

doi: 10.12029/gc20160407

陈岳龙, 李大鹏, 包创, 等. 碎屑沉积岩/沉积物 Sm-Nd、U-Pb 与 Hf 同位素的化学地球动力学意义[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1200-1215.

Chen Yuelong, Li Dapeng, Bao Chuang, et al. Chemically geodynamic significances of Sm-Nd isotopic system and U-Pb dating and Hf isotopic compositions of zircons in clastic sedimentary rocks/sediments: Theory, methods and practices[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1200-1215(in Chinese with English abstract).

碎屑沉积岩/沉积物 Sm-Nd、U-Pb 与 Hf 同位素的 化学地球动力学意义

陈岳龙¹ 李大鹏¹ 包创¹ 李兆¹ 刘长征²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 青海省地质矿产局第五地质勘查院, 青海 西宁 810012)

摘要: 碎屑沉积岩能有效记录它们的源区。碎屑沉积岩的 Nd 同位素组成及其中锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成是解析碎屑物质源区、源区壳-幔相互作用及不同块体间相互作用的关键方法。全岩/全样的 Nd 模式年龄可以指示其源区地壳从亏损地幔分离的平均时间, 而锆石 Hf 同位素模式年龄能够揭示出所测锆石颗粒其形成时的源区特征。细粒碎屑沉积岩/沉积物化学组成代表了其源区上地壳在风化、搬运、沉积过程中不溶于水的 Nb、Ta、Zr、Hf、Sc、Ti、Th、REE 等的平均组成。实践表明, 华北板块、扬子板块、以大兴安岭为代表的中亚造山带东部具有明显不同的形成与演化历史。大兴安岭的地壳增生主要发生于新元古代—古生代期间。由碎屑沉积岩进行化学动力学分析时, 应充分系统考虑地质过程的复杂性, 将宏观与微观相结合、局部与整体相结合。

关键词: 碎屑沉积岩; 化学地球动力学; 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素组成; Nd 同位素

中图分类号: P541; P588.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1200-16

Chemically geodynamic significances of Sm-Nd isotopic system and U-Pb dating and Hf isotopic compositions of zircons in clastic sedimentary rocks/sediments: Theory, methods and practices

CHEN Yue-long¹, LI Da-peng¹, BAO Chuang¹, LI Zhao¹, LIU Chang-zheng²

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. The Fifth Institute of Geological Exploration, Qinghai Bureau of Geology and Mineral Deposits, Xining 810012, Qinghai, China)

Abstract: This paper has summarized the theory, methods and practices of clastic sedimentary rocks and sediments for chemically geodynamics. Clastic sedimentary rocks/sediments can record their provenances effectively. Nd isotopic compositions and U-Pb dating as well as Hf isotopic compositions of zircons in clastic sedimentary rocks/sediments are critical approaches to decipher provenances of clastic materials, interactions between the crust and the mantle, different blocks of their derived regions, and

收稿日期: 2015-05-27; 改回日期: 2015-07-29

基金项目: 深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-04-05-3, 201011057-3)、国家自然科学基金项目 (41473015、40973010) 资助。

作者简介: 陈岳龙, 男, 1962 年生, 教授, 博士, 主要从事区域地球化学、同位素地质年代学与地球化学的教学与科研工作;

E-mail: chyl@cugb.edu.cn。

formation and evolution history of provenance's regional crust. Nd model age of a bulk sample indicates an average extraction time of its derived regional crust from the depleted mantle as a whole. Hf model age of a zircon grain shows its source characteristics during its formation. The chemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks/sediments represent average compositions of their derived regional upper crust for most insoluble elements during weathering, transportation, and deposition in water, such as Nb, Ta, Th, Sc, Zr, Hf, Sc, Ti and REE. The authors' practice shows that the formation and evolution histories of the North China Plate, the Yangtze Plate, and the Central Asian Orogen represented by the Da Hinggan Mountains are significantly different from each other. Crustal growth occurred predominantly in Neoproterozoic-Paleozoic periods in the Da Hinggan Mountains. During chemically geodynamic analysis of clastic sedimentary rocks/sediments, such factors as complexity of geological processes and combination between micro- and macro-scales as well as between locality and integrity should be considered systematically.

Key words: clastic sedimentary rocks; chemically geodynamics; zircon U-Pb dating; Hf isotopic compositions of zircon; Nd model ages

About the first author: CHEN Yue-long, male, born in 1962, professor, doctor, majors in regional geochemistry, radiogenic isotopic geochronology, and isotopic geochemistry; E-mail: chyl@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by Technology Major Project "Deep Exploration and Research" (No.SinoProbe-04-05-3,201011057-3) and National Natural Science Foundation of China (No.41473015, 40973010).

1 引言

化学地球动力学是从元素、同位素地球化学及地质年代学角度重建地质历史上地壳与地幔的运动及相互作用过程。碎屑沉积岩/沉积物蕴含着源区地壳组成与演化的丰富信息^[1-4],它们是源区不同构造单元的物质,由风化、侵蚀作用、被水流带动迁移并由于水动力条件的改变而沉淀的产物,主要由砾、砂、粉砂、黏土组成。尤其是细粒沉积物是对流经源区地表进行均匀采样的理想介质。由于Sm-Nd均为稀土元素,且在地表的风化、剥蚀、搬运、沉积-成岩,甚至变质-深熔过程中不易发生分馏^[5],因此,细粒碎屑沉积物Sm-Nd同位素组成,除了放射性衰变造成的变化外,很难受到其他因素影响,可以代表源区地壳的平均组成。根据Nd同位素亏损地幔模式年龄即可获得源区地壳平均的壳-幔分异事件的年龄。水-岩分配系数小的其他稀土元素、高场强元素(如Nb、Ta、Zr、Hf等)能反映源区地壳的平均化学组成特征^[1-4],有关成矿元素的含量能反映不同成矿潜力的地球化学块体特征^[6-8]。在碎屑沉积物/岩中赋存着锆石/斜锆石、磷灰石、独居石、黑云母、白云母等碎屑矿物,通过对这些矿物的U-Pb年龄、K-Ar/Ar-Ar年龄、U-He年龄、裂变径迹年龄的测定可获得源区地壳岩浆/变质事件年龄、抬升-剥蚀历史等地球动力学方面的丰富信息^[9-14]。由于锆石的抗物理-化学风化及其晶体化学特性,在其结晶时优先从环境中吸收Hf进入晶格,而基本不吸

收Lu,这样在单颗粒锆石年龄测定结构域分析其Hf、O同位素组成,可以识别锆石结晶时其寄主岩的起源性质^[15-18]。

由碎屑沉积岩/物的地球化学特征研究地壳的组成、起源、演化等方面,国内外取得了大量的研究成果。Taylor and McLennan^[12]、McLennan^[3]、Rudnick和Gao^[4]对沉积岩、黄土沉积物的组成与上地壳组成的关系进行了深入的讨论与研究,认为除了一些水-岩相互作用系数较大的元素(如Na、Rb、Mg、Sr、Re、Li、Ca、Se、Mo、U、Au)外,它们的REE、Th、Sc、Co等元素的含量能够反映源区地壳的平均组成。Allegre and Rousseau于20世纪80年代通过加拿大地盾杂岩,一些变沉积岩、沉积岩,河流携带的颗粒物Nd同位素组成对全球地壳演化进行了评估,其结论是从3.8 Ga前到现在,具均一增长的模式,但随着时间的变新地壳增长速率降低^[19];Goldstein et al.^[20]由太平洋、大西洋、印度洋上空搜集的大气尘及主要、次要河流携带的颗粒物测得的Sm-Nd同位素组成有一定的变化,反映了源区的差别,并由此得到了大陆地壳的平均形成年龄为2.0 Ga;由此开启了利用碎屑沉积岩/物Sm-Nd同位素组成研究区域与全球地壳起源的新阶段。随着离子探针与激光剥蚀等离子质谱技术的日臻成熟,使得碎屑沉积岩/物中锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成原位快速测定成为一种常规方法,由碎屑沉积岩研究早期地球的历史、大陆地壳的形成与演化、地球动力学过程等方面取得了极为丰硕的成果。

Harrison et al.^[21]从西澳大利亚 Jack 山的太古宙砾岩中分离出锆石,获得的最老年龄接近 4.4 Ga^[16],从而使地球的“黑暗”时代进一步缩短。这些年龄与 Hf、O 同位素组成相结合,得到那时亏损的地幔与富集的地壳就已经存在,锆石是在有水的钙碱性系统中形成的,壳-幔之间的交换比现今更为强烈,从而推断板块构造机制在那时就起作用了^[16]。Belousova et al.^[22]主要依据来自碎屑组分的 13800 个锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素数据建立了大陆地壳随时间增生的模型,认为新地壳的产生基本不具幕式。年龄与 Hf 同位素数据分析表明现今大陆地壳至少 60% 是 2.5 Ga 以前已经从地幔分离;至少是自太古宙末以来,地壳重熔相对于新生地壳对陆壳的加入占控制地位;新生地壳组分的比例随时间是逐步减少的,在 4.0~2.2 Ga 期间大约为 70%、1.8~0.6 Ga 期间约为 50%、0.6 Ga 以后可能少于 50%。Kröner et al.^[23]根据中亚造山带有关碎屑沉积岩及其他岩石的 Nd 同位素组成、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成对其幔源或新生大陆地壳的产生进行了重新评估,认为总体上过去的估计是夸大了。他指出,中亚造山带中增生体中许多新元古代到古生代花岗岩类应是不均一的前寒武纪地壳熔融或通过古老地壳与新生的或壳内滞留时间短的幔源物质的混合形成,多数处于大陆弧环境;该带中新生地壳的增长出现于晚新元古代到古生代的大陆岛弧环境与大洋、岛弧与前寒武地体的增生过程。Veevers et al.^[24]对澳大利亚西南二叠纪砂岩与现代砂中由锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素、微量元素相结合,阐明了其物质来自 Yilgarn 克拉通而不是 Albany 省的北部。Kuznetsov et al.^[25]对东欧克拉通东北边缘新元古代硅质碎屑岩中的锆石进行 U-Pb 定年、REE 地球化学与 Hf 同位素组成的系统研究,得出这些碎屑沉积岩主要源于波罗的地盾的侵蚀并沿该地盾的被动边缘沉积,该地盾东北部晚前寒武纪一早寒武世火山-沉积、火山岩、花岗岩类及少量的蛇绿岩形成于北极古陆的活动边缘,并最终成为波罗的与北极两大古陆的碰撞带。

青藏高原的抬升与剥蚀历史是地球动力学研究的前沿领域之一,引起国际地学界的高度关注。雅鲁藏布江中碎屑沉积物中锆石 U-Pb 年龄结合裂变迹年龄说明从大峡谷向下,现代河流携带的沉

积物近 50% 来源于南迦巴瓦块体中的基岩;上游的主要支流河岸砂不存在这种基岩特征的锆石,下游 45% 的碎屑锆石来源于广泛出露于块体基底的片麻岩;由基岩冷却年龄对源区范围的限制,得到块体中心平均 7~21 mm/a 的剥蚀速率^[26]。东南亚红河、湄公河、萨温江、伊洛瓦底江碎屑锆石与斜锆石的 U-Pb 定年与 Hf 同位素组成的研究表明,源区于 2.5 Ga、2.3 Ga、1.9 Ga、1.1 Ga、0.8 Ga 等 5 个不同时期发生地壳增长事件。锆石颗粒获得的初始 ϵ_{Hf} 分布于 +13.3~ -16.7, 大约一半的颗粒结晶源于明显亏损的地幔源岩浆,大约 18% 颗粒形成于近球粒陨石特征的岩浆中,其余颗粒得到强烈的负 ϵ_{Hf} 值,说明于 2.3 Ga 与 1.9 Ga 古元古代事件中形成的地壳重熔岩浆大量加入;所有年轻的造山旋回均以大量大陆物质的熔融为特征,它们可能超过新生地壳的增长;唯一例外的是伊洛瓦底地体,其大量地幔物质的输入以 50 Ma 以来的碰撞后岩浆作用为特征^[27]。总之,国际上由碎屑沉积岩/物研究大陆地壳的组成、起源、大陆动力学取得了显著的成功。

国内近年来对碎屑沉积岩/物也开展了大量的研究,取得了非常丰富的成果,研究范围涉及到华北克拉通、华南地块、青藏高原、中亚造山带、大别-苏鲁-秦岭-祁连造山带。如,对华北克拉通的研究确定华北的构造热事件主要发生于 2.5 Ga,在冀东、信阳、焦作等地也存在始太古代—古太古代的岩石与锆石,华北可能存在几个不同的古太古代—始太古代陆核;华北在古元古代晚期,东、西沿吕梁造山带聚合形成统一的华北克拉通^[28-37]。对华南地块的研究确定始太古代地壳残片的存在,格林威尔期事件在华夏古陆中存在的证据、Rodinia 超大陆聚合与裂解导致华南克拉通的初始破坏与再造并成为区别华南与华北的重要标志;甘孜—松潘三叠纪碎屑沉积岩主要来自扬子克拉通西缘与秦岭造山带^[38]。西秦岭三叠纪碎屑沉积岩明显有华北克拉通南缘新太古代物质的贡献,而在二叠纪以前其物质来源主要为秦岭微陆块本身及扬子克拉通北缘^[39]。

利用现代河流沉积物的碎屑物质成分分析研究地质事件,目前也陆续展开。如 Yang et al. 在湖北钟祥所取的汉江细砂一个样品中由碎屑锆石的 U-Pb 单颗粒定年揭示 768 Ma、444 Ma、212 Ma、124 Ma 等四组主要年龄,反映了扬子克拉通北部的岩

浆事件、扬子克拉通北部古元古代与太古宙岩石的暴露有限^[40]。黄河源区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄说明主要来自于华北、东昆仑造山带、柴达木板块、祁连造山带和秦岭造山带^[41]。对黄河入海口碎屑沉积物中锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的研究表明,华北克拉通除东部冀东迁西、辽宁鞍山地区外,其他地区也存在 >3.6 Ga 的地壳物质,大约 2.7 Ga 的碎屑锆石主要是鲁西地区该期岩浆作用的产物,400 Ma 与 1000~800 Ma 的年龄代表苏鲁造山带物质的贡献^[42]。耿显雷等对流经于华北克拉通东部与苏鲁造山带的中国东部几条河流的河沙中碎屑锆石的 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的研究表明,大清河、潮白河、辽河的碎屑锆石来源于华北克拉通东部,辽河中部分 500~100 Ma 的锆石具正的初始 ϵ_{Hf} 值与年轻的 Hf 模式年龄,揭示出显生宙的地壳增长。苏鲁造山带中的大沽河与胶莱河是华北克拉通与扬子克拉通的混合产物;华北克拉通东部现存大陆地壳的 80% 来源于太古宙与古元古代期间的生长^[43]。黄河、长江流域泛滥平原细粒沉积物 Sr 同位素组成空间上具有规律性变化,反映了各汇水盆地内地壳岩石组成、年龄和化学风化作用强度的制约^[44]。

2 理论与方法

2.1 Sm-Nd 同位素体系

细粒碎屑沉积岩/沉积物是源区物质有效平均的产物,由于 Sm、Nd 均为稀土元素,在风化、剥蚀、搬运、沉积、成岩、变质过程难以造成这两个元素之间的明显分馏,因此,细粒沉积物/沉积岩的 Sm-Nd 同位素组成可以得到源区岩石平均的壳-幔分异事件年龄,即所谓的亏损地幔模式年龄。DePaolo 根据美国科罗拉多 1800~1015 Ma 的变质围岩、侵入岩,加利福尼亚岩基与大洋岛弧岩石及科罗拉多北部 2700 Ma 的古老地壳演化,最初构筑了亏损地幔随时间 Nd 同位素的二次演化曲线 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t)=0.25T^2-3T+8.5$, T 的单位为 Ga), 由此演化曲线计算的低 Sm/Nd 比值样品的模式年龄 T_{DM} 为 1600~1900 Ma, 平均为 1800 Ma, 而据球粒陨石均一源计算出的 T_{CHUR} 则平均为 1350 Ma, 认为 T_{CHUR} 低估了真实地壳年龄, T_{DM} 是相当准确的, 尽管其结晶年龄变化 800 Ma, 从而证明相对于亏损地幔分馏的地壳岩石的

Sm/Nd 比值多数测定了原始地壳的形成时间^[47]。事实上,即使是远离大陆的大洋岛弧火山岩一些也不是亏损的,它们含有再循环的组分,如富集地幔 1 (EM-1)、富集地幔-2 (EM-2)、高 μ 值地幔 (HIMM), 分别代表消减深海沉积物或拆沉的大陆岩石圈加入的、海洋地壳与少量深海沉积物加入的、大洋板片加入的下地幔组分^[48]。Goldstein et al. 以正常洋中脊玄武岩的现今 ϵ_{Nd} 平均值为 +10 代表着现今亏损地幔的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, 假定 4560 Ma 前亏损地幔与球粒陨石均一源的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值相同的亏损地幔“线性”(因为 ^{147}Sm 长的半衰期,造成放射成因 ^{143}Nd 随时间增加的变化近于线性)演化,得到亏损地幔平均现今 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.2135, 以此模式计算的亏损地幔模式年龄记为 t_{CR} , 即地壳存留时间。据此对地球上主要与次要河流颗粒物,大陆沉积物及大西洋、太平洋、印度洋上空收集的空气尘埃得到的平均 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.115 ± 0.01 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.51204 ± 0.0002 , 计算得到的平均地壳存留时间为 $(1.70 \pm 0.35)\text{Ga}$ 。由此得到的大陆地壳成分、年龄及历史信息包括:(1)全部沉积体的平均地壳存留年龄为 1.9 Ga 左右;(2)大陆起源输入到大洋中颗粒物 Nd 同位素范围与大西洋沉积物和海水的相同,但低于太平洋的,说明太平洋火山作用对太平洋 Nd 同位素组成具重要的影响;(3)大陆上地壳平均的 Sm/Nd 比值大约为 0.19 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1148$), 并且自古太古代以来保持此值,从而排除了地球整个历史中大陆上地壳总成分是由主要的镁铁质到长英质或长英质到镁铁质趋势的可能性;(4)沉积物看起来主要由具类似 Sm/Nd 比值的大陆地壳侵蚀形成,而不是镁铁质与长英质成分的混合;(5)假定大陆地壳的平均年龄为约 2 Ga, 其平均的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值约为 0.5117 ($\epsilon_{\text{Nd}} \approx -17$);(6)河流与大气颗粒物均一的 Sm-Nd 同位素系统反映了相对于物质在地壳中存留时间的量,短的时间尺度上由沉积过程古老沉积物的有效再循环作用^[20]。尽管目前国内外 Nd 模式年龄的计算多数采用 Goldstein 的模式,但标记上却用的 DePaolo 的 DM 作为下标,即 $t_{\text{DM}}=t_{\text{CR}}/T_{\text{DM}}=T_{\text{CR}}$, 由线性模式计算的 Nd 模式年龄值比 DePaolo 的二次曲线演化模式值略大、计算更为简便。对于一些 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值偏离地壳平均值、不在 0.10~0.13 范围内的样品 Nd 模式年龄的计算,一般假定是其过低或过

高比值是岩石形成时Sm/Nd的过度分馏所致,这样根据岩石的形成年龄、地壳平均的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.115$,将岩石形成到现今衰变产生的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值不足或过剩进行校正,从而得到二阶段模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ ^[49],即:

$$t_{2\text{DM}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{sample}}^0 + \left(0.115 - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{sample}}^0 \right) \times (e^{\lambda t} - 1) - 0.51315}{0.115 - 0.2135} \right] + 1 \quad (1)$$

式中 t 即为岩石的形成年龄,上标0即为样品现今实测值, λ 为 ^{147}Sm 的衰变常数。

Nelson and DePaolo曾经证明有限的地壳深熔事件对Nd亏损地幔模式年龄没有明显的影响^[50]。由于他们是依据推导出的错误公式,讨论深熔事件对模式年龄所造成的估计偏差,其结论是不可信的。通过重新推导与实际验证,证明深熔作用发生的时间与壳-幔分离事件的时间差、熔融产物Sm/Nd比值与源岩的差异程度会对Nd亏损地幔模式产生不同程度的影响,其关系式为^[51]:

$$\text{ERR}t_{\text{DM}} = \frac{\Delta f_{\text{Sm/Nd}}^{f/s}}{\Delta f_{\text{Sm/Nd}}^{f/\text{DM}}} (t_{\text{DM}} - t_m) \quad (2)$$

式中 $f_{\text{Sm/Nd}}$ 为Sm/Nd相对球粒陨石均一源的分馏因子,即 $f_{\text{Sm/Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/0.1966 - 1$, $\Delta f_{\text{Sm/Nd}}^{f/s}$ 指熔融产物的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 分馏因子与源岩 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 分馏因子之差; $\Delta f_{\text{Sm/Nd}}^{f/\text{DM}}$ 指熔融产物的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 分馏因子与亏损地幔 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 分馏因子(0.2135/0.1966-1=0.086)之差; t_m 为深熔事件发生的时间。以2.0 Ga的平均大陆上地壳为例,如果在1.6 Ga时发生熔融事件,其熔融产物既可以是比源岩具更低 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值的熔浆,也可以是比源岩更高 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值的残留物,如果仅仅是完全重熔融不会发生Sm/Nd分馏现象。假设熔融产生的熔浆其 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为0.07,30%的部分熔融,依据质量平衡关系,残留相的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为0.1343,代入(2)式得到熔体相、残留相对模式年龄估计所产生的误差分别为0.13 Ga、-0.10 Ga;但如果发生的时间推后到1.2 Ga时,熔体相、残留相对源岩模式年龄估计所产生的误差分别为0.25 Ga、-0.19 Ga,即时间相差越大,造成的估计误差就会越大。但是模式年龄一般要求

大量数据统计对比,尽管存在壳内熔融事件的影响,作为统计规律还是能有效地区分不同块体之间平均壳-幔分异事件年龄的大致差别,尤其是作为大尺度的全岩样品、碎屑沉积物大区域采样结果与下面介绍的锆石Hf同位素结果一致时,这种块体/区域上的差异便得到了有效证明。

2.2 锆石U-Pb年龄与Hf同位素组成

尽管从元素组成上,地表出露的岩石与中、下地壳存在差别^[4],但是地表岩石中,尤其是中、酸性的火成岩中所赋存的锆石(ZrSiO_4)均是在地壳深部的构造/热运动中形成的。锆石一旦形成,在后期的风化、剥蚀、搬运、沉积-成岩、变质,甚至深熔过程中很难完全被破坏^[16],一些锆石可能在变质-深熔过程中部分溶解,而当成分与物理化学条件达到锆石形成要求时,会以原来未被完全破坏的残留锆石为结晶中心,而发生增生现象,形成在阴极发光或电子背散射成像条件下观察到的核、边结构,如果经历多期次这样的过程,还会形成更为复杂的核、幔、边等结构^[52]。超镁铁质、镁铁质岩浆体系中,由于硅不饱和,经常形成的含锆矿物为斜锆石(ZrO_2)^[53]。

锆石为锆的正硅酸盐,其理论组成上 ZrO_2 为67.22%、 SiO_2 为32.78%。 Zr^{4+} 的离子半径为0.80Å (1Å=10 nm), Hf^{4+} 的离子半径为0.81Å,因此,理论上Zr与Hf在锆石中能形成完全类质同象替换,但在自然界中锆中 HfO_2 的含量范围一般在0.39%~3.98%。 Th^{4+} 、 U^{4+} 的离子半径分别为0.95Å、0.97Å,在锆石结晶时, Th^{4+} 、 U^{4+} 的离子可通过简单的离子替换进入到 Zr^{4+} 的晶格中;同时由于三价稀土元素6次配位的离子半径在1.032~0.900Å,通过稀土元素与Nb、Ta成对替换2个 Zr^{4+} 或稀土元素与五价的P分别同时替换 Zr^{4+} 与 Si^{4+} ,使得锆石中Hf和Y达到次要元素含量水平,稀土元素、P、U和Th成为最高丰度的微量元素。锆石在环境压力下,温度高达1690℃仍能稳定存在。研究表明,锆石的U-Th-Pb衰变系统在800℃以下,保持封闭^[54]。

由于锆石/斜锆石中的U、Th衰变,且衰变体系具有高的封闭温度,其U-Th-Pb的放射性时钟便能准确记录岩浆结晶与较高温度下变质事件的年龄^[54]。同时,由于锆石中的Lu/Hf比值极低,锆石结晶后由 ^{176}Lu 放射性产生所积累的 ^{176}Hf 几乎可以忽

略不计,因此锆石中测定出 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本可以认为是结晶时的初始值。由于锆石的永久性,它的氧同位素组成可与Hf同位素组成及U-Pb年龄相结合,示踪锆石的物质来源或形成过程与事件时代、性质^[18]。

Dodson et al.^[55]与Andersen^[56]的研究表明,随机选取35~70或更多个锆石颗粒测定U-Pb年龄基本能揭示其源区地壳的年龄结构,结合锆石微量元素与Lu-Hf数据有利于深入解释锆石年龄。

由于碎屑沉积岩/沉积物是对源区地壳组分的有效平均,按一定要求测定出的碎屑锆石U-Pb相应年龄段的众数基本上代表着源区此年龄段地质体所占的相对比例,对于一定时代的碎屑沉积岩中锆石U-Pb年龄按从老到新按各年龄锆石颗粒所占概率并计算累积概率就可以获得地质历史条件下源区地壳岩浆作用事件(碎屑沉积岩中的绝大多数锆石依据Th/U比值与结构判断多为岩浆成因^[39])随时间的变化规律。当然严格意义上,这种统计推断要求各地质体中锆石含量相等、接受风化剥蚀迁移的能力相同。但当结合全岩的Sm-Nd同位素组成及测定了锆石年龄相应结构域的Lu-Hf同位素组成时,即使可能有些岩石中不含锆石或风化、剥蚀迁移能力也存在差异,源区地壳的形成、演化历史仍能有效揭示出来^[57,58]。

碎屑沉积岩/沉积物中的锆石U-Pb年龄测定因为1个样品至少要测定35个以上锆石颗粒,要求快速、准确的分析测定方法。目前国内外普遍采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS),尽管此方法比灵敏高分辨离子探针(SHRIMP)、二次离子质谱(SIMS)的精确度稍低,但它在分析效率上远远胜出。测定过程中除了采集 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 信号外,还可得到U、Th、Pb及其他一些微量元素(如稀土元素)的含量,从而可得到 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 比值及相应的误差。根据这些比值及误差、扣除普通Pb的影响后,即可由衰变方程计算出相应的年龄。

$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄常用来校正普通Pb,一般不讨论其年龄意义。可比较 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 三个年龄之间的谐和度,一般对于年龄>1000 Ma锆石,用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来计算谐和度,并使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值,即两个年龄相除后乘以100;而

<1000 Ma锆石,用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 得到的两个年龄相除后乘以100,谐和度在90~110之间的数据说明所测锆石没有铅丢失;文献中也有以不谐和度来评判年龄的可靠性,即以1减去两个年龄相除所得值后乘以100,也就是不谐和度的绝对值 $\leq 10\%$,说明所测锆石没有铅丢失。在碎屑锆石的统计计算中,一些学者将这些限制可能有所放宽,如谐和度设定为80~120的数据可用。

在测定了锆石U-Pb年龄的相同结构域,可由多接收杯电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)测定锆石的Lu-Hf同位素组成。由锆石U-Pb年龄与所测得的Lu-Hf同位素组成,即可计算出锆石形成时相对于球粒陨石均一源的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的万分偏差,即 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 及锆石Hf同位素组成所确定的地壳存留时间,或二阶段亏损地幔模式年龄^[54]。在此计算中,球粒陨石均一源现今 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$;亏损地幔现今 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0385$;地壳平均的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 一般取0.015; ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ ^[16]。

3 实践

3.1 松潘—甘孜、西秦岭三叠纪碎屑沉积岩

Bruguier et al.^[59]、Weislogel et al.^[60]对甘孜—松潘三叠纪复理石沉积岩中的碎屑锆石最先进行颗粒U-Pb年龄测定,但由于其对中国地质资料的不充分掌握,仅根据所测的U-Pb年龄错误地推断这些碎屑沉积岩一些源于中朝克拉通南缘/华北地块。She et al.依据Nd同位素组成及碎屑沉积岩地球化学与岩石学特征对靠近东昆仑造山带南部巴彦喀拉山的甘孜—松潘复理石沉积物源区的推断来自于北部的东昆仑及东北部的南秦岭^[61]。

笔者对甘孜—松潘及龙门山碎屑沉积岩中锆石U-Pb年龄及系统的地球化学研究揭示,扬子克拉通的西、北缘,秦岭造山带是甘孜—松潘地块及龙门山中三叠统碎屑沉积岩主要物源;2800~2200 Ma的碎屑锆石源于扬子克拉通,但因为扬子克拉通经历了多期次的壳内过程,这些最古老的基底组分所占比例很低;2200~1400 Ma的锆石主要来源于秦岭造山带/扬子克拉通西北缘;新元古代—三叠纪年龄的碎屑锆石源于秦岭造山带及扬子克拉通的西、北缘;三叠纪的构造运动强烈而广泛,它导致秦

岭造山带与扬子克拉通的基底剥露及新生地壳组分剥蚀到东特提斯洋中^[57]。

我们对西秦岭在甘肃成县、武都、合作、麻当等地出露的不同时代碎屑沉积岩的地球化学与锆石 U-Pb 年龄系统研究揭示:西秦岭二叠纪以前的碎屑沉积岩的物源是秦岭造山带和/或扬子克拉通;二叠纪—三叠纪期间碎屑沉积岩源区发生了显著变化,北秦岭北缘的华北克拉通基底岩石对此时形成的碎屑沉积岩有重要的贡献,据 Nd 同位素估算,有高达 50% 的华北克拉通南缘的基底岩石组分存在于这些碎屑沉积岩中^[39]。对青海巴彦喀拉山共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩全岩 Nd 同位素组成、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的系统研究,证明主要来源于祁连、东昆仑与柴达木地块,它们与扬子克拉通的 Nd 模式年龄具类似性,地壳形成与演化历史类似于扬子克拉通,可能均是冈瓦纳大陆裂解增生到中国大陆的产物;锆石 U-Pb 年龄主要分布于 400~500 Ma、250~300 Ma,其次是 750~1000 Ma 新元古代,代表着祁连、柴北缘、东昆仑主要的构造岩浆作用期;1000~2700 Ma 古老锆石代表着祁连、柴达木、东昆仑的基底组分;锆石 Hf 同位素亏损地幔模式年龄主要为 1.7~2.5 Ga、2.8~3.6 Ga、1.0~1.7 Ga 3 个年龄段,相应的 U-Pb 年龄为 250~2500 Ma,表明它们是新元古代—早古生代地壳增生组分与古老地壳基底深熔组分的混合产物,晚古生代—早中生代的锆石大部分应是新元古代—早古生代增生地壳组分的熔融产物;共和—花石峡与西秦岭三叠纪碎屑沉积岩在物源上存在明显的差别,说明三叠纪时两沉积区物源上各自独立^[62]。

3.2 中亚造山带——以大兴安岭为例

对大兴安岭古生代碎屑沉积岩较为系统的地球化学与锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的系统研究,认识到志留纪—泥盆纪的碎屑沉积岩锆石 U-Pb 年龄呈多峰值分布,二叠纪的碎屑沉积岩锆石 U-Pb 年龄呈单峰式分布。据年龄对比及全岩 Nd 同位素组成,证明大部分锆石直接源于兴—蒙造山带,少量的来自于南蒙古微陆块或西伯利亚地块,而没有华北板块的物质贡献。锆石 Hf 同位素组成说明这些碎屑沉积岩源区地壳增生阶段发生于中—新元古代、古元古代及早—晚古生代。岩石学与地球化学证明这些古生代碎屑沉积岩的源区物

质是基本相等比例长英质的基底、部分熔融的镁铁质岩石及约 5% 的镁铁质岩石的直接风化产物。二叠纪时中亚造山带以强烈的弧岩浆作用为主,三叠纪时西伯利亚板块与华北板块之间的古亚洲洋消失并完成了碰撞作用^[63,64]。

通过对发源于大兴安岭的主要河流河漫滩沉积物地球化学与从其分离出的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的系统研究,揭示河漫滩沉积物的稀土和微量元素与大陆上地壳组成基本一致。不同地段的河漫滩沉积物微量成矿元素含量存在明显的差别,可能反映了不同地段不同元素成矿的差异。大兴安岭最南部的西拉木伦河无论是从 SiO₂ 含量还是 Nd 同位素组成上,均反映有华北板块北缘物质的明显贡献,西拉木伦河河漫滩沉积物碎屑锆石 Hf 模式年龄的理论模拟说明它是兴蒙带与华北板块北缘以 1:1 混合的结果^[65];最北部的南翁河 Nd 同位素组成表明有西伯利亚板块南缘前寒武纪微陆块物质的贡献。大兴安岭河漫滩沉积物全样 Nd 亏损地幔模式年龄平均值与锆石 Hf 同位素亏损地幔模式年龄基本一致,分别为 1.03 Ga、1.01 Ga。锆石 U-Pb 年龄最大值为 2473 Ma,对应的 Hf 亏损地幔模式年龄为 3.75 Ga,证明大兴安岭中古陆块基底是更老的陆块(3.75 Ga)在古元古代的壳内岩浆作用过程中形成的,中元古代开始古陆块从母陆块分离,可能是古亚洲洋打开的前奏。中新元古代—早古生代末是从亏损地幔增生到大兴安岭区域地壳事件的最强烈阶段,形成古亚洲洋的洋壳与底侵于古陆块中的超镁铁质—镁铁质岩类。晚古生代是古亚洲洋洋壳消减俯冲的主要阶段,至晚二叠世大洋消失殆尽进入到碰撞造山阶段。中生代受古太平洋构造域的影响,底侵于古陆块中的幔源物质发生部分熔融,同时也有少量基底物质卷入到此期岩浆作用中,形成占现今该区出露地壳近 80% 的印支—燕山期火山—侵入岩,但此时基本为一个没有亏损地幔来源的物质直接参与岩浆作用过程^[66]。

3.3 华北板块的形成与演化

在执行深部探测技术与实验研究的地壳全元素探测技术与实验示范项目中,笔者分别对东部、中部 2 个走廊带穿过渤海湾盆地古近系、鄂尔多斯盆地侏罗系的碎屑沉积岩及周缘相关岩石开展了较为系统的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素及全岩地

球化学研究。

3.3.1 华北板块北缘的形成与演化历史

图1是依据锆石U-Pb年龄获得的华北板块北缘的累积概率曲线,该曲线清楚表明2800~2200 Ma期间形成的锆石占了近30%,是该区地壳的主要岩浆作用阶段;2200~1800 Ma期间形成的锆石,已经累积到了70%,说明此阶段该区岩浆作用最为强烈,是最主要的一期造壳事件;而1000~800 Ma期间形成的锆石仅累积到85%以下,也就是在全区所占比例不到15%;最后在晚古生代—中生代期间(300~100 Ma)形成的岩浆锆石约占15%,全部年龄平均值为1837 Ma。地壳增生过程必定是通过岩浆作用,但并不是所有的岩浆作用都会使地壳增生,如壳内重熔作用过程。岩浆作用是否是地壳增生过程可以通过这些锆石的Hf亏损地幔模式年龄来判断。如果Hf亏损地幔模式年龄等于或接近锆石U-Pb

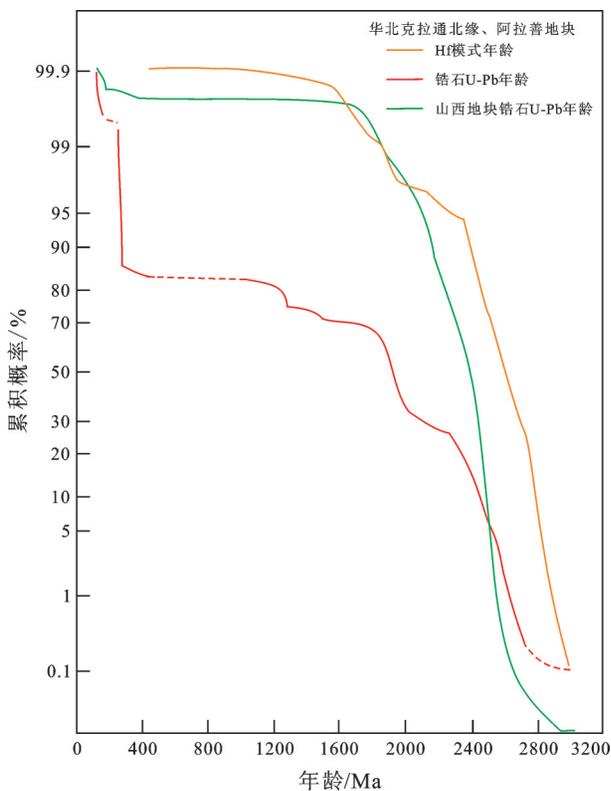


图1 华北板块北缘与山西地块锆石U-Pb年龄与Hf模式年龄累积概率曲线

Fig.1 Cumulative probability curves of zircon U-Pb ages and Hf model ages on the northern margin of the North China Craton and the Shanxi Block

年龄,说明该锆石或者直接源于幔源岩石或者是幔源岩石在地壳中极短时间滞留后就参与了壳内重熔作用。反之,如果锆石Hf亏损地幔模式年龄大于其U-Pb年龄,则说明该锆石是壳源岩石重熔作用的产物。图1为华北板块北缘U-Pb年龄测定过的Hf同位素亏损地幔模式年龄的累积概率曲线。427个颗粒得到的平均亏损地幔模式年龄为2.55 Ga,比锆石平均U-Pb年龄老,说明古元古代形成的锆石存在较多的古老地壳组分再循环组分。最强峰值在约2.8 Ga、其次是2.5~2.4 Ga、1.9~1.8 Ga、1.7~1.6 Ga。4.0~3.5 Ga的颗粒仅有4个,进一步说明该区冥古宙—太古宙早期的地壳组分极为有限的。锆石U-Pb年龄中500~100 Ma的峰值在Hf亏损地幔模式年龄中消失了,说明此阶段形成的锆石其岩浆作用主要是古老地壳再循环的产物。累积概率曲线表明,>3.0 Ga的锆石颗粒所占比例不到0.1%;3.0~2.25 Ga的颗粒则累积占近95%,说明该区地壳的增生主要发生于太古宙至古元古代;<2.25~1.5 Ga的颗粒则已经累积到99%以上,也就是说中元古代是区内另一次地壳增生期,但其强度有限,只占到全区的约4%;只有1个颗粒的亏损地幔模式年龄模式为新元古代—早古生代,在所有颗粒中所占的比例也不足0.1%。

山西地块1230个锆石U-Pb年龄得到的平均值为2242 Ma,较华北板块北缘的平均年龄偏老。年龄呈双峰式分布,在最强峰值约2500 Ma左侧还有2个次要的峰:约2150 Ma、约1900 Ma;另一峰分布于晚古生代—中生代,峰值年龄约为125 Ma。在山西地块中,1500~400 Ma、>3000 Ma的锆石年龄非常有限,>3000 Ma的锆石在山西地块中所占的比例可以忽略不计,3000~1700 Ma期间形成的锆石约占全区的95%;1700~400 Ma期间形成的锆石所占的比例基本可以忽略不计,也即此期间该区地壳基本没有增生;400~125 Ma期间形成的锆石约占全区的5%(图1),此期间,尤其是中生代是华北克拉通岩石圈减薄、置换、重新活化期。其Hf同位素累积概率曲线除了缺失2.0~1.5 Ga的峰以外,其他与华北板块北缘的类似^[67]。

笔者对发源于河北平泉的老哈河河流沉积物中的碎屑锆石U-Pb年龄与Hf同位素组成的系统研究表明:U-Pb年龄主要分布于2598~2370 Ma、

2087~1728 Ma、405~119 Ma 等 3 个 年 龄 段； 它 们 的 Hf 模 式 年 龄 峰 值 为 2.7 Ga 左 右。 源 区 最 强 烈 的 岩 浆 事 件 分 别 发 生 于 约 2.5 Ga、1.8 Ga， 得 到 的 华 北 板 块 东 北 缘 地 壳 的 壳-幔 分 离 时 间 大 约 为 2.7 Ga， 大 约 1.8 Ga 时 的 岩 浆 事 件 主 要 由 2.7 Ga 左 右 增 生 地 壳 组 分 的 重 熔 作 用 形 成。 2.9 Ga 时 的 地 壳 组 分 在 现 今 全 部 地 壳 中 仅 占 5%， 到 2.5 Ga 时 的 古 老 地 壳 组 分 在 现 今 全 部 地 壳 中 约 占 64%， 从 而 说 明 华 北 板 块 东 北 部 地 壳 的 增 长 是 不 均 一 的， 而 是 幕 式 增 长 的； 到 2.5~1.8 Ga 期 间 形 成 的 地 壳 约 占 现 今 地 壳 20%。 根 据 锆 石 Hf 模 式 年 龄 与 U-Pb 年 龄 得 到 了 华 北 板 块 东 北 缘 地 壳 演 化 与 各 时 期 再 循 环 率 的 变 化^[58](图 2)。

3.3.2 华北与扬子板块的碰撞

通过对鄂尔多斯盆地东胜、延安地区三叠纪—侏罗纪碎屑沉积岩系统的地球化学与锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成的研究，揭示东胜地区中侏罗统直罗组砂岩的蚀源区是孔兹岩带，狼山、阴山地体。而延安地区的中生代沉积物的蚀源区由两部分组成，一为华北板块，以 2.5~1.8 Ga 锆石 U-Pb 年龄峰值、Hf 模式年龄为 2.8 Ga 为特征；另一部分则为祁连—秦岭造山带，以 1500~600 Ma、500~100 Ma 的锆石 U-Pb 年龄峰，Hf、Nd 模式年龄低于 2.2 Ga 为特征。延安地区中生代沉积岩中 2.5~1.8 Ga 的锆石应由北部孔兹岩带，狼山、阴山地体提供，而不是华北中部造山带。延安地区晚三叠世晚期碎屑沉积岩的平均 Hf、Nd 模式年龄均为 2.03 Ga，且存在 1500~600 Ma 年龄峰值指示了华北与扬子板块的碰撞发生于此时。主碰撞事件后(由早侏罗世的样品

记录)，秦岭—祁连造山带中的物质贡献比例降低，响应于秦岭造山带的抬升速率减缓。但至中侏罗世早期时，沉积岩中 500~100 Ma 锆石 U-Pb 年龄大量出现，Hf、Nd 模式年龄分别降低至 1.17 Ga、1.13 Ga(图 3)，说明此时秦岭—祁连造山带可能快速抬升并接受剥蚀^[68]。

3.3.3 华北板块东部前寒武纪大陆地壳的形成与演化

通过对渤海湾盆地周缘出露的前寒武纪变质岩中锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成，结合华北板块东部已发表的数据，揭示华北板块东部最强烈的岩浆事件发生于约 2.5 Ga，其次是 1.8 Ga 左右。由 Hf 模式年龄估计的华北板块东部陆壳从地幔抽提时间大约为 2.8~2.7 Ga，与全球基本一致。近年来，大量 2.7 Ga 左右年龄的岩石在华北板块东部被识别出来。强烈与广泛叠加的约 2.5 Ga 的构造—热事件使华北板块东部与世界许多其他板块形成明显的差异。我们定量模拟计算结果表明，约 2.7 Ga 时华北板块东部的地壳重熔率最低(<13%)，证明此时是该板块地壳增生最强烈的阶段；约 2.9 Ga 时的重熔率达到 73%，说明此时主要是壳内岩浆作用事件。结合各时代重熔率与 Hf 模式年龄，我们得到约 2.8 Ga、约 2.7 Ga 时华北陆块的大陆地壳体积分别为 25%、23%，约 2.6 Ga 时形成的大陆地壳占 12%；而约 2.5 Ga 时形成的大陆地壳仅占 6%，与约 2.9 Ga 时形成的大陆地壳体积是相当的(图 4)。

3.4 扬子板块与秦岭—大别—苏鲁造山带

扬子板块、秦岭—大别—苏鲁造山带中有关岩

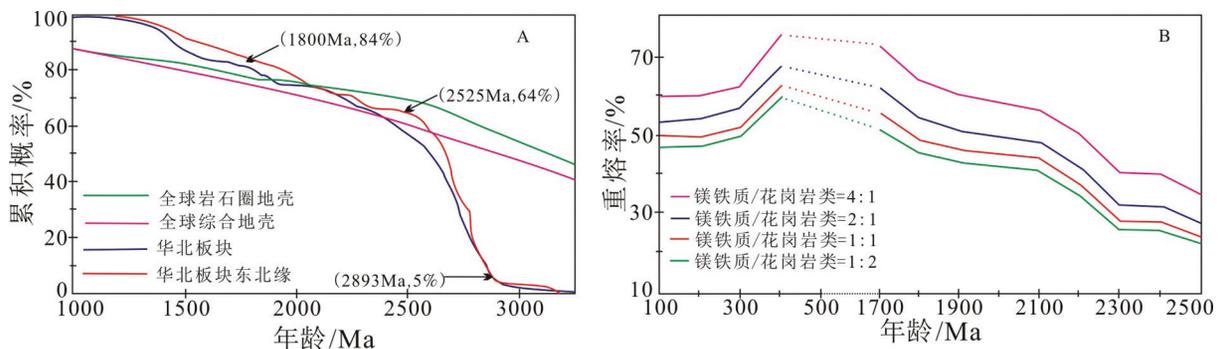


图 2 华北板块东北缘锆石 U-Pb 年龄累积概率曲线(A)与 Hf 同位素组成拟合的重熔率(B)

Fig.2 Cumulative probability curve (A) of zircon U-Pb ages and remelting rates (B) simulated by Hf isotopic composition on the northeastern margin of the North China Plate

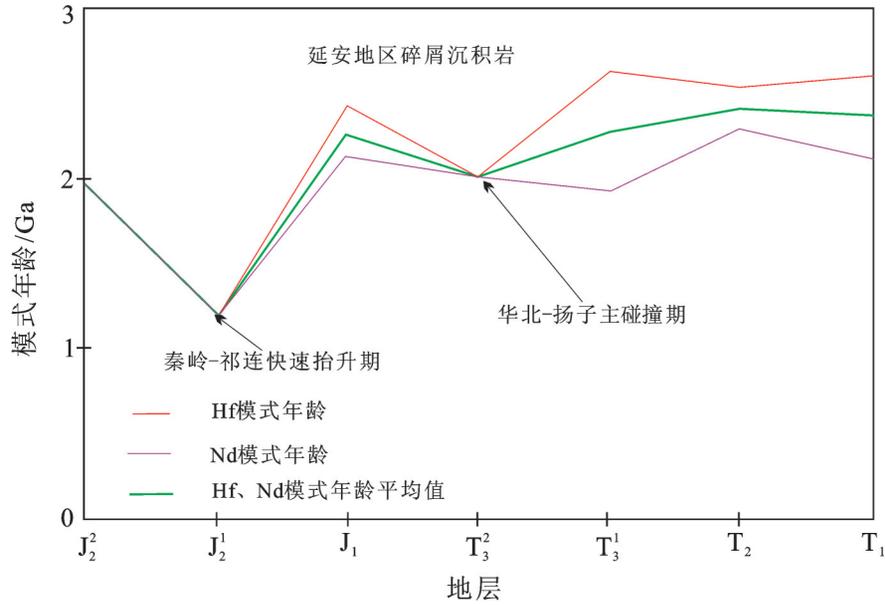


图3 鄂尔多斯盆地延安地区三叠系-侏罗系碎屑沉积岩Hf、Nd模式年龄变化
Fig.3 Variation of Hf and Nd model ages in Triassic-Jurassic strata of Yan'an area

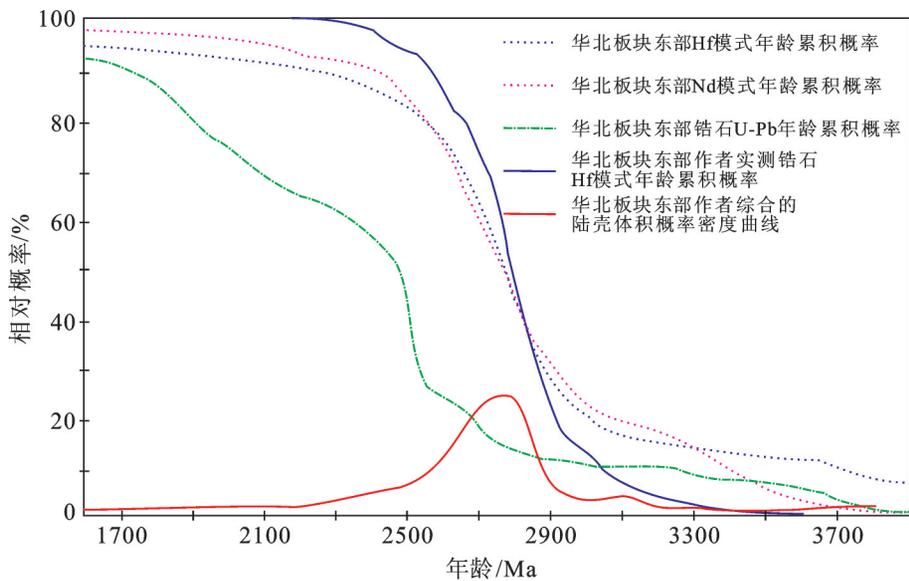


图4 由Hf模式年龄与锆石U-Pb年龄确定的华北板块东部前寒武纪陆壳形成与演化模式
Fig.4 Models of formation and evolution on Precambrian continental crust in eastern North China Craton through Hf model ages and U-Pb dating of zircons

石的Nd亏损地幔模式年龄直方图与>200Ma锆石U-Pb年龄的概率密度曲线如图5所示^[38],Nd亏损地幔模式年龄平均为1.56 Ga,明显较华北板块平均值(2.82 Ga)年轻;锆石U-Pb年龄概率密度曲线表明1300~750 Ma是该区地壳最强烈的岩浆活动期,

占全部年龄的70%;>3500 Ma的锆石几乎不存在,3500~2650 Ma、2118~1680 Ma该区有岩浆作用的记录,它们应记录扬子板块主要基底物质的形成时间,由于后期存在多次壳内岩浆作用,造成此期锆石所占比例约为5%;2650~2500 Ma、2319~2118

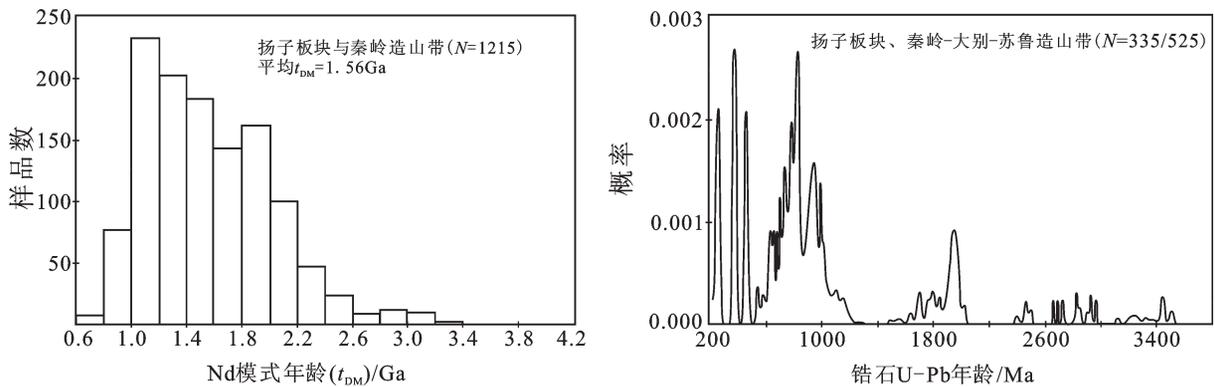


图5 扬子板块、秦岭—大别—苏鲁造山带Nd地幔模式年龄直方图与锆石U-Pb年龄概率密度曲线
Fig.5 Histogram of Nd model ages and probability density curve of zircon U-Pb ages for the Yangtze Plate, the Qinling-Dabie-Sulu Orogen

Ma、1680~1300 Ma 3个年龄段无锆石年龄记录；晚古生代—三叠纪构成区内次为强烈的岩浆活动期，此期锆石所占比例达20%。从而说明扬子板块、秦岭—大别—苏鲁造山带的岩浆活动具幕式特征，各岩浆事件主体发生时间与华北板块存在显著的差别；平均的壳—幔分异事件发生的时间明显晚于华北板块。

4 存在问题与思考

4.1 锆石U-Pb定年

尽管从统计学角度已经证明碎屑沉积岩/沉积物中锆石U-Pb年龄测定的最少颗粒数，但是自然界没有完全相同的两个锆石颗粒。一些颗粒具有多期生长、增生的现象，但现有仪器测定分辨率条件下，一些非常薄的增生区域，如 $<15\ \mu\text{m}$ （灵敏高分辨离子探针束斑），在锆石晶体半暴露条件下不能当作单一颗粒形式而无法获得可靠的年龄；但如果每个晶体不打磨直接测定颗粒从表面到内部的深度剖面年龄信息，一是会造成测试效率的大幅度下降，二是激光束或一次离子穿过不同结构域的混合区时给出的年龄是无意义的混合值，而且在缺少可靠证据时很难排除。因此，目前碎屑锆石年龄统计意义中，一些变质年龄或弱的锆石增生事件基本上没有得到记录，只反映了源区的主要岩浆作用的事件。

4.2 统计与实际的可能偏差

我们知道一些岩石在地表易于风化，而被剥蚀搬运；一些岩石的抗风化能力非常强，从而在河流

沉积物中所占的比例可能较低；一些岩石具有高的锆石含量，而另一些岩石基本不含锆石。这样将会造成不含锆石的岩石被风化、剥蚀时，在沉积岩/沉积物中无锆石年龄记录。这些问题会影响统计结果的进一步推断，现代河流沉积物对于第一个问题，可以与源区岩石的系统测定结果相结合，但对于地质历史上的沉积岩可能无法有效弥补。对于第二个问题，应该结合全岩/全样的Nd/Hf同位素组成，我们对鄂尔多斯中生代沉积岩研究中得到较好的印证。

4.3 地质过程的复杂性

尽管统计结果是地壳岩石大部分 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值在0.10~0.13的范围内，可以计算这些岩石从亏损地幔分异的模式年龄。但是统计多数幔源的镁铁质岩、超镁铁质岩，它们的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值多在0.15~0.22（据大洋地壳Sm、Nd含量换算）^[70]。众所周知，地球除了其大气圈、水圈、生物圈在太阳系的几大行星中是独特的外，其大陆地壳总体成分为安山岩/闪长岩质也是独特的。正是壳内多次的岩浆作用使幔源镁铁质、超镁铁质岩石的部分熔融产物保留在地壳中、熔融残余相部分拆层返回地幔，使地壳多数岩石的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值处于0.10~0.13的范围内。这就表明，所研究对象的Sm-Nd模式年龄一些可能确实代表了真实的壳—幔分异事件年龄，而一些可能是无实际意义的混合结果。尽管对于 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值不在0.10~0.13范围的研究对象，可

以用二阶段模式年龄来计算合理年龄值,但此模式假设该对象是在其形成时造成的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值异常,由于自然地质过程的复杂性,它也许是在对象形成前的一次或多次过程中的异常分馏,但遗憾的是,我们目前并没有先验标准来识别所研究对象所经历真实过程。因此,对于单个模式年龄的解释要慎重;对不同构造块体大量统计的结果,可以得到总体壳-幔分异事件的平均差异性,如华北板块与扬子板块之间。

通常,Sm-Nd与Lu-Hf同位素体系是同步变化的,即是耦合的,构成 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 之间的线性关系^[54]。但是,在一些条件下这两个同位素系统的演化不协调,而发生解耦的现象,如研究发现,在进变质作用过程中麻粒岩相变质条件下,石榴子石中这两个同位素体系存在解耦现象^[71]。因此,在研究中要将宏观与微观紧密相结合,如全岩尺度的Sm-Nd同位素组成代表了源区大量岩石的平均,为总体特征。而碎屑岩石/沉积物中的锆石的Lu-Hf同位素体系为微观表征,我们不能只顾微观而忽视了宏观,也不能只顾宏观而忽视了微观,鄂尔多斯盆地延安地区中生代沉积物将微观与宏观相结合有效地说明了物源变化与秦岭造山带的关系。

具有不同特征的两个块体在相互作用过程中必然涉及到物质与能量的交换,相互作用后的产物可能记录了这种交换,这是我们研究中要仔细加以甄别的。如胶东地区燕山期花岗岩中发现许多约800 Ma锆石颗粒,而这一年龄群在华北板块中基本不存在,这就说明扬子板块的物质在燕山期时可能处于华北板块南缘之下,并为这些花岗岩的形成提供了物质。在考虑物源关系时,不能简单地根据个别年龄值的对比下结论,而应考虑物源区的总体特征,如关于甘孜—松潘三叠纪复理石碎屑沉积岩的物源时,Bruguier^[59]、Weislogel^[60]仅根据2000~1800 Ma、2500~2400 Ma的锆石年龄就错误地推断物源区有华北阜平等地的物质贡献。首先,如果两物源区以1:1混合,将会使1000~800 Ma的年龄峰强度与2000~1800 Ma、2500~2400 Ma峰强度相当,同时还将造成三叠纪复理石沉积的Nd模式年龄大幅度增高;其次,正如图5所示,扬子板块、秦岭—大别造山带中就存在2000~1800 Ma、2500~2400 Ma的锆石年龄,而且各年龄段峰的强度与甘孜—松潘三叠

纪沉积物中碎屑锆石年龄分布是一致的。

5 结 论

碎屑沉积岩/沉积物蕴含着丰富的化学地球动力学信息,在研究工作中合理地将碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及全岩/全样Nd同位素组成及其他地球化学特征相结合就能解决地质-地球化学众多关键问题。通过我们的实践,主要得到以下结论:

(1) 碎屑沉积岩/沉积物中一定数量锆石颗粒U-Pb年龄的测定,可揭示源区地壳的主要岩浆作用事件的年龄,结合所测年龄结构域的Hf同位素组成可有效地揭示这些锆石的物源区特征,即亏损地幔来源还是壳内再循环作用的产物。

(2) 碎屑沉积岩/沉积物全样Nd同位素组成记录了源区地壳的平均壳-幔分异事件年龄,将Nd同位素亏损地幔模式年龄与锆石Hf同位素组成相结合,体现了宏观与微观、局部与整体相结合的科学研究方法,能有效地认识源区地壳的化学地球动力学过程。

(3) 由碎屑沉积岩/沉积物对兴蒙造山带、甘孜—松潘、华北鄂尔多斯盆地与东营拗陷、西秦岭等块体的形成与演化历史所进行的实践探索取得了较多新认识,且与已有的其他研究结果是可以相互印证的,证明所采用的理论、方法可行,且更为快速、经济地把握其源区地壳整体特征。

(4) 碎屑沉积岩/沉积物在识别物源、研究不同构造单元之间的相互作用、重建区域地壳的形成与演化历史中可发挥重要的作用,但一定要考虑地质过程的复杂性、宏观与微观、局部与整体的关系,避免管中窥豹而得出错误的认识或结论。

致谢:中国地质科学院地球物理与地球化学勘查研究所王学求研究员对深部探测专题执行给予了关心与指导,课题负责迟清华研究员对专题实施做出了不懈努力;匿名审稿专家对稿件的严格审阅使本文质量得到了显著改进,谨致谢忱!

参考文献(References):

- [1] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-311.
- [2] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33: 241-265.
- [3] McLennan S M. Relationships between the trace element

- composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 2001, 2: article no. 2000GC000109.
- [4] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[C]// Rudnick R L(ed.). *Treatise on Geochemistry, The Crust*, vol. 3. Oxford: Elsevier, 2004: 1–64.
- [5] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2005: 61–71.
Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Zhao Zhidan. *Isotopic Geochronology and Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 61–71(in Chinese).
- [6] 谢学锦, 吴传璧, 施俊法. 中国勘查地球化学50年回顾与今后展望[C]//二十世纪中国化探(1950–2000).北京:地质出版社, 2009: 3–15.
Xie Xuejin, Wu Chuanbi, Shi Junfa. *Geochemical exploration of China: Overview of past 50 years and outlook*[C]//Chinese Geochemical Exploration in 20th Century(1950–2000). Beijing: Geological Publishing House, 2009: 3–15(in Chinese).
- [7] 王学求, 申伍军, 张必敏, 等. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 116–123.
Wang Xueqiu, Shen Wujun, Zhang Biming, et al. Relationship of geochemical blocks and ore districts: Examples from Eastern Tianshan metallogenic belt, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5):116–123(in Chinese with English abstract).
- [8] 张翔, 刘建宏, 黎志恒, 等. 北祁连成矿带地球化学块体含矿性评价[J]. *地质与勘探*, 2006, 42(3): 42–48.
Zhang Xiang, Liu Jianhong, Li Zhiheng, et al. Ore-bearing potentials of geochemical blocks in the North Qilian metallogenic belt[J]. *Geology and Prospecting*, 2006,42(3):42–48(in Chinese with English abstract).
- [9] Iizuka T, Hirata T, Komiya T, et al. U–Pb and Lu–Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust[J]. *Geology*, 2005, 33(6):485–488.
- [10] Rino S, Komiya T, Windley B F. et al. Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands: Implications for mantle overturns in the early Precambrian[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146: 369–394.
- [11] McDaniel D K, McLennan S M, Hanson G N. Provenance of Amazon fan muds: constraints from Nd and Pb isotopes[C]// Flood R D, Piper DJW, Klaus A, et al.(eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 1997*:155:169–176.
- [12] Clift P D, Giosan L, Blusztajn J, et al. Holocene erosion of the Lesser Himalaya triggered by intensified summer monsoon[J]. *Geology*, 2008, 36:79–82.
- [13] Clift P D, Carter A, Campbell IH et al. Thermochronology of mineral grains in the Red and Mekong Rivers, Vietnam: Provenance and exhumation implications for Southeast Asia[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 2006, 7(10):Q10005, doi: 10.1029/2006GC001336.
- [14] Sherlock S C, Jones K A, Kelley S P. Fingerprinting polyorogenic detritus using the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ultraviolet laser microprobe[J]. *Geology*, 2002,30(6):515–518.
- [15] Amelin A, Lee D C, Halliday A N. Early–middle Archaean crustal evolution deduced from Lu–Hf and U–Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000,64 (24):4205–4225.
- [16] Harrison T M, Blichert-Toft J, Müller W, et al. Heterogeneous Hadean Hafnium: Evidence of Continental Crust at 4.4 to 4.5 Ga[J]. *Science*, 2005,310:1947–1950.
- [17] Valley J W, Lackey J S, Cavosie A J. et al. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2005,150:561–580.
- [18] 李献华, 李武显, 王选策, 等. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf–O 同位素制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(7): 872–887.
Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, et al. Role of mantle-derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: in situ zircon Hf–O isotopic constraints[J]. *Science in China (Series D)*, 2009, doi:10.1007/11430–009–0117–9(in Chinese with English abstract).
- [19] Allegre C J, Rousseau D. The growth of the continents through geological time studied by Nd isotope analysis of shales[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984,67:19–34.
- [20] Goldstein S L, O’Nion R K, Hamilton P J. A Sm–Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 70:221–236.
- [21] Amelin Y. A tale of early Earth told in zircons[J]. *Science*, 2005, 310:1914–1915.
- [22] Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L. et al. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf–isotope data[J]. *Lithos*, 2010,119:457–466.
- [23] Kröner A, Kovach V, Belousova E. et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2013, 25(1): 103–125.
- [24] Veevers J J, Saeed A, Belousova E A, et al. U–Pb ages and source composition by Hf–isotope and trace–element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and moder sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and dedudational history of the Yilgarn Craton[J]. *Earth–Science Reviews*, 2005, 68:

- 245-279.
- [25] Kuznetsov N B, Natapov L M, Belousova E A, et al. Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: implications for plate tectonic models[J]. *Gondwana Research*, 2010, 17:583-601.
- [26] Stewart R J, Hallet B, Zietler P K. et al. Brahmputra sediment flux dominated by highly localized rapid erosion from the easternmost Himalaya[J]. *Geology*, 2008, 36(9):711-714.
- [27] Bodet F, Schärer U. Evolution of the SE Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 2067-2091.
- [28] Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. Comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2008,163: 279-306.
- [29] Xia X P, Sun M, Zhao G C. et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 2006,144:199-212.
- [30] Xia X P, Sun M, Zhao G C. et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of the Ordos Terrane, Western Block of the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241: 581-593.
- [31] 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限制[J]. *科学通报*, 2003,48(18):1970-1975.
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda, Song Tianrui, et al. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changcheng System in the Ming Tombs area, Beijing: Constraints on the protolith nature and maximum depositional age of the Mesoproterozoic cover of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2500-2506.
- [32] 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[J]. *科学通报*, 2008, 53(16):1923-1934.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Yuan Honglin, et al. U-Pb ages and Hf isotopes for detrital zircons from quartzite in the Paleoproterozoic Songshan Group on the southwestern margin of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (18):2828-2839.
- [33] 董春艳, 刘敦一, 李俊建, 等. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成[J]. *科学通报*, 2007,52(16):1913-1922.
- Dong Chunyan, Liu Dunyi, Li Junjian, et al. Paleoproterozoic khondalite belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(21):2984-2994.
- [34] 刘敦一, 万渝生, 伍家善, 等. 华北克拉通太古宙地壳演化和最古老的岩石[J]. *地质通报*, 2007, 26(9): 1131-1138.
- Liu Dunyi, Wan Yusheng, Wu Jiashan, et al. Archean crustal evolution and the oldest rocks in the North China craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007,26(9):1131-1138(in Chinese with English abstract).
- [35] 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等. 乌拉山-集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄——孔兹岩沉积时限的年代学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11): 2639-2654.
- Wu Changhua, Sun Min, Li Huiming, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the khondalites from the Wulashan and Jining high-grade terrain in northern margin of the North China Craton: constraints on sedimentary age of the khondalite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2639-2654(in Chinese with English Abstract).
- [36] Darby B J, Geherels G. Detrital zircon reference for the North China block[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2006,26:637-648.
- [37] Wan Y S, Song B, Liu D Y. et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 2006,149:249-271.
- [38] Chen Y L, Li D P, Zhou J. et al. U-Pb dating, geochemistry, and tectonic implications of the Songpan-Ganzi block and Longmen Shan China[J]. *Geochemical Journal*, 2009,43:77-99.
- [39] 陈岳龙, 李大鹏, 周建, 等. 中国西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 88-107.
- Chen Yuelong, Li Dapeng, Zhou Jian, et al. U-Pb ages of zircons in Western Qinling Shan, China, and their tectonic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008,15(4):88-107.
- [40] Yang J, Gao S, Yuan H L. et al. Detrital zircon ages of Hanjiang River: Constraints on evolution of northern Yangtze Craton, South China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2007,18(3): 210-222.
- [41] 郭亮, 张宏飞, 徐旺春, 等. 黄河源头区碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(12): 1398-1408.
- Guo Liang, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, et al. U-Pb ages of detrital zircons in the Yellow River's source area and their geological significance[J]. *Progress in Natural Science*, 2008,18(3): 1398-1408(in Chinese).

- [42] 郑萍, 李大鹏, 陈岳龙, 等. 黄河口河流沙碎屑沉积物锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 现代地质, 2013, 27(1): 79-90.
Zheng Ping, Li Dapeng, Chen Yuelong, et al. Zircon U-Pb ages of clastic sediment from the outfall of the Yellow River and their geological significance[J]. *Geoscience*, 2013, 27(1):79-90(in Chinese with English Abstract).
- [43] 耿显雷, 高山, 陈晨. 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[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(3):483-499.
Geng Xianlei, Gao Shan, Chen Chen. 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[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(3):483-499(in Chinese with English abstract).
- [44] 孟宪伟, 杜德文, 陈志华, 等. 长江、黄河流域泛滥平原细粒沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 空间变异的制约因素及其物源示踪意义[J]. 地球化学, 2000, 29(6): 562-570.
Meng Xianwei, Du Dewen, Chen Zhihua, et al. Factors controlling spatial variation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the fine-grained sediments from the overbanks of the Yellow River and Yangtze River and its implication for provenance of marine sediments[J]. *Geochemica*, 2000, 29(6): 562-570(in Chinese with English abstract).
- [45] 贾军涛, 郑洪波, 杨守业. 长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(9): 1375-1380.
Jia Juntao, Zheng Hongbo, Yang Shouye. Rock types in Yangtze drainage and their implications for zircon U-Pb provenance study of the Yangtze sediments[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2010, 38(9):1375-1380(in Chinese with English abstract).
- [46] 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J]. 科学通报, 2010, 55(4/5):350-358.
Jia Juntao, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15):1520-1528.
- [47] DePaolo D J. Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic[J]. *Nature*, 1981, 291:193-196.
- [48] Hofmann A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements[C]//Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier Ltd., 2003, Vol.2, 61-101.
- [49] 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1996, 12(3):359-369.
Li Xianhua, McCulloch M T. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(3): 359-369(in Chinese with English abstract).
- [50] Nelson B K, DePaolo D J. Rapid production of continental crust 1.7 to 1.9 b.y. ago: Nd isotopic evidence from basement of the North American mid-continent[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96:746-754.
- [51] 陈岳龙, 杨忠芳. 一个由分馏引起的 Sm-Nd 模式年龄误差公式的更正[J]. 地质论评, 1997, 43(1): 52-57.
Chen Yuelong, Yang Zhongfang. The correction of the error equation on the Sm-Nd model age caused by fractionation[J]. *Geological Review*, 1997, 43(1): 52-57(in Chinese with English abstract).
- [52] Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, Kinny P. Atlas of Zircon Textures[C]//Hancher J M & Hoskin P W O(eds.). *Zircon, Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53:470-500.
- [53] Herman L M, LeCheminant A N. Paragenesis and U-Pb systematics of baddeleyite (ZrO_2) [J]. *Chemical Geology*, 1993, 110:95-126.
- [54] 张德会, 赵伦山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 329-383.
Zhang Dehui, Zhao Lunshan. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 329-383(in Chinese).
- [55] Dodson M H, Compston W, Williams I S. A search for ancient detrital zircons in Zimbabwean sediments. *Journal of Geological Society London*, 1988, 145:977-983.
- [56] Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. *Chemical Geology*, 2005, 216:249-270.
- [57] Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb dating, geochemistry, and tectonic implications of the Songpan-Ganzi block and Longmen Shan, China[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43:77-99.
- [58] Bao C, Chen Y L, Guo R, Li D P. Growth rate of continental crust in the northeast margin of the North China Craton: Constraints from the U-Pb dating and Lu-Hf isotopes of detrital zircons from the Laoha River[J]. *Geochemical Journal*, 2013, 47:547-565.
- [59] Bruguier B C, Lancelot J R, Malavieille J. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganzi flysch Central China: provenance and tectonic correlations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 152:217-231.
- [60] Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: Sedimentary record of collision of the North and South China blocks[J]. *Geology*, 2006, 34:97-100.
- [61] She Z B, Ma C Q, Mason R, Li J W. Provenance of the Triassic

- Songpan-Ganzi flysch, west China[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231:159-175.
- [62] 陈岳龙, 周建, 皮桥辉, 等. 青海共和-花石峡三叠纪碎屑沉积岩的地球化学特征与锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16(2): 161-174.
- Chen Yuelong, Zhou Jian, Pi Qiaohui, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of clastic sedimentary rocks in the Gonghe Huashixia area, Qinghai Province and their geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2):161-174(in Chinese with English abstract).
- [63] Li D P, Chen Y L, Wang Z, et al. Detrital zircon U-Pb ages, Hf isotopes and tectonic implications for Palaeozoic sedimentary rocks from the Xing-Meng Orogenic Belt, Middle-East Part of Inner Mongolia, China[J]. *Geological Journal*, 2011, 46: 63-81.
- [64] Li D P, Chen Y L, Wang Z, et al. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(7): 776-785.
- [65] 包创, 陈岳龙, 李大鹏. 内蒙古西拉木伦河河漫滩沉积物碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9):3159-3172.
- Bao Chuang, Chen Yuelong, Li Dapeng. U-Pb ages, Hf isotopic composition and its geological significance of detrital zircons in the floodplain sediments from the Xar Moron River, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9):3159-3172(in Chinese with English abstract).
- [66] 陈岳龙, 李大鹏, 刘长征, 等. 大兴安岭的形成与演化历史: 来自河漫滩沉积物地球化学及其碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成的证据[J]. *地质学报*, 2014, 88(1): 1-14.
- Chen Yuelong, Li Dapeng, Liu Changzheng, et al. Formation and evolution history of the Da Hinggan Mountains: Evidence from geochemistry of rivers' overbank sediments, their zircon U-Pb ages, and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(1):1-14(in Chinese with English abstract).
- [67] 陈岳龙, 李大鹏, 王忠, 等. 鄂尔多斯周缘地槽形成与演化历史: 来自锆石U-Pb年龄与Hf同位素组成的证据[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3):147-166.
- Chen Yuelong, Li Dapeng, Wang Zhong, et al. History of formation and evolution on the crust around the Ordos basin: Evidences from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircons[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3):147-166(in Chinese with English abstract).
- [68] Bao C, Chen Y L, Li D P, et al. Provenance of the Mesozoic sediments in the Ordos Basin and implications for collision between the North China Craton (NCC) and the South China Craton (SCC)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96:296-307.
- [69] Bao C, Chen Y L, Li D P, et al. Evolutionary history of Precambrian continental crust in the North China Craton[J]. *Geochemical Journal*, 2015, 49:53-62.
- [70] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012:61.
- Zhang Hongfei, Gao Shan. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012:61(in Chinese with English abstract).
- [71] Smit M A, Scherer E E, Mezger K. Lu-Hf and Sm-Nd garnet geochronology: Chronometric closure and implications for dating petrological processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 381 :222-233.