

鄂尔多斯盆地东部晚石炭世本溪组源—汇充填过程与古地理格局

张蕊^{1,2}, 王琳霖³, 刘磊^{1,2}, 虎建玲^{4,5}, 杜佳宁⁶, 陈洪德^{1,2}, 黄道军^{4,5}, 王志伟^{1,2}, 朱淑玥^{1,2}, 李丹^{1,2}

1.成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2.油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

3.中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

4.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710000

5.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

6.中国石油长庆油田分公司第十一采油厂, 甘肃庆阳 745000

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组是加里东运动后的第一套海陆交互相含煤系地层, 勘探潜力巨大, 但受周缘造山带构造活动影响, 盆地东部南北物源体系及多物源复合影响下的盆山耦合关系仍存在争议。进一步示踪物源体系, 揭示构造—沉积格局, 对盆地东部古地理重建具有十分重要的意义。【方法】通过分析岩屑组分、稀土元素特征和碎屑锆石 U-Pb 年龄特征, 结合构造背景及母岩岩性特征, 对鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积期源—汇充填过程进行了探讨。【结果】研究区北部的沉积物主要来自主动大陆边缘构造背景下近源的内蒙古隆起(色尔腾山、乌拉山—大青山、集宁地区)和远源的中亚造山带。南部主要接受来自北秦岭的碎屑物质供给, 源区构造背景较为复杂, 主要为被动大陆边缘和大陆岛弧的混合, 其中北秦岭形成沟—弧—盆背景下的拉张伸展向碰撞挤压转换的构造环境。北部源区的母岩岩性为花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩的混合, 南部源区的母岩岩性主要为花岗岩和碱性玄武岩, 且南北物源体系交汇于莲45—成家沟一带。【结论】本溪期中亚造山带整体以研究区两侧的隆升剥蚀程度较高, 反映华北板块北部不规则斜向碰撞的特征。华北板块北缘抬升较高, 为研究区北部提供主要物源, 以发育大型潮汐—三角洲复合体系为主。受强物源供给影响, 研究区东北部砂体延伸距离更远。鄂尔多斯盆地南部以北秦岭为主要源区, 华北板块南缘此时低幅隆升, 主要发育障壁海岸沉积体系。南北物源交汇区一带, 更多地接受来自北秦岭的碎屑物质, 同时由于受到东向和北东向潮流作用改造, 沉积大量潮汐砂坝。

关键词 古地理格局; 碎屑锆石; 贡献率; 本溪组; 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 张蕊, 女, 2001年出生, 硕士研究生, 地质学, E-mail: zhangrui00106@163.com

通信作者 刘磊, 男, 研究员, 含油气盆地分析, E-mail: liulei@cdut.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

鄂尔多斯盆地作为我国最大的含油气盆地之一, 内部构造稳定, 蕴藏着丰富的油气资源。

收稿日期: 2023-06-21; 收修改稿日期: 2023-09-20

基金项目: 中石油长庆油田科研项目(2021-18099); 中石化科技部项目(P21088-2); 国家自然科学基金项目(42102132); 中国石油天然气股份有限公司“十四五”基础性前瞻性科技项目(2021DJ2101) [Foundation: Research Project of PetroChina Changqing Oilfield, No. 2021-18099; Project of SINOPEC Science and Technology Department, No. P21088-2; National Natural Science Foundation of China, No. 42102132; China National Petroleum Corporation's "Fourteenth Five Year Plan" Basic Prospective Scientific and Technological Projects, No. 2021DJ2101]

上石炭统本溪期,受古亚洲洋俯冲、消减影响,鄂尔多斯盆地处于南隆北倾向北隆南倾的古地貌转换阶段^[1-3],华北陆表海因此从东侧和东北侧侵入盆地内部,水体南深北浅,构造—沉积格局与物源体系复杂。在多期次海侵海退作用下,本溪组发育海陆交互相沉积体系^[4],普遍沉积两套厚层砂体夹煤层,上覆太原组煤系烃源岩地层,不仅具有优质的成藏地质条件,其沉积建造也是记录盆—山关系以及周缘造山带构造演化的关键证据^[5-7]。近年来盆地东部临兴气田、延安气田及神木气田本溪组油气的突破^[8-9],也展示出鄂尔多斯盆地东部本溪组巨大的油气勘探潜力,因此研究鄂尔多斯盆地东部本溪组源—汇系统和构造—古地理格局具有重要意义。

古生代以来,盆地南北两侧洋壳相向俯冲^[10],控制鄂尔多斯盆地的沉积—构造格局^[5],导致盆地周缘造山带隆升剥蚀,成为潜在物源区。前人关于本溪期的物源研究多集中在盆地北缘,普遍认为本溪期受古亚洲洋闭合影响,北部的阴山—阿拉善古陆隆升成为盆地北部的主要物源区^[10-13]。但由于阴山造山带的复杂性和分布的广泛性,无法准确的建立沉积区与阴山造山带不同构造单元间的具体对应关系。也有部分学者通过分析沉积构造背景,认为本溪组时期伊盟隆起作为隆升区向盆地内部供源^[5],阻挡了北缘阴山造山带的供源^[14]。对于本溪期盆地南部是否存在物源,近年来众多学者虽已达成共识,普遍认为此时秦岭造山带已与华北板块碰撞拼合并为盆地南缘供源^[10,13,15],但对于盆地南缘的构造背景和沉积体系仍然存在争议^[4,10,13,16]。不仅如此,对南北物源的影响范围、源区贡献率及多物源体系下的构造—沉积格局等方面的研究依旧薄弱,制约了盆地东部本溪期的古地理格局重建与进一步油气勘探。基于此,本文在野外剖面、钻井岩心及前人研究的基础上,结合稀土元素分析、碎屑锆石 U-Pb 定年及古流向分析等沉积学和地球化学方法,明确鄂尔多斯盆地东部本溪组源区母岩岩性与构造背景,分析华北基底与周缘造山带的构造强弱及供源差异,探讨多物源复合影响下的源—汇充填过程,以进一步揭示鄂尔多斯盆地东部本溪组古地理格局。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地发育于华北板块西部(图 1a)^[17],周缘被多个山系所包围,北邻东西走向的孔兹岩带与阴山造山带相望,南邻秦岭褶皱带,西北邻贺兰山与阿拉善地块相接,西南隔六盘山冲断带与祁连造山带相连,东部紧邻吕梁造山带,是一个在前寒武变质结晶基底上发育的大型多旋回复合盆地^[18](图 1b)。研究区位于盆地东部,北起神木以北,南至黄陵一带,西始正宁,东达临县(图 1c)。由于古亚洲洋俯冲导致中亚造山带的隆升和华北板块上内蒙古隆起的抬升,盆地北部自西向东形成狼山、色尔腾山、乌拉山—大青山以及集宁

地区四大潜在物源区^[19-20]。南部受商丹带点接触碰撞的影响，华北板块南缘抬升，与秦岭造山带共同成为研究区南部的潜在源区^[16]。

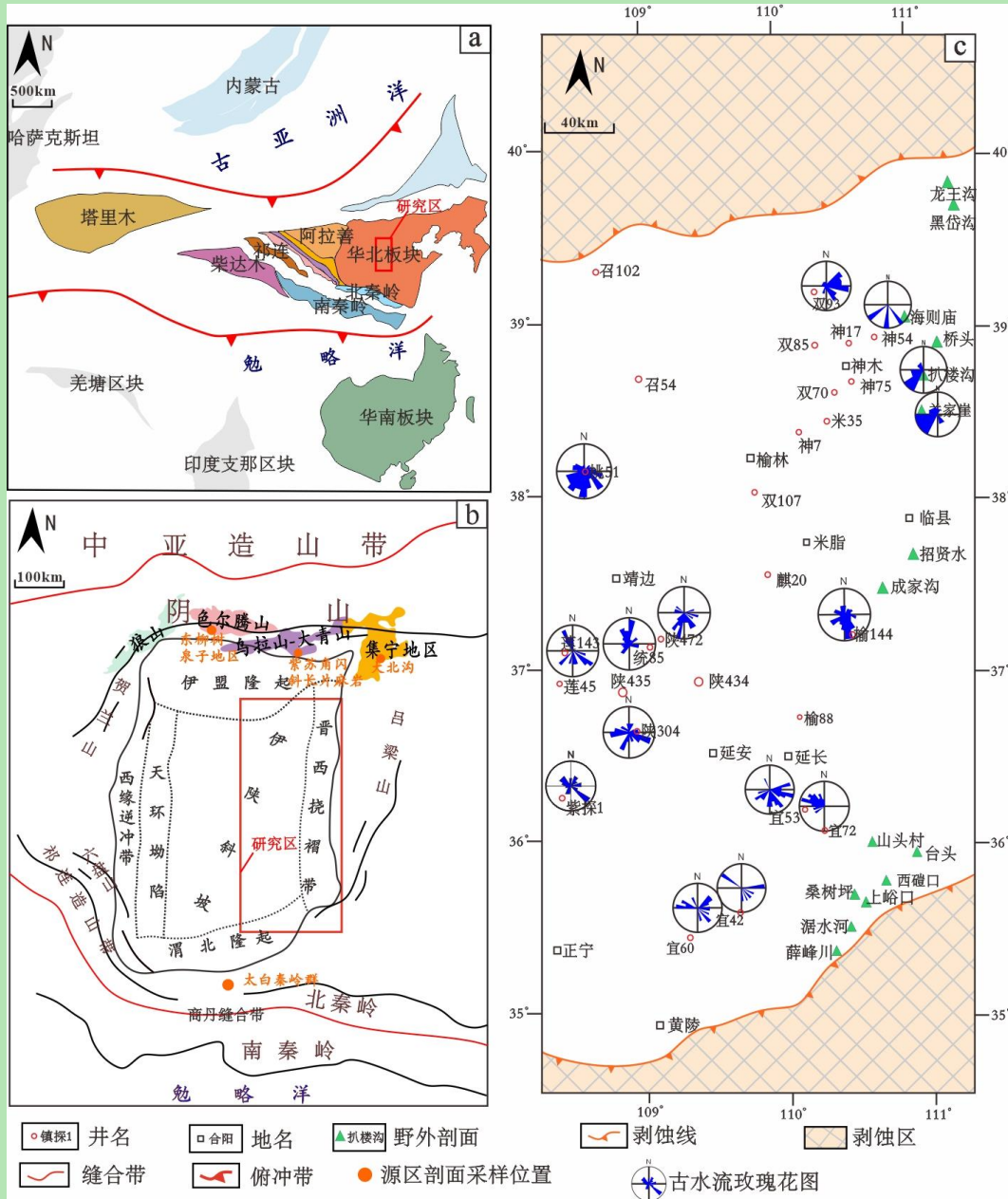


图1 鄂尔多斯盆地东部构造位置、井位和本溪组古水流分布图

(a) 华北及邻区晚石炭世古地理图(据文献[17]修改); (b) 鄂尔多斯盆地本溪组构造位置图; (c) 研究区井位图和本溪组古水流分布图

Fig.1 Tectonic location, well location, and paleoflow distribution map of the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin

奥陶纪，在以碳酸盐为主的陆表海沉积背景下^[7]，受加里东运动影响，盆地整体随华北地台逐渐抬升，海侵海退变化频繁，沉积了晚奥陶世马家沟组碳酸盐岩—蒸发岩^[5]。加里东运动末期，盆地持续遭受剥蚀未接受沉积，缺少志留纪—早石炭世地层，沉积间断长达1.3~1.5 亿年。晚石炭世本溪期，在海西构造运动的影响下，盆地北部古亚洲洋持续向南俯

冲消减，同时南部勉略洋快速扩张，盆地随华北地台缓慢沉降并重新开始接受沉积^[21]，整体构造格局南隆北倾。本溪组地层不整合于下伏马家沟组风化面上（图 2a）^[22]，具有填平补齐的特征。受盆地古地貌格局的影响，华北海主要从东侧和北东侧进入盆地内部，盆地东部的开阔台地向西推进变为潟湖—潮坪相，沉积厚度在靖边一带向西减薄^[5]。在潮汐与河流的相互作用下发生多幕次海侵海退事件，研究区形成浅海泥质陆棚沉积和障壁海岸沉积^[2,7]，由于北部水体较浅，物源供给充分，以潮汐—三角洲复合沉积体系为主，南部水体较深且受潮流影响更明显，主要发育障壁海岸沉积体系。本溪组自下而上依次发育湖田段、畔沟段和晋祠段地层（图 2a, b），且本次研究主要为畔沟段和晋祠段地层。湖田段以暗红色铝土岩、灰黑色泥岩和碳质泥岩为主^[7,12,21]。畔沟段整体表现为灰白色中细粒砂岩、灰黑色泥岩夹灰岩（图 2c, d）。晋祠期，区域海平面下降，底部沉积灰白色厚层中—粗粒石英砂岩与泥岩和薄层粉砂岩互层，大部分区域出现沼泽化，顶部发育 8[#]和 9[#]两套煤层（图 2e~i）。早二叠世，陆表海进一步发展，西部祁连海和东部华北海域连通，连续沉积了太原组深灰色灰岩、泥岩及细砂岩，夹薄煤层^[23]（图 2j）。

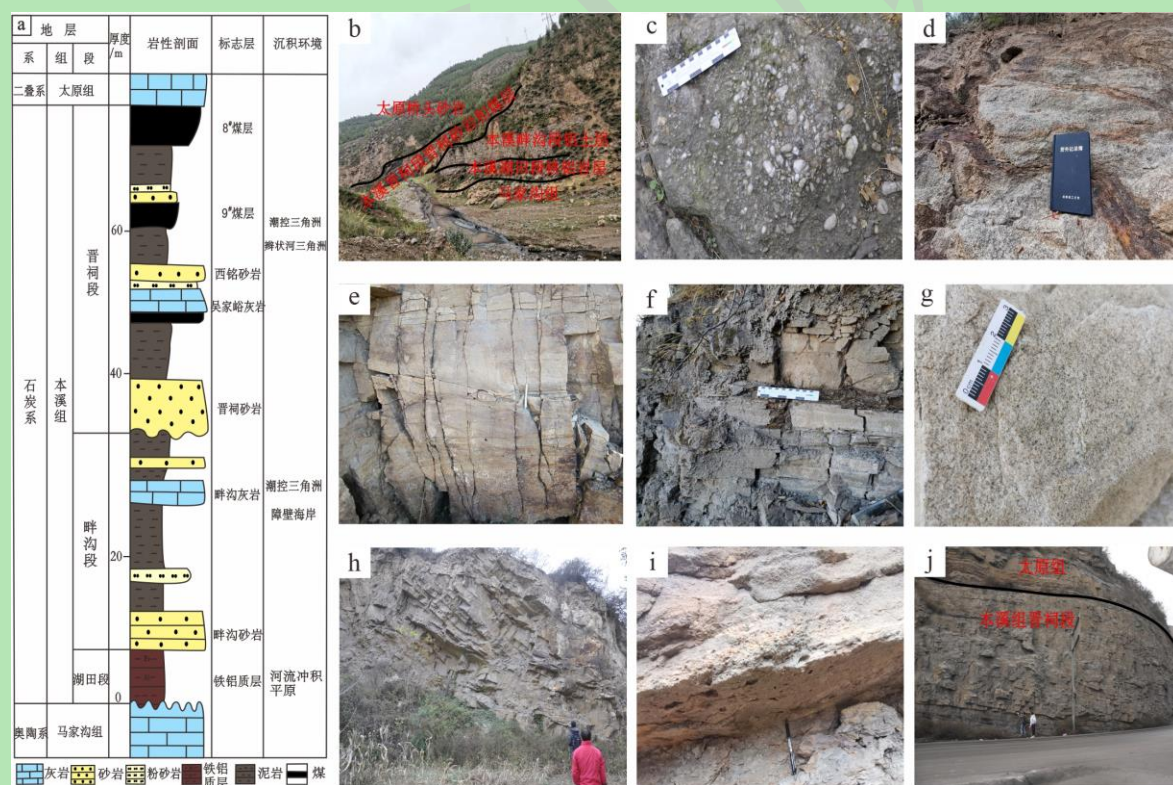


图 2 鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积特征及综合岩性柱状图

(a) 本溪组综合岩性柱状图（据文献[22]修改）；(b) 马家沟组、本溪组、太原组分界线；(c) 薛峰川，畔沟段，底部砾石，磨圆较好，分选差；(d) 海则庙，畔沟段，透镜状石英砂岩；(e) 龙王沟，晋祠段底部砾岩，韵律层理；(f) 台头镇，晋祠段顶部砂岩；(g) 黑岱沟，晋祠段，中细粒石英砂岩；(h) 桑树坪，晋祠段，海相砂岩，石英含量高，夹煤线；(i) 桥头，晋祠砂岩，底部冲刷砾石，磨圆好，略显正粒序；(j) 本溪组、太原组分界线

Fig.2 Sedimentary characteristics and comprehensive lithological histogram of the Benxi Formation in the

2 样品与研究方法

本次研究的样品主要采集于鄂尔多斯盆地东部的 10 个野外剖面 and 35 余口钻井岩心, 优先选取蚀变和成岩作用较弱的新鲜样品, 岩性主要为砂岩和泥岩。挑选 28 件砂岩样品与 30 件泥岩样品, 送至四川省科源工程技术测试中心分别进行薄片分析、主微量以及稀土元素测试分析。根据薄片分析结果统计火山岩岩屑、沉积岩岩屑和变质岩岩屑中各岩屑的百分含量并初步进行物源体系分区。进行地球化学测试时需将样品淘洗、研磨后, 用标准分样筛过筛保留小于 200 目的部分。主量元素测定在坩埚中熔融制作样片, 使用 X 射线荧光光谱仪(XRF) 进行分析测试。微量和稀土元素测定使用敞口酸溶法, 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS) 进行测定^[24]。将测得研究区与收集源区的稀土元素数据利用 Boynton 的球粒陨石数据对稀土元素进行标准化处理^[25], 绘制稀土配分模式曲线并匹配。野外采集的 5 件砂岩样品经破碎、淘洗、电磁分离、重液分离等工艺预处理后, 并从长庆油田收集了 3 件岩石样品的锆石数据(扒楼沟、召 54 和西磴口), 共获得碎屑锆石颗粒 560 颗, 锆石的制靶和锆石 U-Pb 定年分析均在油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成, 测试仪器为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS), 以氦气为载体。其中, 碎屑锆石年龄核密度估计图(Kernel density estimate, KDE) 以及碎屑锆石二维定标图(Multidimensional Scaling, MDS) 的绘制采用 IsoplotR 完成^[26]。本文利用 KDE 图匹配源区与沉积区并通过锆石年龄分布饼状图分析源区贡献率, 结合 MDS 图进一步对研究区锆石年龄的相似性与差异性展开定量对比。

3 鄂尔多斯盆地东部本溪组物源示踪

沉积盆地的源—汇系统控制因素复杂多样, 不同的供源效应导致沉积响应特征的明显差异。基于此, 通过分析盆地的沉积记录以进行物源示踪, 从复杂的沉积结果中识别有效的年龄信号^[27], 从而更加准确地判断碎屑物质的来源及搬运路径, 恢复特定构造背景下盆地的古地理格局。

3.1 岩屑组分分析

碎屑岩中砂岩岩屑的组分特征是反映物源区母岩岩性最直接的证据, 不同岩屑组分含量也可以划分物源体系。为分析研究区砂岩组分特征, 本文统计鄂尔多斯盆地本溪组砂岩中各岩屑所占的百分含量生成饼状图, 并选取 6 张特征明显的镜下照片进行描述(图 3)。结果表明, 研究区在本溪组沉积期火山岩岩屑主要含有花岗岩岩屑、喷发岩岩屑和隐晶岩岩屑; 沉积岩岩屑主要为粉砂岩岩屑和泥岩岩屑; 变质岩岩屑主要有六种类型, 高变岩, 石英岩,

片岩, 千枚岩, 板岩和变质砂岩。区内大致可分为北部、中部和南部三大岩屑组合区域, 其中北部为高变质岩—中沉积岩—低火山岩岩屑组合, 中部表现为高变质岩—中火山岩, 南部为高变质岩—中火山岩—低沉积岩岩屑组合特征(图3)。具体表现为研究区北部富含石英岩岩屑和泥岩岩屑, 火山岩岩屑较少, 偶见花岗岩岩屑; 中部富含石英岩岩屑和隐晶岩岩屑, 花岗岩岩屑和喷发岩岩屑含量明显增多; 南部含有较多的变质砂岩岩屑、片岩岩屑和隐晶岩岩屑, 沉积岩岩屑含量较少。本溪组岩石类型以石英砂岩和岩屑砂岩为主, 薄片总体特征为石英含量多, 其次为岩屑, 极少发育长石。其中石英颗粒磨圆度较好, 分选中等; 碎屑颗粒中, 岩屑形状多变, 多见变质岩岩屑。

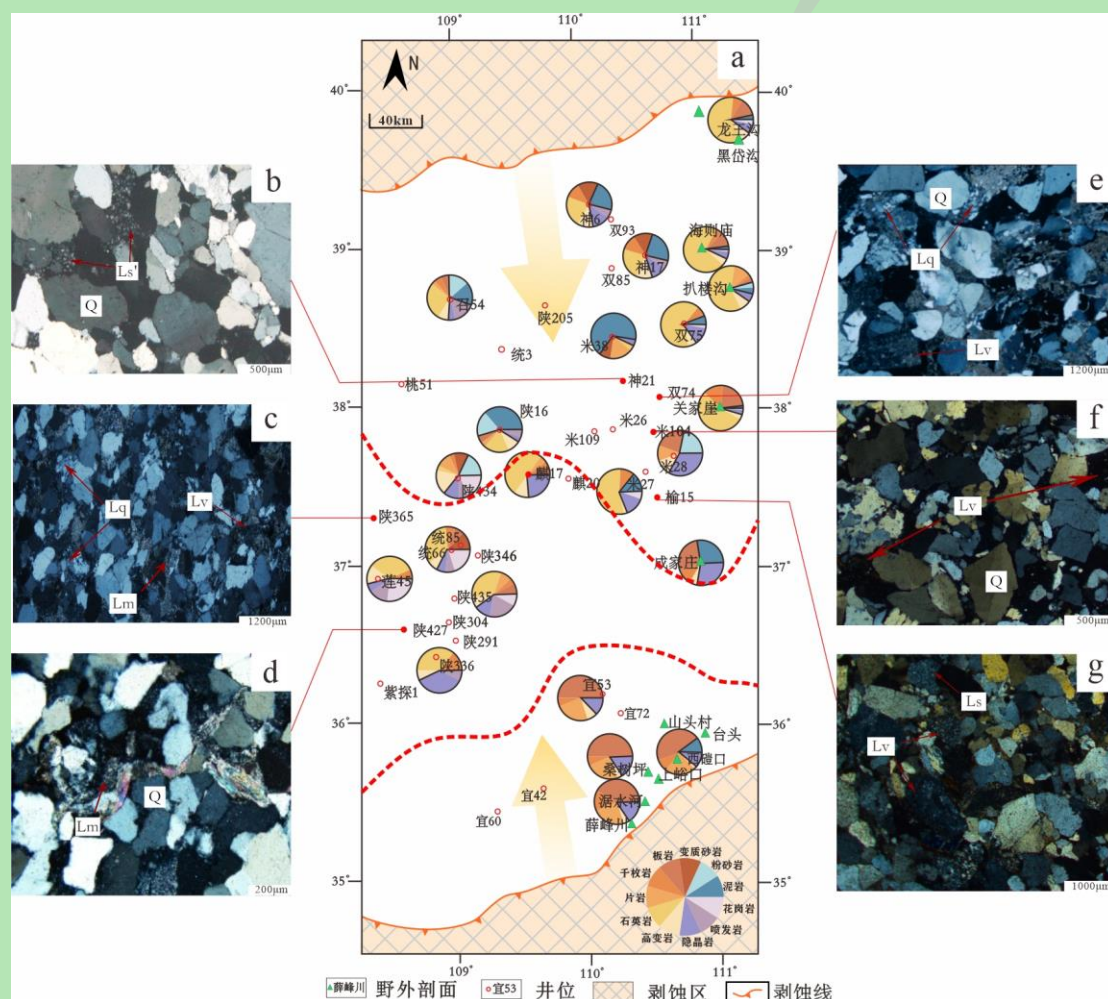


图3 鄂尔多斯盆地东部本溪组岩屑组分分布和砂岩组分镜下特征图

(a) 研究区本溪组岩屑组分分布图; (b) 石英砂岩, 神21井, 晋祠段, 2329.0 m; (c) 细粒岩屑石英砂岩, 陕365井, 晋祠段, 3802.0 m; (d) 中粒岩屑石英砂岩, 陕427井, 晋祠段, 3271.4 m; (e) 石英砂岩, 双74井, 畔沟段, 2150.2 m; (f) 中粒岩屑石英砂岩, 米104井, 畔沟段, 2084.6 m; (g) 岩屑石英砂岩, 榆15井, 晋祠段, 2546.2 m; Q.石英; Lv.火山岩岩屑; Lm.变质岩岩屑; Ls.沉积岩岩屑; Lq.石英岩岩屑; Ls'.粉砂岩岩屑

Fig.3 Microscopic feature map of rock debris component distribution and sandstone composition from the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin

3.2 稀土元素特征

稀土元素 (REE) 因其化学性质稳定且受控于源岩的矿物组成, 为物源示踪提供重要信息^[28]。其中, 通过对比潜在源区与沉积区的稀土配分曲线形态、倾斜度以及 Ce、Eu 元素的特征, 可以较明确地判断源区位置^[29]。本次研究选取鄂尔多斯盆地东部本溪组 3 个野外剖面 and 9 口钻井岩心的 12 个泥岩样品进行采样, 并收集前人在盆地周缘潜在源区获得的稀土数据^[30-34], 绘制出稀土配分曲线。整体来看, 研究区本溪组样品中稀土元素总量 (ΣREE) 介于 $84.4 \times 10^{-6} \sim 440.24 \times 10^{-6}$, 均值为 230.31×10^{-6} 。稀土元素整体分布不均, 轻重稀土比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 7.30~16.75, 均值为 11.32, 表现为轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损的右倾趋势。同时, 研究区样品 Eu 普遍存在一定程度的亏损。将研究区样品的稀土配分曲线与周缘潜在源区的稀土配分曲线按相似性进行匹配, 得出了 4 种类型的稀土配分模式图 (图 4)。

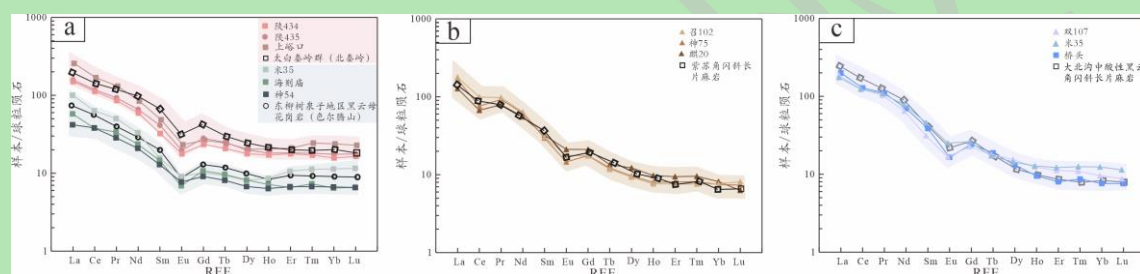


图 4 鄂尔多斯盆地东部本溪组泥岩样品与潜在源区球粒陨石标准化稀土配分曲线

(a) 北秦岭 (稀土配分曲线引自文献[30]), 色尔腾山 (稀土配分曲线引自文献[31]); (b) 乌拉山—大青山 (稀土配分曲线引自文献[32]); (c) 集宁地区 (稀土配分曲线引自文献[33])

Fig.4 Standardized rare earth element (REE) partition curves of mudstone samples from the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin and chondrites in potential source areas

(1) 陕 434 井—陕 435 井—上峪口地区: LREE/HREE 均值 9.24, 轻重稀土分异明显, LREE 右倾而 HREE 较平坦; δCe 均值 3.10, 低负异常, δEu 均值 0.20, 负异常明显; 其稀土配分曲线与北秦岭太白秦岭群的稀土配分曲线相似程度较高, 推测秦岭造山带对研究区南部物源造成影响。(2) 米 35 井—海则庙—神 54 井一带: LREE/HREE 均值 9.97, LREE 较陡峭; δCe 均值 3.05, δEu 均值 0.22, 显示出较弱的 Ce 异常和较强的 Eu 负异常; 其稀土配分曲线与东柳树泉子地区黑云母花岗岩的稀土配分曲线有较强的一致性, 推测此时色尔腾山为研究区北部供源。(3) 召 102 井—神 75 井—麒 20 井地区: LREE/HREE 均值 12.79, LREE 富集, HREE 严重亏损; δCe 均值 2.05, 负异常明显, δEu 均值 0.24, 中等负异常; 其稀土配分曲线与乌拉山—大青山地区的紫苏角闪斜长片麻岩的稀土配分曲线具有亲缘性, 故推测乌拉山—大青山为研究区北部源区之一。(4) 双 107 井—米 35 井—桥头一带: LREE/HREE 均值 12.84, 同样具有轻稀土富集重稀土严重亏损的特征; δCe 均值 2.88, Ce 轻微亏损, δEu 均值 0.21, Eu 亏损较重; 其稀土配分模式与大北沟中酸性黑云角闪斜长片麻岩的稀土配分

曲线显示出高度相似的特征，推测集宁地区为研究区东北部的的主要物源。综合上述结果，认为研究区北部存在3个源区（色尔腾山、乌拉山—大青山和集宁地区），南部源区为秦岭造山带，总体呈现多物源混合的特征。

3.3 碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

本次研究选取研究区内7条野外剖面 and 3口钻井的10个砂岩样品，实测样品点560个，并收集前人双85和成家沟剖面的锆石U-Pb年龄进行分析^[10,13,34]。小于1000 Ma的锆石年龄使用²⁰⁶Pb/²³⁸U，大于1000 Ma的使用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb^[35]，且样品谐和度均介于90%~110%，年轻锆石(<1000 Ma)的单个误差1σ多在10 Ma以内。由于盆地周缘造山带母岩的注入，沉积盆地与其周缘潜在源区具有相似的锆石年龄特征，因此通过对比二者的锆石年龄分布形态可初步判断出碎屑物质的来源。本文总结了前人关于鄂尔多斯盆地潜在源区的碎屑锆石年龄，根据年龄值绘制核密度估计图及锆石年龄分布饼状图（图5）。

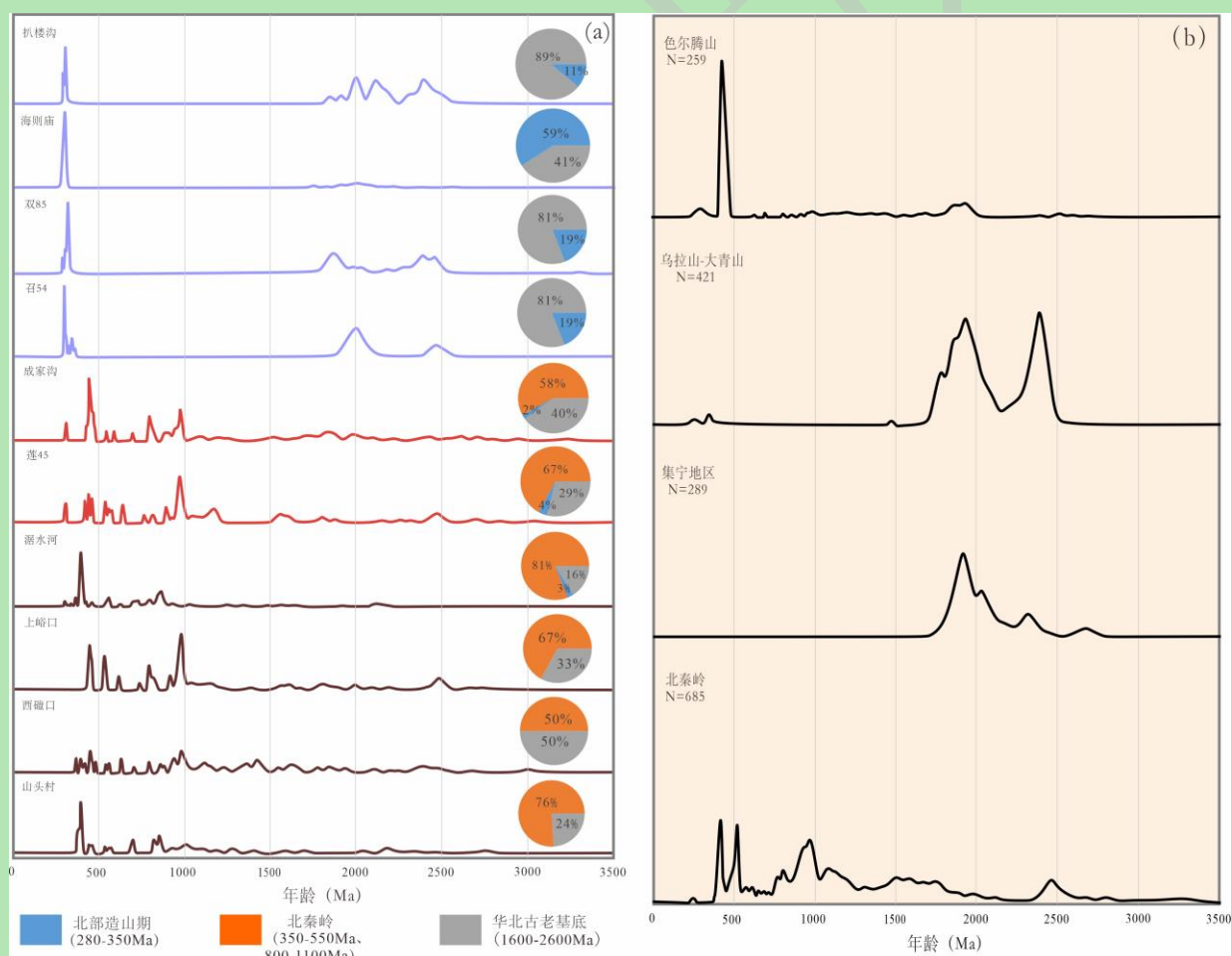


图5 鄂尔多斯盆地东部本溪组与潜在源区碎屑锆石年龄分布图

(a) 鄂尔多斯盆地东部本溪组锆石年龄 KDE 图与锆石年龄饼状图(双85 锆石数据引自文献[10,13], 成家沟剖面锆石数据引自文献[34]); (b) 潜在源区锆石年龄 KDE 图(色尔腾山引自[31,36-37]; 乌拉山—大青山引自文献[38-41]; 集宁地区引自文献[42-43]; 北秦岭引自文献[44-47])

Fig.5 Age distribution of clastic zircons in the Benxi Formation and potential source areas in the eastern Ordos

Basin

KDE 图显示, 研究区 10 个碎屑锆石样品的年龄特征大致分为三种类型, 且主要集中在新太古代—古元古代 (1 600~2 600 Ma)、新元古代 (650~1 000 Ma)、早古生代 (400~550 Ma) 和晚古生代 (279~350 Ma) 四个时期。其中, 第 I 类样品 (扒楼沟、海则庙、双 85 和召 54) 锆石年龄主要介于 $286 \pm 7 \sim 2 521 \pm 42$ Ma, 以较多的晚古生代和新太古代—古元古代锆石出现为特征, 锆石年龄分布表现出与色尔腾山、乌拉山—大青山和集宁地区的锆石年龄具有较高的相似性。晚古生代的锆石年龄存在明显的主峰, 峰值为 ~ 305 Ma, 与兴蒙造山带内索伦缝合带以北的岩浆锆石特征相似^[48-49], 指示古亚洲洋向华北板块的持续俯冲作用, 而晚于本溪期地层沉积年龄的锆石, 推测为研究区地层发生低级区域变质作用导致 Pb 丢失和 U-Pb 年龄的重启从而改变了锆石年龄^[50]。新太古代—古元古代的年龄峰值集中在 $\sim 1 950$ Ma 和 $\sim 2 400$ Ma, 与前人分析的华北克拉通基底的碎屑锆石年龄一致^[51], 指示华北克拉通基底经历了 2.7~2.9 Ga 的陆壳增生、 ~ 2.5 Ga 的克拉通化以及 1.9~2.3 Ga 的造山活动等多期次地质事件, 最终于 ~ 1.8 Ga 时期由东西两个陆块碰撞拼合而成^[52-53]。其中, 饼状图显示第 I 类样品除海则庙外, 其余样品的华北古老基底的碎屑锆石占比均达到 80% 以上, 其次为北部造山期锆石。第 II 类样品 (成家沟剖面 and 莲 45) 锆石年龄主要介于 $304 \pm 3 \sim 2 780 \pm 258$ Ma, 集中在晚古生代、早古生代、新元古代及新太古代—古元古代四个年龄段。第 III 类样品 (山头村、洹水河、西磴口 and 上峪口) 锆石年龄主要介于 $382 \pm 60 \sim 2 810 \pm 332$ Ma, 具有较多的早古生代、新元古代和古元古代锆石年龄, 表现出与北秦岭的锆石年龄分布高度相似的特征。其早古生代碎屑锆石存在明显峰值, 集中在 ~ 440 Ma, 此年龄在二郎坪群、北秦岭群、宽坪群和丹凤群普遍存在^[54-57], 与北秦岭中东段的构造—岩浆活动有关^[58], 指示此时期北秦岭间残余洋盆持续点接触的弧—陆与陆—陆碰撞造山过程^[59]。第 III 类样品新元古代普遍具有多个次峰, 为不同陆块间汇聚和裂解形成的挤压碰撞型花岗岩体^[55], 其中 ~ 600 Ma 的锆石年龄, 在北秦岭中侵位于二郎坪、宽坪岩群的花岗岩体以及陶湾岩群中可见, 可能为弧后盆地扩张形成的产物^[57, 60]。古元古代的碎屑锆石形成 $\sim 2 474$ Ma 的年龄峰值, 与上述华北古老基底锆石一致。其中, 饼状图显示第 III 类样品的锆石主要来源于北秦岭, 其次为华北古老基底。

基于此, 本研究进一步依据碎屑锆石二维定标法分析样品之间的相似性与差异性 (图 6)。研究表明, 上述 11 个砂岩样品在碎屑锆石二维定标图 (MDS) 中分布于两个区域, 反映了截然不同的物源背景, 表明分别受北部源区和南部源区影响较多。其中, 第 I 类样品海则庙、扒楼沟、召 54 和双 85 聚合于 A 区域, 推测与北部中亚造山带形成的锆石具有良好的亲缘

性,表明主要受北部物源影响。结合古流向玫瑰花图(图 1c)可知,北部整体古水流方向自北向南,研究区东北部样品流向主要以北东—南西向为主,少量为北西—南东向,推测集宁地区为东北部的物源区,同时乌拉山—大青山也对其少量供源;西北部样品桃 51 古流向主要为南东或南西向,推测源区为色尔腾山及乌拉山—大青山。第 III 类样品上峪口、西磴口、山头村和淝水河聚合于 B 区域,推测与北秦岭的锆石有良好亲缘性,结合古流向玫瑰花图(图 1c),南部样品整体的古水流方向为南东—北西向,推测沉积物来自北秦岭。值得一提的是,第 II 类样品莲 45 和成家沟在 MDS 图中与第 III 类样品聚合,表明第 II 类样品与第 III 类样品有更好的亲缘性。结合锆石年龄特征(图 4),这类样品既包含以晚古生代为代表的北部源区的碎屑锆石,同时含有以早古生代和新元古代为代表的南部源区的碎屑锆石,且成家沟—莲 45 一带的古流向表现出南北双向混合的特征(图 1c),推测此处为南北物源交汇区,但受南部物源影响更大。

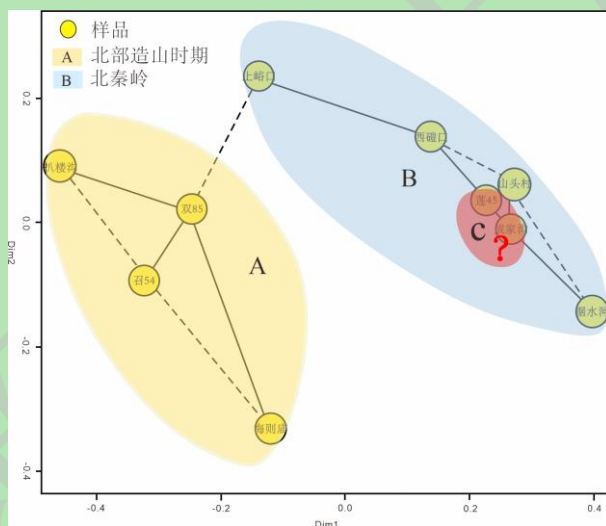


图 6 鄂尔多斯盆地东部本溪组碎屑锆石样品 MDS 图

距离越近相似性越强,实线连接最相似的样品点,虚线连接次相似的样品点

Fig. 6 MDS diagram of clastic zircon samples from the Benxi Formation, eastern Ordos Basin

4 鄂尔多斯盆地东部本溪组源区特征

4.1 源岩性质

沉积物中不活泼微量元素(La、Th 和 Hf)和稀土元素不易受外部环境的影响,在不同的源岩中,其含量的比值存在差异,因此通过 La/Th-Hf 和 La/Yb-REE 判别图可有效地推测源岩的特征^[61-62](图 7)。

La/Th-Hf 和 La/Yb-REE 判别图显示,鄂尔多斯盆地北部源区沉积物整体以平均上地壳长英质源和混合长英质/基性源为主,源岩主要呈中性,岩性主要为花岗岩、碱性玄武岩和

沉积岩。其中，色尔腾山源—汇系统沉积物主要落在平均上地壳长英质源区域；乌拉山—大青山源—汇系统沉积物以混合长英质/基性源为主，集宁地区沉积物主要落在平均上地壳长英质源和混合长英质/基性源区域。北部物源表现为古老沉积物含量自西向东增加，揭示西部以造山物源为主，东部以华北古老基底为主。盆地南部北秦岭沉积物主要落在被动大陆边缘物源，同时包含少量平均上地壳长英质物源组分，岩性以碱性玄武岩和花岗岩为主，揭示南部物源以古老基底为主，其次为早古生代加里东运动花岗岩体。

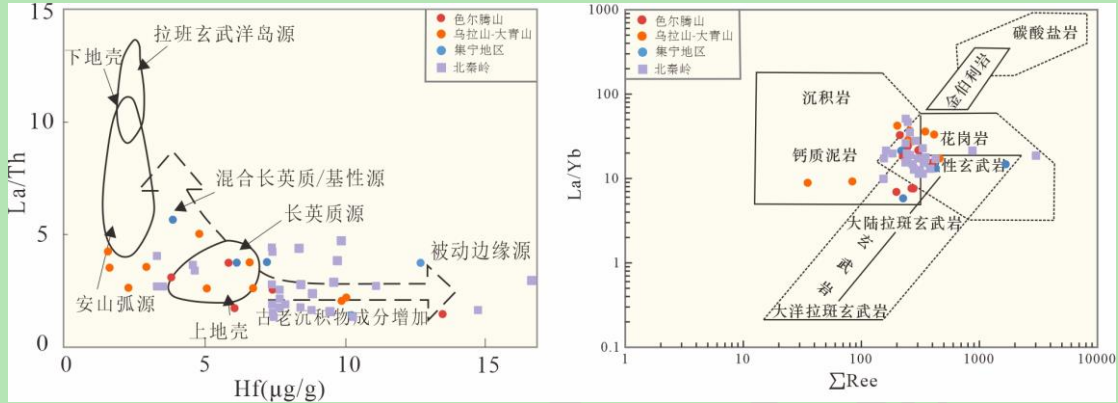


图7 鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积物源区母岩特征判别图

(a) La/Th-Hf 判别图 (底图引自文献[61])；(b) La/Yb- Σ REE 判别图 (底图引自文献[62])

Fig.7 Parent rock characteristics from the Benxi Formation sediment source area in the eastern Ordos Basin

4.2 源区构造背景

沉积岩中特定的主量元素、微量元素和稀土元素的分配的差异性在一定程度上也为识别源区的构造环境提供了证据，本文运用 Cawood^[63]提出的碎屑锆石结晶年龄 (CA) 与地层沉积年龄 (DA) 的差值划分出沉积期三种构造背景：汇聚造山、碰撞挤压和拉张伸展 (图7)，绘制出锆石年龄累积概率图 (Cumulative Distribution Function, CDF)。通过 Bhatia 的分析理论在 La-Th-Sc 和 Th-Co-Zr/10 三元图解上投点^[64] (图8)，并结合 K_2O/Na_2O-SiO_2 判别图来识别源区的构造环境^[65] (图8)。

K_2O/Na_2O-SiO_2 、La-Th-Sc 和 Th-Co-Zr/10 构造背景判别图显示，鄂尔多斯盆地北部源区的构造背景整体以主动大陆边缘为主，其次为大陆岛弧背景。其中，色尔腾山的沉积物集中落在主动大陆边缘区域，少量样品落在大陆岛弧区域；乌拉山—大青山的沉积物与色尔腾山沉积物具有相似的特征；集宁地区表现出以被动大陆边缘为主的构造背景特征。盆地南部北秦岭构造背景以大陆岛弧和被动大陆边缘为主，少量样品点落在主动大陆边缘区域。碎屑锆石年龄累积概率图 (图9) 显示，北部多数样品处于碰撞挤压背景中，南部大部分样品落在碰撞挤压与拉张伸展的重叠区域。

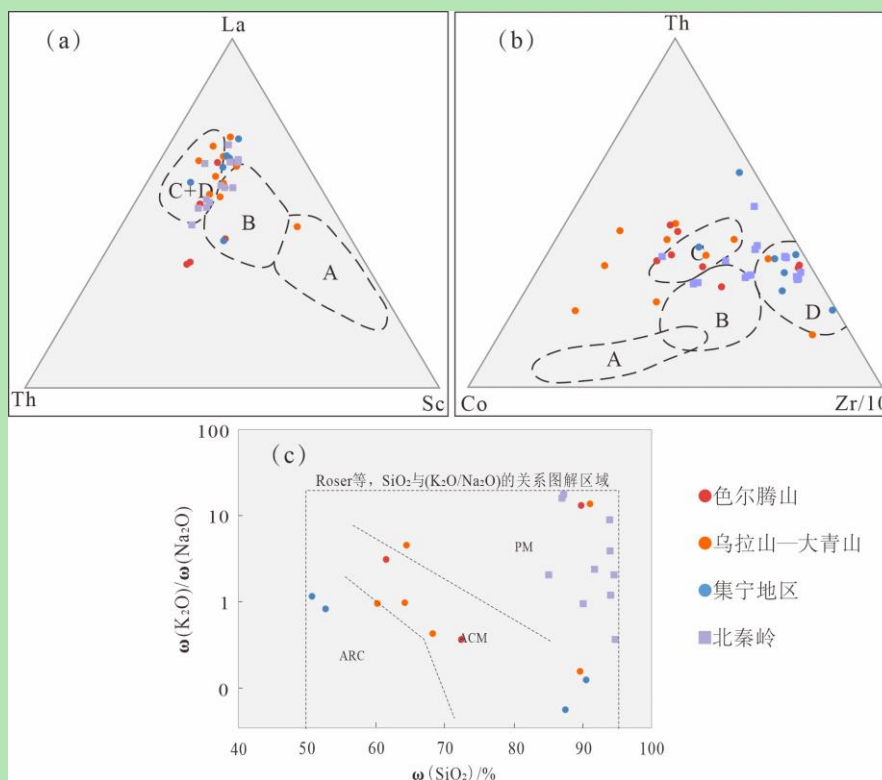


图8 鄂尔多斯盆地东部本溪组沉积物源区构造背景判别图

(a) La-Th-Sc 三元图解, 底图引自文献[64]; (b) Th-Co-Zr/10 三元图解, 底图引自文献[64]; (c) K_2O/Na_2O-SiO_2 判别图, 底图引自文献[65]; A.大洋岛弧; B.大陆岛弧; C.主动大陆边缘; D.被动大陆边缘; ARC.岛弧; ACM.活动大陆边缘; PM.被动大陆边缘

Fig.8 Structural background of the sediment source area in the Benxi Formation, eastern Ordos Basin

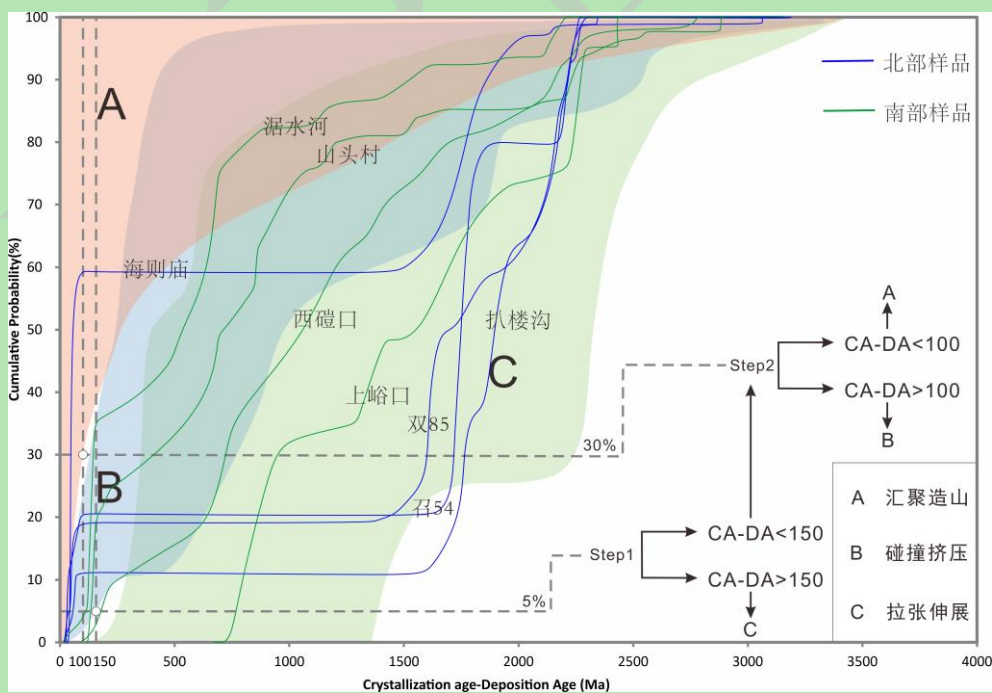


图9 鄂尔多斯盆地东部本溪组碎屑锆石年龄累积概率图

Fig.9 Cumulative probability map of detrital zircon age in the Benxi Formation, eastern Ordos Basin

5 鄂尔多斯盆地东部本溪期多物源复合影响及充填过程

5.1 多物源复合影响

北部样品锆石年龄以华北克拉通基底为主，其次为北部造山期（图 5），表明华北板块北缘对研究区北部碎屑锆石的贡献率高于中亚造山带。其中，北部造山期锆石年龄占比整体上具有西多东少的特征，指示中亚造山带在研究区西侧隆升剥蚀程度大。位于研究区东北部的海则庙剖面主要以造山期锆石为主，其次为华北古老基底，且本溪期海则庙剖面对应的源区为汇聚造山的构造背景（图 9），推测本溪期盆地东北部对应的中亚造山带隆升程度较高。总体来说，中亚造山带两侧隆升程度高于中部，具有不规则斜向碰撞的特点。

混合区样品（成家沟—莲 45 一带）为鄂尔多斯盆地东部的南北物源交汇区，碎屑锆石年龄占比北秦岭居多，其次为华北古老基底，最后为北部造山期（图 5）。图 6 也反映南北交汇区中北秦岭的物源贡献率更大，北部中亚造山带的物源贡献率较低。其中，西侧的莲 45 中来自北部造山期锆石年龄占比略大于东侧的成家沟剖面，也从侧面说明中亚造山带在研究区西侧隆升剥蚀程度更大。成家沟在~450 Ma 存在明显的年龄峰值，而此时莲 45 为弱峰（图 5），可能与北秦岭古生代东段花岗质岩石的形成有关^[58]，推测北秦岭对交汇区东部物源影响更大。

南部样品年龄分布复杂且存在显著差异。整体来看，北秦岭的锆石年龄占比大于华北古老基底，指示北秦岭相较于华北板块南缘的隆升程度更大，物源贡献率更高。其中，西磴口锆石年龄分布表现出多个弱峰的特征，且华北基底锆石占比增多，说明西磴口地区对应的华北板块南缘隆升剥蚀程度增加，推测北秦岭东段的挤压导致华北板块南缘的隆升，阻挡了北秦岭造山带碎屑物质的沉积。汨水河剖面与山头村剖面具有相似的锆石年龄特征，但西侧的汨水河剖面含有少量的~330 Ma 锆石，且汨水河剖面以砾岩为主^[13]，为近源沉积，因此~330 Ma 的少量锆石可能来源于北部细粒沉积物或地层再旋回。南部大部分样品处于碰撞挤压和拉张伸展的重合区域（图 9），而上峪口剖面对应的源区为拉张伸展的构造背景，表明本溪期北秦岭为拉张伸展向碰撞挤压转换的过渡时期，盆地南部对应的源区可能存在小型残余洋盆。上峪口剖面表现出~530 Ma 和~980 Ma 两个显著的锆石年龄峰值，反映其母岩主要存在新元古代和早古生代的锆石，与北秦岭的锆石年龄特征相似，推测盆地东南部物源更多受到北秦岭的影响。同时，宜 72 地区南东—北西向的古水流也得到了印证。

5.2 本溪期沉积充填过程

通过选取鄂尔多斯盆地分布均匀的神 17 井、双 70 井、神 7 井、招贤水剖面、榆 88 井

以及宜 53 井 6 处钻井及剖面，进行地层和砂体综合对比（图 10）。晚古生代，鄂尔多斯随华北地台经历了隆升后又缓慢沉降，晚石炭世本溪组沉积于奥陶纪马家沟组风化面之上，地层具有填平补齐的特征。从图 10 中可以看出，鄂尔多斯盆地东部本溪组地层厚度存在明显差异，整体呈现中部最厚，南部偏厚，北侧偏薄的特征，其中神 7 井和招贤水剖面地层厚度可达 60 余米。湖田段沉积期，盆地整体具有“南隆北倾”的特点，发育冲积平原河流相沉积。畔沟段沉积期，由于南北均为弱物源供给状态，泥岩和灰岩为沉积主导，砂体发育较少且呈条带状展布。晋祠段沉积期，北部造山作用增强导致盆地转换为“北隆南倾”的古地貌格局^[2]，北部供源逐渐强于南部，盆地水体北浅南深。随着盆地北部输入碎屑物质的增多，发育大型潮控三角洲，南部受物源制约，发育小型潮控三角洲。受潮流影响，南北三角洲前缘砂体均被切割成孤立状的潮汐砂坝，顺潮流方向分布且连续性较差，交汇于盆地中部。

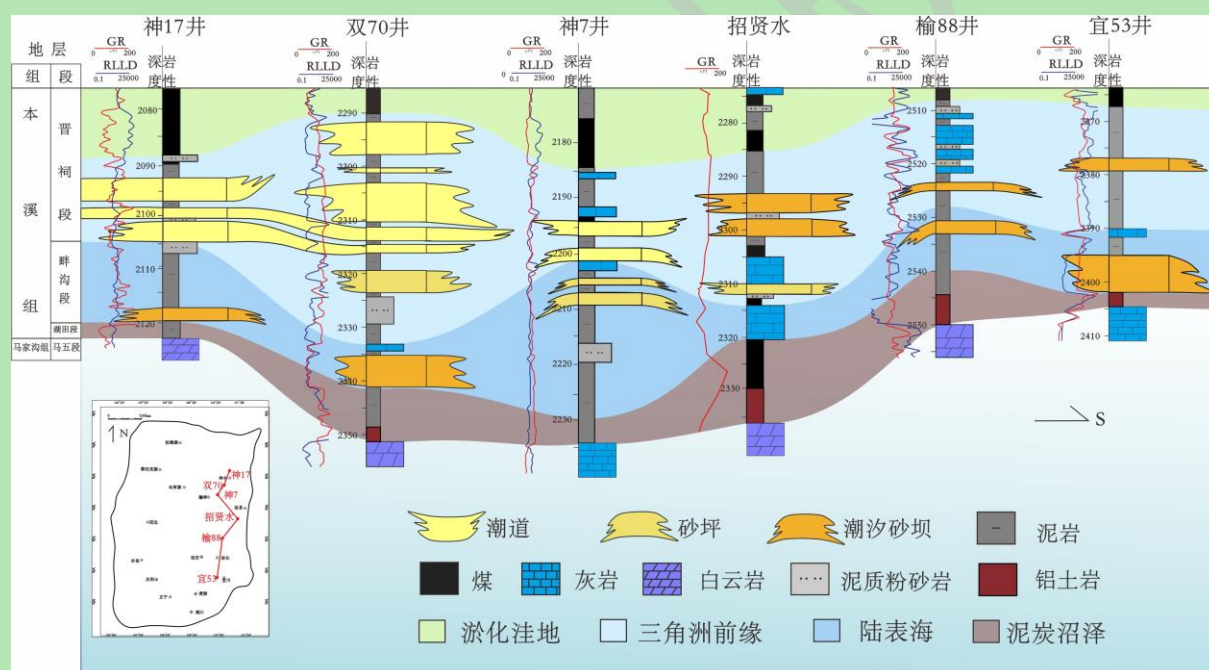


图 10 鄂尔多斯盆地东部本溪组南北向砂体连井图

Fig.10 Connecting wells from north-south sand body in the Benxi Formation, east Ordos Basin

6 鄂尔多斯盆地东部本溪期大地构造背景与古地理格局

晚石炭世本溪期，随着古亚洲洋的俯冲闭合，中亚造山带不断隆升挤压并为华北克拉通北部提供远距离物源，华北板块处于由南隆北倾到北隆南倾的构造转换阶段。位于华北板块之上的内蒙古隆起也随之抬升，内蒙古隆起内部的色尔腾山、乌拉山—大青山及集宁地区为研究区北部三大近源区，形成活动大陆边缘，物源供给复杂，以花岗质岩、碱性玄武岩和沉积岩为主（图 7b）。华北板块北缘整体受到挤压作用，隆起幅度较大，物源供给强，由于河流作用强于华北海入侵的潮汐作用，研究区北部发育大型潮汐—三角洲复合体系^[7]。三

角洲砂体展布位置大致与北部三大源区位置相对应，呈大面积分布且不断向盆地中央推进，但三角洲前缘的砂体被东向和北东向的潮流作用改造形成分散型条带状的潮汐砂坝（图 10）。中亚造山带整体表现为研究区两侧隆升剥蚀程度略高，呈不规则斜向碰撞特征。受其东侧强烈挤压碰撞的影响，研究区东北部碎屑物质的输入明显增多，三角洲体系规模达到北部最大，沉积的砂体厚度大且延伸距离远，可达盆地中部成家沟一带（图 11）。

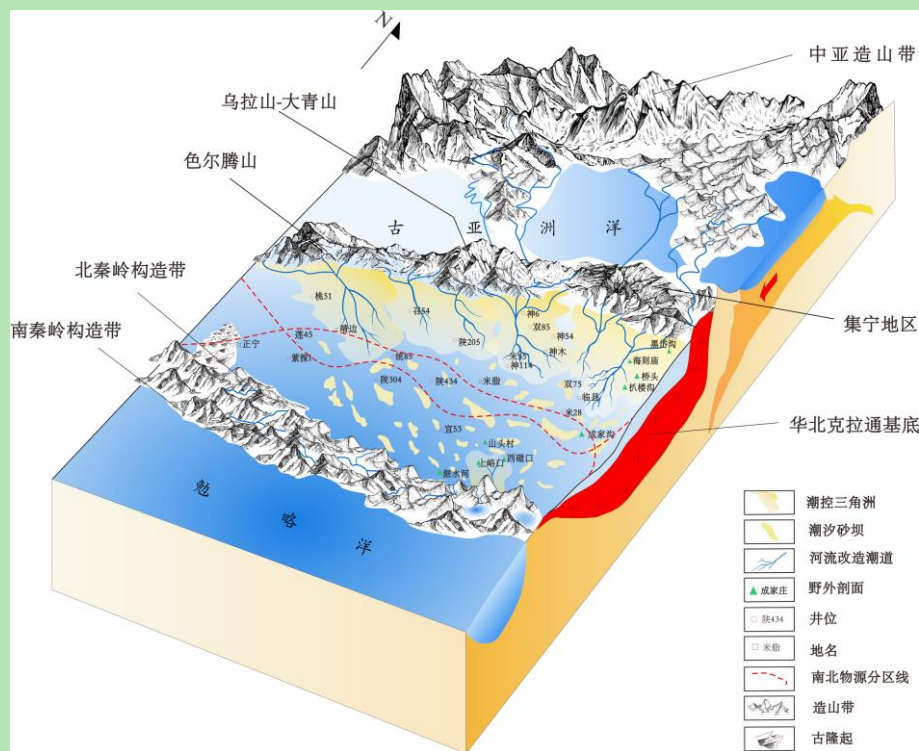


图 11 鄂尔多斯盆地东部本溪组古地理图

Fig.11 Paleogeography of the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin

晚石炭世，勉略洋处于扩张阶段，南部构造背景较为复杂，南秦岭此时可能为被动大陆边缘和大陆岛弧的构造环境。北部的商丹洋于早泥盆世闭合后，北秦岭南侧与南秦岭沿商丹缝合带呈点接触的陆陆碰撞，其北侧与华北板块南缘挤压碰撞导致华北板块南缘发生抬升，推测本溪期盆地南部方向的缝合带中可能仍残留不规则碰撞存在的小型洋盆，因此北秦岭形成沟—弧—盆背景下的拉张伸展向碰撞挤压转换的构造环境。研究区南部物源以近源沉积为主，母岩为碱性玄武岩和花岗岩的混合（图 7b）。北秦岭整体隆升程度虽高于华北板块南缘，但远不及北部造山带，因此研究区南部物源供给相对较弱，砂体搬运距离短。由于本溪期华北海主要从东侧和北东侧进入盆地^[10]，研究区南部受强潮汐作用改造明显，发育小型潮控三角洲—障壁海岸沉积体系，砂体大多沿潮流方向呈孤岛状的砂坝形式分布，连通性较差。北秦岭东段的碰撞造山作用使得华北板块南缘东段的挤压抬升，表现在西碛口一带华北板块古老基底的碎屑锆石贡献率增加。同时，受北秦岭东段强烈隆升的影响，研究区东南缘

上峪口一带物源增加,发育小型三角洲,而西南缘主要发育潮汐砂坝。向北的莲 45—成家沟一带为南北物源体系交汇地带,以北秦岭的碎屑物质供给居多,属于弱物源背景,潮汐作用明显强于河流作用,主要发育顺潮流方向的潮汐砂坝^[7](图 11)。

7 结论

(1) 通过对岩屑组分、本溪组稀土元素特征和碎屑锆石 U-Pb 年龄特征的分析,沉积区样品可划分成三大类,MDS 图显示南北样品分区明显,交汇区样品与南部样品存在高度相似性。由此可知鄂尔多斯盆地东部本溪期存在南北两大物源体系,北部接受远源的中亚造山带提供碎屑物质的同时,内蒙古隆起的色尔腾山、乌拉山—大青山和集宁地区也提供近源的碎屑物质;南部源区主要为北秦岭;南北物源体系交汇于莲 45—成家沟一带,且交汇区受南部物源影响更多。

(2) 元素地球化学指标揭示本溪期研究区北部沉积物以平均上地壳长英质源和混合长英质/基性源为主,母岩主要来自于活动大陆边缘的地球动力学背景。研究区南部沉积物以古老沉积物为主,母岩主要来自于被动大陆边缘和大陆岛弧的构造背景,北部母岩岩性为碱性玄武岩、花岗岩和沉积岩的混合,南部母岩岩性主要为花岗岩和碱性玄武岩。而锆石年龄累积概率图显示南部大部分样品对应的源区处于碰撞挤压与拉张伸展的重叠区域,仅有上峪口剖面对应的源区处于拉张伸展区域,表明此时北秦岭形成沟—弧—盆背景下的拉张伸展向碰撞挤压转换的构造环境,研究区南部方向的缝合带中存在小型洋盆,南秦岭此时可能处于被动大陆边缘和大陆岛弧的构造背景中。

(3) 基于锆石年龄可视化定量分析,研究区北部华北克拉通基底物源贡献占据主导。中亚造山带整体表现为两侧隆升剥蚀程度较高,中部较低,呈现不规则斜向碰撞于鄂尔多斯盆地的特征。北部源区抬升程度高,发育大型潮汐—三角洲复合体系,砂体规模大,可延伸至盆地中部。东北部由于受强物源供给,三角洲砂体延伸距离更远、厚度更大。南部北秦岭物源贡献占据主导,上峪口剖面接受更多来自北秦岭的碎屑锆石,推测东南部物源更多受到北秦岭的影响,形成小型潮控三角洲。由于南部潮流作用强,主要发育顺潮流方向的潮汐砂坝。南北物源交汇区莲 45—成家沟一带属于弱物源供给区,主要受北秦岭供源影响,以潮汐砂坝沉积为主。

致谢 感谢长庆油田提供的实物及分析测试资料,感谢成都理工大学沉积地质研究院刘磊老师的悉心指导以及沉积地质研究院向芳老师提出的建议和帮助,感谢成都理工大学沉积地质研究院王志伟博士、朱淑玥硕士、张靖芪硕士、赵菲硕士和李丹硕士对本文的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 李文厚, 张倩, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 39-52. [Li Wenhou, Zhang Qian, Li Keyong, et al. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(1): 39-52.]
- [2] 尚冠雄. 华北晚古生代聚煤盆地造盆构造述略[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(2): 1-6, 17. [Shang Guanxiang. An outline of Basining structures of North China Late palaeozoic coal accumulation Basin[J]. Coal Geology of China, 1995, 7(2): 1-6, 17.]
- [3] 王东方, 陈从云, 段瑞焱, 等. 中俄边境两侧早古生代造山作用及金银矿带的研究: 中俄联合考察报告[J]. 贵金属地质, 1992, 1(4): 263-270. [Wang Dongfang, Chen Congyun, Duan Ruiyan. Study on early Paleozoic orogeny and gold-silver ore belt on both sides of the Sino-Russian border: A report of Sino Russian joint investigation[J]. Geology and Resources, 1992, 1(4): 263-270.]
- [4] 贾浪波, 钟大康, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组沉积物物源探讨及其构造意义[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 1087-1103. [Jia Langbo, Zhong Dakang, Sun Haitao, et al. Sediment provenance analysis and tectonic implication of the Benxi Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 1087-1103.]
- [5] 翟咏荷, 何登发, 马静辉, 等. 鄂尔多斯盆地及邻区晚石炭世本溪期构造—沉积环境及原型盆地特征[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 726-741. [Zhai Yonghe, He Dengfa, Ma Jinghui, et al. Tectonic-depositional environment and prototype basins during the depositional Period of Late Carboniferous Benxi Formation in Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 726-741.]
- [6] 侯云东, 陈安清, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组潮汐—三角洲复合砂体沉积环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 393-401. [Hou Yundong, Chen Anqing, Zhao Weibo, et al. Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(4): 393-401.]
- [7] 刘新昕. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组沉积环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 1-61. [Liu Xinxin. Study on the sedimentary environment of Upper Carboniferous Benxi Formation of eastern Ordos Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 1-61.]
- [8] 王若谷, 周进松, 杜永慧, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延安气田石炭系—二叠系沉积演化模式[J]. 地质科学, 2021, 56(4): 1088-1105. [Wang Ruogu, Zhou Jinsong, Du Yonghui, et al. Deposition evolution model of the Carboniferous-Permian in Yan'an gas field, the southeastern Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(4): 1088-1105.]
- [9] 宋平, 郭明强, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区上古生界烃源岩特征及其对天然气成藏的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 22-28. [Song Ping, Guo Mingqiang, Zhao Jingzhou, et al. Characteristics of Upper Paleozoic source rocks in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin and their controlling effect on accumulation of natural gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2019, 34(1): 22-28.]
- [10] 张晓星. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组源—汇分析及构造古地理意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 1-55. [Zhang Xiaoxing. Source-sink analysis and tectonic paleogeographic significance of Benxi for Mation in the southern Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 1-55.]
- [11] Chen A Q, Zou H, Ogg J G, et al. Source-to-sink of Late Carboniferous Ordos Basin: Constraints on crustal accretion margins converting to orogenic belts bounding the North China Block[J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(6): 2031-2052.
- [12] 苏东旭, 于兴河, 李胜利, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁海岸沉积特征与展布规律[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 48-56. [Su Dongxu, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Sedimentary characteristics and distribution laws of Benxi Fm barrier coast in SE Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 48-56.]
- [13] 高志东. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组物源分析及有利砂体发育规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 1-71. [Gao Zhidong. Provenance analysis of Benxi Formation of Upper Carboniferous in Ordos Basin and distribution regularity of favorable sand bodies[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 1-71.]
- [14] 乔建新, 邓辉, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积—构造格局及物源分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 12-17. [Qiao Jianxin, Deng Hui, Liu Chiyang, et al. Sedimentary-tectonic framework and provenance analysis of the Late Paleozoic in the northern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2013, 28(1): 12-17.]

- [15] 陈晶, 黄文辉, 何明倩. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组—下石盒子组泥岩元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2018, 32(2): 240-250. [Chen Jing, Huang Wenhui, He Mingqian. Elemental geochemistry characteristics of mudstones from Benxi Formation to Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(2): 240-250.]
- [16] 李树霞, 向芳, 张瑶, 等. 鄂尔多斯盆地南缘晚古生代沉积物源及其对秦岭造山带北部演化的指示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 589-601. [Li Shuxia, Xiang Fang, Zhang Yao, et al. Provenance analysis of the Late Paleozoic sediments in south margin of the Ordos Basin and its indication to evolution of the north of Qinling Orogenic Belt in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(5): 589-601.]
- [17] Dong Y P, Sun S S, Santosh M, et al. Central China Orogenic Belt and amalgamation of East Asian continents[J]. Gondwana Research, 2021, 100: 131-194.
- [18] Gao J, Lv D W, van Loon A J T, et al. Reconstruction of provenance and tectonic setting of the Middle Jurassic Yan'an Formation (Ordos Basin, North China) by analysis of major, trace and rare earth elements in the coals[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 151: 105218.
- [19] 蔡佳, 刘福来, 刘平华, 等. 内蒙古孔兹岩带乌拉山—大青山地区古元古代孔兹岩系年代学研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 3081-3106. [Cai Jia, Liu Fulai, Liu Pinghua, et al. Geochronology of the Paleoproterozoic khondalite rocks from the Wulashan-Daqingshan area, the Khondalite Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 3081-3106.]
- [20] 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2002, 32(7): 538-549. [Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. Characteristics of basement structural units in North China Craton and Early Proterozoic assemblage[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(7): 538-549.]
- [21] 张力文, 吴陈君, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组泥页岩地球化学特征及沉积环境[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(9): 1485-1498. [Zhang Liwen, Wu Chenjun, Huang Daojun, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(9): 1485-1498.]
- [22] 冯娟萍, 欧阳征健, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区上石炭统沉积特征[J]. 古地理论, 2021, 23(1): 53-64. [Feng Juanping, Ouyang Zhengjian, Chen Quanhong, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Carboniferous in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(1): 53-64.]
- [23] 翟咏荷, 何登发, 开百泽. 鄂尔多斯盆地及邻区早二叠世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 139-153. [Zhai Yonghe, He Dengfa, Kai Baize. Tectono-depositional environment and prototype Basin evolution in the Ordos Basin during the Early Permian[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(2): 139-153.]
- [24] 王君玉, 吴葆存, 李志伟, 等. 敞口酸溶—电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中45个元素[J]. 岩矿测试, 2011, 30(4): 440-445. [Wang Junyu, Wu Baocun, Li Zhiwei, et al. Determination of elemental content in geological samples by one-time acid dissolution and inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(4): 440-445.]
- [25] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- [26] Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [27] 杨棵, 朱筱敏, 杨怀宇, 等. 古物源体系多方法表征: 以渤海湾盆地沾化渤南洼陷沙四下亚段为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1542-1560. [Yang Ke, Zhu Xiaomin, Yang Huaiyu, et al. Multi method characterization of a paleo-provenance system: A case study from the Lower 4th member of the Shahejie Formation from the Bonan Sag in Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1542-1560.]
- [28] 雷开宇. 鄂尔多斯盆地北部和南部直罗组沉积—物源对比研究及其意义[D]. 西安: 西北大学, 2016: 1-110. [Lei Kaiyu. Comparative research on sedimentary characteristics and provenance of Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 1-110.]
- [29] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 337-348. [Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 337-348.]
- [30] 巩赢. 鄂尔多斯盆地南缘三叠系物源分析及其盆地耦合关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2022: 1-107. [Gong Ying. Triassic

- provenance analysis and Basin - mountain coupling relationship in southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022: 1-107.]
- [31] 杨星辰. 阴山西段中—新生代隆升过程及其意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2018: 1-127. [Yang Xingchen. Uplift process of the western section of Yinshan from Mesozoic to Cenozoic Period and its geological implications[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2018: 1-127.]
- [32] 蒙炳儒. 内蒙古大青山地区麻粒岩系变质作用同位素年代学制约[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 1-106. [Meng Bingru. Isotopic chronological restriction of granulite facies metamorphism in Daqingshan area, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University, 2007: 1-106.]
- [33] 范志伟. 内蒙集宁地区前孔兹岩系变质基底的组成、地球化学及年代学特征[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-70. [Fan Zhiwei. Composition, geochemical and chronological characteristics of the pre-Khondalite series in Jining, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-70.]
- [34] 贾浪波. 鄂尔多斯盆地中东部上石炭统本溪组物源及沉积体系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 1-133. [Jia Langbo. Study on the provenance and sedimentary system of the Upper Carboniferous Benxi Formation in the central-eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019: 1-133.]
- [35] Sircombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/2/3/4): 47-67.
- [36] 李光耀, 李志丹, 王佳莹, 等. 内蒙古固阳绿岩带高腰海BIF型铁矿锆石LA-ICP-MS年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1317-1326. [Li Guangyao, Li Zhidan, Wang Jiaying, et al. Zircons LA-ICP-MS chronology, geochemical signatures and geological significance of Gaoyaohai BIF-Type iron Deposit in Guyang Greenstone Belt, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(5): 1317-1326.]
- [37] Tang J Z, Zhang Z C, Xue J Z, et al. Permo-Carboniferous provenance shifts at the northern margin of the North China Craton and their tectonic implications: Detrital zircon U-Pb-Hf records from central Inner Mongolia[J]. *Gondwana Research*, 2021, 95: 134-148.
- [38] Ding C W, Zhao B C, Dai P, et al. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the alkaline-carbonatite complex in the Weishan REE deposit, Luxi Block: Constraints on the genesis and tectonic setting of the REE mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 147: 104996.
- [39] Dong C Y, Ma M Z, Wilde S A, et al. The first identification of early Paleoproterozoic (2.46-2.38 Ga) supracrustal rocks in the Daqingshan area, northwestern North China Craton: Geology, geochemistry and SHRIMP U-Pb dating[J]. *Precambrian Research*, 2022, 377: 106727.
- [40] Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of the Ordos Terrane, western Block of the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3/4): 581-593.
- [41] Li D P, Chen Y L, Chen L M, et al. Zircon LA-ICPMS study and petrogenesis simulation of Dahuabei pluton in the Wulashan area, Inner Mongolia[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1727-1737.
- [42] Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 2006, 144(3/4): 199-212.
- [43] Wu B, Long X P, Lan C Y, et al. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Khondalite Belt in the North China Craton: Constraints from the geochronology and geochemistry of 1.9-2.3 Ga felsic and basic intrusive rocks in the Jining area[J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106570.
- [44] Cao H H, Li S Z, Zhao S J, et al. Detrital zircon geochronology of Neoproterozoic to early Paleozoic sedimentary rocks in the North Qinling Orogenic Belt: Implications for the tectonic evolution of the Kuanping Ocean[J]. *Precambrian Research*, 2016, 279: 1-16.
- [45] Zhao L M, Li Y L, Wang G Q, et al. Early Paleozoic arc-accretion in the northern branch of the Proto-Tethys Ocean: New insights from detrital zircon U-Pb ages and geochemistry of paraschists from the Kuanping Complex, North Qinling Orogenic Belt,

- China[J]. *Lithos*, 2021, 400-401: 106410.
- [46] Kang W B, Li W, Dong Y P, et al. Multi-stage metamorphism and deformation of the North Qinling Orogenic Belt: Constraints from petrology, geochronology, and structural analysis of the Qinling Complex[J]. *Gondwana Research*, 2022, 105: 201-216.
- [47] Zhao S J, Li S Z, Liu X, et al. The northern boundary of the Proto-Tethys Ocean: Constraints from structural analysis and U-Pb zircon geochronology of the North Qinling Terrane[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 560-574.
- [48] 刘敏. 兴蒙造山带中西部晚古生代岩浆作用与构造演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 1-125. [Liu Min. Petrogenesis of the Late Paleozoic magmatism and tectonic evolution of the central-western Xing-Meng Orogenic Belt[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017: 1-125.]
- [49] Hu C S, Li W B, Xu C, et al. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of the granitoids of Baolidao and Halatu plutons in Sonidzuoqi area, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 294-306.
- [50] Zi J W, Rasmussen B, Muhling J R, et al. In situ U-Pb and geochemical evidence for ancient Pb-loss during hydrothermal alteration producing apparent young concordant zircon dates in older tuffs[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 320: 324-338.
- [51] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling Lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [52] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 24-36. [Zhai Mingguo. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 24-36.]
- [53] 胡波, 翟明国, 彭澎, 等. 华北克拉通古元古代末—新元古代地质事件: 来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb年代学的证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2508-2536. [Hu Bo, Zhai Mingguo, Peng Peng, et al. Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geological events of the North China Craton: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cambrian and Jurassic sedimentary rocks in western Hills of Beijing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2508-2536.]
- [54] 刘稳航. 东秦岭丹凤地区丹凤群构造变形和年代学研究对商丹构造带演化的约束[D]. 西安: 西北大学, 2015: 1-56. [Liu Wenhong. Constraints of structural deformation and geochronology of Danfeng Group in Danfeng area of East Qinling on the evolution of Shangdan structural belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2015: 1-56.]
- [55] 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 等. 华北克拉通南缘龙王庙碱性花岗岩U-Pb年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2003, 22(10): 762-768. [Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin, et al. U-Pb isotopic ages and their significance of Alkaline Granite in the southern margin of the North China Craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(10): 762-768.]
- [56] 兰瑞烜. 秦岭群岩石变质变形特征及年代学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 1-75. [Lan Ruixuan. The characteristics of metamorphism, deformation and geochronology of rocks in Qinling group[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 1-75.]
- [57] 杨敏. 东秦岭地区二郎坪、宽坪及陶湾岩群变沉积岩碎屑锆石年代学研究及其地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2017: 1-100. [Yang Min. Detrital zircon U-Pb dating of metaclastic rocks from Erlangping, Kuanping and Taowan Group in the eastern Qinling area and its tectonic implication[D]. Xi'an: Northwest University, 2017: 1-100.]
- [58] 张娟, 程昭, 张宏福, 等. 丹凤花岗岩和基性捕虏体的地球化学和锆石U-Pb-Hf-O同位素: 北秦岭超高压变质带两期构造抬升事件的记录[J]. *岩石学报*, 2023, 39(1): 55-73. [Zhang Juan, Cheng Zhao, Zhang Hongfu, et al. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf-O isotopic study of granite and mafic xenoliths in the Danfeng area: Recording two stages of tectonic uplift events in the North Qinling ultrahigh-pressure metamorphic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(1): 55-73.]
- [59] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 746-768. [Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling Orogen[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 746-768.]
- [60] 刘丙祥. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 1-244. [Liu Bingxiang. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 1-244.]
- [61] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and

- geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [62] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25.
- [63] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875-878.
- [64] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [65] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.

Source-to-Sink Filling Process and Paleogeographic Pattern of the Late Carboniferous Benxi Formation in the Eastern Ordos Basin

ZHANG Rui^{1,2}, WANG LinLin³, LIU Lei^{1,2}, HU JianLing^{4,5}, DU JiaNing⁶, CHEN HongDe^{1,2}, HUANG DaoJun^{4,5}, WANG ZhiWei^{1,2}, ZHU ShuYue^{1,2}, LI Dan^{1,2}

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China

4. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710000, China

5. National Engineering Laboratory of Low-Permeability Oil & Gas Exploration and Development, Xi'an 710018, China

6. The 11th Oil Production Plant of Changqing Oilfield Branch of PetroChina, Qingyang, Gansu 745000, China

Abstract: [Objective] The Upper Carboniferous Benxi Formation in the Ordos Basin is the first set of sea-land interaction coal-bearing strata after the Caledonian movement and it has great exploration potential, but the coupling relationship between the basin and mountains under the influence of the north-south source system and multi-source composite in the eastern part of the basin is still controversial owing to the tectonic activity of the periphery orogenic belt. [Methods] To further trace the source system and restore the paleogeographical pattern, the sedimentary source filling process of the Benxi Formation in the eastern Ordos Basin was discussed by analyzing the characteristics of the rock chip components, rare earth elements, and U-Pb age characteristics of clastic zircon, combined with the tectonic background and lithological characteristics of the host rock. [Results] The sediments in the northern part of the study area were derived from the Inner Mongolia uplift (Seltenshan, Wula-Daqingshan, Jining area) and the Central Asian orogenic belt in the active continental margin. The southern part is supplied by clastic material from the North Qinling, and the tectonic background of the source area is relatively complex, which is a mixture of a passive continental margin and continental island arc. In the North Qinling, the tectonic environment includes stretching to collision and extrusion until a trench-arc-basin is formed. The parent rocks in the northern and southern source areas are a mixture of granitic rock and alkaline basalt, and the northern and southern provenance systems converge in the Lian45-Chengjiagou area. [Conclusion] Overall, the Central Asian orogenic belt of the Benxi Formation has a high degree of uplift and denudation on both sides of

the study area, reflecting the characteristics of irregular oblique collision in the northern North China Plate. The northern margin of the North China Plate has high uplift, which provides the main provenance for the northern part of the study area, and is dominated by the development of a large tide-delta complex system. With a strong source supply, the sand body extends farther in the northeast of the study area. The southern part of the Ordos Basin is the source area of the North Qinling Mountains, and the southern margin of the North China Plate rises at this time, developing the barrier coastal sedimentary system. In the area where the north and south sources meet, more detrital materials from the Northern Qinling Mountains are accepted, and a large number of tidal sand dams are deposited owing to the transformation of the eastward and north-east currents.

Key words: paleogeographic pattern; detrital zircon; contribution rate; Benxi Formation; Ordos Basin