.

如前所述,只有少量的锆石具有典型的亏损地幔 $\epsilon_{\text{HF}}(t)$ 值,这表明所研究的锆石包含大量地壳再循环的物质.对于这样的锆石,更适合用两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})来估算地壳的形成时间(Iizuka *et al.*, 2005; Hawkesworth and Kemp, 2006a; Kemp *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008).

如图 8a 所示,3 条河流的碎屑锆石年龄主要分布在 3 个组,即 2.2~2.8 Ga(峰值为 2.4~2.5 Ga)、1.6~2.2 Ga(峰值为 1.8~1.9 Ga)和 100~500 Ma.这不仅证明这些碎屑锆石确实是来源于华北克拉通东部,同时还反映了在这 3 个时间段华北克拉通东部处于强烈的活动期,发生大规模的岩浆构造事件,特别是在 2.4~2.5 Ga 和 1.8~1.9 Ga 这两个阶段. Wu *et al.* (2005)收集大量前人发表的 Nd 同位素数据来研究华北克拉通 3 个不同块体在前寒武时期的地壳生长演化,结果表

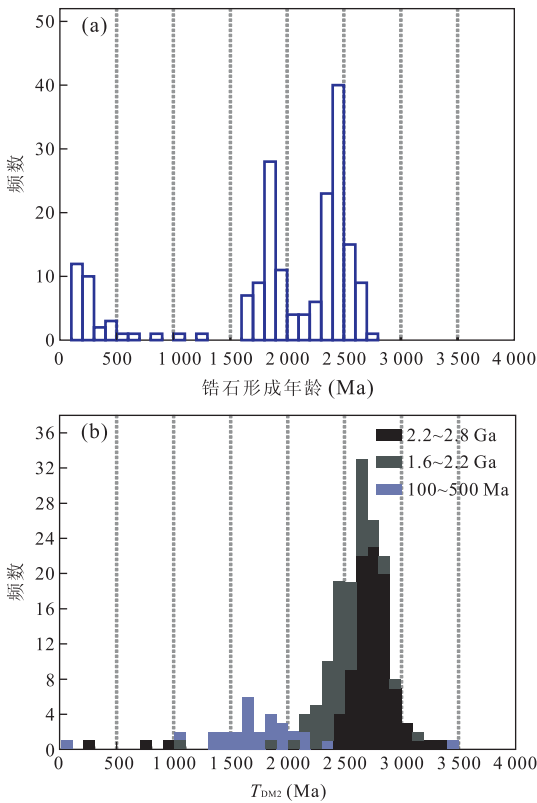


图 8 潮白河、辽河和大清河谐和锆石累计的 U-Pb 年龄及 T_{DM2} (Hf) 分布
 Fig. 8 Corresponding relative probability plots of T_{DM2} (Hf) for zircons from the Chaobai River, Liao River and Daqing River

明华北克拉通东部地壳生长最显著的时期为 2.6~3.0 Ga, 其次是 3.2~3.6 Ga. 图 9 表示随着地质历史时间的变化, 华北克拉通东部地壳生长的速率变化, 该图表明 2.4~3.0 Ga 是华北克拉通东部大陆地壳生长的最主要时期, 特别是在 2.6~2.7 Ga 时处于生长的最高峰, 这与 Wu *et al.* (2005) 的两阶段 Nd 模式年龄 T_{DM2} (Nd) 相吻合. 华北克拉通东部次一级的地壳生长期为 1.3~2.3 Ga, 但这一时期的地壳生长远不如 2.4~3.0 Ga 期间那样显著, 而且也没有明显的高峰期. 图 8(b) 为不同年龄组锆石的 T_{DM2} 分布图, 它揭示了不同年龄组锆石的物质来源及该时期地壳的生长和改造再循环. 2.2~2.8 Ga 年龄组的锆石, 其两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 2.4~3.0 Ga, 虽略大于锆石的 U-Pb 年龄, 但二者的分布区间基本重合. 这说明 2.2~2.8 Ga 年龄组的锆石来源于新生的地壳物质, 并且表明这一时期地壳的演化以新生地壳的产生 (或地壳生长) 为主, 并伴随着微弱的古老地壳重熔再改造. 1.6~2.2 Ga 年龄组的锆石, 其 T_{DM2} 大部分都分布在 2.3~3.0 Ga 的

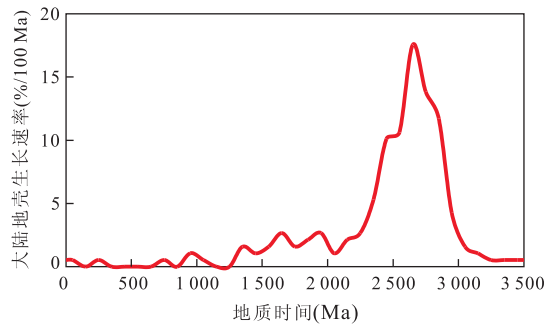


图 9 T_{DM2} (Hf) 指示的华北克拉通东部地壳生长速率
 Fig. 9 Crust growth rate of the eastern North China Craton indicated by T_{DM2} (Hf)

区间, 而 1.6~2.2 Ga 区间的分布较少. 这说明 1.6~2.2 Ga 年龄组的锆石大部分来源于太古宙—古元古代古老地壳重熔再循环的物质, 只有少部分来源于新生的地壳物质, 并且表明这一时期地壳的演化以太古宙—古元古代古老地壳的重熔再改造为主导, 并伴随着少量年轻地壳物质的产生 (或地壳生长). 在 1.6~0.5 Ga 的时间段内, 不论是锆石的 U-Pb 年龄还是两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} , 都非常罕见. 因此, 华北克拉通东部在 1.6~0.5 Ga 这段时期处于长期的稳定, 既没有年轻地壳物质的加入, 也没有古老地壳物质的重熔改造, 是华北克拉通东部地壳演化的寂静期. 最后, 100~500 Ma 这组锆石, 其 T_{DM2} 绝大部分位于 1.3~2.2 Ga 区间. 这表示 100~500 Ma 的锆石来源于古元古代—中元古代古老地壳重熔再循环的物质, 这一时期地壳的演化以古老地壳重熔再改造为绝对优势, 而几乎没有地壳的生长. 如图 10 所示, 基于锆石 U-Pb 年龄的生长曲线和基于 T_{DM2} 的生长曲线之间存在较大的差异, 这表明地壳的改造循环在大陆地壳的形成演化过程中起着非常重要的作用. 基于 T_{DM2} 的地壳生长曲线揭示出, 2.2 Ga 时华北克拉通东部现存大陆地壳的 80% 已经形成, 表明现存大陆地壳的绝大部分来源于太古宙和古元古代的生长.

全球大陆地壳在前寒武的 4 个主要生长阶段分别为 4.4~4.5 Ga、3.8 Ga、3.4 Ga 和 2.7~2.8 Ga (Pietranik *et al.*, 2008). 华北克拉通东部 2.6~2.7 Ga 的 Hf 模式年龄峰与全球克拉通大陆地壳 2.7~2.8 Ga 的生长峰最接近, 而全球其他的 3 个大陆地壳生长峰在华北克拉通东部却没有反映. 另外, 来自扬子克拉通太古代结晶基底碎屑沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究表明扬子克拉通前寒武的地壳生长峰为 3.2~3.8 Ga 和 720~

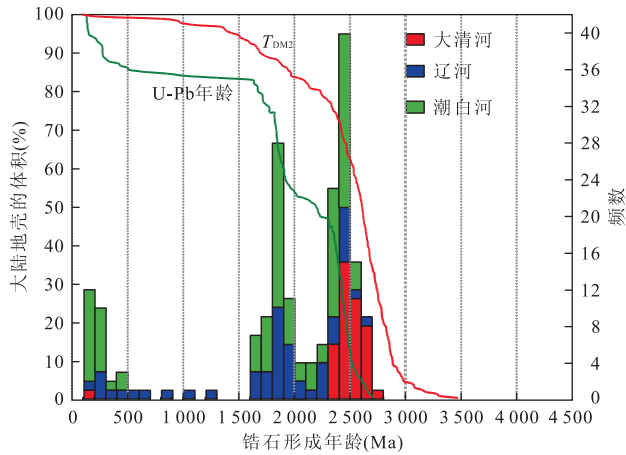


图 10 华北克拉通东部基于大清河、潮白河和辽河碎屑锆石 U-Pb 年龄和 T_{DM2} (Hf) 的累计生长曲线

Fig. 10 Crust growth curves of the eastern North China craton based on U-Pb ages and two-stage Hf crust formation ages for detrital zircons from the Daqing River, Chaobai River and Liao River

910 Ma 两阶段(Liu *et al.*, 2008). 这说明全球不同克拉通的地壳生长阶段并不是完全一致的,它们之间存在着一些差异.

4.3 苏鲁造山带古生代的地壳生长

如图 6 所示,虽然大沽河(DGH01)和胶莱河(JLH01)具有相似的锆石 U-Pb 年龄分布,但是它们的两阶段 Hf 模式年龄差异却很大. 胶莱河(JLH01)锆石的 T_{DM2} 主要分布在区间 2.4~3.3 Ga 和区间 1.4~2.2 Ga,分别与上述的华北克拉通东部 2.4~3.0 Ga 和 1.3~2.3 Ga 的地壳生长阶段相对应. 另外,其不同年龄组锆石的 T_{DM2} 特征显示出与华北克拉通东部大陆地壳非常吻合的演化特征. 即太古宙和古元古代是大陆地壳的快速生长期,而古元古代之后地壳的演化主要以古老地壳物质的重熔再改造为主,几乎没有年轻地壳物质的加入. 这进一步说明胶莱河(JLH01)的物质虽然有一部分源自扬子克拉通的混合,但是绝大部分还是来源于华北克拉通东部的.

与胶莱河(JLH01)不同,大沽河(DGH01) 2.3~2.9 Ga、1.6~2.1 Ga、0.5~1.1 Ga 和 100~400 Ma 4 个 U-Pb 年龄组锆石的 T_{DM2} 分别分布在区间 2.2~2.9 Ga、1.7~2.1 Ga、0.6~1.2 Ga 和 300~600 Ma,即大沽河(DGH01)锆石 U-Pb 年龄的分布和 T_{DM2} 的分布具有惊人的重合性. 这说明在这 4 个阶段,地壳生长都比较明显,而很少显示出古老地壳物质的重熔再改造作用. 2.3~2.9 Ga 的地

壳生长可以很好的与华北克拉通东部太古宙—古元古代(2.4~3.0 Ga)的地壳生长时期相吻合. 1.6~2.1 Ga 的地壳生长可以与华北克拉通东部古元古代—中元古代(1.3~2.3 Ga)的地壳生长相对应. 但是,根据前面的讨论分析,这一时期华北克拉通东部地壳的演化还存在非常显著的太古宙古老地壳的重熔再改造作用,而这一过程在大沽河 1.6~2.1 Ga 的锆石中却没有体现. 0.5~1.1 Ga 的地壳生长(峰期为 800~900 Ma)与扬子克拉通 720~910 Ma 的地壳生长峰可以很好的吻合. 100~400 Ma 锆石虽然绝大部分都具有负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,指示古老地壳物质重熔再改造的来源,但是,与华北显生宙锆石的特征完全不一样. 华北显生宙锆石的物质来源是古元古代—中元古代(1.3~2.2 Ga)的古老地壳,并没有显示出显生宙大陆地壳的生长(Yang *et al.*, 2009); 而大沽河 100~400 Ma 的锆石,其 T_{DM2} 集中分布在 300~500 Ma,指示古生代年轻地壳物质的加入. 因此,这部分的锆石不可能来源于华北克拉通. 这与西部的秦岭造山带存在大量古生代的蛇绿岩相吻合. 这也与早古生代(433.3±4.1 Ma)的双峰式火山岩岩墙广泛分布于南秦岭的南部一致(Zhang *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007). 这些基性火山岩具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+3.28~+5.02),被解释为与南秦岭早古生代的地幔柱岩浆作用有关(Zhang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007),这说明早古生代可能有年轻地壳物质的加入.

5 结论

(1) 潮白河和辽河的碎屑锆石具有 3 个非常一致的年龄组,即 2.1~2.6 Ga、1.6~2.0 Ga 和 100~500 Ma. 大清河的碎屑锆石只有一个年龄组,即 2.3~2.7 Ga. 大沽河和胶莱河的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布相对比较复杂. 大沽河碎屑锆石的年龄主要分布在 2.3~2.9 Ga、1.6~2.1 Ga、0.5~1.1 Ga 和 100~400 Ma 4 个区间,而胶莱河碎屑锆石的年龄主要分布在 2.4~2.9 Ga、1.6~2.3 Ga、600~800 Ma 和 100~400 Ma 4 个区间.

(2) 锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征表明大清河和潮白河的物质完全来源于华北克拉通东部,而辽河和胶莱河除华北东部的主要物质供给外,分别还有少量物质来源于大兴安岭造山带(中亚造山带东部)和扬子克拉通. 虽然华北克拉通东部对大沽河的物质来源有一定的贡献,但是大沽河的物质

主要来源于扬子克拉通。

(3)来自大清河、潮白河和辽河的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据,表明华北克拉通东部地壳生长的主要时期为 2.4~3.0 Ga,特别是在 2.6~2.7 Ga 时处于生长的最高峰,次一级的地壳生长期为 1.3~2.3 Ga,而在其他阶段几乎没有地壳的生长或者不明显。基于 T_{DM2} 的地壳生长曲线表明到 2.2 Ga 时华北克拉通东部现存大陆地壳的 80% 已经形成,表明现存大陆地壳的绝大部分来源于太古宙和古元古代的生长,而自古元古代开始大陆地壳的演化就以古老地壳的重熔再改造为主。华北克拉通东部 2.6~2.7 Ga 的 Hf 模式年龄峰与全球克拉通大陆地壳 2.7~2.8 Ga 的生长峰最接近,而全球其他的 3 个大陆地壳生长峰在华北克拉通东部却没有反映。

(4)大清河碎屑锆石的 Hf 同位素组成表明苏鲁造山带在古生代(300~500 Ma)存在明显扬子克拉通的地壳生长。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi:10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Bichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258. doi:10.1016/s0012-821x(97)00040-x
- Campbell, I. H., Allen, C. M., 2008. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen. *Nature Geoscience*, 1(8): 554-558. doi:10.1038/ngeo259
- Cawood, P. A., Nemchin, A. A., Strachan, R., et al., 2007. Sedimentary basin and detrital zircon record along East Laurentia and Baltica during assembly and breakup of Rodinia. *Journal of the Geological Society*, 164(2): 257-275. doi:10.1144/0016-76492006-115
- Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245-257. doi:10.1016/j.jseaes.2008.05.007
- Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1-2): 157-182. doi:10.1016/s0040-1951(00)00182-7
- Cheng, R. Y., Wu, F. Y., Ge, W. C., et al., 2006. Emplacement age of the Raohe complex in eastern Heilongjiang Province and the tectonic evolution of the eastern part of northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 353-376 (in Chinese with English abstract).
- Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574. doi:10.1039/b206707b
- Condie, K. C., 1998. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4): 97-108. doi:10.1016/s0012-821x(98)00178-2
- Condie, K. C., 2000. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322(1-2): 153-162. doi:10.1016/s0040-1951(00)00061-5
- Condie, K. C., Aster, R. C., 2010. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth. *Precambrian Research*, 180(3-4): 227-236. doi:10.1016/j.precamres.2010.03.008
- Condie, K. C., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2009. Granitoid events in space and time: constraints from igneous and detrital zircon age spectra. *Gondwana Research*, 15(3-4): 228-242. doi:10.1016/j.gr.2008.06.001
- Condie, K. C., Beyer, E., Belousova, E., et al., 2005. U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: the search for juvenile Precambrian continental crust. *Precambrian Research*, 139(1-2): 42-100. doi:10.1016/j.precamres.2005.04.006
- Coogan, L. A., Hinton, R. W., 2006. Do the trace element compositions of detrital zircons require Hadean continental crust? *Geology*, 34(8): 633-636. doi:10.1130/g22737
- De Bieve, P., Taylor, P. D. P., 1993. Table of the isotopic composition of elements. *International Journal of Mass Spectrometry Ion and Process*, 123: 149-166. doi:10.1016/0168-1176(93)87009-h
- DePaolo, D. J., Linn, A. M., Schubert, G., 1991. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research*, 96(B2): 2071-2088. doi:10.1029/90jb02219
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Dahinggan Mountains, northeastern

- China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121 (1-2): 115-135. doi: 10.1016/s0377-0273(02)00415-8
- Faure, M., Lin, W., Le Breton, N., 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China. *Geology*, 29 (2): 119-122. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0119
- Ferry, J. M., Watson, E. B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429-437. doi: 10.1007/s00410-007-0201-0
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198 (3-4): 307-322. doi: 10.1016/s0012-821x(02)00489-2
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892-897. doi: 10.1038/nature03162
- Gao, S., Zhang, J. F., Xu, W. L., et al., 2009. Delamination and destruction of the North China craton. *Chinese Science Bulletin*, 54 (19): 3367-3378. doi: 10.1007/s11434-009-0395-9
- Ge, W. C., Wu, F. Y., Zhou, C. Y., et al., 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, Central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 749-762 (in Chinese with English abstract).
- Gilder, S. A., Leloup, P. H., Courtillot, V., et al., 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 104 (B7): 15365-15390. doi: 10.1029/1999jb900123
- Goldschmidt, V. M., 1933. Grundlagen der quantitativen geochemie. *Fortschritte der Mineralogic Kirtstlographie Petrographie*, 17: 112.
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgam craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Hacker, B. R., Wallis, S. R., McWilliams, M. O., et al., 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Sulu orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 27 (9): 827-844. doi: 10.1111/j.1525-1314.2009.00840.x
- Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., 2003. Zircon: reviews in mineralogy and geochemistry. *Mineralogical Society of America*, 53: 500.
- Hawkesworth, C. J., Dhuime, B., Pietranik, A. B., et al., 2010. The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society*, 167(2): 229-248. doi: 10.1144/0016-76492009-072
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006a. Evolution of the continental crust. *Nature*, 443 (7113): 811-817. doi: 10.1038/nature05191
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006b. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3-4): 144-162. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.09.018
- Hu, Z. C., Gao, S., 2008. Upper crustal abundances of trace elements: a revision and update. *Chemical Geology*, 253(3-4): 205-221. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010
- Iizuka, T., Hirata, T., 2005. Improvements of precision and accuracy in in situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique. *Chemical Geology*, 220 (1-2): 121-137. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.03.010
- Iizuka, T., Hirata, T., Komiya, T., et al., 2005. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: implications for reworking and growth of continental crust. *Geology*, 33(6): 485-488. doi: 10.1130/g21427.1
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Jahn, B. M., Capdevila, R., Liu, D. Y., et al., 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629-653. doi: 10.1016/s1367-9120(03)00125-1
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Capdevila, R., et al., 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4): 171-198. doi: 10.1016/s0024-4937(01)00066-4
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000a. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth and Environmental Sciences*, 350: 181-193. doi: 10.1130/0-8137

- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Hong, D. W., 2000b. Important crustal growth in the Phanerozoic: isotopic evidence of granitoids from East-Central Asia. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 109(1): 5–20. doi:10.1007/bf02719146
- Jian, P., Liu, D. Y., Kroner, A., et al., 2008. Time scale of an early to Mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian orogenic belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth. *Lithos*, 101(3–4): 233–259. doi:10.1016/j.lithos.2007.07.005
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Paterson, B. A., et al., 2006. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, 439(7076): 580–583. doi:10.1038/nature04505
- Kusky, T. M., Santosh, M., 2009. The Columbia connection in North China. *Geological Society of London: Special Publications*, 323: 49–71. doi:10.1144/sp323.3
- Li, S. Z., Kusky, T. M., Liu, X. C., et al., 2009. Two-stage collision-related extrusion of the western Dabie HP-UHP metamorphic terranes, Central China: evidence from quartz c-axis fabrics and structures. *Gondwana Research*, 16(2): 294–309. doi:10.1016/j.gr.2009.03.003
- Li, X. H., Li, Z. X., Ge, W. C., et al., 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma. *Precambrian Research*, 122(1–4): 45–83. doi:10.1016/s0301-9268(02)00207-3
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113(1–2): 135–154. doi:10.1016/s0301-9268(01)00207-8
- Li, Z. X., 1994. Collision between the North and South China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22(8): 739–742. doi:10.1130/0091-7613(1995)023<0574:cbtnas>2.3.CO
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342. doi:10.1130/0091-7613(1992)020<0339:romcit>2.3.CO
- Liu, W., Siebel, W., Li, X. J., et al., 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: constraints on basaltic underplating. *Chemical Geology*, 219(1–4): 5–35. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.01.013
- Liu, X. M., Gao, S., Diwu, C. R., et al., 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital zircon studies. *American Journal of Science*, 308(4): 421–468. doi:10.2475/04.2008.02
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, Berkeley, California, 70.
- McLennan, S. M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2(4): 1021–1044. doi:10.1029/2000gc000109
- Meng, F. X., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2010. Permian-triassic (260–220 Ma) crustal growth of eastern central Asian orogenic belt as revealed by detrital zircon studies. *American Journal of Science*, 310(5): 364–404. doi:10.2475/05.2010.02
- Meng, Q. R., Zhang, G. W., 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323(3–4): 183–196. doi:10.1016/s0040-1951(00)00106-2
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370. doi:10.1016/j.jseaes.2007.11.005
- Oh, C. W., Kusky, T., 2007. The Late Permian to Triassic Hongseong-odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49(7): 636–657. doi:10.2747/0020-6814.49.7.636
- Okay, A. I., Sengör, A. M. C., 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20(5): 411–414. doi:10.1130/0091-7613(1992)020<0411:efitre>2.3.CO
- Pietranik, A. B., Hawkesworth, C. J., Storey, C. D., et al., 2008. Episodic, mafic crust formation from 4.5 to 2.8 Ga: new evidence from detrital zircons, Slave craton, Canada. *Geology*, 36(11): 875–878. doi:10.1130/g24861a.1
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust: the crust: treatise on geochemistry. *Elsevier Science*, 3: 1–64. doi:10.1016/b0-08-043751-6/03016-4
- Samson, S. D., Hibbard, J. P., Wortman, G. L., 1995. Nd isotopic evidence? For juvenile crust in the Carolina terrane, southern Appalachians. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 121(2): 171–184. doi:10.1007/s004100050097
- Samson, S. D., McClelland, W. C., Patchett, P. J., et al., 1989. Evidence from neodymium isotopes for mantle contributions to Phanerozoic crustal genesis in the Canadian Cordillera. *Nature*, 337: 705–709. doi:10.

1038/337705a0

- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293 (5530): 683—687. doi:10.1126/science.1061372
- Shi, G. H., Miao, L. C., Zhang, F. Q., et al., 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(7): 723—729. doi:10.1360/03wd0436
- Shao, J. A., Han, Q. J., Zhang, L. Q., et al., 1999. Two kinds of vertical accretion of the continental crust: an example of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 49(7): 600—606 (in Chinese with English abstract).
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1—3): 79—94. doi:10.1016/0301—9268(95)00070—4
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Li, H. M., et al., 2001. Emplacement age of the postorogenic A-type granites in northwestern Lesser Xing'an ranges, and its relationship to the eastward extension of Suolushan-Hegenshan-Zhalaithe collisional suture zone. *Chinese Science Bulletin*, 46(5): 428—433.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. Continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific, Oxford, 311. doi:10.1016/0031—9201(86)90093—2
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265. doi:10.1029/95rg00262
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., McCulloch, M. T., 1983. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(11): 1897—1905. doi:10.1016/0016—7037(83)90206—5
- Veevers, J. J., Saeed, A., Belousova, E. A., et al., 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn craton. *Earth-Science Reviews*, 68(3—4): 245—279. doi:10.1016/j.earscirev.2004.05.005
- Vermeesch, P., 2004. How many grains are needed for a provenance study? *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3—4): 441—451. doi:10.1016/j.epsl.2004.05.037
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717—3733. doi:10.1016/0016—7037(96)00201—3
- Wang, L., Kusky, T. M., Li, S. Z., 2010. Structural geometry of an exhumed UHP terrane in the eastern Sulu orogen, China: implications for continental collisional processes. *Journal of Structural Geology*, 32(4): 423—444. doi:10.1016/j.jsg.2010.01.012
- Wang, T., Zheng, Y. D., Li, T. B., et al., 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 715—729. doi:10.1016/s1367—9120(03)00133—0
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841—844. doi:10.1126/science.1110873
- Watson, E. B., Wark, D. A., Thomas, J. B., 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413—433. doi:10.1007/s00410—006—0068—5
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2006. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: sedimentary record of collision of the North and South China blocks. *Geology*, 34(2): 97—100. doi:10.1130/g21929
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. *Chemical Geology*, 209(1—2): 121—135. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.04.026
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1—2): 89—113. doi:10.1016/s0040—1951(00)00179—7
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3—4): 241—273. doi:10.1016/s0024—4937(02)00222—0
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1—2): 143—173. doi:10.1016/s0009—2541(02)00018—9
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Sun, D. Y., et al., 2007. The Hulan Group: its role in the evolution of the central Asian orogenic belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3—4): 542—556. doi:10.1016/j.jseas.2007.01.003

- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523—545. doi: 10.1016/j.jseaes.2003.10.011
- Xu, W. L., Ji, W. Q., Pei, F. P., et al., 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: chronology, geochemistry, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392—402. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.07.001
- Yang, J., Gao, S., Chen, C., et al., 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9): 2660—2673. doi: 10.1016/j.gca.2009.02.007
- Yang, J., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2007. Detrital zircon ages of Hanjiang River: constraints on evolution of northern Yangtze craton, South China. *Journal of China University of Geosciences*, 18(3): 210—222.
- Yin, A., Nie, S., 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801—813. doi: 10.1029/93tc00313
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1—2): 100—118. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.10.003
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x
- Zhai, M. G., Gong, B. L., Guo, J. H., et al., 2000. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication. *Lithos*, 52(1—4): 23—33. doi: 10.1016/s0024-4937(99)00082-1
- Zhang, C. L., Gao, S., Zhang, G. W., et al., 2003. Geochemistry of Early Paleozoic alkali dyke swarms in south Qinling and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 46(12): 1292—1306. doi: 10.1360/03yd0520
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a Late Palaeozoic active continental margin. *Journal of the Geological Society*, 164: 451—463. doi: 10.1144/0016-76492005-190
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Tang, Y. J., et al., 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 249(3—4): 262—281. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.01.005
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(1—2): 55—88. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00076-0
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. doi: 10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40(8): 706—721. doi: 10.1080/00206819809465233
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1999. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geological Magazine*, 136(3): 223—240.
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00154-6
- Zhou, T. F., Yuan, F., Fan, Y., et al., 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3—4): 191—206. doi: 10.1016/j.lithos.2008.06.014

附中文参考文献

- 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 等, 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. *岩石学报*, 22(2): 353—376.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等, 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21(3): 749—762.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等, 1999. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例. *岩石学报*, 15(4): 600—606.