https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.071



华北板块中部晚二叠世一早三叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年及物源判别

冯志强^{1,2},刘永江^{3,4},王 权²,史建儒⁵,魏荣珠²,卫彦升²,雷 勇⁶

1. 太原理工大学地球科学与工程系,山西太原 030024

2. 山西省地质调查院,山西太原 030006

3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室,海洋高等研究院,海洋地球科学学院,山东青岛 266100

4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东青岛 266237

5. 山西地质博物馆,山西太原 030021

6. 山西农业大学资源环境学院,山西晋中030801

摘 要: 华北板块陆内盆地晚二叠世一早三叠世地层沉积物的物源一直存在较大争议.对华北板块中部鄂尔多斯盆地东缘 (山西柳林县)上二叠统孙家沟组(2个)和下三叠统刘家沟组(2个)以及沁水盆地(山西沁水县)上二叠统孙家沟组(1个)地层 砂岩样品进行了全岩地球化学分析和碎屑锆石LA-MC-ICPMS U-Pb年龄测定.364个单颗粒锆石中,古生代碎屑锆石约占 21%,具有~275 Ma(218~333 Ma,65颗)和~431 Ma的两个峰值年龄(368~442 Ma,10颗);前寒武纪碎屑锆石约占79%,具 有明显的~1888 Ma(1562~2222 Ma,178颗)和~2529 Ma(2253~3167 Ma,111颗)两个峰值年龄.在前人研究基础上,采 用最年轻单颗粒年龄(YSG)和最年轻的碎屑锆石加权平均年龄(TuffZirc)限定地层最大沉积年龄的方法,确定刘家沟组的2 个样品沉积下限年龄为253±7 Ma和250±7 Ma,孙家沟组3个样品沉积下限分别为256±7 Ma(MSWD=1.1,n=31)、264± 11 Ma(MSWD=4.3,n=7)、250±6 Ma(MSWD=3.6,n=6),与二叠系一三叠系沉积界限年龄251.0±0.4 Ma相接近,其中研 究区刘家沟组砂岩的地质时代应归属于早三叠世,孙家沟组砂岩应归属于晚二叠世,并进一步推测华北山西地区孙家沟组沉 积时代北部早于南部.根据研究区晚二叠世一早三叠世沉积环境和构造背景分析,以及潜在物源区年龄图谱对比,结合古水流 野外分析结果,判别刘家沟组和孙家沟组砂岩中的前寒武纪碎屑锆石物源区为华北板块的变质基底,早古生代碎屑锆石主要 来源于兴蒙造山带南缘的早古生代侵入岩,晚古生代碎屑锆石主要来源于内蒙古隆起的晚古生代侵入岩. 关键词:华北中部;山西;晚二叠世一早三叠世;碎屑锆石U-Pb定年;物源分析;构造地质学.

中图分类号: P548 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1288-19 **收稿日期:** 2021-12-27

Detrial Zircon U-Pb Dating and Provenance Analysis for Late Permian-Early Triassic Sandstone in Central North China Craton

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.121201102000150012-05,HXCT01-2018F005);山西省自然科学基金(Nos.2019L0126,2019L0054);山 西地质博物馆地勘基金18-19年古生物化石调查项目(No.ZDF03-FC190802);山西省优秀博士来晋工作奖励基金(No.SXYB-KY2019032);山西农业大学科技创新基金项目(No.2020BQ47).

作者简介:冯志强(1984-),男,副教授,硕士生导师,主要从事构造地质学方面的研究.ORCID:0000-0002-1197-5749. E-mail: fengzhiqiang@tyut.edu.cn

引用格式:冯志强,刘永江,王权,史建儒,魏荣珠,卫彦升,雷勇,2023.华北板块中部晚二叠世一早三叠世砂岩碎屑锆石U-Pb定年及物源判别,地球科学,48(4):1288-1306.

Citation: Feng Zhiqiang, Liu Yongjiang, Wang Quan, Shi Jianru, Wei Rongzhu, Wei Yansheng, Lei Yong, 2023. Detrial Zircon U-Pb Dating and Provenance Analysis for Late Permian-Early Triassic Sandstone in Central North China Craton. *Earth Science*, 48(4):1288-1306.

Feng Zhiqiang^{1,2}, Liu Yongjiang^{3,4}, Wang Quan², Shi Jianru⁵, Wei Rongzhu², Wei Yansheng², Lei Yong⁶

- 1. Department of Earth Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
- 2. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, China
- 3. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques of Ministry of Education, Institute for Advanced Ocean Study, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
- 4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
- 5. Shanxi Museum of Geology, Taiyuan 030021, China

6. College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China

Abstract: The Permian-Triassic stratum of North China craton is well known for its extensive distribution, special lithology, marine-terrestrial transition system and significant division of sedimentary lithology. The predecessors have discussed sedimentary age and source of the Permian-Triassic sandstones, but there is still much controversy. In this study, five sandstone samples are selected from the eastern Ordos basin (Liulin area, Liujiagou and Sunjiagou formations) and Qinshui basin (Qinshui area, Sunjiagou Formation) in Shanxi Province of the central North China craton for LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons and geochemical analysis, with the attempt to determine the maximum sedimentary age and its provenance. The geochronology results show that detrital zircons (n=364) from five samples are composed mainly of the Paleozoic and Precambrian magmatic zircons. Among them, the Paleozoic zircons account for 21% with peak ages of ~ 275 Ma (218-333 Ma; n=65) and ~ 431 Ma (368-442 Ma; n=10), while the Precambrian zircons account for 79% with distinct peak ages of ~ 1.888 Ma (1.562-2.222 Ma; n=178) and ~ 2529 Ma (2253-3167 Ma; n=111). By using the youngest single detrital zircons ages (YSG) and TuffZirc (Zircon Age Extractor)(+6), it obtained different maximum sedimentary ages of 253 ± 7 Ma and 250 ± 7 Ma for the Liujiagou Formation, as well as 256 ± 7 Ma (MSWD=1.1, n=31), 264 ± 11 Ma (MSWD=4.3, n=7), and 250 ± 6 Ma (MSWD=3.6, n=6) for the Sunjiagou Formation, respectively, which is close to the Permian/Triassic boundary age 251.0 ± 0.4 Ma. Based on these results, it constrains that the Liujiagou Formation formed in the Early Triassic and Sunjiagou Formation formed in the Late Permian, and further presume that the sedimentary timing of northern part of Sunjiagou Formation in Shanxi Province is older than southern part. The main material sources of the Permian-Triassic sandstones (Liujiagou and Sunjiagou Formations) are from the Late Paleozoic intrusive rocks in the Inner Mongolia uplift at the northern part of North China craton and the metamorphic basement of North China craton, while a few material sources are from granitic intrusive rocks in southern Xing-Meng orogenic belt.

Key words: central North China; Shanxi Province; Late Permian-Early Triassic; detrital zircon U-Pb dating; provenance analysis; structural geology.

0 引言

碎屑锆石是沉积岩中常见的副矿物,记录了地 壳演化的岩浆与变质事件,因其具有耐腐蚀和抗风 化的特点,其碎屑锆石的年龄分布以及Hf同位素组 成常被广泛用于判别沉积物的源区性质、限定沉积 岩形成时代、探讨区域构造演化以及古气候与古环 境等,是地质学家研究沉积盆地与周缘造山带及盆 山耦合的重要手段(Fralick and Kronberg,1997; Zhang et al., 2007; Li et al., 2010, 2022; Ju et al., 2021).华北板块北接中亚造山带,南临秦岭一大别 造山带(图 1a),自形成稳定的克拉通以来,其周缘 构造主要受板块俯冲与挤压作用所控制,陆内盆地 则以垂直升降为主,并长期接受稳定的沉积,这些 沉积作用不仅记录了华北板块陆内盆地的形成过 程,还保存了周缘造山带重要的构造演化信息,因 而受到众多学者的关注(Zhai and Santosh, 2011; Zhao and Cawood, 2012; Li *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2021).

近年来,多数学者通过碎屑锆石 U-Pb年代学 等手段对华北地区及其周缘造山带进行了研究,初 步厘定了华北板块古生代以来的构造演化特征.虽 然大量数据显示华北板块南北部的碎屑锆石年龄 组成以及峰值存在明显差异,但对其沉积物源区的 性质仍存在较大争议(Zhu et al.,2014;Zhou et al., 2019;王艳鹏,2019;郑伟等,2021;Wu et al.,2021). 首先是华北板块内部晚古生代沉积地层的物源区 仍未取得统一的认识,部分学者认为晚古生代地层 物源区主要来自华北板块北部的内蒙古隆起,少量 来自中亚造山带或兴蒙造山带(Li et al.,2010;Ma et al., 2014; Zhou et al., 2019); 而另一种观点认为 主要来自华北板块南部的北秦岭造山带(Zhu et al., 2014; 王艳鹏, 2019). 其次, 多数学者在沉积物 源区的研究中仅对晚古生代碎屑锆石物源进行了 初步分析(于兴河等, 1994; 刘锐娥等, 2003; 曹高社 等, 2019), 而对晚古生代沉积地层中少量的早古生 代(~420 Ma)碎屑锆石源区性质却鲜有讨论.

因此,为了探究华北板块陆内盆地沉积物物源 性质以及晚古生代构造演化,本文选择华北板块中 部鄂尔多斯盆地东缘柳林地区上二叠统孙家沟组 与下三叠统刘家沟组砂岩,以及沁水盆地上二叠统 孙家沟组凝灰质砂岩进行锆石U-Pb年代学及地球 化学分析,通过与潜在物源区的锆石年龄峰值进行 对比,判别研究区晚二叠世一早三叠世砂岩物源区 性质,为探讨华北板块中部晚古生代构造演化提供 有力证据.

1 区域地质背景

华北板块构造演化复杂,~2500 Ma的板块聚 合拼贴构成了华北板块的统一基底,此后又相继经 历了裂解、消减和碰撞拼合,于~1850 Ma最终成为 稳定的克拉通(Zhai,2003;Zhao et al.,2005,2012; Zhai and Santosh,2011).华北板块的拼合与克拉通 化以及中元古代基底隆升与陆内裂谷作用使其保 存了大量的前寒武纪变质基底(Wan et al.,2006; Zhai and Santosh,2011).古生代以来由于受到南部 秦岭造山带以及北部中亚造山带的影响形成了现 今的构造格局(图 1a).根据基底出露情况自西向东 分为西部地块、中部地块和东部地块(Zhao et al., 2005).

研究区主要位于华北板块陆内盆地中部的鄂尔多斯盆地东缘柳林和沁水盆地沁水地区(图1b). 柳林地区横跨华北中部陆块和西部陆块,东临吕梁山,西部为鄂尔多斯盆地,区内从前寒武纪至新生 代地层均有出露(耿元生等,2000;张建中,2007).柳 林地区晚古生代至早中生代沉积地层由老到新为 上石炭统太原组、二叠系山西组、石盒子组、孙家沟 组以及三叠系刘家沟组(图2),其中太原组与山西 组为海陆交互相含煤沉积,孙家沟组含有著名的锯 齿龙类化石.自晚二叠世以来,由于华北板块北缘 的不断抬升,研究区逐渐转化为陆相拗陷盆地沉积 体系,气候也转为大陆性干旱气候,上石盒子组和 孙家沟组主要为砖红色泥岩、灰绿色中细粒长石砂 岩以及岩屑长石砂岩,三叠系刘家沟组以紫红色 中一细粒岩屑长石砂岩为主(张建中,2007).

沁水地区位于华北板块中部(图1b),区内前寒 武纪至新生代地层均有出露,其中早古生代地层主 要包括寒武系与奥陶系,寒武系主要由下部的紫色 泥页岩、中部的薄层灰岩、细粒灰岩及上部的竹叶 状灰岩、白云岩组成,地层厚度自东向西逐渐减薄, 沉积环境为典型的陆表海.下奥陶统地层主要以白 云岩为主.晚古生代地层与柳林地区基本一致(图 2),主要包括上石炭统太原组、下二叠统山西组、 中一上二叠统下石盒子组、上石盒子组及孙家沟组. 同时中生代和新生代地层也均有出露(Zhai and Santosh,2011;卫彦升等,2021).

2 样品采集及岩相学

本文研究的砂岩样品分别取自柳林县东和沁 水县端氏镇(图1b和图2),且取样位置均明显可见 刘家沟组和孙家沟组整合接触关系,其中柳林地区 样品分别取去自郝家津(19SJG01和19LJG01)和薛 村(19SJG02和19LJG02);沁水县端氏镇样品取自 孙家沟组上部(4419RZ).由于黄土覆盖严重,鄂尔 多斯盆地东缘柳林孙家沟组地层仅在郝家津、薛村 镇、长峪一带冲沟中有少量出露(图 3a~3f),底界以 出现砖红色、灰红色泥岩、粉砂岩与下石盒子组分 界,两者为整合接触关系.孙家沟组下部砂岩夹层 较多,以灰红、灰绿色为主,上部砂岩夹层较少,为 灰红色(图 3a~3f),砂岩中发育典型平行和交错层 理(图3g),多含泥砾,其中泥岩、粉砂质泥岩中含钙 质结核及灰绿色淡水灰岩条带、团块夹层.刘家沟 组岩性主要为紫红色、浅红色、灰红色薄一中厚一 厚层状中一细粒岩屑长石砂岩、长石砂岩、以及粉 砂岩夹较不稳定的紫红色、砖红色泥岩、粉砂质泥 岩.砂岩中发育平行层理、斜层理、板状交错层理、 大型楔状交错层理.

刘家沟组砂岩样品(19LJG01和19LJG02),为 中、细粒岩屑长石砂岩,分选性和磨圆度中等,颗粒 成分主要为岩屑、长石、石英及少量白云母、黑云母. 其中岩屑成分复杂,粒径主要集中在0.15~0.40 mm 之间,含量约10%~25%;石英含量约30%~50%, 粒径0.05~0.30 mm;长石以斜长石为主,含量约 35%~45%,粒状或长板状,表面粗糙,粒径在 0.05~0.30 mm.少数样品中含有白云母颗粒,含量 <10%(图4a~4b).



图1 华北板块区域地质简图(a)和山西省区域地质图(b)(据 Zhao et al., 2005; Meng et al., 2019修改)

Fig.1 Simplified tectonic map showing the North China craton (a) and geological map of the Shanxi Province (b) (modified from Zhao *et al.*, 2005; Meng *et al.*, 2019)

图 a 中, 1. 石拐子盆地; 2. 西山盆地; 3. 下板城盆地; 4. 牛营子盆地; 5. 北票盆地; 6. 汝箕沟盆地; 7. 静乐地区; 8. 济阳地区; 9. 豫西地区; 10. 合肥 盆地; F₁. 离石断裂; F₂. 洪涛山一鹅毛口断裂; F₃. 狐偃山断裂; F4. 太岳山断裂; F₅. 横河断裂; F₆. 太行山断裂; F₇. 系舟山断裂; F₈. 唐河断裂





孙家沟中砂岩样品(19SJG01和19SJG02)为 中、细粒长石岩屑砂岩、碎屑颗粒分选中等,磨圆度 较差,多为棱角一次棱角状,颗粒支撑,胶结物很少. 颗粒成分主要为石英、长石、岩屑、及少量白云母组 成.石英颗粒不规则,表面较为干净,含量25%~ 35%.长石以斜长石为主,粒状或长板状,表面粗糙, 多见有聚片双晶,含量约20%~25%.岩屑粒径变化 也较大,主要集中0.15~0.25 mm之间,含量约 40%~45%(图4c~4d).

沁水盆地沁水县地区孙家沟组砂岩样品 (4419RZ),主要为含火山碎屑沉积岩夹层,岩性为 中细粒凝灰质长石岩屑杂砂岩(图3h~3i),为灰紫 红色,中细粒砂状结构,块状构造.岩石主要由石 英、长石、岩屑和方解石胶结物、凝灰质杂基等组 成,其中岩屑以中酸性火山岩为主,含量在30%~ 40%之间,碎屑大小0.05~1.00 mm,呈棱角状一次 磨圆状、不规则状,磨圆度中等一较差,分选性中 等,碎屑间呈点状接触,颗粒支撑,孔隙式胶结.碎 屑间局部由亮晶方解石胶结物胶结,多充填污浊的 凝灰质(图4e~4f).

3 测试方法及分析结果

3.1 测试方法

本文样品测年锆石的分选和制靶在河北廊坊 地质调查院完成,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定 年在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重 点实验室(长春)完成.具体操作流程详见郝宇杰等 (2020),①激光剥蚀系统(COMPEx Pro型)为 193nm ArF 准分子激光器,与激光器联用的是 Agilent 7900型 ICP-MS 仪器;②采用 He 作为剥蚀物 质的载气,仪器最佳化采用美国国家标准技术研究 院 研 制 的 人 工 合 成 硅 酸 盐 玻 璃 参 考 物 质 (NIST 610),然后采用标准锆石(91500)外部校正 法进行锆石原位 U-Pb 分析;③采用直径为 32 µm、 频率为 7 Hz 的激光束斑进行样品分析;④利用 ICP-



图 3 柳林地区和沁水地区孙家沟组、刘家沟组地层特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the Sunjiagou and Liujiagou formations in Liulin and Qinshui areas a.柳林郝家津孙家沟组与刘家沟组接触关系; b~c.刘家沟组灰绿色砂岩,孙家沟组紫红色砂岩; d~e.柳林地区孙家沟组上部晚古生代脊椎 动物化石及化石层剖面; f.柳林薛村南刘家沟组和孙家沟组接触关系; g.柳林地区孙家沟组砂岩平行层理; h~i.沁水端氏镇凝灰质长石砂岩 野外照片

MASDATACALL 软件计算同位素比值及相应²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U和²⁰⁷Pb/²³⁵U的年龄值;⑤根据Andersen(2002)计算方法,对结果进行普通铅校正,然后采用Isoplot程序计算其年龄,详见附表1.

选择新鲜样品经过无污染碎样后在核工业北 京地质研究院(北京)完成主量、微量和稀土元素分 析.其中主量元素采用熔片法 X-射线荧光光谱法 (XRF)测定,分析准确度和精度优于2%~3%;微



图 4 研究区砂岩野外露头及显微特征. Fig.4 Outcrop and microscopic characteristics of the sandstone in studied area a~b.柳林地区刘家沟组砂岩显微照片;c~d.柳林地区孙家沟组砂岩显微照片;e~f.沁水盆地凝灰质砂岩野外露头和显微照片;Q.石英;Qm. 单晶石英;Pl.斜长石;K.钾长石;Lv.火山岩碎屑;Ls.沉积岩碎屑;Lm.变质岩碎屑

量元素和稀土元素是用 Teflon 熔样罐进行熔样,然 后采用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨等 离子体质谱仪 ICP-MS进行测定,准确度和精度优 于 10%, Fe₂O₃、FeO采用容量法(VOL)测定,详见 附表 2.

3.2 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 结果

样品 19LJG01:该样品中的碎屑锆石 CL 图像 (图 5a),显示锆石颗粒粒径分布于 50~120 μm 之 间,普遍具有晶棱圆化,多以半自形一他形为主,绝 大部分锆石不同程度地保留明显的岩浆振荡环带, 极少部分具有扇形或面状分带结构特征.82个测点 结果显示,Th/U比值主体为0.04~1.56,仅一颗锆 石 Th/U小于0.01,可能代表锆石为变质锆石成因. U-Pb年龄集中分布在253~2 599 Ma之间(图 6a~ 6b),可分为 253~314 Ma,427~442 Ma,1569~ 2 018 Ma 三组, 对应年龄峰值分别为279 Ma (MSWD=2.3, *n*=16), 432 Ma(MSWD=0.079, *n*=4), 1 889 Ma(MSWD=0.34, *n*=27), 2 528 Ma (MSWD=0.14, *n*=35), 其中最年轻碎屑锆石年龄 为253±7 Ma, 指示砂岩沉积时代应晚于253 Ma.

样品 19LJG02:CL 图像揭示锆石大小在 80~ 150 μm之间,长短轴比接近 2:1,锆石颗粒具有明显 晶棱圆化,呈半自形一他形结构,多数锆石具有一 定的核边结构,边部发育明显岩浆成因的振荡生长 环带,少部分内部结构均匀(图 5b).对样品 19LJG02进行了82颗锆石U-Pb同位素测年结果显 示,U-Pb年龄范围在 250~2 697 Ma,Th/U比值为 0.01~1.72,其中仅有 2颗碎屑锆石为古生代,分别 为 250±7 Ma和 368±10 Ma,其余 80颗均为前寒武 纪,介于1 625~2 697 Ma,峰值年龄为1 889 Ma



图 5 研究区孙家沟组与刘家沟组砂岩样品碎屑锆石 CL 图像 Fig. 5 CL images of detrital zircon of sandstone samples from the Sunjiagou and Liujiagou formations

(n=49)与2406 Ma(n=31).其中最年轻碎屑锆石 年龄为250±7 Ma(图6c~6d).

样品 19SJG01:该样品中的碎屑锆石 CL 图像 显示锆石颗粒粒径介于 80~200 μ m,锆石多呈短柱 状或浑圆状,以发育不同程度的核边结构特征为 主,边部发育有明显岩浆成因的振荡生长环带(图 5c).82 颗测点的锆石 Th/U 比值为 0.01~1.16, U-Pb 年龄范围在 251~3 167 Ma,可分为 251~ 318 Ma,400~434 Ma,1 683~1 985 Ma,2 002~ 3 160 Ma 四组,对应年龄峰值分别为 273 Ma (MSWD=1.1; n=31),423 Ma (MSWD=8.1; n= 4),1 887 Ma (MSWD=54; n=11),2 406 Ma(n= 36),其中最年轻锆石加权平均年龄为 261±4 Ma (MSWD=0.82; n=12)(图 6e~6f).

样品 19SJG02: CL 图像揭示锆石大小在 70~ 120 μ m之间,长短轴比介于 1: 1~2: 1,锆石以晶棱 圆化为显著特征,呈半自形一他形结构并且不同程 度地保留有岩浆结晶成因特征的振荡环带(图 5d). 对 19SJG02进行了 82颗锆石 U-Pb 同位素测年结果 显示,U-Pb 年龄范围在 258~2 588 Ma,Th/U比值 为 0.04~1.56,可分为 258~323 Ma,1 676~ 2 010 Ma,2 032~2 588 Ma 三组,对应年龄峰值分 别为 264 Ma(MSWD=4.2, n=4),1 897 Ma(n= 50)和 2 483 Ma(n=16),其中最年轻碎屑锆石加权 平均年龄为 264±11 Ma(MSWD=4.3; n=7)(图 6g~6h). 样品 4419RZ-1 中锆石为无色至深褐色,多为 短柱状,长短轴比接近 2:1,CL 图像中绝大部分发 育明显的岩浆振荡环带,Th/U比值介于 0.3~2.1, 为岩浆锆石成因(图 5e).样品 4419RZ-1 共获得 36 颗锆石测年有效数据,其中有 4 个明显的峰值年龄 段,分别为 250~259 Ma,303~333 Ma,1 600~ 1 800 Ma,2 438~2 587 Ma,其中最小年龄为 218 Ma的样品由于其 Pb丢失极为严重(含量仅为 1×10^{-6}),且锆石表面裂纹较多,因其 U-Pb 封闭系 统可能被后期破坏故删除.该样品最年轻锆石加权 平均年龄为 250±6 Ma(MSWD=3.6; n=6)(图 6i~6j).

总体看来,刘家沟组砂岩(19LJG01和19LJG02) 最年轻锆石年龄应该介于250~253 Ma,结合古生 物地层学研究,可以限定其沉积下限为早三叠世; 孙家沟组砂岩样品(19SJG01、19SJG02和4419RZ-1) 最年轻锆石年龄介于250~264 Ma,结合野外孙家 沟组和刘家沟组的接触关系,以及其中发现的锯齿 龙类化石,可以限定孙家沟组砂岩的沉积下限为晚 二叠世.值得注意的是,在早古生代碎屑锆石分布 中,柳林地区孙家沟组样品中锆石>400 Ma的 锆石有3颗427±11 Ma,432±12 Ma和434± 11 Ma;刘家沟组中锆石年龄其中>400 Ma的有4 颗,分别为427±11 Ma,429±11 Ma,430±11 Ma, 442±11 Ma.而沁水地区中的孙家沟组锆石样品中 未发现早古生代锆石年龄.



图 6 研究区刘家沟组与孙家沟组砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年谐和图和频谱图

Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams and histograms of detrital zircon of sandstone samples in Liujiagou and Sunjiagou formations



图 7 刘家沟组和孙家沟组砂岩稀土元素球粒陨石(a);全球大陆平均上地壳标准化稀土元素配分曲线(b);刘家沟组和孙家 沟组砂岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(c)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE diagram (a); UCC-normalized REE diagram (b); primitive mantle-normalized trace elements diagram of the Liujiagou and Sunjiagou formations(c)

球粒陨石,全球大陆平均上地壳和原始地幔的标准化数值分别据文献Boynton, 1984;Sun and McDonough, 1989;McLennan et al., 1993

3.3 岩石地球化学特征

3.3.1 主量元素 刘家沟组砂岩测得 SiO,含量为 75.13%~59.86%, 平均 68.47%; Al₂O₃ 含量 为 15.22%~11.43%,平均12.65%.孙家沟组砂岩测得 SiO₂和 Al₂O₃ 与 刘 家 沟 组 基 本 相 似, 分 别 介 于 73.05%~53.98% (平均为61.58%)和15.33%~ 11.89%(平均为14.29%). 岩石中的SiO₂/Al₂O₃比 值是沉积岩成熟度的重要指标,Fe₂O₃/K₂O比值可 以反映岩石风化过程中砂岩中铁、镁矿物的稳定程 度(Taylor and McLennan, 1985). 刘家沟组与孙家 沟组的砂岩 SiO₂/Al₂O₃比值基本一致,前者介于 6.14~4.34,平均值为5.45,后者比值范围为6.14~ 3.54,都显示出成熟度中等的特征.刘家沟组的 Fe₂O₃/K₂O比值范围为2.64~0.85,平均值1.44,而 孙家沟组的Fe₂O₃/K₂O略低于刘家沟组,介于 1.69~0.85,平均值1.41,总体反映出本次采集样品 都经历了不同程度的风化林滤作用,造成砂岩中镁 铁矿物的分解、流失.

3.3.2 稀土元素和微量元素 刘家沟组和孙家沟 组砂岩稀土范围分别介于 216.13×10⁻⁶~86.36× 10⁻⁶(平均155.44×10⁻⁶)和 232.45×10⁻⁶~96.27× 10⁻⁶(平均158.69×10⁻⁶),稀土元素含量变化范围较 大.在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图7a),刘 家沟组和孙家沟组的砂岩稀土元素表现出一致的 趋势,暗示它们可能具有相同的物源,均呈现一定 程度的轻、重稀土元素分馏,总体表现为轻稀土富 集、重稀土亏损的特征.刘家沟组砂岩LREE/ HREE 平均值为 9.29, Eu/Eu*比值范围为 0.98~ 0.71,平均值为 0.82, 具负 Eu异常特征, (La/Yb)_N= 16.69~8.11, 无明显的 Ce 异常.孙家沟组砂岩 LREE/HREE平均值为 8.38, Eu/Eu*比值范围为 0.89~0.65, 平均值为 0.77, 具负 Eu 异常特征, (La/Yb)_N=10.91~8.27, 也无明显的 Ce 异常.在稀土元素大陆上地壳(UCC)标准化图解上(图7b), 刘家沟组和孙家沟组的测试样品也具有一致的趋势, 曲线较为平缓, 总体表现出轻微的轻稀土富集以及弱的 Eu 负异常特征, 与全球平均大陆上地壳的稀土元素含量非常接近.特征微量元素原始地幔标准化微量元素蛛网图中规律明显(图7c), 整体而言, 刘家沟组和孙家沟组砂岩样品亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf和富集大离子亲石元素 Rb、U.

4 讨论

4.1 刘家沟组与孙家沟组地层时代讨论

孙家沟组由刘鸿允(1991)创名于宁武县化北 屯乡孙家沟,时代置于晚二叠世.早期的区调工作 中称为石千峰组一段,后称为石千峰组(即狭义的 石千峰);刘家沟组系刘鸿允(1991)创名于山西宁 武县化北屯乡刘家沟,是石千峰群的第2个组,时代 置于早三叠世.2020年《山西省区域地质志》仍沿用 这两个组,时代厘定依据前人结果.尽管地层沉积 时限的确定有地层对比和古生物化石相对年代学 证据,但一直缺乏最新同位素年代学佐证,而且对 于其沉积物源也尚不清楚.本文试图采用沉积岩中 碎屑锆石的U-Pb年龄来限定地层的最大沉积年龄 及物源.目前,主要有7种方法(Dickinson and Gehrels,2009;Tucker *et al.*,2013):①最年轻单颗粒年 龄(YSG);②最年轻图像碎屑锆石年龄(YPP);③ 最年轻碎屑锆石年龄(YDZ);④加权平均年龄 (YC1σ)(+3);⑤加权平均年龄(YC2σ)(+3);⑥算 术平均年龄(WA);⑦Tuffzirc年龄(+6),即需要至 少6颗最年轻的碎屑锆石做加权平均年龄.目前大 部分学者选择其中第1种和第7种,本文也沿用这 两种方法.

4.1.1 刘家沟组沉积时限的限定 本文利用砂岩 碎屑锆石最小年龄或最年轻碎屑锆石加权平均年龄来进一步限定地层的沉积时代.虽然由于Pb丢失或者数据分析误差会导致计算出的最小年龄会有些偏差,但是运用最小年龄组的加权平均年龄能有效地减少误差(Dickinson and Gehrels,2009;曹高社等,2019).基于这一原则,限定刘家沟组样品LJG01和LJG02的最小年龄分别为253±7 Ma和250±7 Ma,与二叠系一三叠系沉积界线251.0±0.4 Ma较一致.结合以上研究可以发现,研究区刘家沟组形成时代应属于早三叠世.

4.1.2 孙家沟组沉积时限的限定 以往的研究表明,华北地区山西孙家沟组岩性整体表现为北部岩石粒度较粗,南部较细,并且具有穿时地层的特点,南部为早三叠世,中部和北部因海退较晚而为晚二叠世(张抗,1991).李兴文和刘俊(2013)在柳林县薛村镇孙家沟组发现了锯齿龙类颌齿化石,认为其与柳林黄河龙时代一致,据此推断孙家沟组为二叠世晚期.欧阳舒和王红农(1985)通过对孢粉化石研究认为华北南部的平顶山砂岩段与山西孙家沟组层位相当,结合在山西保德孙家沟组顶部发现的脊椎

动物化石,将孙家沟组归属于晚二叠世,但登封地 区孙家沟组顶部孢粉的时代研究显示要比山西孙 家沟组年轻.另外,近年来部分学者通过碎屑锆石 U-Pb年代学研究发现,华北南部宜阳地区孙家沟 组底部最小年龄为248±7 Ma,年代上属于早三叠 世(曹高社等,2019),这一认识与太原西山石千峰 组下部砂岩碎屑锆石年龄(<250 Ma)基本一致 (Wu et al.,2021).本文在鄂尔多斯盆地东缘柳林和 沁水地区孙家沟组中获得3个砂岩碎屑锆石的最小 年龄组加权平均值为255±7 Ma(n=6),结合在孙 家沟组上部发现的锯齿龙类古生物化石(图 3d~ 3e),认为孙家沟的沉积下限为晚二叠世.

4.2 物源分析

4.2.1 Dickinson 三角图解 沉积岩的物质来源是 一个复杂的问题,盆地形成的构造背景往往决定着 沉积物最终的结构和化学特征,因此可以通过对母 岩的特性分析来确定源区的构造背景(Han et al., 2011).根据砂岩碎屑成分的统计结果,运用Dickinson分析理论做出Q-F-L、Qm -F-Lt三角形图 解(图8).Q-F-L图解中孙家沟组与刘家沟组砂 岩样品主要落在切割型岛弧区,少量落在过渡型岛 弧及再旋回造山带中(图8a);Qm-F-Lt图解中孙 家沟组与刘家沟组砂岩样品落在切割型岛弧区且 靠近于过渡型岛弧区,揭示了沉积物源来自岩浆弧 与碰撞造山带之间的混合区域(图8b).



Fig.8 Tectonic discrimination triangle diagrams of Q-F-L and Qm-F-Lt for the Liujiagou and Sunjiagou formations (Dickinson *et al.*, 1983)

4.2.2 地层古水流特征 本次系统实测了研究区 孙家沟组砂岩斜层理及交错层理的地层产状,经水 平校正后投入玫瑰花图,古流向的玫瑰花图显示柳 林和沁水地区孙家沟组的古流向主要为南西向、正 南向和南东向(图9).

4.2.3 上二叠统一下三叠统物源示踪 沉积物物 源分析是研究大地构造背景的重要内容之一,是再 现沉积盆地演化、恢复古环境的重要依据,其具体 分析方法包括岩石学、地球化学、重矿物和同位素 年代学等(陈龙等,2022).稀土元素(REE)受后期 的风化、成岩及变质作用的影响相对较弱,可用作 指示源岩及鉴别砂岩物源的重要参数(Rollinson, 1999:王远超等,2020),例如源自基性岩石的稀土 元素具有低的LREE/HREE比值, 无 Eu, 而长英质 岩石通常具有较高的LREE/HREE比值, 目具 Eu 负异常.酸性侵入岩和火山岩、长英质变质岩,以及 来自大陆源区的沉积岩等 Eu 多显示负异常,刘家 沟组和孙家沟组砂岩的稀土元素球粒陨石配分曲 线表现为轻稀土元素相对富集,重稀土相对亏损的 特征,LREE/HREE平均比值分别9.29和8.38,Eu/ Eu*平均比值分别为0.82和0.77,具有明显的负Eu 异常,总体而言,稀土特征表明刘家沟组和孙家沟 组沉积物物源主要来自上地壳,在样品全球平均大 陆上地壳成分(UCC)标准化稀土元素配分曲线中 (图7b),刘家沟组和孙家沟组砂岩样品稀土元素总 体表现平缓,略微呈现出轻稀土元素富集,(La/ Yb)ucc平均值分别为1.30和0.99,表现为不同程度 的Eu正异常,说明在不同时代的刘家沟组和孙家沟 组沉积物物源发生了变化,可能有来自下地壳和幔 源深部物质的加入.另外,在F₁'-F₂'物源区分析 图上(图10a),绝大部分样品落入P4区域,只有3个



Fig.9 The paleocurrent rose map of the Suniiagou Formation

样品落入P2区域,说明刘家沟组和孙家沟组砂岩的 沉积物源绝大部分来自古老的沉积体系或克拉通 或者再旋回造山带,极少部分为中性火成岩物源区. 砂岩宏观物质组成分析表明(图10b),刘家沟组和 孙家沟组沉积物源岩性质主要代表了上地壳物质 来源,也可能含有少量中基性物质.在La-Th-Hf 源岩属性判别图解(图10c),绝大部分样品落入长 英质物源区,个别样品落入安山质物源区至下地壳 之间.综合以上分析,刘家沟组和孙家沟组物源主 要为成熟大陆石英物源区,混有少量安山质或下地 壳深部物质.

研究区附近均发育有大量古老上地壳长英质 岩石,因此仅靠地球化学特征无法详细确定各个时 代的源区,是北部的兴蒙造山带,还是南部的秦岭 造山带,还是盆地基底,亦或兼而有之.锆石是组成 沉积岩的重要副矿物,因锆石具有较高的U-Pb同 位素封闭温度体系,逐渐成为众多地质工作研究沉 积岩物源区特点、探讨其区域构造演化必不可少的 手段之一(Han et al., 2011; Liu et al., 2021; 孔令耀 等, 2022).

因此,利用沉积物中的碎屑锆石年龄谱反演源 区并进行亲缘性对比是近年来流行的有效方法之





P1. 基性火山岩物源区; P2. 中性火山岩物源区; P3. 酸性火山岩物源区; P4. 成熟大陆石英质物源区 a. F₁'-F₂'判别图解(底图据 Roser and Korsch, 1988); b. K₂O-Rb判别图解(据 Floyd and Leveridge, 1987); c. La/Th-Hf判别图解(据毛光周和刘池洋, 2011)

一.从研究区二叠系一三叠系砂岩碎屑锆石U-Pb 年龄分布图(图11a~11b)可以看出,其主要有 2500 Ma,1800 Ma以及晚古生代年龄主峰(图11c) 以及早古生代(~420 Ma)的次级峰值.

(1)前寒武纪碎屑锆石的物源区.本文在华北 中部刘家沟组和孙家沟组砂岩中共获得364颗碎屑 锆石 U-Pb 谐和年龄,其中含有大量的前寒武纪碎 屑锆石,占所有碎屑锆石的79%,具有~1888 Ma (年龄范围为1562~2222 Ma)和~2534 Ma(年龄 范围为2253~3167 Ma)两个明显的峰值(图11c), 尤其以~2528 Ma的峰值最为显著,最老碎屑锆石 年龄为3167±19 Ma.

已有研究显示,华北板块古老基底具有特征鲜明的~1888 Ma和~2534 Ma两个年龄峰值(Zhao et al.,2005; Zhai et al.,2011;图11c),年龄介于1600~3800 Ma且分布广泛,为华北板块基底演化的两个重要阶段.~2700 Ma,华北板块基底围绕古陆核发育大量新生地壳,并形成多个微陆块(沈其韩和钱祥麟,1995; Zhai et al.,2011).~2500 Ma,这

些微陆块发育麻粒岩相的变质作用并伴有大量花 岗岩侵入,同时微陆块拼贴聚合完成(Zhao et al., 2005),如华北中部恒山、五台以及登封等地发现的 2 800~2 700 Ma的片麻岩(翟明国和彭澎, 2007: Zhai et al., 2011).2 300~1 900 Ma 期间,已形成的 拼贴陆块经历了拉伸一破裂事件,典型代表为晋豫 和胶辽裂陷盆地,而后~1900 Ma,区域上超高温麻 粒岩的发现标志这些裂陷盆地的最终拼合与焊接 (Zhai et al., 2011; Zhao et al., 2012; Li et al., 2017). ~1800 Ma,华北板块广泛发育面状的强烈变质作 用以及花岗岩的侵入,记录了华北板块基底的整体 降升或最终形成(Zhao et al., 2000),同时,华北板块 沉积盖层中也含有大量的1700~2900 Ma的碎屑 锆石(曹高社等,2019).本文研究区刘家沟组和孙家 沟组砂岩中的前寒武纪锆石以棱角状,磨圆度较差 为主,可能不具有沉积盖层中碎屑锆石的再循环产 物特征,而是寄宿于碎屑沉积物中被搬运迁移的, 其砂岩中峰值~1888 Ma和~2534 Ma的碎屑锆石 主要来源于华北板块基底的中高级变质岩.



Fig. 11 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams and histograms



图 12 华北板块晚古生代一早中生代碎屑锆石及潜在源区 U-Pb 年龄(<600 Ma)分布

Fig.12 U-Pb ages (<600 Ma) of potential sources detrital zircons from Late Paleozoic to Early Mesozoic in the North China craton

a.北京西山双泉组(Yang et al.,2006);b.燕山刘家沟组和孙家沟组(Ma et al.,2014);c,g.云冈一平鲁石盒子组上部;宁武一静乐刘家沟组 (周瑞,2019);d.内蒙古隆起晚古生代花岗岩(Zhang et al.,2006);e.柳林地区刘家沟组和孙家沟组来自本次研究;f.延安地区石千峰组上部; 济源地区石千峰组上部(Li et al.,2010;彭深远等,2019);h.中亚造山带古生代至中生代地层碎屑锆石年龄(Li et al.,2011);i.沁水盆地石孙 家沟组;k.洛阳一登封石千峰组上部和二马营组下部(Yang et al.,2017);l.北秦岭古生代花岗岩(Wang et al.,2009)

(2)早古生代碎屑锆石的物源区.研究区刘家 沟组和孙家沟组砂岩中的显生宙锆石CL图像表现 出典型的振荡环带结构,为岩浆锆石的典型特征, 主要锆石年龄峰值为~275 Ma(图6和图11d),含少 量早古生代锆石(~430 Ma).由于华北板块内部早 古生代(420~440 Ma)岩浆记录及部分早古生代地 层缺失(Yang et al.,2006;Ma et al.,2014),这些早 古生代碎屑锆石不应来自华北板块内部.因此,华 北板块北部的内蒙古隆起、兴蒙造山带,以及华北 南部的北秦岭造山带和南秦岭造山带均有可能成 为华北板块上古生界的沉积物源区.

研究表明,华北板块北缘兴蒙造山带内早古生 代岩浆记录分布较为广泛(Liu et al.,2021),形成了 一条东西走向的早古生代岛弧岩浆带,形成时间主 要集中于428~458 Ma,如图古日格地区包尔汉图 群及侵入岩(453~425 Ma;徐备等,2014)、达茂旗 北部岛弧闪长岩-花岗闪长岩-英云闪长岩(452~ 446 Ma;张维和简平,2008)、白乃庙群及侵入岩 (437~474 Ma;Zhang et al.,2021)、正镶白旗二长花 岗岩(~457 Ma;秦亚等,2013)、敖汉旗八当山群火 山岩、吉中放牛沟火山岩(444~476 Ma;裴福萍等, 2014)和延吉地区侵入岩(~422 Ma;Wang et al., 2016).多数学者认为这条岛弧岩浆带记录了华北北 缘早古生代期间发生过弧-陆碰撞,为华北板块早 古生代碎屑锆石提供了潜在物源.

另外,华北南部北秦岭造山带的早古生代岩浆 岩也广泛分布(Dong et al.,2021),并构成了北秦岭 岩浆岩带的主体,岩石类型以中一酸性花岗质侵入 岩为主(386~499 Ma),如板山坪、四棵树、西庄河、 灰池子等岩体,其构造环境与早古生代期间商丹洋 壳向北的俯冲和闭合有关(Dong and Santosh, 2016).虽然有部分研究将华北板块早古生代碎屑锆 石归源于北秦岭造山带,但是这与华北板块下古生 界砂岩古水流由南至北方向的认识相悖(图9).因 此,结合本文研究区砂岩骨架及古水流分析,将刘 家沟组和孙家沟组中少量早古生代碎屑锆石物源 归属于华北北缘的兴蒙造山带.

(3)晚古生代碎屑锆石的物源区.华北板块北 部的内蒙古隆起主要由华北板块基底新太古界和 元古界组成,零星分布有华北板块的沉积盖层中一 新元古界和古生界.由于受到北侧兴蒙造山带构造 活动的影响,内蒙古隆起广泛分布晚古生代侵入岩 体.本文研究的华北板块中部刘家沟组和孙家沟组 砂岩晚古生代碎屑锆石主要为岩浆锆石,峰值年龄 为~247 Ma,~370 Ma,~273 Ma,~329 Ma,~396 Ma, 与大同及北京西山地区砂岩的晚古生代碎屑锆石 年龄峰值(270~280 Ma)相似(图 12),基本与内蒙 古隆起晚古生代的两次重要岩浆活动期次吻合 (~250 Ma和~320 Ma).多数学者认为这两期岩浆 活动和古亚洲洋洋壳向南俯冲有关,进而导致内蒙 古隆升并接受剥蚀,为华北板块陆内盆地沉积提供 物源(Yang et al., 2006, 2017; Li et al., 2010, 2011; Ma et al., 2014; Zhu et al., 2014; Zhou et al., 2019). 此外,部分学者研究发现柳林地区晚古生代地层砂 岩中的碎屑锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值多为负值(-17.5~-7.2), 与内蒙古隆起晚古生代侵入岩的 ε_{нf}(t)值范围基本 一致(Zhu et al., 2014; 曹高社等, 2019). 本文对华北 板块地区晚古生代一早中生代砂岩碎屑锆石峰值 统计发现(图12),华北板块北部北京西山、燕山及 云冈一平鲁地区碎屑锆石年龄以晚古生代峰值为 主,几乎很少有早古生代锆石出现;中部柳林、延安 及宁武一静乐盆地含有少量早古生代碎屑锆石年 龄,而南部济源,沁水盆地及洛阳登封地区早古生 代锆石年龄较多,整体来看,华北板块晚古生代碎 屑锆石显示出由南向东北逐渐减少的趋势(图12).

根据以上碎屑锆石的物源区分析,本文刘家沟 组和孙家沟组砂岩的沉积物中前寒武纪碎屑锆石 来源于华北板块基底,早古生代碎屑锆石主要来源 于兴蒙造山带,晚古生代碎屑锆石主要来源于内蒙 古隆起.

5 结论

(1)华北山西鄂尔多斯盆地东缘(柳林县)和沁

水盆地(沁水县)地区的刘家沟组和孙家沟组砂岩 主要为岩屑长石砂岩,碎屑锆石以岩浆成因为主, 测得 364个谐和年龄数据显示出 250~396 Ma, 400~442 Ma,1 562~2 222 Ma,2 253~3 167 Ma共 4个主要峰值区间,其中尤以 2 253~3 167 Ma峰值 最为显著.

(2)刘家沟组的 2个砂岩样品沉积下限年龄为 250±7 Ma和 253±7 Ma;孙家沟组 3个砂岩样品沉 积下限年龄分别为 256±7 Ma(MSWD=1.1, n= 31)、264±11 Ma(MSWD=4.3, n=7)、250±6 Ma (MSWD=3.6, n=6),与二叠系一三叠系沉积界限 年龄 251.0±0.4 Ma相接近,结合前人古生物地层 学研究,研究区刘家沟组砂岩的地质时代归属于早 三叠世,孙家沟组砂岩应归属于晚二叠世.

(3) 刘家沟组和孙家沟组砂岩沉积物主要形成 于3个时期:前寒武纪碎屑锆石具有明显~1888 Ma 和~2534 Ma的两个峰值年龄,说明其主要来自华 北板块古老基底;早古生代碎屑锆石具有较弱的 ~431 Ma的峰值年龄且占比较小,主要源于兴蒙造 山带南缘的岛弧侵入体;晚古生代碎屑锆石具有显 著的~275 Ma峰值年龄,其沉积物主要与华北板块 北部的内蒙古隆起有关.

致谢:在审稿过程中承蒙两位匿名专家的详细 审阅,并给予了建设性的修改建议和意见,在此表 示衷心的感谢.同时感谢吉林大学地球科学学院郝 宇杰副教授,以及山西地质博物馆续世朝和董黎阳 教授级高工在野外调查过程中提供的帮助.

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ²⁰⁴Pb. Chemical Geology, 192(1-2): 59-79. https://doi. org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63-114. https://doi. org/10.1016/b978-0-444-42148-7.50008-3
- Cao, G.S., Fang, B.B., Sun, F.Y., et al., 2019. Maximum Sedimentary Age and Provenance of Pingdingshan Sandstone in the Southern Part of North China Block: Evidence from Detrital Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age. Acta Petrologica Sinica, 35(8): 2518-2544(in Chinese with English abstract).

Chen, L., Liang, C.Y., Liu, Y.J., et al., 2022. Geochronol-

ogy and Provenance Analysis of the Xiufeng Formation in Mohe Basin: Implications for the Evolution of the Eastern Mongol–Okhotsk Ocean. *Earth Science*, 47(9): 3334-3353(in Chinese with English abstract).

- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., et al., 1983. Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Soci*ety of America Bulletin, 94(2): 222. https://doi.org/ 10.1130/0016-7606(1983)94222: ponaps>2.0.co;2
- 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
- Dong, Y. P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. Gondwana Research, 29(1): 1-40. https://doi. org/10.1016/j.gr.2015.06.009
- Dong, Y. P., Sun, S. S., Santosh, M., et al., 2021. Central China Orogenic Belt and Amalgamation of East Asian Continents. *Gondwana Research*, 100: 131– 194. https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.03.006
- Floyd, P. A., Leveridge, B. E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542. https://doi. org/10.1144/ gsigs.144.4.0531
- Fralick, P. W., Kronberg, B. I., 1997. Geochemical Discrimination of Clastic Sedimentary Rock Sources. Sedimentary Geology, 113(1/2): 111–124. https://doi.org/ 10.1016/s0037-0738(97)00049-3
- Geng, Y.S., Wan, Y.S., Shen, Q.H., et al., 2000. Chronological Framework of the Early Precambrian Important Events in the Luliang Area, Shanxi Province. Acta Geologica Sinica, 74(3): 216-223(in Chinese with English abstract).
- Han, G. Q., Liu, Y. J., Neubauer, F., et al., 2011. Origin of Terranes in the Eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China: U-Pb Ages of Detrital Zircons from Ordovician-Devonian Sandstones, North Da Xing' an Mts. *Tectonophysics*, 511(3/4): 109–124. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2011.09.002
- Hao, Y.J., Shang, Q.Q., Ren, Y.S., et al., 2020. In Situ Analysis of Rare Earth Element Composition of Scheelite by LA-ICP-MS. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(4): 1029-1041(in Chinese with

English abstract).

- Ju, Y. W., Yu, K., Wang, G. Z., et al., 2021. Coupling Response of the Meso-Cenozoic Differential Evolution of the North China Craton to Lithospheric Structural Transformation. *Earth-Science Reviews*, 223: 103859. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103859
- Kong, L.y., Guo, P., Wan, J., et al., 2022. Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Mesoproterozoic Metasedimentary Rocks in Dabie Orogen and Its Geological Significance. *Earth Science*, 47(4): 1333-1348 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. P., Chen, Y. L., Wang, Z., et al., 2011. 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. *Geological Journal*, 46(1): 63-81. https://doi. org/10.1002/gj.1257
- 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, S. Z., Jahn, B. M., Zhao, S. J., et al., 2017. Triassic Southeastward Subduction of North China Block to South China Block: Insights from New Geological, Geophysical and Geochemical Data. *Earth-Science Reviews*, 166: 270-285. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.009
- Li, X. W., Liu, J., 2013. New Specimens of Pareiasaurs from the Upper Permian Sunjiagou Formation of Liulin, Shanxi and Their Implications for the Taxonomy of Chinese Pareiasaurs. *Vertebrata Palasiatica*, 51(3): 199– 204(in Chinese).
- Li, Z. Q., Li, F. J., Chen, Z. A., et al., 2022. Provenance of Late Mesozoic Strata and Tectonic Implications for the Southwestern Ordos Basin, North China: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Journal of Earth Science*, 33(2): 373-394. https: //doi.org/10.1007/s12583-021-1450-y
- Liu, H.Y., 1991. Tectonic, Paleogeographic and Sedimentary Evolution of Late Precambrian in China. *Chinese Journal of Geology*, 26(4): 309-316(in Chinese with English abstract).
- Liu, R.E., Huang, Y.M., Wei, X.F., et al., 2003. Analysis of Provenance of Late Paleozoic in the Northern Ordos Basin and Its Geological Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(3): 82-86(in Chinese with

English abstract).

- Liu, Y. J., Li, W. M., Ma, Y. F., et al., 2021. An Orocline in the Eastern Central Asian Orogenic Belt. *Earth–Science Reviews*, 221: 103808. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2021.103808
- Ma, S. X., Meng, Q. R., Duan, L., et al., 2014. Reconstructing Late Paleozoic Exhumation History of the Inner Mongolia Highland along the Northern Edge of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 87: 89-101. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2014.02.020
- Mao, G.Z., Liu, C.Y., 2011. Application of Geochemistry in Provenance and Depositional Setting Analysis. Journal of Earth Sciences and Environment, 33(4): 337-348 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. In: Johnsson, M. J., Basu, A., eds., Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments.Geological Society of America, 284:21-40. https://doi.org/10.1130/spe284-p21
- Meng, Q. R., Wu, G. L., Fan, L. G., et al., 2019. Tectonic Evolution of Early Mesozoic Sedimentary Basins in the North China Block. *Earth-Science Re*views, 190: 416-438. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.003
- Ouyang, S., Wang, R. N., 1985. Age Assignment of the Pingdingshan Member in Henan and Anhui Provinces. *Petroleum Geology & Experiment*, 7(2): 141-147, 167 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F.P., Wang, Z.W., Cao, H.H., et al., 2014. Petrogenesis of the Early Paleozoic Tonalite in the Central Jilin Province: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 2009– 2019(in Chinese with English abstract).
- Peng, S.Y., Yang, W.T., Wang, Y.P., et al., 2019. Detrital Zircon Chronology of the Lower-Middle Triassic Strata in Jiyuan Area and Its Implication for Provenance Analysis. *Geological Science and Technology Information*, 38(5): 126-137(in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Liang, Y.H., Xing, J.L., et al., 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).
- Rollinson, H., 1999. Petrology and Geochemistry of Metamorphosed Komatiites and Basalts from the Sula Mountains Greenstone Belt, Sierra Leone. *Contributions to*

Mineralogy and Petrology, 134(1): 86-101. https:// doi.org/10.1007/s004100050470

- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1-2): 119-139. https://doi. org/ 10.1016/0009-2541(88)90010-1
- Shen, Q.H., Qian, X.L., 1995. Archean Rock Assemblages, Episodes and Tectonic Evolution of China. Acta Geoscientica Sinica, 16(2): 113-120(in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Soci*ety, London, Special Publications, 42(1): 313-345. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Black well Scientific Publications, Oxford, 312.
- Tucker, R. T., Roberts, E. M., Hu, Y., et al., 2013. Detrital Zircon Age Constraints for the Winton Formation, Queensland: Contextualizing Australia's Late Cretaceous Dinosaur Faunas. *Gondwana Research*, 24(2): 767– 779. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.009
- Wan, Y. S., Wilde, S. A., Liu, D. Y., et al., 2006. Further Evidence for ~ 1.85 Ga Metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from Metamorphic Rocks in the Lushan Area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9(1/2): 189– 197. https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.06.010
- Wang, F., Chen, F. K., Hou, Z. H., et al., 2009. Zircon Age Sand Sr-Nd-Hf Isotopic Paleozoic Granitoids in the Chongli-Chicheng Area, Northern Margin of the North China Block. Acta Petrologica Sinica, 25: 3057-3074 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Y., Yang, Y.C., Huang, Y.W., et al., 2016. Formation Ages and Tectonic Significance of Ophiolites in Wandashan Terrane of the Eastern Heilongjiang. *Jour*nal of Earth Sciences and Environment, 38(2): 182-195.
- Wang, Y.C., Zhao, Y.Y., Liu, C.H., et al., 2020. Detrital Zircon Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Sandstone in the Ershierzhan Formation of the Mohe Basin. Acta Geologica Sinica, 94(3): 869– 893(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.P., 2019. Sedimentary and Provenance Characteristics of Middle Permian-Lower Triassic in Yiyang Area, Southern Margin of North China and Their Implications

for Evolution of Basin-Mountain System (Dissertation). Henan Polytechnic University, Jiaozuo(in Chinese with English abstract).

- Wei, Y.S., Feng, Z.Q., Yan, T., et al., 2021. Mesozoic Tectonic Evolution of the Central North China Craton: A Case Study from the Shanxi Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 1–25. (2021–08– 26) (in Chinese with English abstract). https://kns.cnki. net/kcms/detail/22.1343.P.20210825.1417.001.html
- Wu, Q., Ramezani, J., Zhang, H., et al., 2021. High-Precision U-Pb Age Constraints on the Permian Floral Turnovers, Paleoclimate Change, and Tectonics of the North China Block. *Geology*, 49(6): 677-681. https:// doi.org/10.1130/G48051.1
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 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).
- Yang, D. B., Yang, H. T., Shi, J. P., et al., 2017. Sedimentary Response to the Paleogeographic and Tectonic Evolution of the Southern North China Craton during the Late Paleozoic and Mesozoic. *Gondwana Research*, 49: 278-295. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.06.009
- 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
- Yu, X.H., Wang, D.F., Zheng, J.M., 1994. Discussion on Relationship between Permian Sandstones Clastic Components and Its Tectonic Settings. *Geoscience*, 8(3): 299-307(in Chinese with English abstract).
- Zhai, M., 2003. Palaeoproterozoic Tectonic History of the North China Craton: A Review. Precambrian Research, 122(1-4): 183-199. https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00211-5
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. Gondwana Research, 20(1): 6-25. https://doi. org/10.1016/j.gr.2011.02.005
- Zhai, M.G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic Events in the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2665-2682(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wang, Y. N., Zhang, B. H., et al., 2021. Tectonothermal Events in the Central North China Craton since the Mesozoic and Their Tectonic Implications: Constraints from Low-Temperature Thermochronolo-

gy. *Tectonophysics*, 804(5): 228769. https://doi.org/ 10.1016/j.tecto.2021.228769

- Zhang, J.Z., 2007. A Comparative Study on the Paleoproterozoic Strata in the Northern Section of the Luliang Mountain, Shanxi Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., 1991. Tilloid at the Bottom of the Sedimentary Covers on the Margins of the Ordos Basin. *Regional Ge*ology of China, 10(1): 79-85(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., 2006. Hornblende Thermobarometry of the Carboniferous Granitoids from the Inner Mongolia Paleo-Uplift: Implications for the Tectonic Evolution of the Northern Margin of North China Block. *Mineralogy and Petrology*, 87(1): 123-141. https://doi.org/10.1007/s00710-005-0116-2
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007. Carboniferous Granitic Plutons from the Northern Margin of the North China Block: Implications for a Late Palaeozoic Active Continental Margin. *Journal of the Geological Society*, 164(2): 451-463. https://doi. org/10.1144/ 0016-76492005-190
- Zhang, W., Jian, P., 2008. SHRIMP Dating of Early Paleozoic Granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 82(6): 778-787(in Chinese with English abstract).
- 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., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103 (1-2): 55-88. https://doi. org/10.1016/S0301-9268 (00)00076-0
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202. https://doi. org/10.1016/j. precamres.2004.10.002
- Zheng, W., Xu, X., Qi, Y.A., et al., 2021. Evolution of Terrestrial Triassic Ichnofossils and Ecological Significance in Western Henan Province. *Earth Science*, 1-23 (2021-07-21) (in Chinese with English abstract). https://kns. cnki. net/kcms/detail/ 42.1874.P.20210721.0834.002.html.
- Zhou, R., 2019. Study on the Relationship between Sedimentation and Tectonism of Late Paleozoic-Early

Mesozoic Sediments in the North-Central North China Craton (Dissertation). Taiyuan University of Technology, Taiyuan (in Chinese with English abstract).

- Zhou, R., Liu, D. N., Zhou, A. C., et al., 2019. A Synthesis of Late Paleozoic and Early Mesozoic Sedimentary Provenances and Constraints on the Tectonic Evolution of the Northern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185: 104029. https://doi.org/10.1016/j. jseaes.2019.104029
- Zhu, X. Q., Zhu, W. B., Ge, R. F., et al., 2014. Late Paleozoic Provenance Shift in the South-Central North China Craton: Implications for Tectonic Evolution and Crustal Growth. *Gondwana Research*, 25(1): 383-400. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.04.009

附中文参考文献

- 曹高社, 方磅磅, 孙凤余, 等, 2019. 华北陆块南部平顶山砂 岩的最大沉积年龄和物源区: 来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb年龄的证据. 岩石学报, 35(8): 2518-2544.
- 陈龙,梁琛岳,刘永江,等,2022. 漠河盆地绣峰组形成时代 及物源分析:对蒙古一鄂霍茨克洋东段演化的启示.地 球科学,47(9):3334-3353.
- 耿元生,万渝生,沈其韩,等,2000.吕梁地区早前寒武纪主 要地质事件的年代框架.地质学报,74(3):216-223.
- 郝宇杰, 商青青, 任云生, 等, 2020. LA-ICP-MS 原位分析 白钨矿稀土元素. 吉林大学学报(地球科学版), 50(4): 1029-1041.
- 孔令耀,郭盼,万俊,等,2022.大别造山带中元古代变沉积 岩碎屑锆石U-Pb年代学与Hf同位素特征及其地质意 义.地球科学,47(4):1333-1348.
- 李兴文,刘俊,2013.山西柳林孙家沟组锯齿龙类新材料及 其分类学意义.古脊椎动物学报,51(3):199-204.
- 刘鸿允, 1991. 中国晚前寒武纪构造、古地理与沉积演化. 地 质科学, 26(4): 309-316.
- 刘锐娥,黄月明,卫孝锋,等,2003.鄂尔多斯盆地北部晚古 生代物源区分析及其地质意义.矿物岩石,23(3): 82-86.
- 毛光周, 刘池洋, 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中 的应用. 地球科学与环境学报, 33(4): 337-348.
- 欧阳舒, 王仁农, 1985. 豫皖地区平顶山砂岩段地质时代的 探讨. 石油实验地质, 7(2): 141-147, 167.

- 表福萍, 王志伟, 曹花花, 等, 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.
- 彭深远,杨文涛,王艳鹏,等,2019.济源地区中-下三叠统 碎屑锆石年代学特征及其物源分析.地质科技情报, 38(5):126-137.
- 秦亚,梁一鸿,邢济麟,等,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.
- 沈其韩, 钱祥麟, 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和 演化. 地球学报, 16(2): 113-120.
- 王艳鹏,2019. 华北南缘宜阳地区中二叠统一下三叠统沉积 和物源特征及其对盆山系统演化的指示(博士学位论 文). 焦作:河南理工大学.
- 王远超,赵元艺,刘春花,等,2020. 漠河盆地二十二站组砂 岩年代学、地球化学及其地质意义.地质学报,94(3): 869-893.
- 卫彦升, 冯志强, 闫涛, 等, 2021. 华北板块中部中生代构造 演化: 以山西为例. 吉林大学学报(地球科学版), 1-25. (2021-08-26). https://kns.cnki.net/kcms/detail/ 22.1343.P.20210825.1417.001.html.
- 徐备,赵盼,鲍庆中,等,2014.兴蒙造山带前中生代构造单元 划分初探.岩石学报,30(7):1841-1857.
- 于兴河, 王德发, 郑浚茂, 1994. 华北地区三叠系砂岩成分 与构造背景关系的探讨. 现代地质, 8(3): 299-307.
- 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.
- 张建中,2007.山西吕梁山北段古元古代地层对比研究(硕 士学位论文).北京:中国地质大学.
- 张抗, 1991. 鄂尔多斯盆地边缘沉积盖层底部类冰碛岩的讨论. 中国区域地质, 10(1): 79-85.
- 张维,简平,2008.内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb年代学.地质学报,82(6):778-787.
- 郑伟,许欣,齐永安,等,2021.豫西地区陆相三叠纪遗迹化 石演化及生态学意义.地球科学,1-23.(2021-07-21). https://kns. cnki. net/kcms/detail/42.1874. P.20210721.0834.002.html.
- 周瑞,2019.华北中北部晚古生代末期-早中生代沉积与构 造作用的关系研究(博士学位论文).太原:太原理工 大学.