

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.548



北京周口店太平山南坡晚古生代碎屑锆石 U-Pb 年代学及其大地构造意义

张航川, 徐亚军*, 杜远生, 王国庆, 杨坤光

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为了探讨华北板块北缘晚古生代的隆升历史和古亚洲洋的闭合过程, 利用碎屑岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和锆石微量元素组成对北京周口店太平山南坡晚石炭世—早二叠世地层进行物源分析, 并判定源区的大地构造背景。5 件样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄主要分布在 3 个时代: 显生宙 (285~425 Ma)、古元古代 (1 700~2 450 Ma) 和新太古代 (2 500~2 747 Ma)。前寒武纪的锆石年龄主要集中在 2.5 Ga 和 1.8 Ga, 与华北克拉通的前寒武纪基底岩石相似。显生宙的锆石年龄主要集中在 308~297 Ma, 最年轻的峰值年龄在 299~291 Ma, 在误差范围内与地层沉积年龄相似, 因此这些最年轻的碎屑锆石属于早二叠世同沉积锆石。29 颗同沉积锆石的 Hf 同位素结果显示, 原始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 021~0.282 318, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -20.1~-9.6。显生宙锆石的年龄谱特征以及 Hf 同位素组成与内蒙古隆起同期的岩浆锆石特征十分相似, 因此显生宙碎屑锆石可能来源于内蒙古隆起, 并伴随有少量来自北侧兴安造山带南部的早古生代岛弧碎屑的输入。二叠纪同沉积锆石的微量元素特征表明锆石结晶的岩浆源区具有大陆岛弧的构造属性。上述数据表明: (1) 华北板块北缘在晚石炭世—早二叠世为活动大陆边缘; (2) 晚古生代古亚洲洋向华北北缘的持续俯冲消减导致了内蒙古隆起的快速隆升; (3) 古亚洲洋闭合的时间应晚于早二叠世。

关键词: 华北北缘; 周口店; 物源分析; 锆石; 古亚洲洋; 构造; 地质年代学。

中图分类号: P547

文章编号: 1000-2383(2018)06-2100-16

收稿日期: 2018-12-16

Detrital Zircon Geochronology of Late Paleozoic Strata from Southern Hillside of Taiping Hill in Zhoukoudian Area, Beijing and Their Tectonic Implications

Zhang Hangchuan, Xu Yajun*, Du Yuansheng, Wang Guoqing, Yang Kunguang

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Late Paleozoic siliciclastic rocks outcrop in the southern hillside of Taiping hill, Zhoukoudian area. In order to trace sediment provenance and unravel the tectonic evolution of the North China craton and its surrounding plates, U-Pb dating and Hf isotopic analyses were performed on detrital zircons from this succession. U-Pb ages of five samples can be divided into three groups: Phanerozoic (285–425 Ma), Paleoproterozoic (1 700–2 450 Ma) and Neoproterozoic (2 500–2 747 Ma). Precambrian zircons show obvious age peaks at 2.5 Ga and 1.8 Ga, which are similar to those of basement rocks of the North China Craton. Phanerozoic zircons from five samples are predominantly distributed in the range of 308–297 Ma, with the youngest peaks varying from 299 to 291 Ma. U-Pb ages of the youngest zircons are consistent with the Early Permian depositional age, suggesting that these zircons are synsedimentary detritus. Characteristics of age spectra of the Phanerozoic zircons are similar to those of coeval igneous rocks outcropped in the Inner Mongolia paleo-uplift to the north, which suggests the source of Phanerozoic zircons. The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of 29 synsedimentary zircons range from 0.282 021 to 0.282 318 and -20.1 to -9.1, respectively, which are consistent with those of active arc rocks in the Inner Mongolia paleo-uplift, rather than the Xing-

基金项目: 国家基础科学人才培养基金项目 (No.J1310038); 国家大学生创新创业项目 (No.201610491005)。

作者简介: 张航川 (1995-), 男, 硕—博连读生, 主要从事大地构造学的研究工作。ORCID: 0000-0001-9064-5328. E-mail: zhanghangchuancug@163.com

* **通讯作者:** 徐亚军, E-mail: xuyajun19@163.com

引用格式: 张航川, 徐亚军, 杜远生, 等, 2018. 北京周口店太平山南坡晚古生代碎屑锆石 U-Pb 年代学及其大地构造意义. 地球科学, 43(6): 2100–2115.

Meng orogenic belt. Minor detritus from the Early Paleozoic arc rocks in the southern orogen of the Xing-Meng orogen also flowed into the basin. Trace elements of Early Permian synsedimentary zircons are characterized by those of zircons crystallized in the environment of continent arc and active continental boundary. The results suggest that: (1) the northern margin of the North China craton was an Andean-type continental margin during the Late Carboniferous to Early Permian period, (2) rapid rise of the Inner Mongolia paleo-uplift was attributed to the subduction of Paleo-Asian ocean under the northern margin of the craton, and (3) closure of the Paleo-Asian ocean should be later than the Early Permian.

Key words: North China craton; Zhoukoudian area; provenance; zircon; Paleo-Asian ocean; tectonics; geochronology.

0 引言

华北克拉通自早元古代吕梁运动形成基底之后,在中元古代到早三叠世发育盖层沉积(黄汲清等,1977; Zhao *et al.*, 2005; Zhao and Cawood, 2012).在大部分地区的沉积盖层中缺失上奥陶统一下石炭统,表现为上石炭统的陆源碎屑岩直接不整合覆盖在下古生界海相碳酸盐岩之上,记录了晚古生代华北克拉通与周缘板块之间的相互作用.早期的研究认为华北北缘自克拉通形成后直到与西伯利亚克拉通拼合一直是稳定的被动大陆边缘(Cope *et al.*, 2005; Zhao and Cawood, 2012).近年来随着对古亚洲洋演化研究的不断深入,已经证实晚古生代华北克拉通北缘存在古亚洲洋南向的俯冲,导致了华北北缘构造性质的转换(Zhang *et al.*, 2007a; Jian *et al.*, 2008; 李益龙等, 2012).然而,对于这一区域构造演化的研究仍然存在诸多争论,其中关于古亚洲洋最终关闭的时间一直是一个重要的议题.一部分学者认为古亚洲洋于泥盆纪—石炭纪之间沿着索伦缝合带关闭(图 1a)(Tang, 1990; Dobretsov *et al.*, 1995; Khain *et al.*, 2002),而另一部分学者则认为该洋盆的关闭一直持续到中二叠世—早三叠世(Li, 2006; Windley *et al.*, 2007; Eizenhöfer *et al.*, 2014).以往的认识主要是基于对兴蒙造山带内部出露在古亚洲洋关闭过程中出现的岩浆—变质作用的年代学和构造属性的研究.兴蒙造山带内部镶嵌着多个微陆块(如浑善达克地体和额尔古纳地块;图 1b),表明古亚洲洋属于一个多岛洋的性质(Li *et al.*, 2015; Safonova *et al.*, 2017),而这些微陆块在古亚洲洋南向俯冲的过程中向华北克拉通北缘的碰撞—增生也会产生相应的岩浆—变质作用记录,如此易导致以微陆块与华北克拉通北缘之间的碰撞—增生时间来代表整个古亚洲洋的关闭时间.

同造山盆地内部保存的碎屑记录是研究造山运动的另一种重要手段,其中碎屑锆石的 U-Pb 年代学组成及其地球化学特征可以反映相邻造山带演化的

阶段(Liu *et al.*, 2001; Cawood *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2014).北京周口店地区地处中亚增生造山带南缘,盆地内部的碎屑岩能够清晰地记录古亚洲洋向华北北缘俯冲—增生的过程.本文系统地采集了周口店地区太平山南坡上石炭统一二叠统的碎屑岩样品,通过碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成、锆石微量元素特征分析,确定了这套连续地层的物源,并根据物源特征探讨了晚古生代古亚洲洋南向俯冲作用控制下的华北克拉通北缘的盆山相互作用的过程.该研究对限制古亚洲洋的闭合时间以及华北克拉通北缘晚古生代的构造演化具有重要的意义.

1 区域地质背景及采样

1.1 研究区大地构造位置

北京地区处于华北克拉通北缘,北部紧邻兴蒙造山带东段(图 1a).兴蒙造山带是古亚洲洋东部消减—闭合过程中与华北克拉通和西伯利亚克拉通相互作用的产物,带内出露大量的显生宙蛇绿岩套、增生杂岩以及相关的岩体(Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013).根据 Eizenhöfer *et al.*(2014)的观点,兴蒙造山带由北向南可划分出北方造山带、索伦缝合带和南方造山带.古亚洲洋与华北克拉通北缘相互作用形成的南方造山带由北向南又可以依次厘定出图灵凯蛇绿岩带、温都尔庙增生杂岩带和白乃庙岛弧带.华北克拉通北缘分为内蒙古隆起和燕山构造带两部分,二者以平泉—古北口—赤城断裂带为界.东西向的内蒙古隆起内分布着大量的晚古生代侵入岩体,年龄集中介于 330~275 Ma (Zhang *et al.*, 2008, 2009a, 2009b),隆起区大部分区域缺失华北特征型的中元古代—早古生代海相地层.燕山板内构造带内是相对完整的华北型岩石地层.前寒武纪基底岩石主要是一些片麻岩、斜长角闪岩以及各类混合岩,片麻岩的 U-Pb 年龄主要集中在 2.5 Ga 和 1.8 Ga(Zhao *et al.*, 2005).这些基底岩石被中元古代—中奥陶世的碳酸盐岩和泥质岩覆盖,上覆为

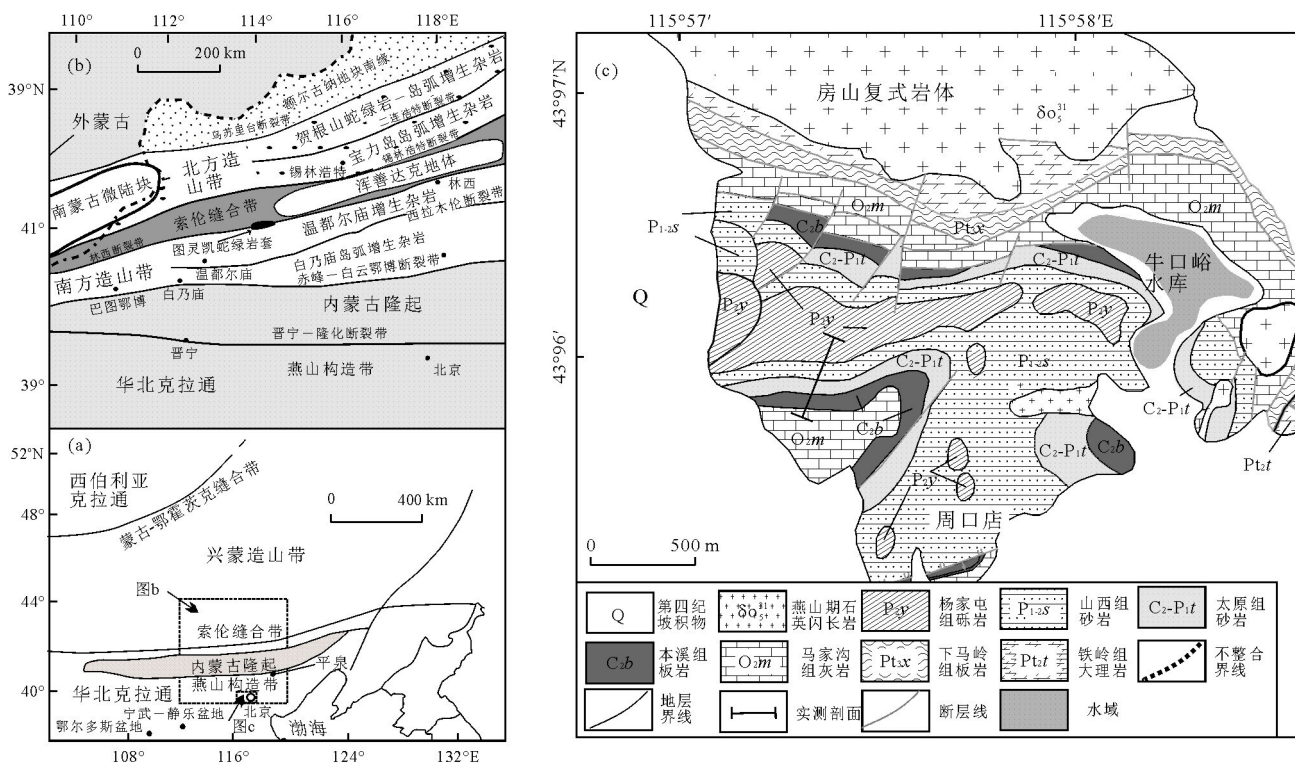


图 1 (a) 研究区大地构造位置; (b) 兴蒙造山带构造分区; (c) 周口店区域地质图

Fig.1 (a) Tectonic framework of North China craton and Central Asian orogenic belt; (b) geological sketch map of Xing-Meng orogenic belt; (c) detailed geological map of Zhoukoudian area

图 a 修改自 Zhang *et al.* (2007a); 图 b 修改自 Jian *et al.* (2012); 图 c 修改自周口店幅 1:50 000 地质图

晚古生代—早中生代陆源碎屑岩 (Li and Powell, 2001). 研究区地处北京市房山区周口店镇 (图 1c), 大地构造位置隶属于燕山构造带 (图 1a), 出露最古老的岩石为 2.5 Ga 的官地杂岩 (赵温霞等, 2003; 颜丹平等, 2005), 盖层发育完整, 晚古生代的碎屑岩以不整合的接触关系覆盖在奥陶系马家沟组灰岩之上, 受侏罗纪房山岩体侵入的影响, 研究区附近的岩石发生了不同程度的变质作用。

1.2 研究剖面与采样

研究剖面位于周口店镇太平山南坡 (图 2; 具体位置见图 1c). 剖面出露了上石炭统一下二叠统的 4 个岩石地层单位, 包括上石炭统本溪组、上石炭统一下二叠统太原组、下二叠统山西组和杨家屯组 (区域上相当于下石盒子组). 本溪组底部与下覆奥陶统马家沟组灰岩平行不整合接触, 岩性以角岩、板岩和砾岩为主. 太原组由两个沉积旋回组成, 第一个旋回为灰色中层变质细粒石英砂岩夹炭质板岩, 部分层位夹煤层; 第二个旋回主要为灰褐色板岩、粉砂岩. 山西组也由两个沉积旋回组成, 第一个旋回底部岩性为灰色中粗粒岩屑砂岩, 与下覆太原组为冲刷接触关系,

由下往上沉积粒度逐渐变小, 局部可见交错层理; 第二个旋回为黑色炭质板岩夹煤层, 旋回底部是深灰色中细粒变质岩屑砂岩, 顶部是板岩. 该组旋回上部的炭质板岩与泥质岩对应潮湿环境下的湖泊相沉积, 是华北板块的一个重要含煤层. 杨家屯组由两个沉积旋回组成, 第一个旋回的岩性主要为灰褐色中—粗粒变质岩屑砂岩; 第二个旋回的岩性主要为灰色中—厚层细粒岩屑砂岩夹黑色炭质板岩. 该组底部多为灰白色中—厚层砾岩, 砾石呈白色、棱角状, 砾径集中在 5~10 mm, 因砾石的颜色和外部形态特征, 该套砾岩也被称为“豆腐块”砾岩 (赵温霞等, 2003). 砾石经电子探针测试, 成分主要为 SiO₂, 结合显微镜下观察, 砾石岩性为石英岩. 层内发育明显的冲刷构造, 结合角砾状砾石的形态, 表明了其近源快速沉积的特点, 与旋回底部的岩屑砂岩代表了辫状河流或山区河流的沉积环境. 在实测剖面的基础上, 笔者分别在太原组、山西组和杨家屯组砂岩粒度和成分变化较大的层位采集了 5 件样品 (15ZKD-1、15ZKD-2、15ZKD-3、15ZKD-4 和 15ZKD-7) 用于碎屑锆石 U-Pb 年代学研究, 实测剖面图及具体采样层位见图 2. 样品薄片镜下观察显示,

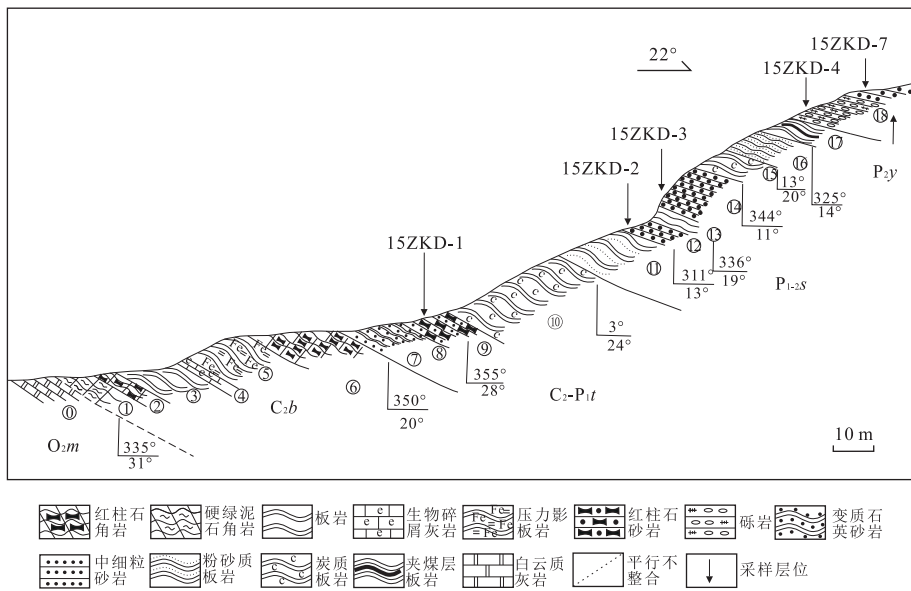


图 2 太平山南坡实测剖面

Fig.2 Measured sectional mapping of the southern hillside of Taiping hill

岩石发生轻微变质,镜下具定向特征.碎屑颗粒中矿物成分均以石英为主,岩屑主要为变沉积岩岩屑,部分样品杂基含量较高.

2 分析方法

锆石的分选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成,锆石的制靶和阴极发光(CL)照像在北京铀年领航科技有限公司完成.锆石微量元素含量测定和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a.激光剥蚀过程中采用氦气作载气,氩气为补偿气以调节灵敏度,另外输入少量氮气以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密性(Hu *et al.*, 2008).数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成. U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 6 个测试点分析 2 次 91500.对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010).锆石样品加权平均年龄计算、谐和图与年龄谱的绘制采用 Isoplot(3.27 版)完成.本文将谐和度 $\geq 90\%$ 的分析点视为谐和年龄,加权平均年龄的计算和年龄谱的绘制只采用具有谐和年龄的锆石.在谐

和年龄选取的过程中,小于 1 000 Ma 的年龄采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,大于 1 000 Ma 的年龄则采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄.

锆石 Hf 同位素的原位微区分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的多接受等离子质谱仪(Neptune Plus MC-ICP-MS)与 Geolas2005 基态原子 ArF 激光剥蚀系统联机的仪器上完成,激光剥蚀斑束的直径为 $44\ \mu\text{m}$,仪器测试条件、实验数据校正和分析流程详见 Hu *et al.* (2012).锆石 Hf 同位素分析的测点选择在 LA-ICP-MS 年龄测试点的附近,或者通过 CL 照片选择同样成因的环带区域.在 Hf 同位素分析中,标准锆石 91500 和 GJ-1 被用来校正精确度,91500 的平均 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 284 \pm 0.000\ 007$ ($n = 10$, 1σ),建议的比值为 $0.282\ 303 \pm 0.000\ 021$ (Wu *et al.*, 2006); GJ-1 的比值为 $0.282\ 002 \pm 0.000\ 011$ ($n = 4$, 1σ),建议比值为 $0.282\ 015 \pm 0.000\ 019$ (Elhlou *et al.*, 2006).分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010)完成.单阶段的 Hf 模式年龄(t_{DM})通过参照亏损地幔与现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比率进行计算,比值分别为 0.282 35 和 0.038 40.两阶段的 Hf 模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 通过大陆地壳的平均 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值进行计算,平均值为 0.015 (Griffin *et al.*, 2004).

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品中挑选的锆石多数呈浅红—紫红色, 颗粒以长柱状或者短柱状及其碎片为主, 偶见不规则状, 以自形一半自形锆石为主, 也有部分他形颗粒. CL 照片显示的形态主要有 3 类(图 3): (1) 大部分发育清晰的振荡环带, 表明了锆石主要起源于岩浆结晶; (2) 一部分锆石的 CL 内部均一, 无明显结构, 颗粒大多数呈他形, 属于变质成因的锆石; (3) 少量锆石显示核一边结构, 核部具均一或者振荡环带结构, 被外部明亮的、狭窄的、无环带的边包裹, 暗示了不同成因锆石的晚期生长(Xu *et al.*, 2010). 由于变质边很窄, 所有具有核一边结构的锆石分析点位于颗粒的核部.

15ZKD-1 样品是采自太原组上部的红柱石石英砂岩. 共测试锆石 71 颗, 大部分测点落在谐和曲线上或者附近(图 4a), 获得 60 个谐和年龄, 剩余 11 个测试点的数据谐和度低于 90%. 谐和的锆石颗粒 CL 图像主要为具振荡环带的岩浆锆石, 少量为变质锆石, 并且少部分具有被后期热事件改造的明亮的变质边(图 3a). 60 个谐和年龄分布介于 289~2 727 Ma, 可以分为 6 个年龄段: 289~325 Ma($n=33$), 343~409 Ma($n=5$), 1 740~2 080 Ma($n=8$), 2 258~2 369 Ma($n=2$), 2 447~2 618 Ma($n=11$) 和 2 727 Ma($n=1$). 在年龄谱中形成了 3 个年龄峰值: 2 486 ± 21 Ma (MSWD = 0.83, $n=9$), 1 804 ± 86 Ma (MSWD = 1.5, $n=4$) 和 299 ± 3 Ma (MSWD = 2.0, $n=19$)(图 5a). 19 颗年轻的锆石给出的加权平均年龄 299 ± 3 Ma, 限定了太原组沉积的下限年龄在早二叠世.

15ZKD-2 样品是采自山西组下部的杂砂岩. 对样品中的 71 颗锆石进行了 71 次分析, 获得 61 个谐和年龄, 10 颗锆石年龄不谐和. 谐和的锆石颗粒中, 有两颗锆石的 CL 成像显示暗淡的均一结构, 且 Th/U 比值 < 0.1, 分别为 0.015 和 0.075, 与变质锆石的特征一致. 其余具有谐和年龄的锆石 CL 照片显示典型的振荡环带, 并且 Th/U 比值介于 0.42~6.78, 与岩浆锆石的特征一致. 61 个谐和年龄分布范围介于 291~2 672 Ma, 构成 5 个年龄段: 291~320 Ma($n=8$), 391~410 Ma($n=4$), 1 750~2 109 Ma($n=18$), 2 235~2 322 Ma($n=3$) 和 2 433~2 672 Ma($n=28$). 在年龄谱中形成了 4 个明显的年龄峰, 峰值分别为 2 481 ± 17 Ma (MSWD =

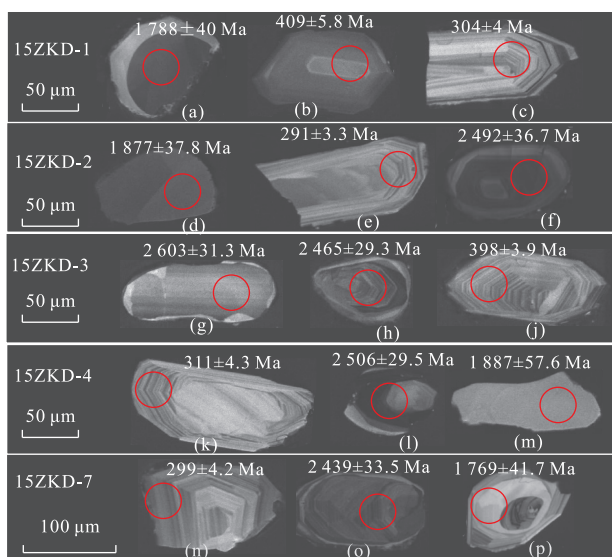


图 3 周口店晚生代碎屑岩部分锆石阴极发光照片

Fig.3 Respective CL images for analysed detrital zircons from Late Paleozoic strata in Zhoukoudian area

0.4, $n=14$), 1 857 ± 25 Ma (MSWD = 1.2, $n=12$), 403 ± 27 Ma (MSWD = 2.7, $n=12$) 和 298 ± 4 Ma (MSWD = 1.5, $n=6$)(图 5b).

15ZKD-3 样品是采自山西组顶部的岩屑砂岩. 测试的 77 颗锆石中获得了 67 个谐和的锆石年龄(图 4c). 谐和锆石中绝大部分锆石的阴极发光照片显示明显的岩浆振荡环带(图 3j), 少数颗粒发育明亮的变质边(图 3h). 谐和年龄分布介于 292~2 747 Ma, 主要集中在 4 个年龄区间: 292~309 Ma ($n=4$), 387~424 Ma ($n=9$), 1 526~2 044 Ma ($n=15$) 和 2 172~2 747 Ma ($n=36$). 另有两颗锆石的谐和年龄分别为 1 243 ± 51 Ma 和 1 367 ± 59 Ma, 最老的锆石谐和年龄为 2 809 ± 36 Ma. 在年龄谱中形成了 4 个年龄明显的峰, 峰值加权平均年龄分别为 2 526 ± 19 Ma (MSWD = 2.2, $n=27$), 1 932 ± 40 Ma (MSWD = 2.4, $n=11$), 394 ± 8 Ma (MSWD = 1.5, $n=4$) 和 299 ± 4 Ma (MSWD = 2.7, $n=3$)(图 5c).

15ZKD-4 样品采自杨家屯组底部的“豆腐块”砾岩. 在 79 颗锆石上进行了 79 次分析(图 4d), 获得 55 个谐和年龄. 阴极发光照片显示谐和锆石具岩浆锆石的振荡环带(图 3k). 55 个谐和年龄分布介于 285~2 506 Ma, 主要集中在 4 个年龄段: 285~329 Ma ($n=47$), 337~396 Ma ($n=2$), 1 887~1 889 Ma ($n=2$), 2 480~2 506 Ma ($n=3$). 另有一颗锆石给出了 2 161 ± 51 Ma 的谐和年龄. 在年龄谱中形成了 2 个明显的年龄峰, 峰值主要为 2 497 ±

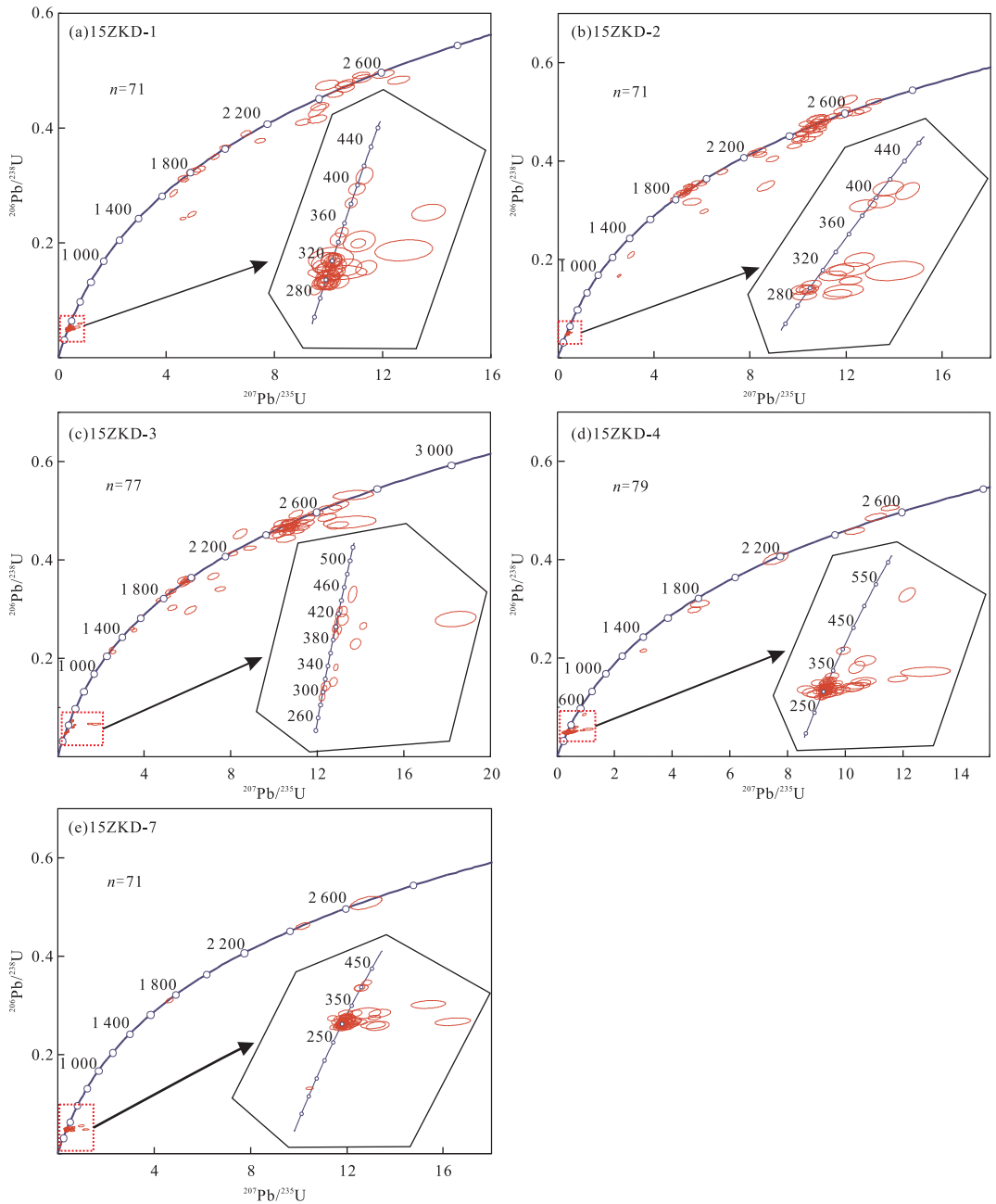


图 4 周口店太平山南坡下二叠统碎屑锆石 U-Pb 谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams for detrital zircons from the studied samples
年龄单位为 Ma

38 Ma (MSWD = 0.16, $n = 3$) 和 308 ± 2 Ma (MSWD=2.3, $n = 31$) (图 5d), 最年轻 8 颗谐和和锆石给出的加权平均年龄为 291 ± 4 Ma (MSWD = 2.5, $n = 8$), 限定了杨家屯组沉积的下限年龄为早二叠世早期。

15ZKD-7 样品为杨家屯组下部的岩屑砂岩。71 个锆石测试点中获得 53 个谐和锆石年龄 (图 4e)。阴极发光照片显示谐和的锆石内部具明显的岩浆振荡环带 (图 3n)。谐和年龄分布介于 289~2 695 Ma, 主要集

中在 289~328 Ma ($n = 47$)、398~412 Ma ($n = 3$) 和 2 439~2 695 Ma ($n = 2$) 3 个年龄区间, 并在 298 ± 2 Ma (MSWD=2.1, $n = 33$) 形成了一个优势年龄峰。另有一颗锆石给出了 $1 769 \pm 42$ Ma 的谐和年龄 (图 5e)。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

本文测试了下二叠统杨家屯组样品 (15ZKD-7) 中最年轻的 29 颗锆石的 Hf 同位素组成, 分析结果见表 1。获得的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围为 0.282 021~0.282 318; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的值均为负值, 集中介

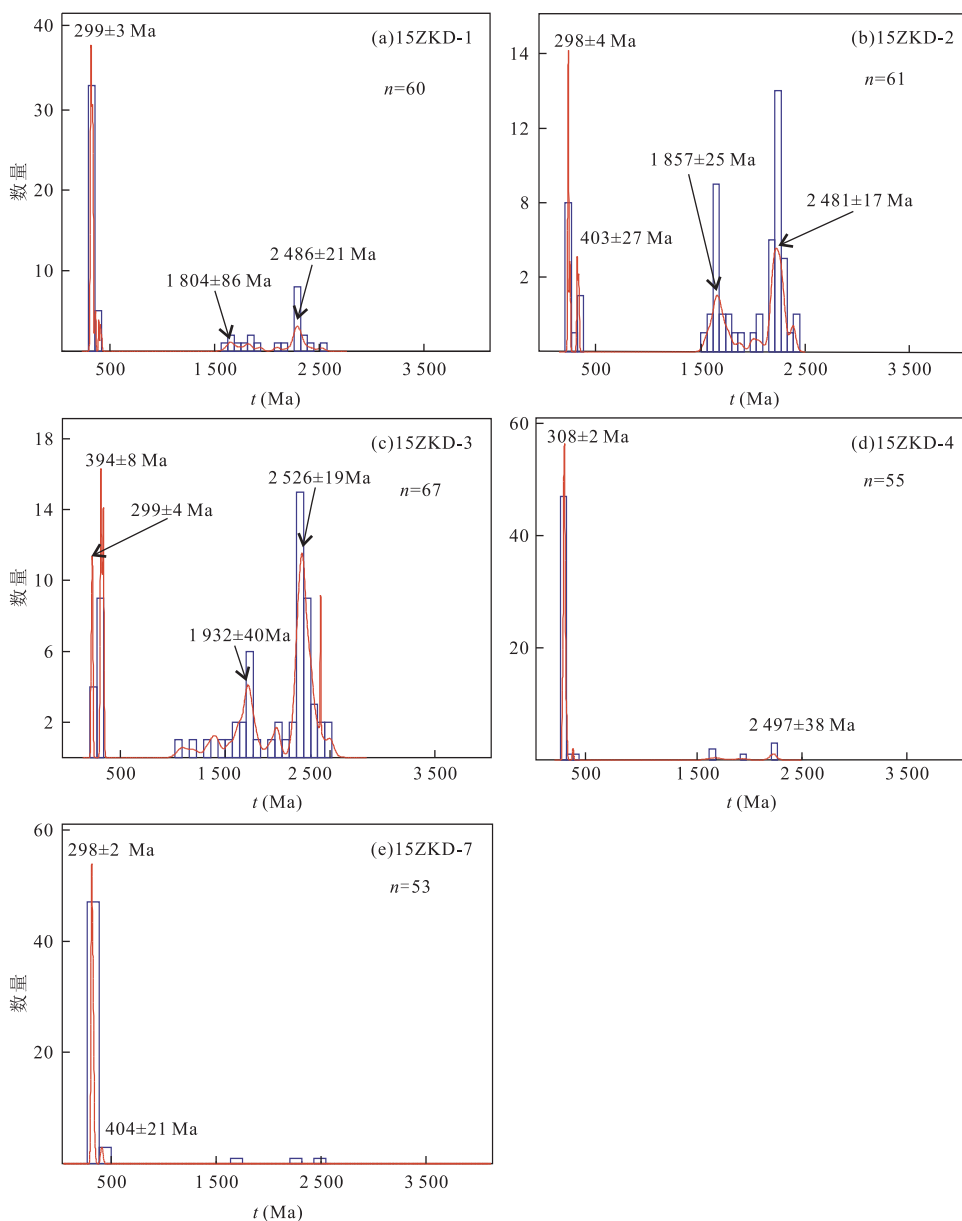


图 5 周口店太平山南坡下二叠统碎屑锆石年龄谱

Fig.5 U-Pb age distribution diagrams for detrital zircons from the Taiyuan, Shanxi and Yangjiatun Formations in the Zhoukoudian area

于 $-9.6 \sim -20.1$, 两阶段模式年龄 (t_{DM2}) 的范围介于 $1.71 \sim 2.29$ Ga (图 6).

4 讨论

4.1 地层的沉积时代

周口店太平山南坡下古生界本溪组、太原组、山西组、杨家屯组呈连续的整合接触关系(赵温霞等, 2003). 采自太原组底部的样品中(15ZKD-1)最年轻的 11 颗锆石的加权平均年龄为 299 ± 3 Ma, 与国际地层年代学表中石炭纪和二叠纪的界限年龄一致. 通常来

讲, 碎屑锆石是源区岩石经风化—剥蚀—搬运之后沉积下来的碎屑矿物, 因而最年轻碎屑锆石的峰值年龄一般老于地层的沉积年龄, 通常可以用于限定地层的下限年龄. 但是如果源区存在剧烈的火山活动以及快速的隆升, 那么沉积物经历的地表过程会大大缩减甚至会不经这些过程而直接沉积在盆地之中, 这时最年轻碎屑锆石的峰值年龄与地层的沉积年龄相当 (Dickinson and Gehrels, 2009), 这部分锆石也称为“同沉积锆石”, 它们的 U-Pb 年龄可以用于标定地层的沉积年龄. 太原组底部样品的最年轻碎屑锆石年龄峰值与前人利用古生物化石对地层限定的沉积时代年龄相似, 比如太原组下部产属于晚石炭世的蜓类 $Tr-$

表 1 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 1 Lu-Hf isotope analysis of zircons from Zhoukoudian area (sample 15ZKD-7)

编号	年龄		比值				$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	
	$t(\text{Ma})$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$					1σ
1	302	0.001 316	0.000 595	0.057 293	0.000 017	0.282 318	0.000 013	-9.66	1 329.11	1 722.30	-0.960 37
2	301	0.001 251	0.000 962	0.045 521	0.000 028	0.282 053	0.000 013	-19.06	1 698.56	2 237.32	-0.962 31
3	296	0.001 041	0.001 455	0.040 156	0.000 021	0.282 140	0.000 014	-16.04	1 568.00	2 068.1	-0.968 63
4	313	0.002 051	0.002 842	0.094 317	0.000 081	0.282 216	0.000 018	-13.20	1 501.94	1 924.96	-0.938 23
5	299	0.000 674	0.001 226	0.029 290	0.000 022	0.282 317	0.000 012	-9.64	1 308.02	1 718.60	-0.979 71
6	304	0.000 945	0.000 467	0.035 241	0.000 011	0.282 145	0.000 015	-15.67	1 556.97	2 054.16	-0.971 52
7	310	0.000 762	0.000 839	0.030 615	0.000 010	0.282 150	0.000 016	-15.32	1 542.59	2 039.93	-0.977 04
8	299	0.001 274	0.001 385	0.047 786	0.000 037	0.282 143	0.000 017	-19.46	1 713.83	2 257.89	-0.961 64
9	306	0.001 026	0.000 540	0.036 940	0.000 010	0.282 085	0.000 013	-17.76	1 643.50	2 170.10	-0.969 09
10	303	0.001 495	0.001 805	0.057 087	0.000 029	0.282 075	0.000 014	-18.29	1 679.12	2 196.89	-0.954 96
11	297	0.001 505	0.000 741	0.056 254	0.000 012	0.282 042	0.000 016	-19.58	1 725.60	2 262.63	-0.954 67
12	299	0.000 675	0.001 047	0.025 713	0.000 019	0.282 146	0.000 015	-15.69	1 544.91	2 051.71	-0.979 68
13	296	0.000 764	0.000 699	0.027 271	0.000 011	0.282 102	0.000 017	-17.33	1 609.44	2 139.31	-0.977 00
14	309	0.001 399	0.001 796	0.049 840	0.000 062	0.282 108	0.000 016	-16.97	1 627.80	2 128.95	-0.957 87
15	304	0.001 412	0.000 710	0.051 770	0.000 013	0.282 021	0.000 017	-20.14	1 750.13	2 298.92	-0.957 47
16	295	0.000 924	0.000 995	0.035 976	0.000 025	0.282 120	0.000 016	-16.74	1 590.70	2 106.01	-0.972 18
17	294	0.001 411	0.000 664	0.051 129	0.000 018	0.282 075	0.000 017	-18.46	1 675.16	2 199.21	-0.957 51
18	297	0.001 118	0.000 582	0.039 416	0.000 024	0.282 127	0.000 012	-16.49	1 589.13	2 093.56	-0.966 33
19	290	0.000 538	0.001 207	0.023 096	0.000 021	0.282 061	0.000 014	-18.86	1 655.72	2 218.18	-0.983 79
20	290	0.000 757	0.001 457	0.027 270	0.000 033	0.282 124	0.000 015	-16.69	1 579.33	2 099.78	-0.977 18
21	295	0.000 798	0.000 494	0.029 036	0.000 011	0.282 110	0.000 012	-17.10	1 600.37	2 125.50	-0.975 97
22	300	0.000 729	0.000 309	0.025 178	0.000 002	0.282 151	0.000 014	-15.49	1 540.05	2 041.85	-0.978 04
23	302	0.001 219	0.000 565	0.043 450	0.000 009	0.282 085	0.000 013	-17.88	1 652.10	2 173.98	-0.963 27
24	299	0.002 103	0.000 716	0.076 302	0.000 027	0.282 090	0.000 017	-17.97	1 685.05	2 175.41	-0.936 65
25	293	0.001 294	0.000 956	0.045 145	0.000 037	0.282 105	0.000 013	-17.40	1 627.83	2 140.15	-0.961 02
26	290	0.000 891	0.000 658	0.031 924	0.000 021	0.282 118	0.000 012	-16.94	1 592.87	2 112.50	-0.973 16
27	306	0.001 044	0.000 654	0.036 147	0.000 014	0.282 106	0.000 012	-17.04	1 615.84	2 130.71	-0.968 55
28	313	0.000 613	0.000 188	0.024 631	0.000 004	0.282 092	0.000 013	-17.29	1 616.64	2 150.01	-0.981 52
29	312	0.001 283	0.001 071	0.043 075	0.000 044	0.282 118	0.000 016	-16.55	1 609.33	2 107.9	-0.961 34

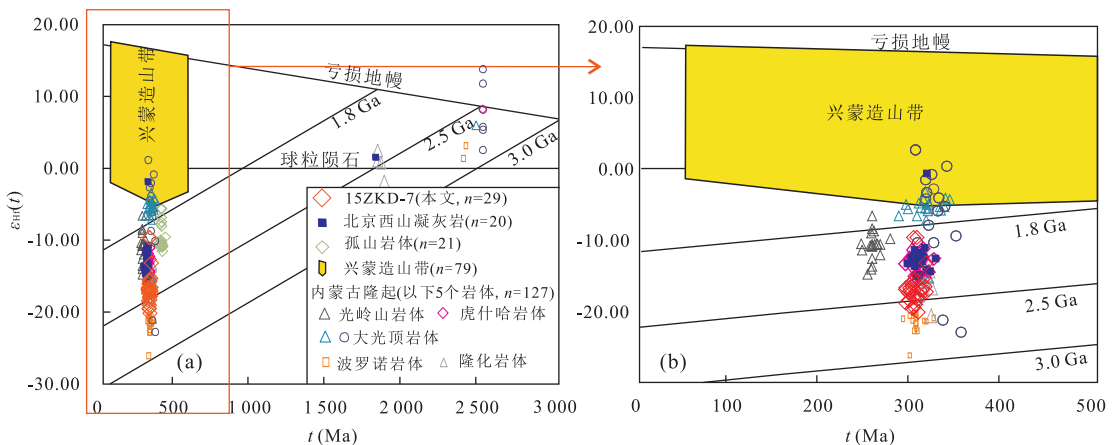


图 6 杨家屯组早二叠世碎屑锆石的 Hf 同位素特征

Fig.6 Hf isotopic of detrital zircons from Yangjiatun Formation in Zhoukoudian area

b 图为 a 图红框区域放大大部分.内蒙古隆起区域数据引用较多,如图 b.兴蒙造山带数据来自 Yang *et al.* (2006);北京西山凝灰岩数据来自 Zhang *et al.* (2007c);孤山岩体数据来自 Zhang *et al.* (2007b);内蒙古隆起数据来自 Zhang *et al.* (2009a)

ticites sp.和早二叠世的假希瓦格蠕 *Pseudoschwagerina* sp.(赵温霞等,2003),时代也处于晚石炭世一早

二叠世转换阶段.因此本文推断,组成太原组底部最年轻峰值年龄的这部分碎屑锆石属于同沉积锆石,最

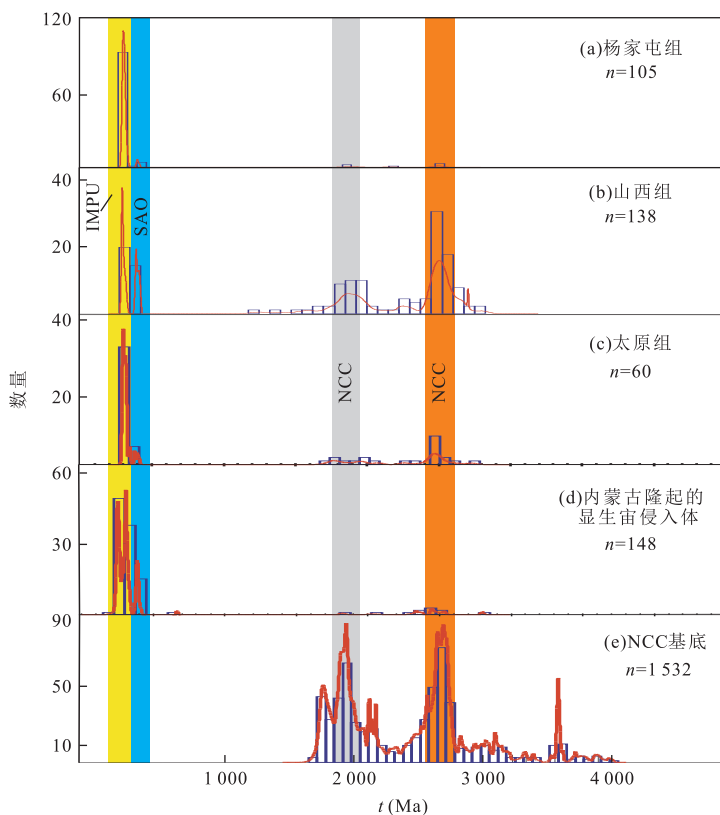


图 7 锆石 U-Pb 年龄与邻区岩浆岩体对比

Fig.7 U-Pb age distribution diagram for detrital zircons

图 a, b, c 分别为本文不同层位样品的锆石年龄数据;图 a 来自样品 15ZKD-4、15ZKD-7;图 b 来自样品 15ZKD-2、15ZKD-3;图 c 来自样品 15ZKD-1;IMPU 表示内蒙古隆起(图 d),数据来自 Zhang *et al.*(2007a, 2007b, 2009a);SAO 表示南方造山带,NCC 表示华北克拉通基底(图 e),数据来自 Rojas-Agramonte *et al.*(2011)

年轻的峰值年龄限定了太原组底部的沉积年龄应为早二叠世早期。

山西组底部样品(15ZKD-2)最年轻锆石峰值年龄为 298 ± 4 Ma, 杨家屯组底部样品(15ZKD-4)最年轻的峰值年龄为 291 ± 4 Ma, 上部样品(15ZKD-7)最年轻的峰值年龄为 298 ± 2 Ma, 均为早二叠世。而古生物学资料表明, 山西组和杨家屯组多产二叠纪的植物化石, 如 *Lobatannularia sinensis* (中华瓣轮叶)和 *Sphenophllum verticillatum* (轮生楔叶)等(赵温霞, 2003)。因此最年轻的碎屑锆石年龄峰值与古生物资料限定的地层沉积时代在误差范围内是一致的。综合上述最年轻碎屑锆石的峰值年龄以及古生物资料推断, 太原组、山西组和杨家屯组碎屑岩的沉积时代均应为早二叠世早期。

4.2 物源分析

北京周口店地区地处华北克拉通北部的燕山构造带内, 华北北缘的内蒙古隆起、兴蒙造山带、华北内部以及南部北秦岭造山带均为潜在的物源区。本文将太平山南坡的碎屑锆石年龄谱与邻区(平泉地

区、鄂尔多斯盆地、太行山南缘、静乐盆地和北京西山)同时代地层对比, 发现这些位于华北内部的盆地石炭纪—二叠纪的碎屑锆石年龄分布区间基本一致, 包括 2.7~2.4 Ga、1.9~1.65 Ga 和 330.0~260.0 Ma。但是二叠纪同沉积锆石的含量明显有差异, 而且从北往南呈规律变化, 如在北部平泉地区的锆石含量约占 30% (马收先等, 2011, 2014), 北京西山地区(Yang *et al.*, 2006)和本文数据显示锆石含量约为 16%, 而位于南部静乐盆地的锆石含量占 8% (Li *et al.*, 2009), 最南边的太行山南缘的二叠纪锆石含量仅为 6% (Li *et al.*, 2010), 这说明二叠纪同沉积锆石由北往南逐渐减少, 暗示了物源区在研究区以北, 结合南向的古流证据(王华等, 2001), 推断沉积物主要来自盆地北部。

太平山南坡的碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在 2 747~2 433 Ma、2 080~1 740 Ma、424~387 Ma 和 329~285 Ma 4 个区间。前寒武纪碎屑锆石年龄主要出现在太原组和山西组, 杨家屯组有少量分布, 并在 2.5 Ga 和 1.9~1.8 Ga 形成两个明显的年龄峰值(图

5). 这两个年龄峰值与华北基底岩石大规模形成的两次岩浆事件年龄一致(图 7e)(Zhao *et al.*, 2005), 表明在太原组和山西组沉积期间, 物源区存在大量华北基底岩石或者这些岩石的再循环沉积物。

显生宙碎屑锆石的年龄范围与兴蒙造山带和内蒙古隆起报道的中—晚古生代岩浆活动时间范围一致。兴蒙造山带是在古亚洲洋的消减—关闭过程中形成的大型增生造山带, 其内部结构包括主洋盆关闭形成的索伦缝合带、缝合带北侧增生在西伯利亚南缘的北方造山带和南侧增生在华北北缘的南方造山带(Eizenhöfer *et al.*, 2014)。南方造山带以及华北北缘出露的中—晚古生代侵入岩和火山碎屑岩的锆石 U-Pb 结晶年龄主要集中在 490~390 Ma 和 325~252 Ma (Zhang *et al.*, 2009a; Wang *et al.*, 2016; 王健等, 2016; Zhu *et al.*, 2016), 如南方造山带内图灵凯蛇绿岩单元中长英质岩石的年龄集中在 490~450 Ma, 早古生代白乃庙岛弧和巴图岛弧地体中的长英质岩石年龄集中在 480~410 Ma (Jian *et al.*, 2008), 华北北缘内蒙古隆起中部分长英质岩石的年龄在 390 Ma 左右 (Zhang *et al.*, 2007b; 表 2)。本文样品中 424~387 Ma 的碎屑锆石年龄范围与南方造山带内早古生代岛弧地体以及华北北缘内蒙古隆起区内的岩石年龄范围一致, 与图灵凯蛇绿岩中的长英质岩石年龄不一致。因此南方造山带中的早古生代岛弧地体和内蒙古隆起区中的部分泥盆纪侵入体可能是太平山南坡碎屑岩中 424~

387 Ma 碎屑锆石的物源区。这一物源特征说明古亚洲洋体系中早古生代形成的岛弧地体在二叠纪之前已经增生到了华北克拉通的北缘, 这与 Zhang *et al.* (2007b) 和刘建峰等 (2013) 认为的在早泥盆世 (410~390 Ma) 该区存在弧—陆碰撞的认识是一致的。

内蒙古隆起区也出露有大量年龄分布介于 330~255 Ma 的长英质岩石 (表 2), 这些岩石中部分锆石的 Hf 同位素组成与样品中同期锆石的 Hf 同位素组成相似 (图 6)。尤其值得指出的是, 北京西山一带发现有 296 Ma 左右的凝灰岩 (Zhang *et al.*, 2007c), 其年龄峰值以及 Hf 同位素组成在误差范围内和本文样品中的二叠纪同沉积锆石年龄峰值完全一致 (图 6)。这一方面证明了样品中的显生宙碎屑锆石应主要源自盆地北部的内蒙古隆起区, 另一方面也证明了二叠纪碎屑锆石源自活动火山的喷发事件, 属于同沉积碎屑锆石的推断。

区域地层资料显示 (童金南等, 2013), 内蒙古隆起缺失了大量的中元古代—早古生代的沉积盖层, 仅在隆化—丰宁断裂带附近出露少量该时间段内的沉积岩 (Zhang *et al.*, 2009a; 曹花花等, 2012), 下侏罗统直接覆盖在前寒武纪基底岩石之上, 这样的地层接触关系表明华北北缘内蒙古隆起区在侏罗纪之前可能长期暴露, 隆起区前寒武纪基底及中元古代—早古生代盖层中的部分岩石被剥蚀, 这些可能是样品中变沉积岩岩屑的主要物源区。

表 2 华北北缘内蒙古隆起和南方造山带的岩浆活动记录

Table 2 Data of magmatism in Inner Mongolia paleo-uplift and Xing-Meng orogenic belt

岩体名	采样点	构造分区	岩性	锆石 U-Pb t (Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	参考文献
孤山岩体	承德	内蒙古隆起	石英闪长岩	390±4		Zhang <i>et al.</i> , 2007b
水泉沟岩体	赤城	内蒙古隆起	石英碱长岩	390±6	-11.8~-5.8	Zhang <i>et al.</i> , 2007a
隆化岩体	隆化	内蒙古隆起	石英闪长岩	311±2	-20.7~-13.2	Zhang <i>et al.</i> , 2009a
大光顶岩体	隆化	内蒙古隆起	石英闪长岩	324±6	-22.8~1.2	Zhang <i>et al.</i> , 2009a
波罗诺岩体	波罗诺	内蒙古隆起	石英闪长岩	302±4	-38.3~-20.1	Zhang <i>et al.</i> , 2009a
建平岩体	辽西	内蒙古隆起	闪长岩	304±2		Zhang <i>et al.</i> , 2009a
D315-1	建平	内蒙古隆起	石英闪长岩	252±4		Zhang <i>et al.</i> , 2009a
MT1-1	图灵凯蛇绿岩	南方造山带	石英闪长岩	454±2		Jian <i>et al.</i> , 2008
MT1-4	图灵凯蛇绿岩	南方造山带	奥长花岗岩	472±2		Jian <i>et al.</i> , 2008
MT1-8	图灵凯蛇绿岩	南方造山带	英云闪长岩	490±7		Jian <i>et al.</i> , 2008
DRAB01	巴图岛弧	南方造山带	英云闪长岩	417±2		Jian <i>et al.</i> , 2008
BYH01	巴图岛弧	南方造山带	石英闪长岩	440±2		Jian <i>et al.</i> , 2008
BYH02	巴图岛弧	南方造山带	闪长岩	452±3		Jian <i>et al.</i> , 2008
BNM04	白乃庙岛弧	南方造山带	流纹岩	474±7		Jian <i>et al.</i> , 2008
BNM09	白乃庙岛弧	南方造山带	伟晶岩	411±8		Zhang <i>et al.</i> , 2013
BNM01	白乃庙岛弧	南方造山带	英安岩	436±9		Zhang <i>et al.</i> , 2013
BNM05	白乃庙岛弧	南方造山带	闪长岩	419±10		Zhang <i>et al.</i> , 2013
T3S-1	北京西山	燕山构造带	凝灰岩	296±4	-15.9~-10.7	Zhang <i>et al.</i> , 2007c
YSH01-4	赤峰	赤峰—开原断裂带	流纹质凝灰岩	404±1	-22.0~-16.4	刘建峰等, 2013

综合上述年代学和区域地层信息推断,周口店地区太平山南坡下古生界碎屑岩中的沉积物主要源自华北北缘内蒙古隆起区内的前寒武纪基底岩石、兴蒙造山带内南方造山带分布的早古生代岛弧地体以及华北北缘同沉积期的火山碎屑沉积物。

4.3 大地构造意义

对造山带演化研究极其重要的岩石记录经常会在后期的风化—剥蚀—搬运过程中从造山带内消失,而它们所形成的沉积物往往被沉积在相邻的盆地之中,是研究造山带构造演化的重要地质记录,这些碎屑物质的地球化学特征以及年代学特征对构造背景的限制作用已经被大量的研究证实(Belousova *et al.*, 2002; Cawood *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012).华北克拉通北缘二叠纪火山岩露头较少,可能是长期暴露遭受剥蚀作用的结果.周口店太平山南坡碎屑岩中保留的碎屑锆石年代学特征以及同沉积锆石的地球化学特征可以反映华北北缘二叠纪大地构造背景。

Cawood *et al.* (2012)根据盆地周缘岩浆活动以及基底岩石卷入造山带的情况把盆地类型划分为 3 大类,每类盆地内充填的沉积物的碎屑锆石 U-Pb 锆石年代学特征不同:(1) 汇聚背景下的沉积盆地(如弧前盆地、弧后盆地),大多伴随着同期的岛弧岩浆活动,因此沉积物中含有大量来自活动岛弧的火山碎屑物质,在弧后盆地靠近大陆一侧也会出现来自大陆的较老的沉积物;(2) 同造山背景下的沉积盆

地(如弧后前陆盆地、周缘前陆盆地)的沉积物主要来自上隆的造山带,因卷入造山带的岩石不仅有较老的基底岩石,而且伴有同造山岩浆活动,所以沉积物中除了有较多基底岩石碎屑外,也经常有新生的、年轻的岩浆岩碎屑;(3) 离散背景下的沉积盆地(包括裂谷盆地、被动大陆边缘、稳定的克拉通盆地)中的沉积物主要来自盆地周缘的大陆基底,与盆地开启时间相当的年轻沉积物较少.据此总结了 3 种沉积盆地内部碎屑锆石 U-Pb 年龄累积曲线特征(图 8e).根据碎屑锆石年龄的累积曲线特征,太平山南坡下古生界碎屑锆石 U-Pb 年龄数据中较多的来自内蒙古隆起的同沉积碎屑锆石,并且在太原组和山西组中还有大量的来自华北克拉通基底的碎屑物质,但是杨家屯组沉积时期,仅有来自内蒙古隆起的同期火山物质,没有来自华北克拉通基底的碎屑物质输入.根据碎屑锆石年龄的累积曲线特征及其物源区存在同期火山活动的物源特征,表明盆地处于汇聚型大陆边缘背景之下。

微量元素 Hf、Nb、Th、U 在不同成分的岩浆中的含量和地球化学行为是不同的,相应导致这些岩浆中结晶的锆石的 Hf、Nb、Th、U 含量和比值出现差异,而岩浆的成分又受控于岩浆形成的构造背景,因此 Yang *et al.* (2012)总结出锆石的 Nb/Hf-Th/U 和 Hf/Th-Th/Nb 图解(图 8),用于判别盆地内部充填的某个时间段的碎屑锆石属于板内/非造山成因,还是岛弧/造山带背景下结晶的锆石.周口店

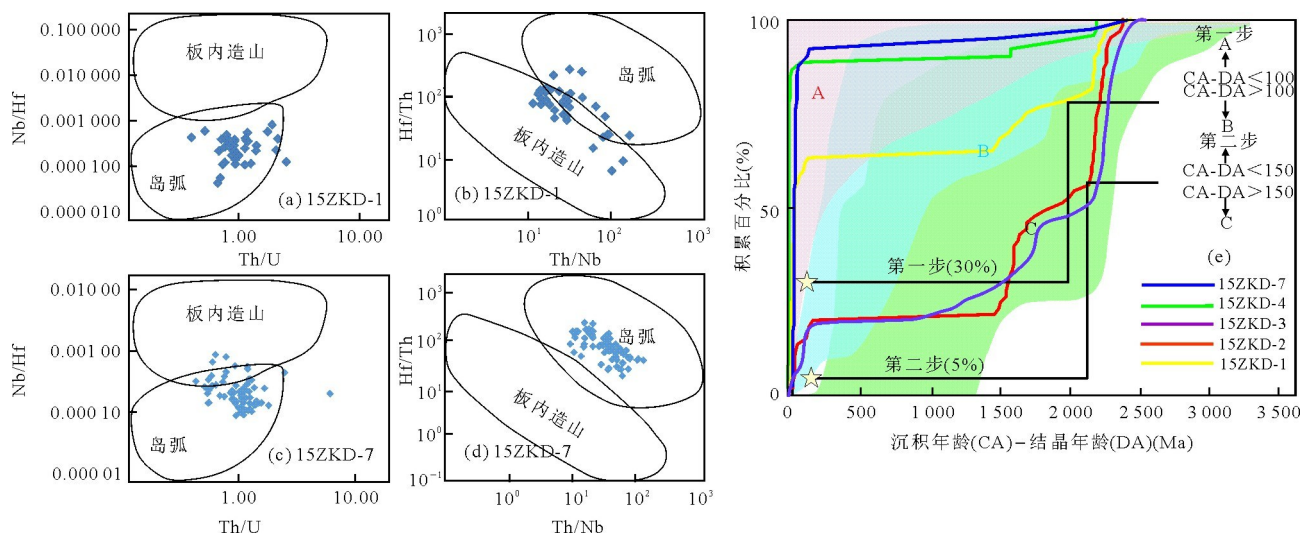


图 8 构造背景判别

Fig.8 Tectonic background discrimination diagrams

a~d.同沉积锆石微量元素构造背景判别图(a和b为太原组同沉积锆石,c和d为杨家屯组同沉积锆石,修改自 Yang *et al.* (2012); e.累积曲线修改自 Cawood *et al.* (2012)

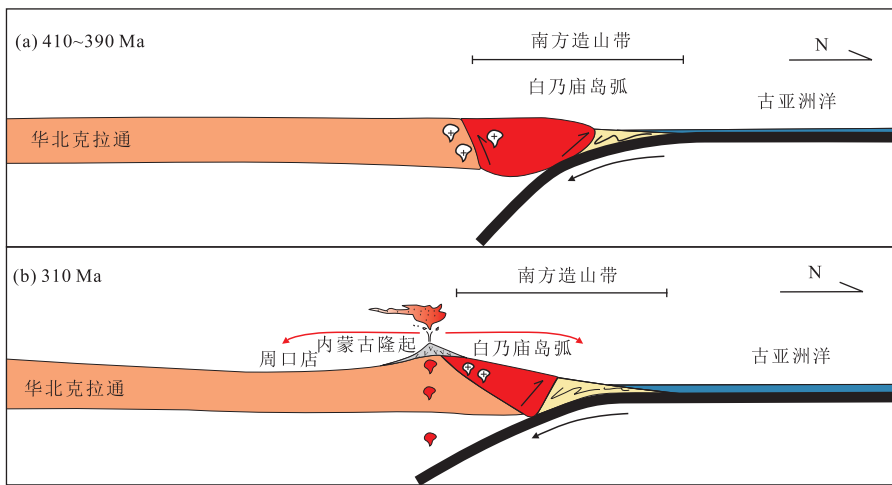


图 9 华北北缘中—晚古生代构造演化模式

Fig.9 Tectonic evolution of the northern margin of North China craton in Mid-Late Paleozoic

太平山南坡晚古生代地层中早二叠世同沉积锆石的微量元素比值与岛弧/造山带背景下结晶的锆石一致(图 8a~8d),表明华北北缘在二叠纪早期存在活动的岛弧岩浆作用。二叠纪同沉积锆石的 Hf 同位素组成显示的两阶段模式年龄与华北克拉通基底岩石一致(图 6),说明岛弧岩浆作用起源于华北克拉通基底岩石在二叠纪的重融再造。这些活动的岛弧岩浆作用存在,表明古亚洲洋洋壳在二叠纪早期仍然存在南向的消减作用,古亚洲洋的关闭应该在早二叠世之后。这与前人对华北北缘侵入岩的研究结果一致(Windley *et al.*, 2007; Eizenhöfer *et al.*, 2014)。本次研究中获得的晚古生代碎屑锆石从 330~285 Ma,具有连续、无间断的特征,与区域地质资料记载的华北北缘晚古生代岛弧岩浆活动在 330~260 Ma 长期活动的信息一致(Yang *et al.*, 2006; 马收先等, 2011)。

根据区域地质资料,内蒙古隆起的大规模上隆始于~330 Ma(马收先等, 2011; 马千里等, 2017),与华北北缘岛弧岩浆活动起始时间基本一致。时空上的耦合关系表明,内蒙古隆起的上隆与古亚洲洋南向俯冲导致的岛弧火山作用相关。从太平山南坡下古生界中保存的碎屑锆石年代学特征来看,前寒武纪沉积物在太原组—山西组中大量存在,而杨家屯组中缺失(图 5; 图 7a, 7b),物源在垂向上的变化反映了二叠纪岛弧属于发育在华北大陆北缘的大陆岛弧属性。在太原组—山西组沉积期,同沉积期的岛弧火山作用导致基底岩石与同期的火山碎屑物质一起被剥蚀到沉积盆地之中。杨家屯组沉积期火山作用持续不断,但是火山口附近的基底岩石已经被剥

蚀殆尽或者被覆盖在火山碎屑之下,仅有同沉积期的火山碎屑进入沉积盆地。

近来, Eizenhöfer *et al.* (2014) 调查了兴蒙造山带南侧的西拉木伦—林西一带的二叠纪碎屑岩的物源,这套岩石的锆石 U-Pb 年代学特征与本文一致,说明上隆的内蒙古隆起不但向南侧华北内陆提供沉积物,同时也向北侧古亚洲洋方向的弧前盆地之中提供沉积物。

综合上述研究结果以及区域地质资料,本文认为华北北缘石炭纪—二叠纪盆山相互作用受控于古亚洲洋南向俯冲导致的内蒙古隆起的快速上隆,其演化模型可总结如下:在 330 Ma 之前,由于古亚洲洋的南向消减导致早古生代形成的岛弧地体增生到华北克拉通的北缘(图 9a),从约 330 Ma 开始,古亚洲洋持续南向消减导致华北克拉通北缘及其早期增生的地体快速上隆,形成内蒙古隆起,上隆的基底以及同期的岛弧火山活动形成大量的沉积物向隆起两侧搬运,沉积在南部华北北缘弧后前陆盆地和北侧弧前盆地之中(图 9b)。

5 结论

北京周口店地区晚古生代碎屑锆石的 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成约束了华北克拉通北缘的盆山相互作用过程及古亚洲洋洋盆闭合的时间。碎屑锆石 U-Pb 年龄表明太原组—杨家屯组的年龄主要集中在 2 747~2 433 Ma、2 080~1 740 Ma、424~387 Ma 和 329~285 Ma,分别源自盆地北部华北北缘内蒙古隆起区内的前寒武纪基底岩石、兴蒙造山

带内南方造山带分布的早古生代岛弧地体以及华北北缘同沉积期的火山碎屑沉积物。早二叠世碎屑锆石属于同沉积锆石,限定了太原组—杨家屯组沉积时代在早二叠世早期。同沉积期的火山活动具有岛弧岩浆活动的地球化学特征,暗示该时期古亚洲洋并没有闭合,持续的南向消减作用导致了内蒙古隆起的快速上隆,并向隆起两侧提供了大量的沉积物。晚古生代华北北缘的盆山相互作用受控于古亚洲洋洋壳的南向俯冲作用。

致谢: 锆石的 U-Pb 年代学测试和 Hf 同位素测量得到了胡兆初教授、罗涛博士、齐靓博士和戴维硕士的帮助,野外工作得到了李哲硕士的帮助,两名匿名审稿人对论文的完善给出了有益的建议和意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Cao, H. H., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2012. Permian Tectonic Evolution of the Eastern Section of the Northern Margin of the North China Plate: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2733–2750 (in Chinese with English abstract).
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J., Dhuime, B., 2012. Detrital Zircon Record and Tectonic Setting. *Geology*, 40(10): 875–878. <https://doi.org/10.1130/g32945.1>
- Cawood, P. A., Nemchin, A. A., Freeman, M., et al., 2003. Linking Source and Sedimentary Basin: Detrital Zircon Record of Sediment Flux along a Modern River System and Implications for Provenance Studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1–2): 259–268. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00122-5)
- Cope, T., Ritts, B. D., Darby, B. J., et al., 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. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.3.270>
- Dickinson, W. R., Gehrels, G. E., 2009. Use of U-Pb Ages of Detrital Zircons to Infer Maximum Depositional Ages of Strata: A Test against a Colorado Plateau Mesozoic Database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1–2): 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.013>
- Dobretsov, N. L., Berzin, N. A., Buslov, M. M., 1995. Opening and Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Review*, 37(4): 335–360. <https://doi.org/10.1080/00206819509465407>
- Eizenhöfer, P. R., Zhao, G. C., Zhang, J., et al., 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. <https://doi.org/10.1002/2013tc003357>
- Elhlo, S., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1383>
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3–4): 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093–1101. <https://doi.org/10.1039/b804760j>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In-Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391–1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Huang, J. Q., Ren, J. S., Jiang, C. F., et al., 1977. An Outline of the Tectonic Characteristics of China. *Acta Geologica Sinica*, 51(2): 117–135 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Kröner, A., Windley, B. F., et al., 2012. Carboniferous and Cretaceous Mafic-Ultramafic Massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP Zircon and Geochemical Study of the Previously Presumed Integral “Hegenshan Ophiolite”. *Lithos*, 142–143: 48–66. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.007>
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.005>
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Kröner, A., et al., 2002. The Most Ancient Ophiolite of the Central Asian Fold Belt:

- U-Pb and Pb-Pb Zircon Ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and Geodynamic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3-4): 311-325. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00587-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00587-3)
- Li, D. P., Jin, Y., Hou, K. J., et al., 2015. Late Paleozoic Final Closure of the Paleo-Asian Ocean in the Eastern Part of the Xing-Meng Orogenic Belt: Constrains from Carboniferous-Permian (Meta-) Sedimentary Strata and (Meta-) Igneous Rocks. *Tectonophysics*, 665: 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.10.007>
- Li, H. Y., He, B., Xu, Y. G., et al., 2010. U-Pb and Hf Isotope Analyses of Detrital Zircons from Late Paleozoic Sediments: Insights into Interactions of the North China Craton with Surrounding Plates. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 335-346. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.05.002>
- Li, H. Y., Xu, Y. G., Huang, X. L., et al., 2009. Activation of Northern Margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotopes of Detrital Zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu-Jingle Basin. *Chinese Science Bulletin*, 54(4): 677-686. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0444-9>
- Li, J. Y., 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(3-4): 207-224. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.09.001>
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Xiao, W. J., et al., 2012. Superposition of Paleo-Asian and West-Pacific Tectonic Domains in the Eastern Section of the Solonker Suture Zone: Insights from Petrology, Geochemistry and Geochronology of Deformed Diorite in Xar Moron Fault Zone, Inner Mongolia. *Earth Science*, 37(3): 433-450 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.051>
- Li, Z. X., Powell, C. M., 2001. An Outline of the Palaeogeographic Evolution of the Australasian Region since the Beginning of the Neoproterozoic. *Earth Science Reviews*, 53(3-4): 237-277. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(00\)00021-0](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(00)00021-0)
- Liu, J. F., Li, J. Y., Chi, X. G., et al., 2013. Early Devonian Felsic Volcanic Rocks Related to the Arc-Continent Collision on the Northern Margin of North China Craton—Evidences of Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 32(2-3): 267-278 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Liu, W. C., Dai, S. W., et al., 2001. Thrusting and Exhumation Processes of a Bounding Mountain Belt: Constraints from Sediment Provenance Analysis of the Hefei Basin. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 144-150. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2001.tb00516.x>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ma, Q. L., Xu, X. R., Du, Y. S., 2017. Zircon U-Pb Chronology and Provenance of the Sanhao Conglomerate in Zhoukoudian, Beijing: Implications for Coeval Paleogeography. *Geological Science and Technology Information*, 36(4): 29-35 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. X., Meng, Q. R., Qu, Y. Q., 2011. A Study of Detrital Zircons of Late Carboniferous-Middle Triassic Strata in the Northern Margin of North China Block and Its Geological Implication. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1485-1500 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. X., Meng, Q. R., Wu, G. L., et al., 2014. Late Paleozoic Exhumation of the Inner Mongolia Paleo-Uplift: Evidences from Sedimentary Records. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1771-1789 (in Chinese with English abstract).
- Rojas-Agramonte, Y., Kröner, A., Demoux, A., et al., 2011. Detrital and Xenocrystic Zircon Ages from Neoproterozoic to Palaeozoic Arc Terranes of Mongolia: Significance for the Origin of Crustal Fragments in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 19(3): 751-763. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.10.004>
- Safonova, I., Kotlyarov, A., Krivonogov, S., et al., 2017. Intra-Oceanic Arcs of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 50: 167-194. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.005>
- Tang, K. D., 1990. Tectonic Development of Paleozoic Foldbelts at the North Margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249-260. <https://doi.org/10.1029/te009i002p00249>
- Tong, J. N., Xu, R., Yuan, Y. M., 2013. Lithostratigraphy and Reconstruction of Sedimentary Sequence and Environment in Zhoukoudian Area of Beijing. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(1): 15-23 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Chen, Z. H., Lu, Y. C., 2001. Sedimentary Characteristics of the Main Sandstone Body of the Lower Section of the Taiyuan Formation and Its Relation to Coal Accumulation of the Fugu-Baode Mine, Hedong

- Coalfield, Western North China. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 562–569 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2016. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(5): 792–808 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.067>
- Wang, Q. F., Deng, J., Liu, X. F., et al., 2016. Provenance of Late Carboniferous Bauxite Deposits in the North China Craton: New Constraints on Marginal Arc Construction and Accretion Processes. *Gondwana Research*, 38: 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.015>
- Windley, B. F., Alexeev, D., Xiao, W., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Wu, F. Y., Yang, Y. H., Xie, L. W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.003>
- Xu, Y. J., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2014. Early Paleozoic Orogenesis along Gondwana's Northern Margin Constrained by Provenance Data from South China. *Tectonophysics*, 636: 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.08.022>
- Xu, Y. J., Du, Y. S., Cawood, P. A., et al., 2010. Detrital Zircon Record of Continental Collision: Assembly of the Qilian Orogen, China. *Sedimentary Geology*, 230(1–2): 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.06.020>
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2005. A Geochronological Constraint to the Guandi Complex, Western Hills of Beijing, and Its Implications for the Tectonic Evolution. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 332–337 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2012. Large Igneous Province and Magmatic Arc Sourced Permian-Triassic Volcanogenic Sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261–262: 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.018>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J. A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3–4): 336–352. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007a. 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(2): 451–463. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-190>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007b. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan Diorite Pluton on the Northern Margin of the North China Block and Its Tectonic Implications. *Geological Magazine*, 144(3): 553. <https://doi.org/10.1017/s0016756807003275>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007c. Zircon SHRIMP U-Pb and In-Situ Lu-Hf Isotope Analyses of a Tuff from Western Beijing: Evidence for Missing Late Paleozoic Arc Volcano Eruptions at the Northern Margin of the North China Block. *Gondwana Research*, 12(1–2): 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.08.001>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Kröner, A., et al., 2008. Early Permian Plutons from the Northern North China Block: Constraints on Continental Arc Evolution and Convergent Margin Magmatism Related to the Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1441–1467. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0368-2>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, X. C., et al., 2009a. Late Paleozoic to Early Mesozoic Mafic-Ultramafic Complexes from the Northern North China Block: Constraints on the Composition and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Lithos*, 110(1–4): 229–246. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.008>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009b. 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. <https://doi.org/10.1130/b26157.1>
- Zhang, W., Jian, P., Kröner, A., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Development of an Early to Mid-Paleozoic Continental Margin Arc in the Southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.05.025>
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222–223: 13–54. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.017>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>

- Zhao, W. X., Li, F. L., Zhou, H. W., et al., 2003. Geology in the Zhoukoudian Region and Geological Methods and Advanced Technological Application in the Fieldwork. China University of Geoscience Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhu, M. S., Miao, L. C., Baatar, M., et al., 2016. Late Paleozoic Magmatic Record of Middle Gobi Area, South Mongolia and Its Implications for Tectonic Evolution: Evidences from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 507–519. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.002>

附中文参考文献

- 曹花花, 许文良, 裴福萍, 等, 2012. 华北板块北缘东段二叠纪的构造属性: 来自火山岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学的制约. *岩石学报*, 28(9): 2733–2750.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等, 1977. 中国大地构造基本轮廓. *地质学报*, 51(2): 117–135.
- 李益龙, 周汉文, 肖文交, 等, 2012. 古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加: 来自内蒙吉林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据. *地球科学*, 37(3): 433–450. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.051>
- 刘建峰, 李锦铁, 迟效国, 等, 2013. 华北克拉通北缘与弧—陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩——锆石 U-Pb 定年及地球化学证据. *地质通报*, 32(2–3): 267–278.
- 马千里, 许欣然, 杜远生, 2017. 北京周口店三好砾岩的时代、物源背景及其古地理意义: 来自沉积学和碎屑锆石年代学的证据. *地质科技情报*, 36(4): 29–35.
- 马收先, 孟庆任, 曲永强, 2011. 华北地块北缘上石炭统一—中三叠统碎屑锆石研究及其地质意义. *地质通报*, 30(10): 1485–1500.
- 马收先, 孟庆任, 武国利, 等, 2014. 内蒙古隆起晚古生代构造隆升的沉积记录. *地质学报*, 88(10): 1771–1789.
- 童金南, 徐冉, 袁晏明, 2013. 北京周口店地区岩石地层及沉积序列和沉积环境恢复. *地球科学与环境学报*, 35(1): 15–23.
- 王华, 陈钟惠, 陆永潮, 2001. 山西河东煤田保德矿区太原组砂体特征及与煤聚集的关系. *地质学报*, 75(4): 562–569.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪石岩年龄、岩石成因及构造背景. *地球科学*, 41(5): 792–808. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.06>
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, 等, 2005. 北京西山官地杂岩的形成时代及构造意义. *地学前缘*, 12(2): 332–337.
- 赵温霞, 李方林, 周汉文, 等, 2003. 周口店地质及野外地质工作方法与高新技术应用. 武汉: 中国地质大学出版社.