

内蒙古林西地区上二叠统一中三叠统沉积序列的碎屑锆石记录及对古亚洲洋(东段)闭合时间的制约

朱俊宾, 和政军

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:晚二叠世—中三叠世在中亚造山带东段构造演化过程中是重要的转折期, 它涉及古亚洲洋的最终闭合、沉积环境剧变等重大地质问题, 而上二叠统林西组和中一下三叠统幸福之路组沉积序列记录了相应的构造演化过程。笔者对内蒙古东南部林西地区出露良好的林西组与幸福之路组, 采取砂岩样品进行碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究, 解析年代学、沉积物源等信息。研究显示, 被认为是三叠系标志层的陆相红色砂泥岩始现于晚二叠世。幸福之路组细砾岩样品最年轻碎屑锆石年龄为 241Ma, 从而将地层沉积时代上延至中三叠世后期。它与下伏林西组为整合接触关系, 但在幸福之路组下部地层中发现微角度不整合, 沉积时代存在间断(早、中三叠世之间)。林西组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄组成分为 4 组: 254~336Ma、372~528Ma、669~1000Ma 和 1300~2534Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大(-25.6~+17.2)。幸福之路组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄集中于 241~278Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值=+8.6~+16.5, 其石炭纪和古元古代碎屑锆石少量。对比研究显示, 林西组砂岩除兴蒙造山带物源外, 还含有大量华北克拉通物源。与之相反, 幸福之路组砂岩物源主要来自林西周边岩浆岩。结合区域地质特征, 笔者认为古亚洲洋闭合于晚石炭世之前, 晚古生代末是残余陆表浅海环境。内蒙古东南部地区在晚石炭世以来, 表现为西伯利亚和华北克拉通联为一体后的陆内裂陷沉积活动及岩浆活动。

关键词:碎屑锆石; U-Pb 和 Hf 同位素; 物源分析; 中亚造山带

位于西伯利亚克拉通与中朝、塔里木克拉通之间的中亚造山带(CAOB)或中亚—蒙古造山带, 是全球最大的古生代造山带, 也是全球显生宙地壳垂向增生最显著的地区之一, 其组成结构和演化历史均十分复杂(Sengör et al., 1993; Jahn et al., 2000; Li Jinyi, 2006; Windley et al., 2007)。它以多岛弧系统、众多蛇绿岩、蓝片岩带和古生代弧盆为特征(Xiao Wenjiao et al., 2003, 2009)。

内蒙古东南部地区属于中亚造山带东段, 也称兴蒙造山带或中亚—蒙古造山带(Ren Jishun et al., 1992), 著名的索伦缝合带经过该区(Xiao Wenjiao et al., 2003)(图 1)。长期以来该区被认为是古亚洲洋最后消亡所在地(Wang Quan et al., 1986; Chen Bin et al., 2009; Jian Ping et al., 2010; Zhang Xiaohui et al., 2015)。有关古亚洲洋最后消亡的时间问题一直存在争议, 主要有以下两种意见: 一部分学者认为古亚洲洋闭合于石炭纪之前或更早(Tang Kedong, 1990; Tong Ying et al., 2015; Xu

Bei et al., 1997), 石炭纪或晚泥盆世以来内蒙古地区进入洋盆封闭后的演化阶段; 还有一部分学者认为, 自显生宙以来, 西伯利亚克拉通与华北克拉通的边缘不断相对增生, 直至晚古生代末或中生代初期才对接形成一个大陆(Wang Quan et al., 1986; Chen Bin et al., 2009; Xiao Wenjiao et al., 2003, 2009; Li Jinyi, 2006; Li Jinyi et al., 2007; Miao Laicheng et al., 2008)。鉴于此, 内蒙古东南部地区晚古生代大地构造研究已成为关键所在。

锆石的 U-Th-Pb 同位素体系具有较高的封闭温度(Cherniak et al., 2000), 以及较强的抗风化和抗干扰性, 它通常可以保存源区原岩的年龄记录。利用碎屑锆石进行物源分析, 对了解盆地演化过程、与造山带相对位置及相互作用方面意义重大, 已成为区域大地构造研究的重要手段。然而, 锆石的 U-Pb 年龄可能会受到后期构造热事件的影响, 而不能正确代表原岩年龄。Lu-Hf 同位素系统则基本不受此影响, 同时还能反映地壳演化的信息。利用锆石

注: 本文为中国地质调查局项目(编号: 12120113013700、12120113013800)资助的成果。

收稿日期: 2015-12-10; 改回日期: 2016-04-18; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 朱俊宾, 男, 1984 年生。博士后。构造地质学专业。通讯地址: 100037, 中国地质科学院地质研究所; E-mail: zhujunbin0819@163.com。

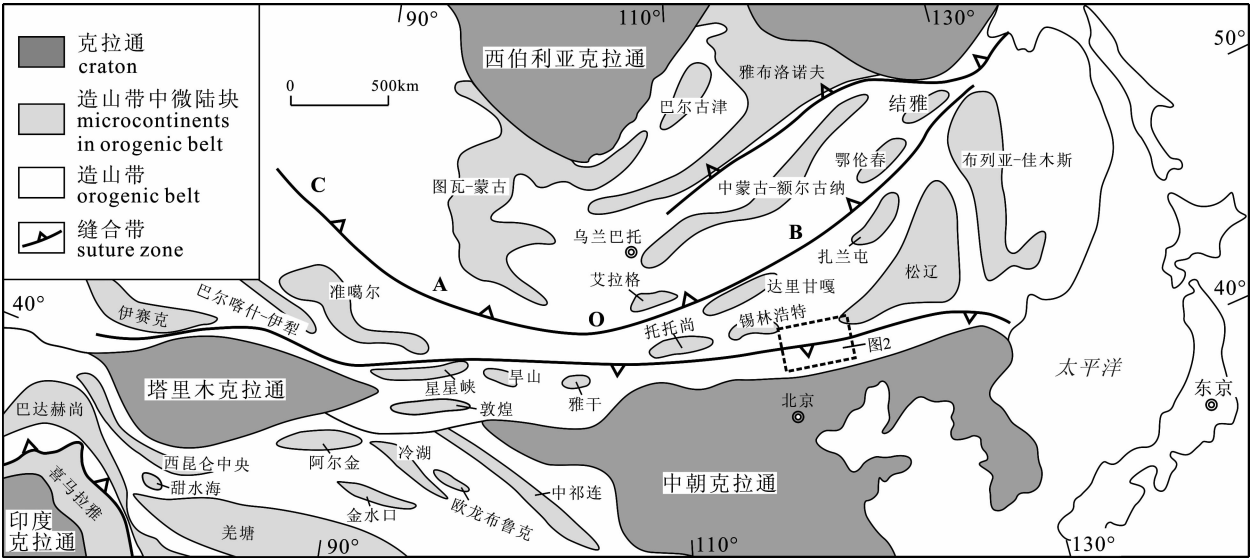


图 1 东亚主要构造单位图(据 Ren Jishun et al. ,1999 修改)

Fig. 1 Major tectonic units of East Asia, modified from Ren Jishun et al. (1999)

U-Pb 定年与 Hf 同位素相结合的分析、测试技术,可以更精确地反映沉积物源和陆壳生长等信息(Iizuka et al. ,2005)。

内蒙古东南部碎屑锆石相关的研究工作主要集中于中、晚二叠世沉积岩,对晚二叠世沉积地层与早三叠世沉积地层之间的关系以及物源情况等缺乏系统工作。而晚二叠世一中三叠世在中亚造山带东段构造演化过程中是承上启下的关键地质时期,它涉及古亚洲洋闭合、沉积环境剧变等重大问题。因此,本文从上二叠统林西组和中一下三叠统幸福之路组碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究入手,开展相关沉积序列与物源体系对比,解析该区地球动力学信息,为这一时期的盆山演化过程及古亚洲洋最终闭合等问题提供新依据。

1 地质概况及样品描述

兴蒙造山带(东段)是由众多微型块体拼贴而成的造山带,包括锡林浩特地块、松辽地块、布列亚-佳木斯地块等(图 1)。内蒙古东南部地区属于兴蒙造山带东段,以发育 NEE 向地质构造单元为特征,包括数条蛇绿岩带、岩浆弧、增生楔和火山-沉积岩。它的北部是华力西造山带,南部是加里东造山带,中间区域则叠加了印支造山作用(Ren Jishun et al. ,1992)。

研究区地理位置处于内蒙古东南部林西县-巴林右旗一带(图 2)。有学者认为,林西至索伦敖包一线的索伦缝合带(Solonker)是西伯利亚与华北两大克拉通于晚二叠世末(或早三叠世初)最终碰撞、

闭合之地(Xiao Wenjiao et al. ,2003,2009; Jian Ping et al. ,2010)(图 1)。索伦缝合带东西长约 900km,南北宽约 60km,它由磨拉石、残余岩浆弧和蛇绿岩组成。缝合带北侧是宝力道岛弧增生杂岩,南侧西拉木伦河一带则属于温都尔庙俯冲-增生杂岩带。宝力道杂岩包括岛弧岩浆岩和前寒武纪地体,前者形成时代是晚石炭世约 310Ma,后者指锡林浩特杂岩(Chen Bin et al. ,2009)。宝力道至锡林浩特地区还存在长约 250km 的北倾逆冲断裂带,指示向北的板块俯冲活动(Xu Bei et al. ,1997)。也有学者认为,内蒙古东南部地区在晚古生代属于残余陆表海盆。二叠世以来,随着陆壳的抬升,海水逐渐退却,并于林西一带最后消失。晚二叠世一早、中三叠世时期进入陆内造山演化阶段(Xu Bei et al. ,2014)。

林西地区出露地层包括元古界、志留系、二叠系、三叠系和侏罗系(图 2)。元古代地层出露于林西县西北,称锡林浩特变质杂岩(或宝音图群)。它由黑云石英片岩、二云石英片岩、石英岩以及少量黑云斜长片麻岩组成。志留系杏树洼组分布于西拉木伦河北岸双井子一带,富含珊瑚化石(BGMRNM,1996)。

二叠系分布广泛,包括下二叠统大石寨组、中二叠统哲斯组、于家北沟组 and 上二叠统林西组。大石寨组由中酸性熔岩、火山碎屑岩和凝灰质砂岩、砂岩等组成,其火山岩具有双峰式裂谷成因特征(Zhang Xiaohui et al. ,2008; Shao Ji'an et al. ,2014)。中二叠统哲斯组,分布于西拉木伦河以北地区,岩性主体是生物碎屑灰岩、灰岩、粉砂岩、长石砂岩和砂砾岩等,属于滨浅海相沉积。中二叠统于家北沟组分

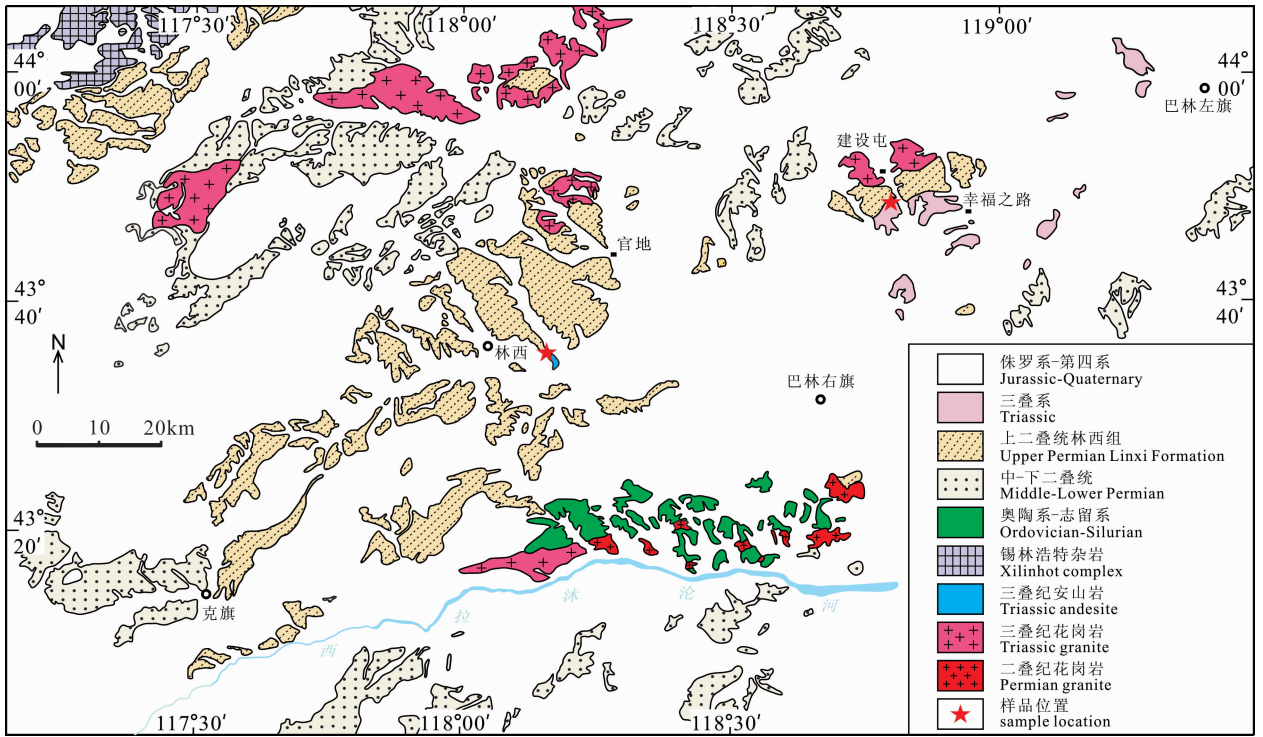


图 2 内蒙古林西地区地质略图^{①②}

Fig. 2 Geological sketch map of the Linxi region in Inner Mongolia^{①②}

布于西拉木伦河以南地区(时代与哲斯组相当),包括粉砂岩、砂岩、凝灰质砂岩、砾岩夹少量中酸性火山岩,含植物和腕足类化石丰富(图 3)。上二叠统林西组主要分布于林西县官地镇一带,以深灰色板岩、灰黑色页岩、砂岩和砾岩的岩石组合为特征,产淡水双壳类 *Palaeomutela-Palaeonodonta* 组合(BGMRNM,1996)。在林西县南黑山头地区林西组含紫红色泥岩、泥质砂岩、砾岩和灰色砂页岩、砂岩(图 4a,b),上部被三叠纪安山岩(Liu Yongsheng et al.,2012)覆盖(图 4c)。

幸福之路组(或老龙头组),在林西和巴林右旗地区均有出露,它以紫红色河、湖相沉积为特征。林西官地镇一带岩性为灰绿色、紫色板岩和岩屑砂岩(Yang Bing et al.,2014),巴林右旗一带则为紫红色砂砾岩、砂岩、泥岩和灰白色长石砂岩、灰绿色钙质粉砂岩(图 4d,e,f),水平层理、斜层理、泥裂和波痕等沉积构造常见,并含早三叠世叶肢介化石(He Zhengjun et al.,1997)。

用于碎屑锆石测试的 5 件样品分别采自林西县东南黑山头和林西县东北幸福之路乡(图 2,3),采样坐标: E118°10′20.9″; N43°34′55.0″(样品编号 14LX1)和 E118°10′30.9″; N43°34′57.6″(样品编号 14LX2)、E118°48′25.9″; N43°48′6.2″(样品编号

14XF1、14XF2 和 14XF3)。样品 14LX1 是黄绿色中细粒砂岩,由石英(40%)、岩屑(15%)、长石(25%)和基质组成。样品 14LX2 是灰色中细粒砂岩,中细粒砂状结构,由石英(20%)、长石(40%)、岩屑(20%)和基质组成。样品 14XF1 是黄绿色粉砂岩,由细颗粒石英、长石及黏土矿物组成。样品 14XF2 是灰白色中细粒长石砂岩,由长石(40%)、石英(30%)、中酸性熔岩岩屑(20%)和基质组成。样品 14XF3 是紫灰色含砾粗砂岩,不等粒砂状结构,由安山岩砾石(10%)、岩屑(30%)长石(25%)、石英(20%)和基质组成。

2 分析测试方法

锆石挑选工作由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。采用常规方法将砂岩样品粉碎至 300 μ m 左右,经淘洗、重选富集,再经磁选和密度分选后,在双目镜下挑选出锆石颗粒。然后将挑选出的锆石颗粒粘帖制成环氧树脂样品靶,进行打磨、抛光使锆石露出新鲜截面,以供透射、反射和阴极发光(CL)照相及 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素测试。部分代表性锆石 CL 图像见图 5。

碎屑锆石 U-Pb 测年在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。实验采用激光剥蚀等离子体质谱

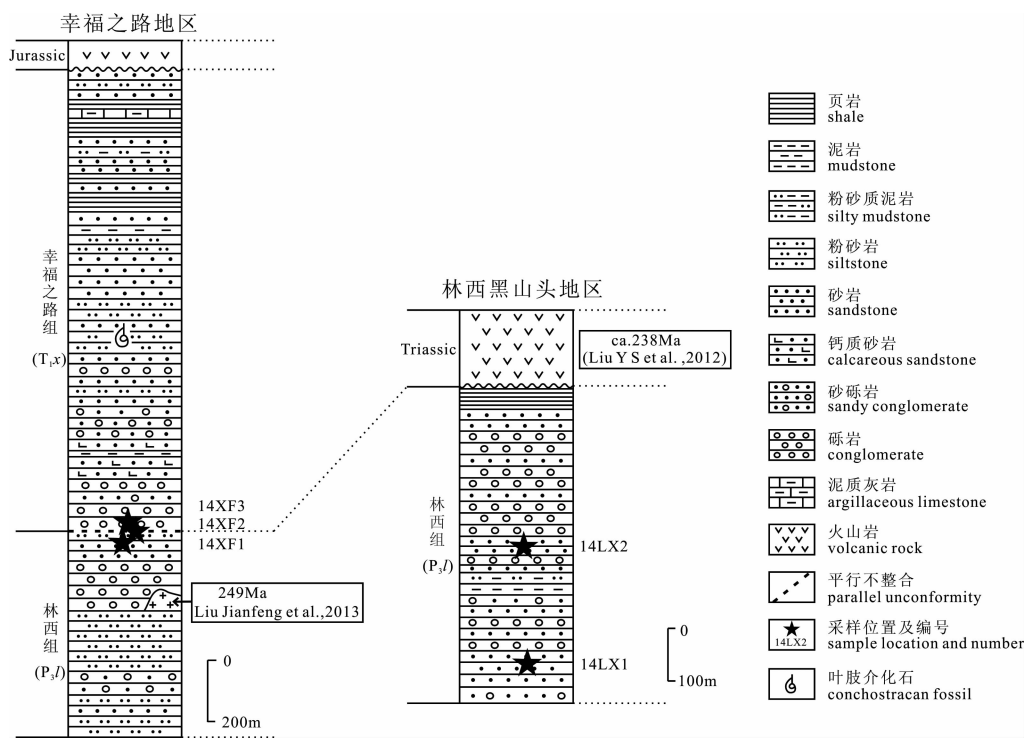


图 3 上二叠统林西组与下三叠统幸福之路组沉积序列

Fig. 3 The sedimentary sequences of Upper Permian Linxi Formation and Lower Triassic Xingfuzhilu Formation

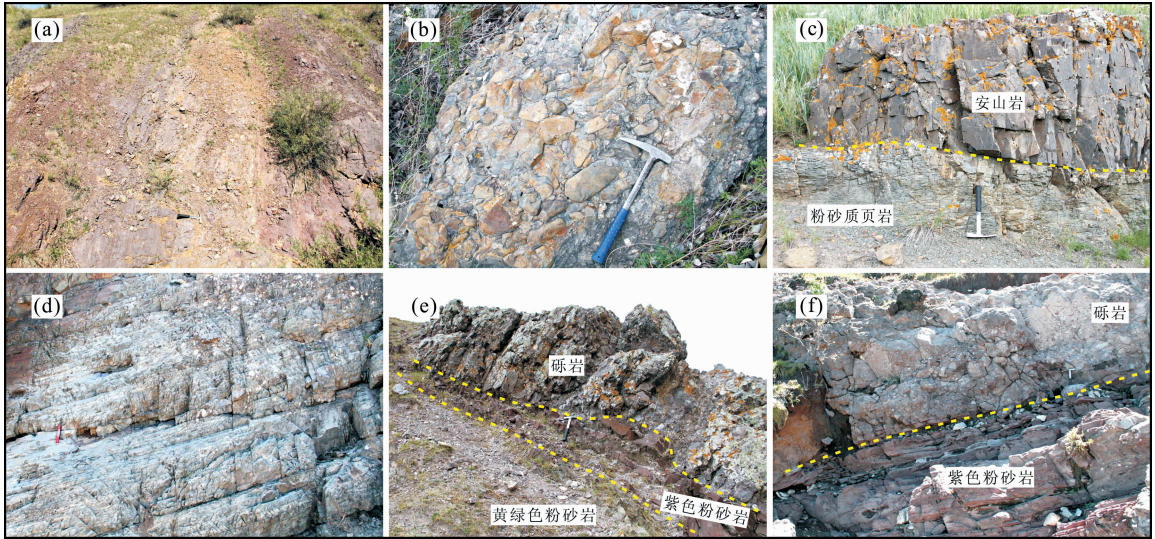


图 4 林西组与幸福之路组野外照片

Fig. 4 Field photographs for the Linxi and Xingfuzhilu formations

分析技术(LA-MC-ICP-MS),多接收电感耦合等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune。激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX 准分子激光器,激光波长 193nm,脉冲宽度 5ns,斑束直径为 35 μ m 或 50 μ m,能量密度 13-14J/cm²,频率 8-10Hz。激光剥蚀物质以氦为载气送入 Neptune,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素,从而进行锆石 U-Pb

同位素测定。采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标样,利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。年龄计算采用国际标准程序 Isoplot。

年龄大于 1000Ma 时采用 $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 计算方法,年龄小于 1000Ma 时则采用 $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 方法分别计算锆石测年结果的谐和度。将谐和度在 90%~110%之外

的数据视为无效年龄。选取具有有效年龄的锆石颗粒进行 Hf 同位素测试, Hf 同位素分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点位于同一颗锆石晶体内部, 即在 U-Pb 年龄测试的同一点位或附近。

锆石 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 定年测试使用同一台激光剥蚀系统。测试使用激光束斑直径 50 μ m, 激光剥蚀时间为 26s, 测试时采用锆石 GJ-1 标准, 实验分析流程和校正参见 (Geng Jianzhen et al., 2011)。锆石 Hf 同位素两阶段亏损地幔模式年龄计算过程中, 亏损地幔现今 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$)_{DM} = 0.0384、($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_{DM} = 0.28325; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中, 采用球粒陨石现今 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$)_{CHUR} = 0.0332、($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_{CHUR} = 0.282772 (Blichert-Toft et al., 1997)。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

3.1.1 晚二叠世林西组

样品 14LX1 测试锆石 73 颗, 获得有效数据 46

个。锆石年龄分布范围介于 260~1772Ma 之间, 年龄峰值集中于 260~345Ma 和 443~528Ma, 最年轻锆石年龄是 260Ma (图 7, 8)。260~345Ma 区间的碎屑锆石 21 颗, Th/U 比值除 64 号测点外, 其余均大于 0.4, 且岩浆振荡环带清晰, 属于岩浆成因锆石。443~528Ma 区间的碎屑锆石 12 颗, 在阴极发光照片中颜色相对较深, Th/U 比值 0.13~0.68, 岩浆环带相对较弱, 也属于岩浆成因锆石。中一新元古代锆石 ($n=13$) 较为分散, 从 754Ma 至 1772Ma 均可见。Th/U 比值 0.18~0.94 (大于 0.4 的锆石 9 颗), 大部分具有清晰岩浆振荡环带, 以岩浆成因锆石为主。样品 Th/U 比值参见图 6。

样品 14LX2 获得 80 个有效年龄数据, 分布范围介于 265~1867Ma 之间。可分为 265~316Ma ($n=38$)、431~510Ma ($n=25$) 和 669~1867Ma ($n=17$) 三组锆石年龄 (图 7, 8)。其中, 显生宙锆石具有十分清晰的岩浆振荡环带, Th/U 比值 0.23~1.34 (图 6), 为岩浆成因锆石。元古代锆石中, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

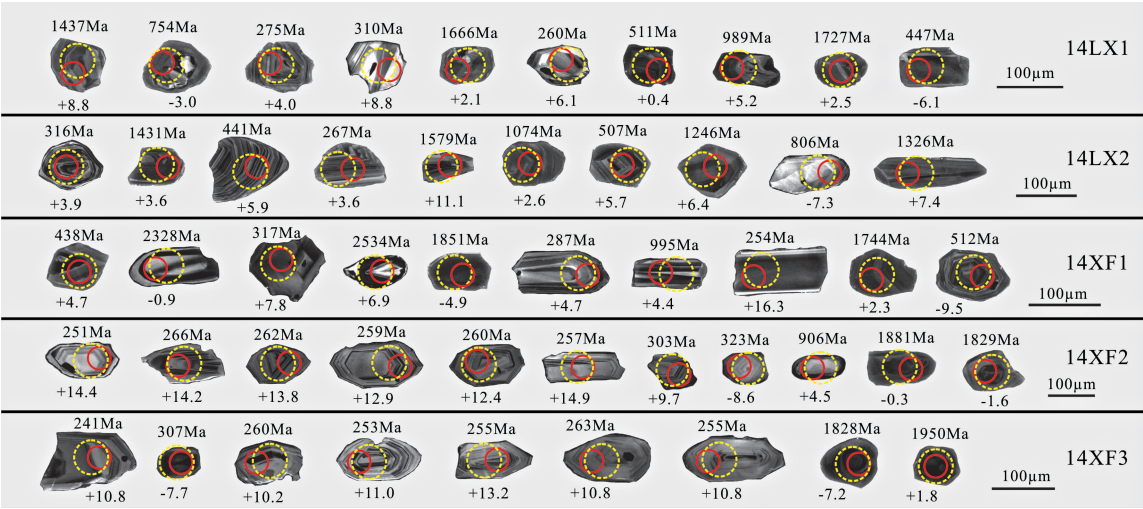


图 5 部分代表性碎屑锆石 CL 图像 (红圈代表测年点位置、黄圈代表 Hf 同位素测试位置)

Fig. 5 Representative CL images of detrital zircons for sedimentary rocks

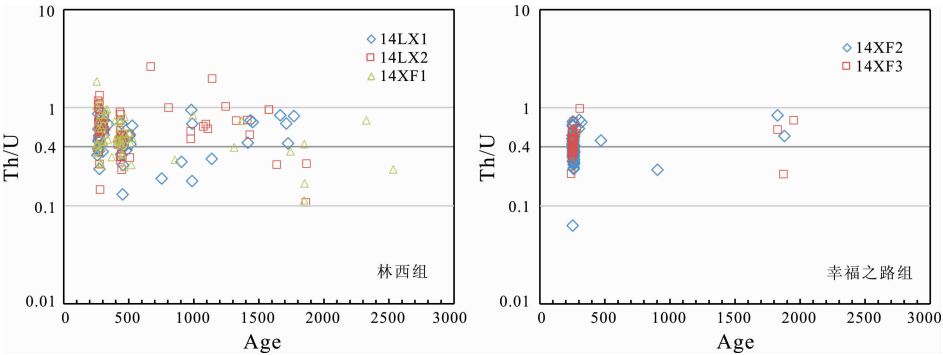


图 6 样品 Th/U 比值与 U-Pb 年龄关系图

Fig. 6 Zircon age and Th/U relationship diagrams for sedimentary rocks

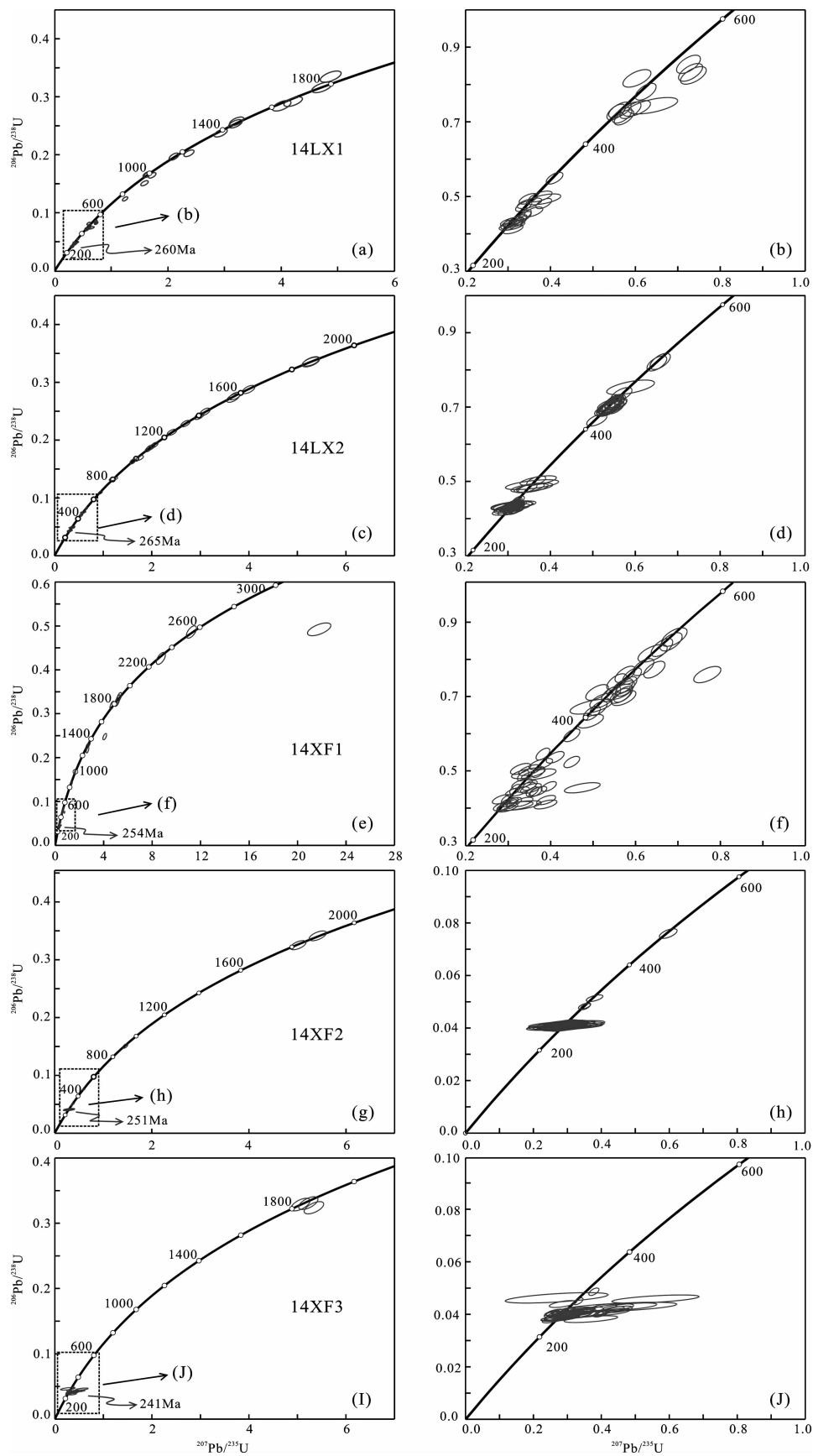


图 7 样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 U-Pb concordia diagrams of detrital zircons from sedimentary rocks

年龄为 1863Ma 的锆石(测点号 78)Th/U 比值低(0.11),锆石 CL 照片中颜色深,且不具有岩浆振荡环带,可能属于变质锆石。其余锆石 Th/U 比值为 0.26~2.61,具有弱或清晰的岩浆振荡环带,指示岩浆成因锆石。

样品 14XF1 测试锆石 72 颗,有效数据点 58 个(图 7,8)。锆石年龄介于 254~2534Ma 之间,可分为 254~341Ma($n=24$)、372~528Ma($n=24$)和 858~2534Ma 等 3 组。其中,年龄区间在 254~341Ma 之间的碎屑锆石 Th/U 比值较大(0.26~1.8)(图 6),岩浆振荡环带清晰,属于岩浆成因锆石。年龄区间在 372~528Ma 之间的锆石 Th/U 比值 0.25~0.81,大部分具有岩浆振荡环带,也是岩浆成因锆石。年龄区间在 858~2534Ma 之间的锆石包括新元古代锆石两颗($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 858Ma 和 995Ma)、中元古代锆石两颗($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1312Ma 和 1369Ma)、古元古代锆石 5 颗

($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1744Ma、1851Ma、1852Ma、1853Ma 和 2328Ma)以及太古代锆石 1 颗($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2534Ma)。中—新元古代锆石岩浆振荡环带清晰,Th/U 比值为 0.29~0.83,显示岩浆成因锆石特征。部分古元古代锆石 CL 照片中颜色较深,不具有岩浆环带,且 Th/U 比值低,可能为变质成因锆石。太古代锆石由核部、生长边和反应边三部分组成。

3.1.2 早—中三叠世幸福之路组

样品 14XF2 获得有效年龄数据 95 个。锆石年龄分布于 251~1881Ma 之间,可进一步分为 251~266Ma($n=88$)、303~472Ma($n=4$)和 906~1881Ma($n=3$)等 3 组年龄(图 7h,8)。其中,年龄在 251~266Ma 之间的碎屑锆石晶形良好,呈半自形—自形短柱状,岩浆振荡环带清晰,Th/U 比值 0.24~0.72(图 6),岩浆成因特征明显。年龄在 303~472Ma 之间的碎屑锆石 Th/U 比值 0.46~0.75,

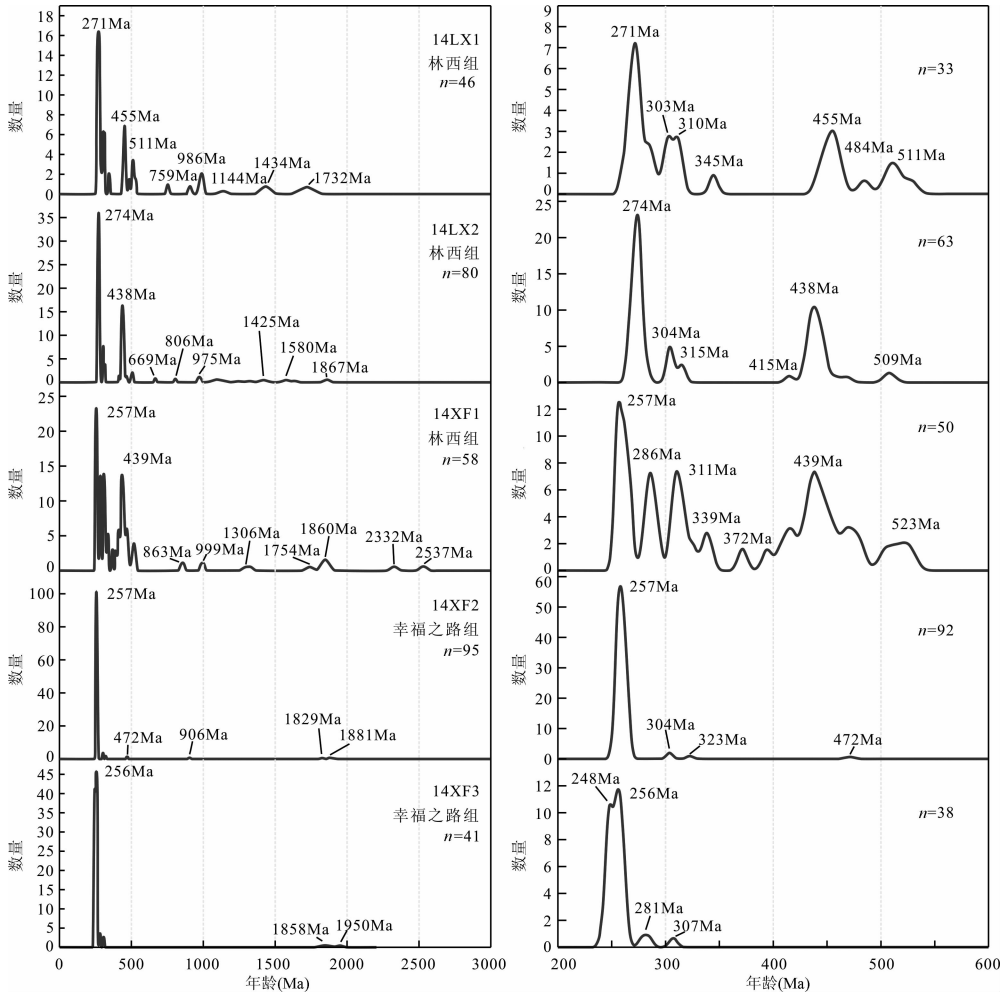


图 8 碎屑锆石 U-Pb 年龄频率图
Fig. 8 Correlation to probability plots of zircon ages for the sedimentary rocks

同样具有清晰的岩浆振荡环带,指示岩浆成因特征。两颗元古代锆石由内核和边部组成,边部具有弱的岩浆环带,可能受一定程度变质作用影响。另一颗锆石($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1881Ma)显示岩浆成因特征。

样品 14XF3 测试锆石 65 颗,获得有效数据 41 个。锆石年龄在 241~1950Ma 之间,年龄峰值集中于 241~307Ma($n=38$)之间(图 7J,8),另有 3 颗早元古代锆石。其中,显生宙锆石晶形较好,具有十分清晰的岩浆环带,Th/U 比值 0.21~0.98(图 6),显示岩浆成因锆石特征。早元古代锆石呈椭圆状,弱的岩浆振荡环带,Th/U 比值 0.21~0.74,也属于岩浆成因锆石。

3.2 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素测试结果见图 9。上二叠统林西组 3 件样品(14LX1、14LX2 和 14XF1)共测试 Hf

同位素点位 184 个。锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.0002~0.0045, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.281292~0.283100。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大,为 -25.6~+17.2。 t_{DM} 值 = 215~2695, t_{DM}^{C} = 188~3131。

中一下三叠统幸福之路组 2 件样品(14XF2 和 14XF3)共测试 Hf 同位素点位 101 个。锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.0002~0.0036, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.281442~0.283084。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 = -8.6~+16.5(图 9)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可明显分为两部分:U-Pb 年龄在 241~278Ma 之间的碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 = +8.6~+16.5;U-Pb 年龄在 285~1950Ma 之间的碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则变化较大,为 -8.6~+9.7。 t_{DM} 值 = 239~2511, t_{DM}^{C} = 238~2924。

4 讨论

4.1 地层时代与沉积序列

林西组灰黑色板岩、页岩中含有丰富的淡水双

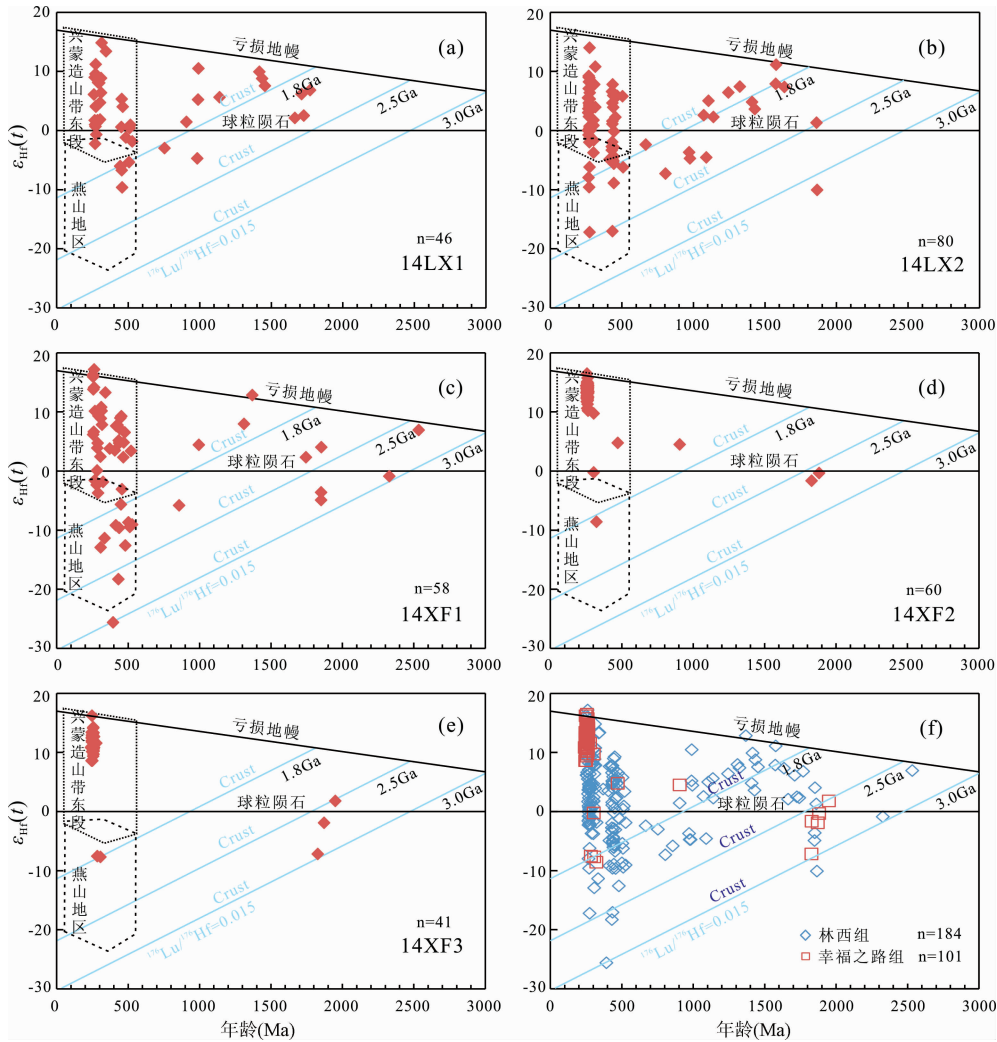


图 9 碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-年龄关系图

Fig. 9 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vs. crystallizing ages for sedimentary rocks

壳类、叶肢介和植物化石,地层时代属于晚二叠世(Zhang Yongsheng et al., 2012)。巴林右旗哈拉山地区幸福之路组下部地层中凝灰岩薄层的锆石 U-Pb 年龄为 253Ma,紫红色砂泥岩中还存在较多早三叠世叶肢介和孢粉化石,指示其为早三叠世地层(He Zhengjun et al., 1997; Zheng Yuejuan et al., 2014)。但是,作为幸福之路组另一标准剖面所在地的查干布拉格地区,两件砂砾岩样品最年轻碎屑锆石年龄分别为 251Ma 和 241Ma,说明幸福之路组地层时代可能并非前人所定早三叠世,它的沉积上限可能已至中三叠世晚期。

内蒙古和东北地区紫红色陆相沉积地层,历来被认为是早三叠世的标志地层,如扎鲁特旗、龙江县地区的老龙头组、吉林九台卢家屯组(Zhang Wu et al., 2006; BGMRJP, 1988; BGMRHP, 1993)。本次研究发现,林西县东南黑山头地区也存在类似沉积层,它由较厚的砾岩夹紫红色泥岩、泥质粉砂岩组成(图 3)。碎屑锆石 U-Pb 年龄显示,两件样品最年轻锆石年龄分别为 265Ma 和 260Ma,说明陆相红层始发育于晚二叠世。

有关晚二叠世与早三叠世地层之间的关系,具有一定的争议。Zheng Yuejuan et al. (2014)认为林西组与幸福之路组生物群具有一定继承性,二者之间没有大的沉积间断。He Zhengjun et al. (1997)认为巴林右旗查干布拉格地区幸福之路组底部砾岩与林西组粉砂岩呈平行不整合接触。野外观察发现,在幸福之路组底部杂色砾岩层之下,还普遍存在厚约 10~30cm 的紫红色泥质粉砂岩夹灰白色长石砂岩透镜体,它与上覆砾岩层呈微角度不整合(图 3e)或平行不整合接触(图 3f),与下伏黄绿色粉砂岩呈整合接触。黄绿色粉砂岩样品(14XF1)最年轻锆石年龄为 254Ma,它代表了林西组顶部序列的沉积时限。灰白色长石砂岩样品(14XF2)最年轻锆石年龄为 251Ma, U-Pb 年龄频谱和林西组样品有较为明显差异,应代表了幸福之路组底部序列的沉积时限。因此,在误差范围内,可以认为上二叠统林西组与中一下三叠统幸福之路组之间为整合接触关系。但是,细砾岩样品(14XF3)最年轻锆石年龄为 241Ma,并在 248~256Ma 之间存在明显的年龄峰值。结合地层间微角度不整合接触关系,表明砾岩层形成之前存在沉积间断。这个不整合接触关系可能反映了残余海盆演化的结束、印支造山运动的开始。

综上所述,幸福之路组地层沉积时代为早一中

三叠世,它与下伏林西组为整合接触关系。早、中三叠世之间存在沉积间断。

4.2 物源分析

内蒙古东南部林西地区林西组砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 年龄组成可进一步分为 4 组:石炭纪—晚二叠世碎屑锆石(254~336Ma)、早古生代—晚古生代早期碎屑锆石(372~528Ma)、中—新元古代碎屑锆石(669~1600Ma)和新太古代—古元古代碎屑锆石(1600~2534Ma)。幸福之路组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄主要为早二叠世—中三叠世(241~278Ma),石炭纪和古元古代碎屑锆石少量。

4.2.1 石炭纪—中三叠世碎屑锆石 (ca. 241~336Ma)

石炭纪—二叠纪是年龄相对集中区域,形成峰值年龄~303Ma、~286Ma、~274Ma、~271Ma 和~257Ma。它代表了内蒙古中东部及华北北缘地区地壳强烈的增生期,岩浆活动强烈。如苏尼特左旗—锡林浩特—西乌珠穆沁旗一带的晚石炭世(337~302Ma)花岗质侵入岩(Chen Bin et al., 2009; Liu Jianfeng et al., 2009; Yang Junquan et al., 2014)。类似花岗岩在华北北缘隆化地区(Zhang Shuanhong et al., 2007)和大兴安岭中北部龙镇、扎兰屯、牙克石、塔河等地也有较多出露(She Hongquan et al., 2012; Zhao Zhi et al., 2010)。二叠纪花岗岩分布更加广泛,它呈带状分布于内蒙古中东部地区的南、北两侧。北带从二连浩特北部沿着中蒙边界一直延伸至黑龙江漠河,它由大量的碱性花岗岩(Wu Fuyuan et al., 2002; Tong Ying et al., 2015; Zhang Xiaohui et al., 2015)和双峰式火山岩(Zhang Xiaohui et al., 2011)组成。南带位于达茂旗—温都尔庙—镶黄旗一线(Zeng Junjie et al., 2008; Liu Changfeng et al., 2010; Lu Yanming et al., 2012)。此外,锡林浩特、林西等地也有零星出露(Shi Guanghai et al., 2004)。而早—中三叠世岩浆岩则多分布于林西县周边地区,如转山子和建设屯花岗闪长岩体(Liu Jianfeng et al., 2013, 2014),黑山头高镁安山岩(Liu Yongsheng et al., 2012)。

锆石 Hf 同位素研究显示,兴蒙造山带东段石炭纪—中三叠世岩浆岩具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+5.4~+14.5),二阶段模式年龄集中于古生代早期—中、新元古代(Chen Bin et al., 2009; Zhao Zhi et al., 2010)。华北北缘花岗岩则以负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-38.3~+1.2)为主,二阶段模式年龄为古元古代(Yang

Jinhui et al., 2006; Zhang Shuanhong et al., 2007, 2009; Wang Huichu et al., 2007; Wang Fang et al., 2009; Mo Nan et al., 2014)。林西组砂岩样品 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-17.2 \sim +17.2$) 指示这一时期的碎屑锆石除来自兴蒙造山带外, 也有部分来自华北克拉通北缘物质, 具有混合物源特征。而幸福之路组砂岩 Hf 同位素特征与林西周边的岩浆岩 (Liu Jianfeng et al., 2013, 2014) 类似, 指示其近缘沉积特征。

4.2.2 早古生代—晚古生代早期碎屑锆石 (ca. 372~528Ma)

林西组砂岩古生代早期碎屑锆石呈现峰值年龄 $\sim 438\text{Ma}$ 、 $\sim 455\text{Ma}$ 、 $\sim 511\text{Ma}$ 和 $\sim 523\text{Ma}$ 。这一时期的岩浆活动在内蒙古东南部、华北北缘以及东北地区有所表现。如温都尔庙早古生代与板块俯冲相关的岩浆岩带 (Zhang Shuanhong et al., 2014; Liu Dunyi et al., 2003; Qin Ya et al., 2013); 东北地区古生代早期 (约 $480 \sim 520\text{Ma}$) 花岗岩 (Ge Wenchun et al., 2007; Pei Fuping et al., 2014) 和华北北缘泥盆纪花岗岩 (Luo Zhenkuan et al., 2001)。锆石 Hf 同位素特征与石炭纪—三叠纪时期类似, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值时指示兴蒙造山带来源 (Pei Fuping et al., 2014), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值时则来自华北北缘 (Yang Jinhui et al., 2006)。

4.2.3 中—新元古代碎屑锆石 (ca. 669~1666Ma)

中—新元古代岩浆事件在华北克拉通内部记录较少, 但兴蒙造山带中却普遍存在。如苏左旗南部温都尔庙群绿片岩 Sm-Nd 同位素年龄 825Ma (Li Shujing et al., 1995); 锡林浩特杂岩中变质辉长岩 SHRIMP U-Pb 年龄 739.6Ma (Ge Mengchun et al., 2011); 克什克腾旗五道石门基性火山岩中存在 $760 \sim 950\text{Ma}$ 的继承性锆石 (Wang Yanyang et al., 2014)。东北地区也曾发现同时期的碎屑锆石或继承锆石 (Zhou Jianbo et al., 2012)。因此, 林西组砂岩中约 $669 \sim 1666\text{Ma}$ 之间的碎屑锆石更可能来自兴蒙造山带内部。

4.2.4 约 1.8Ga 和 2.5Ga 的碎屑锆石

区域构造研究表明, 华北克拉通在 $2.6 \sim 2.5\text{Ga}$ 和 $1.9 \sim 1.7\text{Ga}$ 发生了两次重大的构造热事件, 分别称为 25 亿年地质事件和 18 亿年地质事件 (Zhai Mingguo et al., 2000)。在冀北、怀安、尚义等地存在大量 $\sim 2.5\text{Ga}$ 的变质侵入岩, 如冀北单塔子英云闪长质侵入岩 (Liu Shuwen et al., 2007)。 $\sim 1.8\text{Ga}$ 时期, 则代表华北克拉通进入伸展构造体制, 基底抬升并产生裂陷槽, 伴随基性岩墙群和非造山岩浆活

动。 $\sim 1.8\text{Ga}$ 岩浆事件范围十分广泛, 在整个华北可能都有发育 (Zhai Mingguo et al., 2000, 2007)。这两期构造岩浆事件在华北克拉通内虽十分普遍, 但兴蒙造山带内却没有任何发现。林西组和幸福之路组砂岩样品中 $\sim 1.8\text{Ga}$ 和 $\sim 2.5\text{Ga}$ 的碎屑锆石显然与这两次岩浆事件有关。

4.3 对古亚洲洋闭合时代的约束

如前所述, 上二叠统林西组碎屑锆石年龄结构复杂, 具有 $\sim 257\text{Ma}$ 、 $\sim 271\text{Ma}$ 、 $\sim 438\text{Ma}$ 、 $\sim 439\text{Ma}$ 多个峰值年龄, 未形成峰值年龄的前寒武纪 (约 $669 \sim 2537\text{Ma}$) 碎屑锆石也常见。物源研究显示, 碎屑锆石既有来自兴蒙造山带内部, 也有来自华北克拉通北缘, 指示林西组砂岩混合物来源的沉积特征。而幸福之路组砂岩碎屑锆石年龄结构相对单一, 以近缘沉积为特征。林西组砂岩中大量华北克拉通物质的出现, 暗示华北与西伯利亚克拉通及其间各块体的碰撞、拼合在林西组沉积时已经发生。结合内蒙古东南部地区中二叠统哲斯组 and 上二叠统林西组碎屑锆石年代学及 Hf 同位素资料 (Cope et al., 2005; Han Guoqing et al., 2012; Eizenhofer et al., 2014), 可以发现这种混合物源的沉积于哲斯组沉积时就已经出现。哲斯组与林西组碎屑锆石年龄频率图十分相似, 均具 $\sim 276\text{Ma}$ 和 $\sim 437\text{Ma}$ ($\sim 455\text{Ma}$) 年龄峰值 $\sim 1.8\text{Ga}$ 和 $\sim 2.5\text{Ga}$ 的年龄峰值 (图 10), 与现代西拉木伦河沉积物的年龄频率图也具有一定的相似性 (前寒武部分)。因此, 华北与西伯利亚克拉通的闭合发生于中二叠世哲斯组沉积之前。

区域资料表明, 内蒙古东南部地区在晚石炭世以来是浅海至陆相的沉积环境。早、中二叠世地层以海陆交互相—浅海相为特征, 晚二叠世地层则形成于陆相环境 (BGMRNM, 1996)。华北克拉通北缘, 浅海—滨浅海相的下二叠统三面井组陆源碎屑岩不整合覆盖于奥陶纪片麻状石英闪长岩上。锡林浩特—西乌旗地区出露以砂岩、细砂岩为主的寿山沟组, 可见植物化石碎片。东乌旗地区则发育含腕足类、苔藓虫以及植物化石碎片的海陆交互相格根敖包组 (Zhu Junbin et al., 2015)。早二叠世晚期以广布的浅海相大石寨组火山—沉积地层为代表, 正镶白旗地区出现含植物化石的陆相地层额里图组。中二叠世以滨浅海相哲斯组为代表, 它是富含腕足、珊瑚和蜓等化石的碳酸盐岩和砂岩沉积。在西拉木伦河以南, 与之相当的地层称为于家北沟组, 它由砂岩、粉砂岩和砾岩、粗砾岩组成, 含腕足类、双壳类以及较多的植物化石, 指示海陆交互相沉积。晚二叠

世,以陆相林西组为代表,灰黑色砂岩、砂板岩中可见淡水双壳类和植物化石。此外,内蒙古东南部及东北地区动、植物群的混生作用始于中二叠世时期(Shi Guangrong et al., 2002; Shen Shuzhong et al., 2006; Huang Benhong et al., 1998),东乌旗东北地区还发现了早、中二叠世华夏植物群化石(Zhou Zhiguang et al., 2010)。上述资料表明,内蒙古东南部地区晚石炭世以来是浅海至陆相的沉积环境。

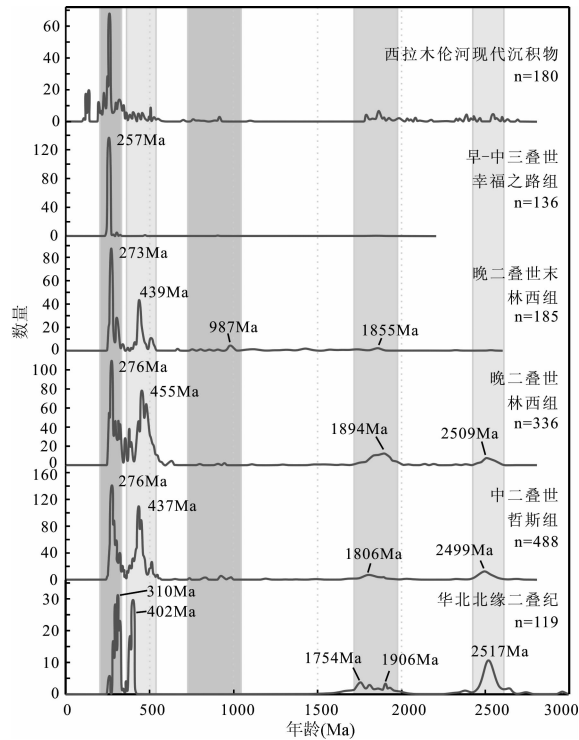


图 10 碎屑锆石年龄频率对比图(数据来自:本文;Cope et al., 2005; Han Guoqing et al., 2012; Bao Chuan et al., 2013; Eizenhofer et al., 2014)

Fig. 10 Contrasting relative probability plots of detrital zircons for the sedimentary rocks

岩浆岩的研究也为该区晚古生代构造演化提供了较多依据。锡林浩特—西乌旗等地以 I 型钙碱性系列为特征的石炭纪花岗岩(Wu Fuyuan et al., 2011),形成于造山后伸展环境(Hu Chuansheng et al., 2015)。二叠纪岩浆岩,以 A 型花岗岩和双峰式火山岩为特征,呈巨型带状分布于西伯利亚克拉通南缘至华北北缘地区,它们是后碰撞—后造山伸展背景下幔源岩浆底侵诱发形成的,代表了新晋大陆内部的垂向增生过程(Wu Fuyuan et al., 2002; Shi Guanghai et al., 2004; Jahn et al., 2009; Zhang Yuqing et al., 2009; Xu Jiajia et al., 2012;

Yarmolyuk et al., 2014; Tong Ying et al., 2015; Zhang Xiaohui et al., 2008, 2015)。而索伦山和贺根山蛇绿岩的 SHRIMP 锆石年龄(Miao Laicheng et al., 2008; Jian Ping et al., 2010)与早二叠世 A 型花岗岩及双峰式火山岩基本上同一时期,它可能是局部地区拉张强度较大而出现的镁铁质或超镁铁质侵入体。

综上所述,内蒙古东南部地区在晚石炭世以来,表现为西伯利亚和华北克拉通及其间微陆块联为一体后的陆内裂陷沉积活动及岩浆活动。晚二叠世一早、中三叠世期间,地壳大范围抬升导致海水全面退出,并转为炎热、干旱的气候环境,从而形成紫红色幸福之路组河、湖相沉积层。

5 结论

(1)幸福之路组地层沉积时代属于早—中三叠世,与下伏林西组之间为整合接触关系。早、中三叠世之间存在沉积间断。

(2)林西组样品碎屑锆石 U-Pb 定年主要反映 4 组年龄:石炭纪—晚二叠世碎屑锆石(260~336Ma)、早古生代—晚古生代早期碎屑锆石(372~528Ma)、中—新元古代碎屑锆石(669~1600Ma)和新太古代—古元古代碎屑锆石(1600~2534Ma)。幸福之路组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄集中于早二叠世—中三叠世(241~278Ma),石炭纪和古元古代碎屑锆石少量。

(3)林西组砂岩物源来自兴蒙造山带以及华北克拉通北缘,幸福之路组物源主体为周边岩浆岩,华北克拉通北缘物源少量。

(4)结合前人研究资料,古亚洲洋闭合于晚石炭世之前。晚石炭世以来,研究区表现为西伯利亚与华北克拉通联为一体后的陆内裂陷沉积活动及岩浆活动。

注 释

- ① 内蒙古自治区地质局第二区域地质测量队, 1968. 中华人民共和国地质图(1:20 万刘家营子幅)。
- ② 辽宁省第二区域地质测量队, 1970. 中华人民共和国地质图(1:20 万林西县幅, 克什克腾旗幅, 五分地幅)。

References

Bao Chuang, Chen Yuelong, Li Dapeng. 2013. Hf isotopic composition and its geological significance of detrital zircons in the floodplain sediments from the Xar Moron River, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3159~3172 (in Chinese with English abstract).

- Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of the chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province (BGMHRP). 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~734 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province (BGMHRP). 1988. *Regional Geology of Jilin Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~697 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region (BGMHRNM). 1996. *Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy of China (15): Stratigraphy (Lithostratic) of Nei Mongol Autonomous Region*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~344 (in Chinese without English abstract).
- Chen Bin, 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.
- Cherniak D J, Watson E B. 2000. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172(1~2): 5~24.
- Cope T, Ritts B D, Darby B J, Fildani A, Graham S A. 2005. Late Paleozoic sedimentation on the northern margin of the North China Block: Implications for regional tectonics and climate change. *International Geology Review*, 47(3): 270~296.
- Eizenhfer P R, Zhao Guochun, Zhang Jian, Sun Min. 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker suture zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks. *Tectonics*, 33(4): 441~463.
- Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, Yu Yang, Sun Junjun, Bao Jianquan, Wang Shihai. 2011. Dissolution and supracrustal rocks dating of Xilin Gol complex, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 182~195 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, Zhang Jiheng, Xu Xuechun, Cheng Ruiyu. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., Northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423~440 (in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508~1513 (in Chinese with English abstract).
- Han Guoqing, Liu Yongjiang, Neubauer F, Jin Wei, Genser J, Ren Shoumai, Li Wei, Wen Quanbo, Zhao Yingli, Liang Chenyue. 2012. LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the Permian sandstones in Da Xing'an Mountains, NE China: New evidence for the eastern extension of the Erenhot-Hegenshan suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 249~271.
- He Zhengjun, Liu Shuwen, Ren Jishun, Wang Yu. 1997. Late Permian-Early Triassic sedimentary evolution and tectonic setting of the Linxi region, Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 16(4): 403~409 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chuansheng, Li Wenbo, Xu Cheng, Zhong Richen, Zhu Feng. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotope of the granitoids of Baolidao and Halatu plutons in Sonidzuoqi area, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 294~306.
- Huang Benhong, Ding Qiuhong. 1998. The Angara flora from Northern China. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(1): 97~104 (in Chinese with English abstract).
- Iizuka T, Hirata T. 2005. Improvements of precision and accuracy in in situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation MC-ICP MS technique. *Chemical Geology*, 220(1): 121~137.
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Science*, 91: 181~193.
- Jahn B M, Litvinovsky B A, Zandvilevich A N, Reichow M. 2009. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance. *Lithos*, 113(3~4): 521~539.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Wei, Zhang Fuqin. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1): 169~190.
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207~224.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, Li Yaping, Wang Yanbin. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Shujing, Gao Dezhen. 1995. New discoveries of geological structures in Sonid Zuoqi of Inner Mongolia and discussion on tectonic features. *Geoscience*, 9(2): 130~141 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changfeng, Zhang Haoran, Yu Yangsen, Zhou Zhiguang, Liu Wencan, Zhang Huafeng. 2010. Dating and petrochemistry of the Beijige pluton in Siziwangqi, Inner Mongolia. *Geoscience*, 24(1): 112~119 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner

- Mongolia; Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317~327 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, Ma Zhihong, Zhao Zhi, Wang Tiefu, Hu Zhaochu, Zhao Xiuyu. 2009. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz-diorite in the Southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhao Zhi, Hu Zhaochu, Chen Junqiang. 2013. Zircon U-Pb age and petrogenetic discussion on Jianshetun adakite in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 827~839 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Chi Xiaoguo, Qu Junfeng, Hu Zhaochu, Guo Chunli. 2014. Petrological and geochemical characteristics of the Early Triassic granite belt in Southeastern Inner Mongolia and its tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1677~1690 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Lü Yongjun, Feng Yonggang, Zhang Chen, Tian Wei, Yan Quanren, Liu Xiaoming. 2007. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi complex, Northern Hebei province. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 484~497 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Wang Xiaohong, Wang Dongbing, He Detao, Zong Keqing, Gao Changgui, Hu Zhaochu, Gong Hujun. 2012. Triassic high-Mg adakitic andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the fate of the Paleo-Asian Ocean crust and fossil slab-derived melt-peridotite interaction. *Chemical Geology*, 328(11): 89~128.
- Lu Yanming, Pan Mao, Qing Min, Zhang Yujie, Han Xianju, Chao Yinyin. 2012. Zircon U-Pb age of gold-bearing granitic intrusive rocks in Bilihe gold deposit of Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 993~1004 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Guan Kang, Qiu Youshou. 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei province and its geochemical significance. *Geochimica*, 30(2): 116~122 (in Chinese with English abstract).
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Guo Feng. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 348~370.
- Mo Nan, Guo Lei, Tong Ying, Wang Tao, Liu Jiang, Li Jianbo. 2014. Geochronology, geochemistry, Hf isotope of Xiaojinggou pluton in the northern margin of North China Craton and its tectonic implication. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50(6): 1021~1034 (in Chinese with English abstract).
- Pei Fuping, Wang Zhiwei, Cao Huahua, Xu Wenliang, Wang Feng. 2014. Petrogenesis of the Early Paleozoic tonalite in the central Jilin province: Evidence from zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 2009~2019 (in Chinese with English abstract).
- Qin Ya, Liang Yihong, Xing Jilin, Zhang Qingwei, Liu Chengxian. 2013. The identification of Early Paleozoic O-type adakitic rocks in Zhengxiangbaiqi area, Inner Mongolia and its significance. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 106~114 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, Liu Zhigang, Liu Fengren. 1992. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 1~205 (in Chinese without English abstract).
- Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. 1999. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85~93 (in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman U S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 209~304.
- Shao Ji'an, Tang Kedong, He Guoqi. 2014. Early Permian tectono-palaeogeographic reconstruction of Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1859~1866 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, Guan Jidong, Yang Yuncheng, Zhang Dequan, Tan Gang, Zhang Bin. 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571~594 (in Chinese with English abstract).
- Shen Shuzhong, Zhang H, Shang Qinghua, Li W Z. 2006. Permian stratigraphy and correlation of Northeast China: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 304~326.
- Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqing, Jian Ping, Fan Weiming, Liu Dunyi. 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhote A-type granite in Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(7): 723~729.
- Shi Guangrong, Shen Shuzhong, Tazawa J. 2002. Middle Permian (Guadalupian) brachiopods from the Xiujiminqin area, Inner Mongolia, Northeast China, and their palaeobiogeographical and palaeogeographical significance. *Paleontological Research*, 6(3): 285~297.
- Tang Kedong. 1990. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249~260.
- Tong Ying, Jahn B M, Wang Tao, Hong Dawei, Smith E I, Sun Min, Gao Jianfeng, Yang Qidi, Huang Wei. 2015. Permian alkaline granites in the Erenhot-Hegenshan belt, Northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 320~336.
- Wang Fang, Chen Fukun, Hou Zhenhui, Peng Peng, Zhai Mingguo. 2009. Zircon ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition

- of Late Paleozoic granitoids in the Chongli-Chicheng area, northern margin of the North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 3057 ~ 3074 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Zhao Fengqing, Li Huimin, Sun Lixin, Miao Laicheng, Ji Shiping. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from Northern Hebei: The geological records of Late Paleozoic magmatic arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597~604 (in Chinese with English abstract).
- Wang Quan, Liu Xueya. 1986. Paleoplate tectonics between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China. *Tectonics*, 5(7): 1073~1088.
- Wang Yanyang, Xu Bei, Cheng Shengdong, Liao Wen, Shao Jun, Wang Yan. 2014. Zircon U-Pb dating of the mafic lava from Wudaoshimen, Hexigten, Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2055~2062 (in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(12): 31 ~ 47.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1): 143~173.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1~30.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22 (6): 1069, doi: 10.1029/2002TC1484.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Huang Baochun, Han Chunming, Yuan Chao, Chen Hanlin, Sun Min, Sun Shu, Li Jiliang. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the Southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 98(6): 1189~1217.
- Xu Bei, Chen Bin. 1997. Framework and evolution of the Middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in Northern Inner Mongolia. *Science in China. Series D*, 40(5): 463~469.
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841~1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiajia, Lai Yong, Cui Dong, Lu Bin. 2012. Petrology and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Qianjinchang pluton, Southeastern Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4): 617 ~ 628 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bing, Zhang Xionghua, Ge Mengchun, Zhao Shengmin, Wei Yi, Huang Xing, Luan Tengfei, Wei Xinxiang, Yang Zhiyong. 2014. Late Permian-Early Triassic palynological assemblages in Linxi, Inner Mongolia and discovery of Triassic strata. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(7): 784 ~ 794 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, Wilde S A, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2006. Constraints on the timing of the Yanshan fold and thrust belt, North China. *Earth and Planet Science Letter*, 246(3~4): 336~352.
- Yang Junquan, Zhang Surong, Liu Yongshun, Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, Peng Lina. 2014. Discovery of Carboniferous diorite from Moheertu in Dongwuqi area, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb geochronology. *Geoscience*, 28 (3): 472 ~ 477 (in Chinese with English abstract).
- Yarmolyuk V V, Kuzmin M I, Ernst R E. 2014. Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 158 ~ 179.
- Zeng Junjie, Zheng Youye, Qi Jianhong, Dai Fanghua, Zhang Gangyang, Pang Yingchun, Wu Bin. 2008. Foundation and geological significance of adakitic granite at Guyang of Inner Mongolia. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 33 (6): 755 ~ 763 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo, Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinental of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China Series D: Earth Science*, 43(supplement 1): 219~232.
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665 ~ 2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Yang Zhenyu, Hu Jianmin, Wu Hai. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China Block: Implications for a late Paleozoic active continental margin. *Journal of the Geological Society, London*, 164(2): 451~463.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Hu Jianmin, Liu Shuwen, Yang Yueheng, Chen Fukun, Liu Xiaoming, Liu Jian. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China Craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1~2): 181~200.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Ye Hao, Liu Jianmin, Hu Zhaochu. 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian

- Orogenic Belt. Geological Society of America Bulletin, 126(9~10): 1275~1300.
- Zhang Wu, Fu Xiaoping, Ding Qiuhong, Li Nan, Li Yong, Zheng Shaolin. 2006. A new knowledge of the Lower Triassic Laolongtou Formation in the Defatun area, Jialaid Qi, Inner Mongolia. Journal of Stratigraphy, 30(1): 26~33 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, Wilde S A, Hu Zhaochu. 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.
- Zhang Xiaohui, Wilde S A, Zhang Hongfu, Zhai Mingguo. 2011. Early Permian high-K calc-alkaline volcanic rocks from NW Inner Mongolia, North China: Geochemistry, origin and tectonic implications. Journal of the Geological Society, London, 168(2): 525~543.
- Zhang Xiaohui, Yuan Lingling, Xue Fuhong, Yan Xin, Mao Qian. 2015. Early Permian A-type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of post-collisional tectonic and oceanic crustal recycling. Gondwana Research, 28(1): 311~327.
- Zhang Yongsheng, Niu Shaowu, Tian Shugang, Xing Enyuan, Su Kui, Cao Jie, Wang Juntao. 2012. The discovery of conchostracan fossils in the Upper Permian Linxi Formation of Linxi area, Inner Mongolia, and its geological significance. Geological Bulletin of China, 31(9): 1394~1403 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Xu Liquan, Kang Xiaolong, Bao Yinwuliji. 2009. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its significance. Geology in China, 36(5): 988~995 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Pan Shiyu, Liu Jianfeng, Sun Wei, Hu Zhaochu. 2010. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of Carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern Lesser Xing'an Range. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2452~2464 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yuejuan, Huang Xin, Chen Shuwang, Zhang Haihua, Su Fei, Gong Fanhao, Zhang Jian. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the tuffs of the Lower Triassic Xingfuzhulu Formation in Bairin Right Banner, Inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 33(2~3): 370~377 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Liu Fulai, Liu Jianhui. 2012. Detrital zircons from Phanerozoic rocks of the Songliao Block, NE China: Evidence and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 47: 21~34.
- Zhou Zhiguang, Gu Yongchang, Liu Changfeng, Yu Yangsen, Zhang Bing, Tian Zhijun, He Fubing, Wang Biren. 2010. Discovery of Early-Middle Permian cathaysian flora in Manduhuaolage area, Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia, China and its geological significance. Geological Bulletin of China, 29(1): 21~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Junbin, Sun Lixin, Ren Jishun, Li Shan. 2015. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of the volcanic rocks from the Gegen Obo Formation in East Ujimqin Banner area, Inner Mongolia, and its significance. Acta Geoscientia Sinica, 36(4): 466~472 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 包创,陈岳龙,李大鹏. 2013. 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. 岩石学报, 29(9): 3159~3172.
- 葛梦春,周文孝,于洋,孙俊俊,鲍建泉,王世海. 2011. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定. 地学前缘, 18(5): 182~195.
- 葛文春,隋振民,吴福元,张吉衡,徐学纯,程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 岩石学报, 23(2): 423~440.
- 耿建珍,李怀坤,张健,周红英,李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报, 30(10): 1508~1513.
- 和政军,刘淑文,任纪舜,王瑜. 1997. 内蒙古林西地区晚二叠世—早三叠世沉积演化及构造背景. 中国区域地质, 16(4): 403~409.
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京:地质出版社, 1~734.
- 黄本宏,丁秋红. 1998. 中国北方安加拉植物群. 地球学报, 19(1): 97~104.
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京:地质出版社, 1~697.
- 李述靖,高德臻. 1995. 内蒙古苏尼特左旗地区若干地质构造新发现及其构造属性的初步探讨. 现代地质, 9(2): 130~141.
- 柳长峰,张浩然,於扬森,周志广,刘文灿,张华锋. 2010. 内蒙古中部四子王旗地区北极各岩体锆石定年及其岩石化学特征. 现代地质, 24(1): 112~119.
- 刘敦一,简平,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据. 地质学报, 77(3): 317~327.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,李亚萍,王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565~582.
- 刘建峰,迟效国,张兴洲,马志红,赵芝,王铁夫,胡兆初,赵秀羽. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 83(3): 365~376.
- 刘建峰,迟效国,赵芝,胡兆初,陈军强. 2013. 内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论. 岩石学报, 29(3): 827~839.
- 刘建峰,李锦轶,迟效国,曲军峰,胡兆初,郭春丽. 2014. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩带岩石地球化学特征及其构造环境. 地质学报, 88(9): 1677~1690.
- 刘树文,吕勇军,凤永刚,张臣,田伟,闫全人,柳小明. 2007. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. 高校地质学报, 13(3): 484~497.

路彦明,潘懋,卿敏,张玉杰,韩先菊,朝银银. 2012. 内蒙古毕力赫含金花岗岩类侵入岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 岩石学报, 28(3):993~1004.

罗镇宽,苗来成,关康,裴有守. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义. 地球化学, 30(2):116~122.

莫南,郭磊,童英,王涛,刘江,李建波. 2014. 华北北缘大青山小井沟岩体年代学、地球化学和 Hf 同位素特征及其地质意义. 北京大学学报(自然科学版), 50(6):1021~1034.

内蒙古自治区地质矿产局. 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社:1~344.

裴福萍,王志伟,曹花花,许文良,王枫. 2014. 吉林省中部地区早古生代英云闪长岩的成因:锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 岩石学报, 30(7):2009~2019.

秦亚,梁一鸿,邢济麟,张青伟,刘城先. 2013. 内蒙古正镶白旗地区早古生代 O 型埃达克岩的厘定及其意义. 地学前缘, 20(5):106~114.

任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,刘志刚,刘凤仁. 1992. 中国东部大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京:科学出版社,1~205.

任纪舜,牛宝贵,刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用. 地学前缘, 6(3):85~93.

邵济安,唐克东,何国琦. 2014. 内蒙古早二叠世构造古地理的再造. 岩石学报, 30(7):1858~1866.

余宏全,李进文,向安平,关继东,杨郦城,张德全,谭刚,张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报, 28(2):571~594.

王芳,陈福坤,侯振辉,彭澎,翟明国. 2009. 华北陆块北缘崇礼-赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(11):3057~3074.

王惠初,赵凤清,李惠民,孙立新,苗来成,冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3):597~604.

王炎阳,徐备,程胜东,廖闻,邵军,汪岩. 2014. 内蒙古克什克腾旗五道石门基性火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 30(7):2055~2062.

徐备,赵盼,鲍庆中,周永恒,王炎阳,罗志文. 2014. 兴安造山带前

中生代构造单元划分初探. 岩石学报, 30(7):1841~1857.

徐佳佳,赖勇,崔栋,鲁彬. 2012. 内蒙古前进场岩体岩石学与锆石 U-Pb 年代学研究. 北京大学学报(自然科学版), 48(4):617~628.

杨兵,张雄华,葛梦春,赵省民,韦一,黄兴,栾腾飞,魏信祥,杨志勇. 2014. 内蒙古林西地区晚二叠世一早三叠世孢粉组合及三叠系的发现. 地球科学——中国地质大学学报, 39(7):784~794.

杨俊泉,张素荣,刘永顺,程银行,滕学建,李艳锋,彭丽娜. 2014. 内蒙古东乌旗莫合尔图石炭纪闪长岩的发现:来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 现代地质, 28(3):472~477.

曾俊杰,郑有业,齐建宏,代芳华,张刚阳,庞迎春,武彬. 2008. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6):755~763.

翟明国,彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11):2665~2682.

张武,傅晓平,丁秋红,李楠,李勇,郑少林. 2006. 内蒙古扎赉特旗德发电地区下三叠统老龙头组的新发现. 地层学杂志, 30(1):26~33.

张玉清,许立权,康小龙,宝音乌力吉. 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义. 中国地质, 36(5):988~995.

张永生,牛绍武,田树刚,邢恩袁,苏奎,曹洁,王俊涛. 2012. 内蒙古林西地区上二叠统林西组叶肢介化石的发现及意义. 地质通报, 31(9):1394~1404.

赵芝,迟效国,潘世语,刘建峰,孙巍,胡兆初. 2010. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义. 岩石学报, 26(8):2452~2464.

郑月娟,黄欣,陈树旺,张海华,苏飞,公繁浩,张健. 2014. 内蒙古巴林右旗下三叠统幸福之路组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 33(2~3):370~377.

周志广,谷永昌,柳长峰,於炀森,张冰,田志君,何付兵,王必任. 2010. 内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早—中二叠世华夏植物群的发现及地质意义. 地质通报, 29(1):21~25.

朱俊宾,孙立新,任纪舜,李舫. 2015. 内蒙古东乌旗地区格根敖包组火山岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 地球学报, 36(4):466~472.

Detrital Zircon Records of Upper Permian-Middle Triassic Sedimentary Sequence in the Linxi Area, Inner Mongolia and Constraints on Timing of Final Closure of the Paleo-Asian Ocean (Eastern Segment)

ZHU Junbing, HE Zhengjun

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

It is an important period for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asia Orogenic Belt during the Late Permian to Middle Triassic, which involved the final closure of the Paleo-Asian Ocean and the sharp changes of sedimentary environment. The well exposed Upper Permian Linxi Formation and Lower-Middle Triassic Xingfuzhulu Formation record the evolution history of southeastern Inner Mongolia. Then, sandstone samples were chosen to carry out U-Pb and Lu-Hf isotope test, which is used to analyze the geochronology and extract sediment provenance information. The new U-Pb data show the red stratum which was considered as the symbol of Triassic before is also discovered in Late Permian, southeast of Linxi county. In addition, the previous Early Triassic Xingfuzhulu Formation is probably an Early to Middle Triassic sedimentary sequence, which is conformable contact with lower Linxi Formation. Furthermore, an age gap between Early and Middle Triassic was found base on both geochronological data and field observation. The geochronological results also show that sandstones from Linxi Formation have four groups of U-Pb age at 254~336Ma, 372~528Ma, 669~1000Ma, and 1300~2534Ma. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from -25.6~+17.2. In contrast, samples from Xingfuzhulu Formation only have one group of U-Pb age at 241~278Ma, while the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from +8.6~+16.5, and few Carboniferous and Paleoproterozoic detrital zircons were found. In view of different characteristics of U-Pb and Hf isotope, the sandstones from Linxi Formation probably sourced from Xing-Meng Orogenic Belt and north of the North China craton, while the sandstones from Xingfuzhulu Formation mainly sourced from surrounding magmatic rocks. These results, combined with regional data, indicate that the final closure of the Paleo-Asian Ocean is before Late Carboniferous. Since then, the sediments and magmatism happened in an intracontinental environment.

Key words: detrital zircon; U-Pb and Hf isotopes; provenance; CAO