

鄂尔多斯盆地西部太原组碎屑物质来源与古地理重建

马贤成¹, 刘磊^{1,2}, 王志伟¹, 胡爱平^{3,4}, 虎建玲^{4,5}, 胡琮³, 王峰^{1,2}, 李丹¹, 张成弓^{1,2}, 付斯一^{1,2}, 陈洪德^{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. 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 西安 710018

4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710000

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地二叠系太原组具有厚度大分布广、油气资源类型丰富等特征, 展现出巨大的勘探潜力。目前, 对该地层的研究主要集中在盆地东部, 而西部地区由于构造格局与沉积演化的复杂多变, 对太原组的勘探和研究亟待深入探讨。【方法】鉴于此, 采用野外露头观察、钻井样品采集, 结合前人研究成果, 综合运用碎屑锆石 U-Pb 定年、古流向分析等物源分析方法, 对鄂尔多斯盆地西部太原组碎屑物质来源、构造背景及古地理格局进行了系统研究。【结果】研究区东北部 (A 组) 的沉积物主要来自碰撞挤压构造背景下的阴山造山带, 物源供给强, 向盆地中部依次发育三角洲平原、三角洲前缘、潮汐砂脊和潮汐砂坝。西北部 (B 组) 的沉积物来自碰撞挤压和汇聚造山构造背景下的阿拉善地块, 向盆地中部依次发育三角洲平原、三角洲前缘和潟湖—潮坪。南部 (D 组) 地区的沉积物来自古特提斯洋扩张—俯冲—碰撞构造环境下的北祁连、北秦岭构造带, 太原期中央古隆起变缓, 物源供给弱, 主要发育障壁岛—障壁—潮坪沉积。【结论】研究区北部在碰撞和汇聚造山构造背景下隆升程度高, 物源供给强, 发育大型的潮汐—三角洲复合体系, 而南部在拉张伸展构造背景下物源供给较弱, 以潮坪—潟湖为主。本研究不仅深化了对鄂尔多斯盆地西部沉积体系和物源供给机制的认识, 也为重建盆地西部的构造—沉积演化过程和古地理格局提供了新的视角和参考。

关键词 碎屑锆石; 物源分析; 鄂尔多斯盆地西部; 古地理格局; 太原组

第一作者简介 马贤成, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, 地质学, E-mail: 18387018709@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 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

鄂尔多斯盆地位于中国中北部, 被誉为国家第二大油气富集区, 该盆地富含大量的天然气和煤炭资源, 是我国能源开发的重要基地之一^[1]。下二叠统太原组发育煤层和暗色泥岩, 并与山西期、石盒子期的大型砂体相配置构成了二叠纪丰富的天然气藏^[2]。一直以来

学者们对盆地东部物源体系、沉积相和成藏规律已有深入讨论^[3-5],但对盆地西部勘探研究相对薄弱,主要受限于构造背景复杂和源区背景差异缺乏系统研究。在近年来,随着勘探技术的进步和资料的积累,盆地西部逐渐成为重点勘探目的区^[6-8],特别是下古生界马家沟组及上古生界羊虎沟组、山西—石盒子组中,天然气勘探取得了显著成果^[9-11]。目前,南北物源如何控制沉积相以及物源区特征已取得初步成果^[12-14],然而,太原期南北物源影响范围,盆地周缘造山带不同的构造背景能否与沉积体系建立对应关系,还值得进一步研究。

自二叠纪以来,北部物源区的构造活动进入了快速活跃的阶段,其抬升时间早于南部地区^[15-16]。在太原期,盆地西北部主要以三角洲沉积为主,但碎屑沉积物是源自阿拉善地块还是阴山造山带,目前尚未明确^[17]。对于盆地西南部,多数学者认为该区域广泛发育着潟湖—潮坪沉积,障壁岛呈点状分布^[2,6],其物源是北祁连构造带还是北秦岭构造带,在不同学者的研究中存在一定的差异和争议^[18-20]。目前对太原组鄂尔多斯盆地西部及周缘沉积环境的研究虽取得一定进展,但现有成果多集中于烃源岩系统的评价^[1,21-22]。前人多从重矿物分析、古水流方向判定以及稀土元素等角度来探讨碎屑物质来源^[2,12-14,19],研究手段较为单一。对于碎屑物质来源及其影响范围存在一定的局限性,并且对物源构造背景方面的关注较少。通过综合野外露头观察、钻井样品及前人研究成果,基于碎屑锆石 U-Pb 定年和古流向分析方法,结合构造背景和沉积特征建立盆地西部太原组沉积模式,系统阐述碎屑物质来源和构造背景,揭示研究区南北碎屑物质来源差异,重点讨论南北地质单元构造活动差异如何影响碎屑物质供给和沉积填充过程,旨在为鄂尔多斯盆地西部太原组的规模增储与古地理重建提供参考。

1 地质构造背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部(图 1a)^[23],从构造地貌看,总体构造为南北走向,东缓西陡的不对称箕状向斜^[24]。本研究区域起点位于乌海市,向南延伸经过银川市、同心县、固原市,直至陇县地区(图 1b)^[25]。西侧边界接壤贺兰山区以及六盘山,东侧则扩展至定边县和环县一带。研究区域是鄂尔多斯地块、阿拉善地块和秦祁褶皱带的交汇地区,经历多次构造性质的控制,演化过程多变,物源复杂^[26](图 1b)。在太原期,古亚洲洋向华北板块北缘俯冲,盆地北部抬升,南部北秦岭、北祁连构造带隆起,阴山造山带、阿拉善地块和北秦祁构造带成为研究区的潜在物源区^[27]。通过调研前人对潜在源区的碎屑锆石年代学数据研究(图 1b),北祁连构造带碎屑锆石年龄主要集中在 400~520 Ma、850~1 000

Ma^[28-29]；中亚造山带碎屑锆石年龄主要集中在 260~350 Ma、419~541 Ma^[30]；阿拉善地块碎屑锆石年龄主要分布在 252~500 Ma、850~1 000 Ma、1 800~1 900 Ma、2 300~2 500 Ma^[29,31]；北秦岭构造带碎屑锆石年龄则主要集中在 400~500 Ma、850~1 000 Ma、2 400~2 600 Ma^[30-32]；华北克拉通基底碎屑锆石年龄主要集中在 1 900~2 000 Ma、2 400~2 600 Ma^[33-34]；而阴山造山带碎屑锆石年龄则集中在 280~419 Ma、1 700~1 900 Ma、2 450~2 550 Ma^[35-36]。

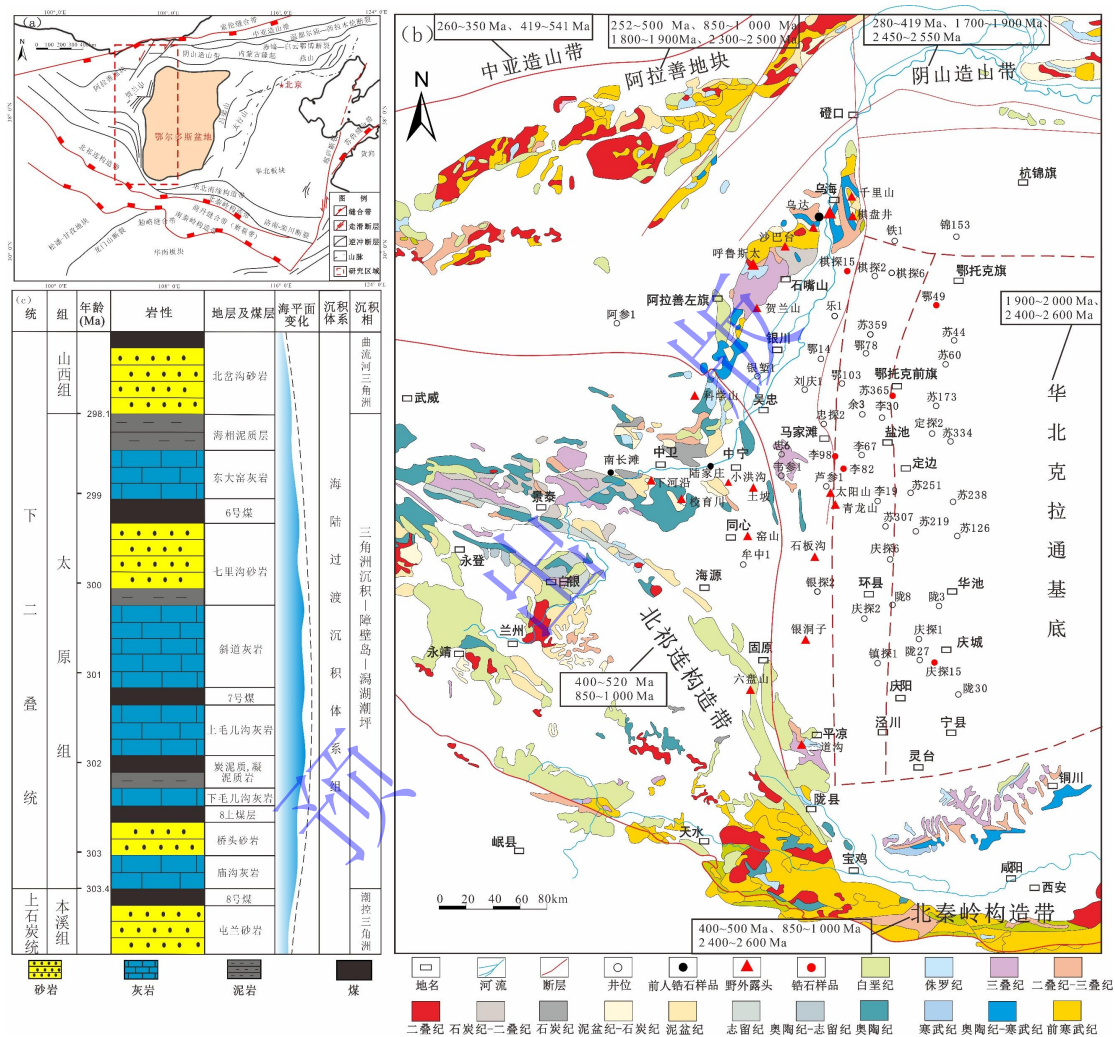


图1 鄂尔多斯盆地西部构造位置及太原组岩性特征图

(a) 鄂尔多斯盆地及周缘构造纲要及研究区大地构造位置图^[23]，该图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS(2016)1570的标准地图制作，底图无修改；(b) 鄂尔多斯盆地西部太原组地质简图^[25]；(c) 鄂尔多斯盆地太原组地层综合岩性柱状图^[44]

Fig.1 Structural location map of western Ordos Basin and comprehensive column chart of Taiyuan Formation

自吕梁运动之后，华北克拉通结晶基底逐渐形成^[37]。受加里东运动的影响，鄂尔多斯盆地与华北大陆板块整体抬升，在西南部形成断褶带和隆起，阻挡了祁连海的入侵^[38]。晚

石炭世, 华北大陆板块沉降, 逐渐合并成为一个海域^[39]。早二叠世太原期, 东西两侧海水侵入, 华北海与祁连海相通, 原本的中央古隆起随着海平面上升而被淹没。这一转变使中央古隆起的沉积作用逐渐减弱^[40], 其西部由边缘裂陷转为克拉通内坳陷, 发育潟湖—潮坪沉积, 向东地势升高, 发育广泛的潮坪和障壁砂坝^[41]。北部地区主要发育海陆过渡相沉积, 南部靠近北秦岭、北祁连地区发育海相沉积^[27]。早二叠世山西期, 海水从东西两侧逐渐退出。盆地开始接受陆相沉积, 由此进入陆相沉积阶段^[42]。太原组发育有泥岩、灰岩、砂岩和煤层等^[43], 砂岩以中—粗粒为主, 分选性和磨圆度较好。自下而上主要发育桥头砂岩、马兰砂岩以及七里沟砂岩, 庙沟段和东大窑段多陆源砂泥互层(图 1c)^[44]。

2 样品及方法

2.1 碎屑锆石年代学

碎屑锆石 U-Pb 年代学是利用放射性地质年代学方法来测定沉积岩中具有代表性碎屑矿物锆石的年代, 广泛运用于碎屑物质来源系统研究中^[45-46]。锆石 U-Pb 年代学具有数据获取快、物源对比精确度高以及估算源区剥蚀量等优势^[47]。本文碎屑锆石 U-Pb 年代学获取主要包括预处理和同位素测试, 预处理方法为激光剥蚀—等离子质谱法(LA-ICPMS), 该方法确保了锆石颗粒表面的平滑度, 锆石 U-Pb 定年处理在廊坊诚信地质服务有限公司完成。同位素测试是测定锆石年龄的常用方法, 它依赖于 U-Th-Pb 同位素体系, 具体来说, 通过测量以下三组同位素比值来确定锆石的年龄: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 。这些比值提供了关于锆石形成时间的详细信息^[48]。对于大于 1 000 Ma 的年龄, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值; 小于 1 000 Ma 的年龄则采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值, 其中谐和度在 90%至 110%之间的锆石被用于统计年龄, 以生成概率密度分布函数曲线(KDE)进行视觉分析^[49]。最普遍的方法是在 IsoplotR (<https://www.ucl.ac.uk/~ucfbpve/isoplotr/home/index.html>) 平台进行绘制。此外, 本研究使用锆石二维定标图 MDS 来获得不同碎屑锆石样品之间的相似(差异)性, 该方法运用 K-S 检验的 D 值或 Kuiper 检验的 V 值, 利用特定算法转换, 将碎屑锆石样品的量化分析结果以点的形式在多维空间中展现, 将样品间的相似性简化至二维空间, 样品之间的差异系数越小距离越近, 反之距离越远^[50-51]。这种方法能够有效地区分来自不同物源的沉积物。IsoplotR 平台中依次调选 detritals—MDS 功能选项, 将本研究涉及的 9 个碎屑锆石样品数据导入, 最终生成锆石二维定标图 MDS。

2.2 古流向判别

古流向是追溯沉积物物源区的一种重要手段，利用各种交错层理倾向、砾石的定向排列、地层倾角测井以及生物遗迹等沉积构造来判断古水流的方向。地层倾角测井可测得井眼处地层的倾角和方位角，判断地下地层的产状及层理等构造方向^[52]。此外，借助电成像测井的动态图像，拾取交错层理并获得倾角和倾向，也能够为古水流方向的判断提供依据^[53]。首先拾取沉积层理方向形成玫瑰花图，读取泥岩段内部层理倾斜方向作为构造倾向，对砂岩沉积层理方向进行构造校正后，再通过倾角矢量图确定井眼处的古水流方向^[54]。

2.3 构造背景判别

本研究采用了 Cawood *et al.*^[55]的方法来判别源区的地质构造背景，该方法利用不同的锆石年龄数据反映样品物源区汇聚造山，碰撞挤压，拉张伸展三种不同的构造背景。在不同的构造环境中锆石年龄存在显著差异，汇聚边缘盆地的碎屑锆石比例大于 50%，结晶年龄接近地层沉积年龄。碰撞挤压形成的盆地通常仅含有少量接近沉积年龄的碎屑锆石，碎屑锆石比例（50%~10%）。伸展盆地的碎屑锆石年龄比沉积年龄大得多，碎屑锆石比例只有不到 5%。具体步骤：第一步，在 5%最年轻碎屑锆石情况下，CA（crystallization ages 结晶年龄）与 DA（depositional age 地层沉积年龄）之差大于 150 Ma 时，可判断为拉张伸展构造背景，小于 150 Ma 为汇聚造山和碰撞挤压构造背景；第二步，当 CA-DA 差值小于 150 Ma 时，在 30%最年轻碎屑锆石情况下，进一步区分汇聚造山和碰撞挤压构造背景，CA-DA>100 Ma 为碰撞挤压构造背景，CA-DA<100 Ma 为汇聚造山构造背景^[55]。

3 结果

3.1 碎屑锆石年代学特征

本文在研究区太原组沉积期的 6 处采样点获得 365 个碎屑锆石测年数据，并把这些数据与前人在乌达、南长滩、陆家庄及周缘潜在物源区公开报道的锆石 U-Pb 年龄进行对比分析^[33]。由于周边造山带母岩的侵蚀和沉积，盆地中的碎屑沉积物展示了与这些造山带相一致的锆石年龄特征。为了深入理解这一特征，我们收集了已有研究中关于盆地边缘锆石年龄谱图的数据，并将这些锆石年龄谱图与研究区域中的碎屑锆石年龄进行了比较（图 2）。

MDS（图 3）结果被分为四组，苏 365、鄂 49、乌达三个样品表现出较强的亲缘性（图 3），其锆石年龄谱与阴山造山带及华北克拉通的锆石年龄谱相似（图 2），将其归为 A 组。李 98、李 82、棋探 15 样品之间的差异系数较小（图 3），锆石年龄 252~541 Ma 占比均大于 60%（图 2a），与阿拉善地块和中亚造山带表现出较强的相关性，此外，在 850~1

000 Ma 表现出微弱峰值，能与阿拉善地块 850~1 000 Ma 的年龄峰值对应（图 2），将其归为 B 组。南长滩、陆家庄、李 98 样品之间表现出一定的相似性（图 3），南长滩样品~446 Ma、陆家庄样品~425 Ma 的年龄峰值与北祁连构造带 400~500 Ma 主峰值相吻合，同时~273 Ma 能与阿拉善地块~270 Ma 的峰值对应（图 2），李 98 样品在 299~419 Ma 的年龄占比为 9%，远小于南长滩、陆家庄样品在 299~419 Ma 的年龄占比（图 2a），因此将南长滩、陆家庄归为 C 组。庆探 15 样品与其他样品的相关性较差（图 3），在 400~500 Ma、900~1 000 Ma 具有弱峰值，这些弱峰值能与北秦岭构造带年龄峰值相对应（图 2），将其作为 D 组。

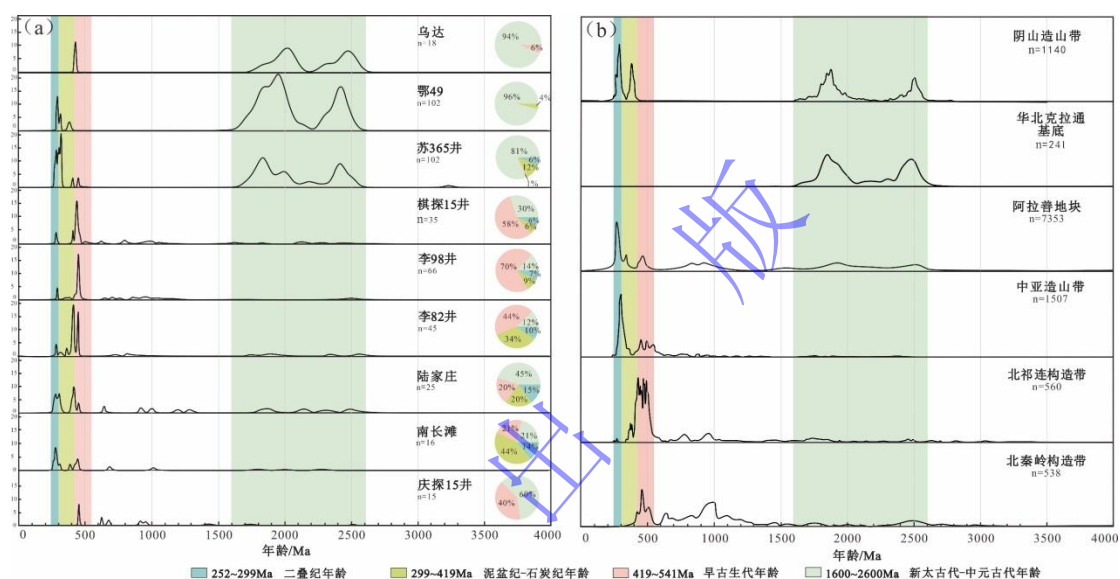


图 2 鄂尔多斯盆地西部太原组与周缘潜在源区碎屑锆石年龄分布图

(a) 鄂尔多斯盆地西部太原组锆石年龄分布图与锆石年龄饼状图（乌达、南长滩、陆家庄锆石数据引自文献[33]）；(b) 周缘潜在源区碎屑锆石年龄分布图（北祁连构造带锆石数据[28-29]，中亚造山带锆石数据[30]，阿拉善地块锆石数据[29,31]，北秦岭构造带锆石数据[30-32]，华北克拉通基底锆石数据[33-34]，阴山造山带锆石数据[35-36]，均源自二叠系地层）

Fig.2 Age distribution map of detrital zircons from Taiyuan Formation and peripheral potential source areas in western Ordos Basin

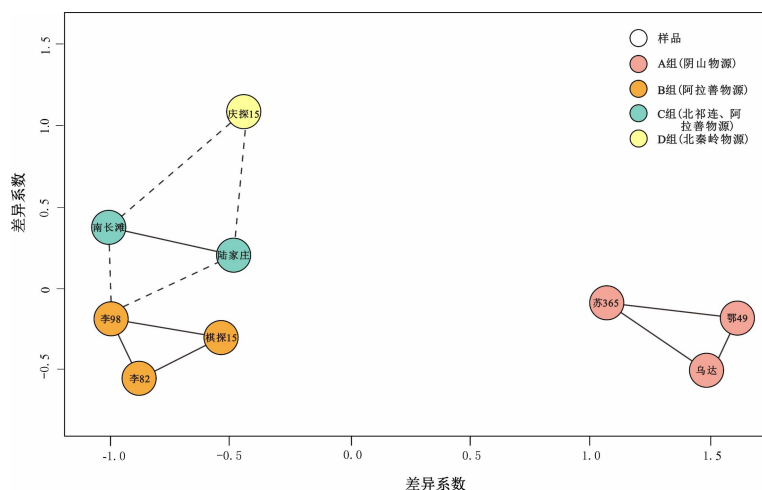


图3 碎屑锆石 U-Pb 年龄多维定

标 MDS 图 (据文献[51]修改)

样品之间的差异系数越小距离越近, 实线表示样品之间最相似, 虚线表示样品之间次相似

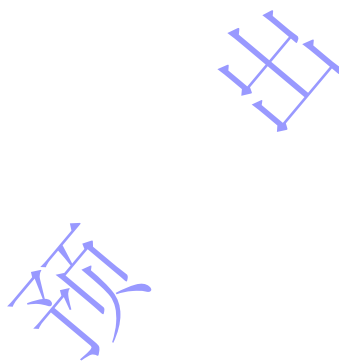
Fig.3 Multi-dimensional age scaling MDS map of detrital zircon U-Pb (modified from reference [51])

研究区内锆石的年龄分布 (图 2) 主要集中在新太古代—古元古代 (1 600~2 600 Ma)、早古生代 (419~541 Ma)、泥盆纪—石炭纪 (299~419 Ma) 和二叠纪 (252~299 Ma) 四个地质时期。第 I 组数据样品 (乌达、鄂 49、苏 365) 显示, 二叠纪锆石年龄 (252~299 Ma) 所占比为 0%~6%; 泥盆纪—石炭纪锆石年龄 (299~419 Ma) 所占比为 0%~12%, 早古生代锆石 (419~541 Ma) 所占比为 0%~6%; 而新太古代—古元古代锆石年龄 (1 600~2 600 Ma) 所占比例高达 81%~96%。具体而言, 乌达存在~421 Ma、~2 000 Ma、~2 450 Ma 三个显著的年龄峰值; 鄂 49 呈现~302 Ma、~1 950 Ma、~2 400 Ma 三个明显的年龄峰值; 苏 365 则以~323 Ma、~1 850 Ma、~2 400 Ma 为年龄特征峰值。第 II 组数据样品 (棋探 15、李 82、李 98) 中, 二叠纪锆石年龄 (252~299 Ma) 占比为 6%~10%, 泥盆纪—石炭纪锆石年龄 (299~419 Ma) 所占比为 6%~34%, 早古生代锆石年龄 (419~541 Ma) 占比为 44%~70%, 新太古代—古元古代锆石年龄 (1 600~2 600 Ma) 占比为 12%~30%。棋探 15 具有~280 Ma、~443 Ma 两个明显年龄峰值, 李 82 具有~418 Ma 主峰值、~443 Ma 次峰值, 李 98 的主峰值为~437 Ma, 次峰值为~292 Ma。第 III 组数据样品 (陆家庄、南长滩) 显示, 二叠纪锆石年龄 (252~299 Ma) 占比为 14%~15%, 泥盆纪—石炭纪锆石年龄 (299~419 Ma) 所占比为 6%~34%, 早古生代锆石年龄 (419~541 Ma) 占比为 20%~21%, 新太古代—古元古代锆石年龄 (1 600~2 600 Ma) 占比为 21%~45%。陆家庄具有~273 Ma 的主峰值和~425 Ma 的次峰值, 南长滩具有~280 Ma、~446 Ma 两个明显年龄峰值。第 IV 组数据样品 (庆探 15) 显示, 不存在晚古生代锆石年龄 (252~419 Ma), 早古生代锆石年龄 (419~541 Ma) 占比为

40%，新太古代—古元古代锆石年龄（1 600~2 600 Ma）占比为 60%，具有~451 Ma、~621 Ma、~912 Ma 三个年龄峰值。

3.2 古流向与砂体厚度特征

本文对研究区的千里山（图 4b）、呼鲁斯太（图 4c）、下河沿（图 4d）、太阳山（图 4e）4 个野外剖面进行了多组单向板状和槽状交错层理前积层的测量，并收集长庆油田鄂 91（图 4f）、余 3（图 4g）、李 50（图 4h）、陇 27（图 4i）等 6 口钻井的成像测井数据展开分析。最后在 Reservoir Analysis System 软件绘制古流向玫瑰花图。同时，结合研究区内一百多口钻井的地层砂体厚度数据，绘制出砂厚和古流向平面分布图（图 4a）。研究结果表明太原组时期研究区东北部地区砂厚小于 15 m，砂体向南边伸展、古流向整体为南方向，千里山古流向为南方向、鄂 91 古流向为南东方向。西北部沙巴台—呼鲁斯太一带砂厚大于 20 m，砂体厚度往东南方向伸展，延伸较远，呼鲁斯太古流向为自北西向南东方向；余 3 至李 82 一带砂体厚度往西南方向逐渐变薄，整体古流向为多向；研究区南部整体砂厚小于 10 m，砂体平行于海岸线零星分布，陇 27、陇 30 地区古流向主要为东西向。



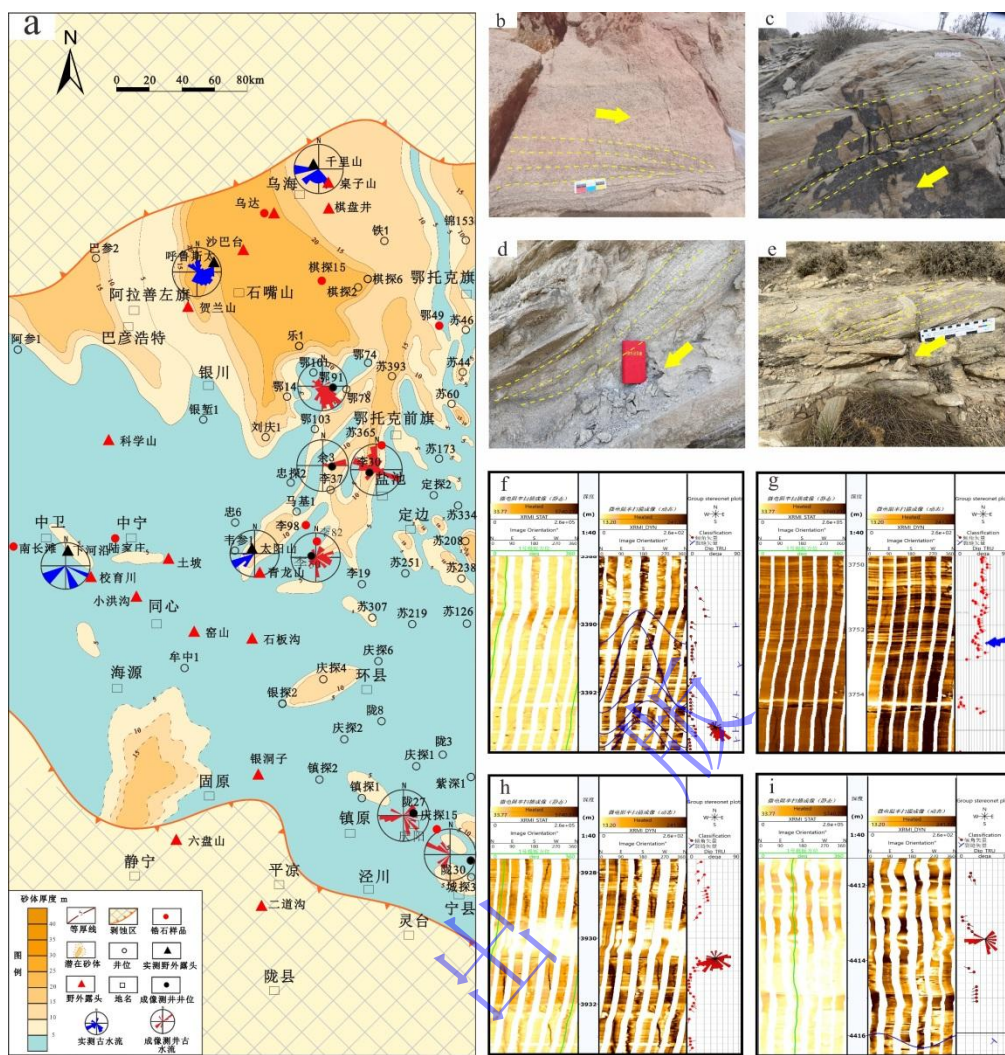


图 4 鄂尔多斯西部太原组砂厚和古流向平面分布图

(a) 研究区太原组砂厚和古流向平面图；(b) 太原组羽状交错层理，千里山剖面；(c) 太原组平行层理，呼鲁斯太剖面；(d) 太原组板状交错层理，下沿河剖面；(e) 太原组板状交错层理，太阳山剖面；(f) 鄂 91 成像测井资料；(g) 余 3 成像测井资料；(h) 李 50 成像测井资料；(i) 陇 27 成像测井资料

Fig.4 Plane distribution of sand thickness and paleo-flow direction of Taiyuan Formation in western Ordos

4 讨论

4.1 物源及构造背景综合分析

4.1.1 A 组物源及构造背景

在对 A 组（乌达、鄂 49、苏 365）样品的锆石年龄谱进行综合分析后，我们发现它们均展现出 1 800~2 000 Ma、2 400~2 600 Ma 峰值的显著峰值（图 2），饼状图显示 1 600~2 600 Ma 占比高达 90%（图 2a），与阴山造山带、华北克拉通基底呈现强烈的亲缘性^[32]（图 3）。古流向整体为自北向南（图 4a），物源来自盆地北边，而北秦岭、北祁连构造带位于盆地南部地区（图 1b），表明 A 组样品不接受来自北秦岭、北祁连构造带的物源；样品中

均存在大量 1 700~1 900 Ma 和 2 000~2 600 Ma 的锆石年龄，此年龄在华北克拉通基底广泛分布^[56-57]；有研究发现，阿拉善诺尔公及狼山地区存在大量 400~500 Ma 锆石年龄^[34,58]，早古生代（419~541 Ma）可能和阿拉善地块与华北地块碰撞拼合事件有关^[59]；苏 365 锆石年龄~323 Ma 峰值、鄂 49 锆石年龄~302 Ma 峰值，与阴山造山带在 300~400 Ma 发育的大量花岗岩和火山岩体相吻合^[60]，并与晚古生代华北板块北缘古亚洲洋向南俯冲、碰撞有较强的相关性^[61]。以上表明该组物源主要接受来自阴山造山带和华北克拉通基底的物源。

A 组锆石样品，其前 5%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差均小于 150 Ma，而前 30%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差均大于 100 Ma。由此判断，A 组的物源区构造背景为碰撞挤压（图 5）^[55]，这与晚古生代华北北缘克拉通和内蒙古造山带由北向南挤压造山事件相关^[62]。此外，早二叠世盆地北缘构造背景为地体拼贴—陆内裂谷—初始碰撞，导致阴山造山带大面积隆升^[60]。

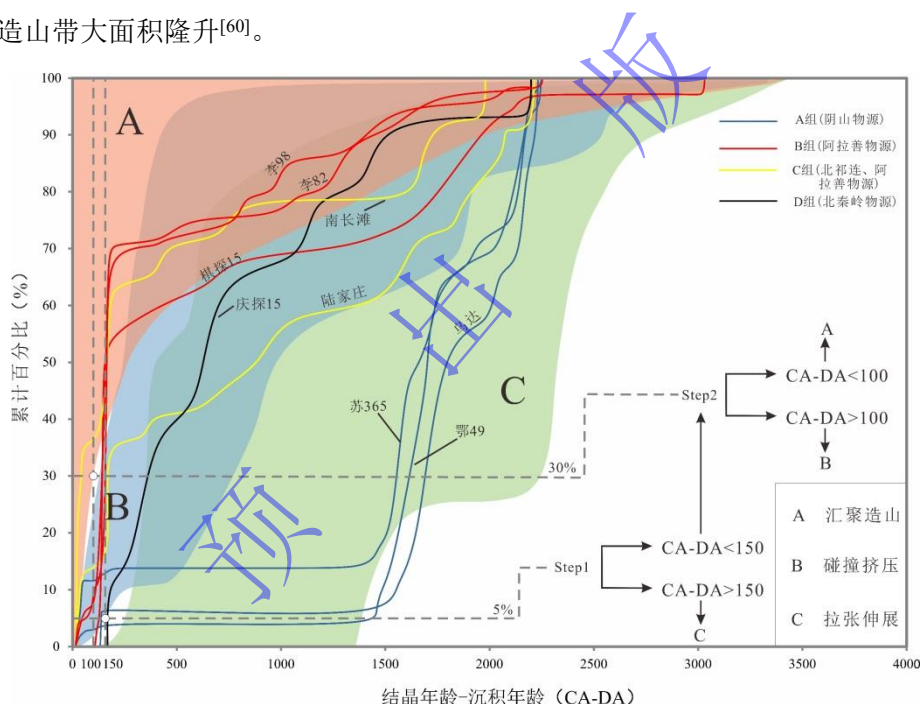


图 5 鄂尔多斯盆地西部太原组碎屑锆石 U-Pb 年龄构造分类示意图（底图据文献^[55]修改）

A. 汇聚造山（红色区域）；B. 碰撞挤压（蓝色区域）；C. 拉张伸展（绿色区域）；CA（crystallization ages 结晶年龄）-DA（depositional age 地层沉积年龄）值在 5% 累计的情况下大于 150 Ma 时，可判断为拉张伸展构造背景；若该值小于 150 Ma，则继续观察其在 30% 累计比例的情况，CA-DA > 100 Ma 为碰撞挤压构造背景，CA-DA < 100 Ma 为汇聚造山构造背景^[55]

Fig.5 Schematic diagram of U-Pb age structure classification of detrital zircons from Taiyuan Formation, western Ordos Basin

4.1.2 B 组物源及构造背景

B 组（棋探 15、李 98、李 82）样品，锆石年龄谱均存在 270~300 Ma、410~462 Ma 主峰值，850~1 000 Ma 次峰值的特征（图 2a），与阿拉善锆石年龄谱匹配度高（图 2b），整个

年龄分布中，饼状图显示 252~541 Ma 占比高达 78% (图 2a)，表明 B 组样品的锆石年龄主要来源于阿拉善地块和中亚造山带。阴山造山带和华北克拉通基底的峰值年龄主要集中于新太古代—中元古代 (1 600~2 600 Ma) [63]，此外，B 组样品地区的古流向为北西至南东向 (图 4a)，物源来自盆地北西方向，而北秦岭、北祁连构造带位于盆地南部 (图 1b)。以上表明 B 组锆石样品不接受来自阴山造山带，北秦岭、北祁连构造带以及华北克拉通基底的物源。850~1 000 Ma 次峰值可能与阿拉善新元古代岩浆事件有关[33]，早古生代的锆石年龄 (419~541 Ma) 和阿拉善与华北地块碰撞拼合事件有关[59]；阿拉善地块达里克庙花岗闪长岩形成于 442.9 ± 1.3 Ma、 432.5 ± 1.2 Ma[64]，能与李 98 样品~437 Ma 的峰值对应；阿拉善地块雅布赖山花岗闪长岩形成年龄为 280 ± 1 Ma、英云闪长岩形成年龄为 272 ± 1 Ma[65]，与棋探 15 样品~280 Ma、李 98 样品~292 Ma 的年龄峰值相对应。以上表明该组物源主要接受来自阿拉善地块和部分中亚造山带的物源。

B 组锆石样品 (棋探 15、李 98、李 82)，其前 5%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差都小于 150 Ma，前 30%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差大于 100 Ma，部分小于 100 Ma，这表明 B 组的物源区构造背景为碰撞挤压和汇聚造山 (图 5)。有前人研究表明，晚古生代阿拉善雅布赖山地区的中酸性岩 (272~280 Ma) 形成于宗乃山—沙拉扎山构造带与雅布赖—诺尔公—红古尔玉林构造带的碰撞或碰撞后环境[66]。早二叠世阿拉善下盐滩岩体的成岩环境可能与俯冲作用相关的岛弧环境有关，并展现出板块汇聚边缘的典型特征[67]。

4.1.3 C 组物源及构造背景

C 组 (陆家庄和南长滩) 样品，锆石年龄谱均存在 270~300 Ma、400~500 Ma 峰值的特征 (图 2a)，北秦岭、北祁连构造带和阿拉善地块存在 400~500 Ma 的锆石年龄[28,31,33]，阿拉善地块存在 270~300 Ma 的锆石年龄[65,68] (图 2b)，故锆石年龄以北秦岭、北祁连构造带和阿拉善地块为主要物源。阴山造山带、华北克拉通基底物源区的峰值年龄主要集中于新太古代—中元古代 (1 600~2 600 Ma) [63]，与上述三处样品的年龄分布特征明显不存在相关性 (图 2b)，表明该地区不接受来自阴山造山带和华北克拉通基底的物源。陆家庄~425 Ma、南长滩~446 Ma 年龄峰值能与北祁连微块体于加里东运动时期向北俯冲撞击而产生的构造岩浆热事件存在关联[69]，早古生代的锆石年龄 (419~541 Ma) 和阿拉善与华北地块碰撞拼合事件有关[59]。阿拉善地块 270~300 Ma 锆石年龄与晚古生代岩浆活动有关[65]。以上表明陆家庄和南长滩主要接受来自北祁连构造带和阿拉善地块的物源。

C组样品（陆家庄和南长滩），其前5%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差都小于150 Ma，前30%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差表现为陆家庄大于100 Ma，南长滩小于100 Ma。陆家庄、南长滩分别体现了物源区碰撞挤压、汇聚造山构造背景（图5）。结合本节物源分析结果，我们推测体现的物源区构造背景可能与阿拉善地块早二叠世雅布赖山—诺尔公—狼山岩浆岩有关^[66-67]，有前人研究发现南长滩二叠系有火山活动^[33]，可能接受了来自阿拉善北缘火山喷发形成的火山灰沉积。

4.1.4 D组物源及构造背景

样品庆探15中，锆石年龄谱具有~451 Ma、~912 Ma微弱年龄峰值，与北秦岭、北祁连构造带和阿拉善地块锆石年龄谱表现出相似性（图2），~451 Ma峰值与北秦岭、北祁连微块体于加里东运动时期向北俯冲撞击而产生的构造岩浆热事件存在关联^[69]，而年龄~912 Ma峰值与Rodinia超大陆聚合背景下的格伦维尔造山运动有关^[70]。庆探15地区古流向为东西向（图4a），物源可能来自东西部，而阿拉善地块位于盆地北部（图1b）。以上表明庆探15主要接受来自北秦岭、北祁连构造带物源。

样品庆探15中，前5%碎屑锆石的结晶年龄与沉积年龄之差大于150 Ma，这说明其物源区构造背景为拉张伸展（图5）。前人研究发现，晚古生代北秦岭构造带的构造与勉略洋盆地的伸展作用有关^[71]，从中晚泥盆世到中三叠世末西秦岭造山带及其邻区表现出板内伸展的构造作用^[72]，这些构造事件能与庆探15表现出拉张伸展的构造环境相对应（图5）。

4.2 南北碎屑物质来源差异

4.2.1 南北沉积体系差异

研究区北部受地形抬升影响，物源供给强，砂体厚度大面积广（图4a）。东北部太原组早期海水入侵，但未超过石嘴山一带，乌达—石嘴山一带发育三角洲平原沉积（图6b, h）；太原组中期，海侵范围扩大，乌达地区转为潮坪沉积^[2]。中部及定边地区受中央古隆起的影响，发育平行于海岸线的点状潮汐砂脊（图6j, k）。研究区西北部砂体厚度由西北到东南逐渐减薄，这一趋势指示水动力条件由北向南逐渐减弱，阿拉善地块供给强度下降，依次发育三角洲前缘、潟湖—潮坪相（图6a）。研究区中南部，北祁连带及走廊带南部地区均受南部的海侵影响，发育大量潮坪—潟湖沉积（图6e, f），砂体呈零星点状分布。

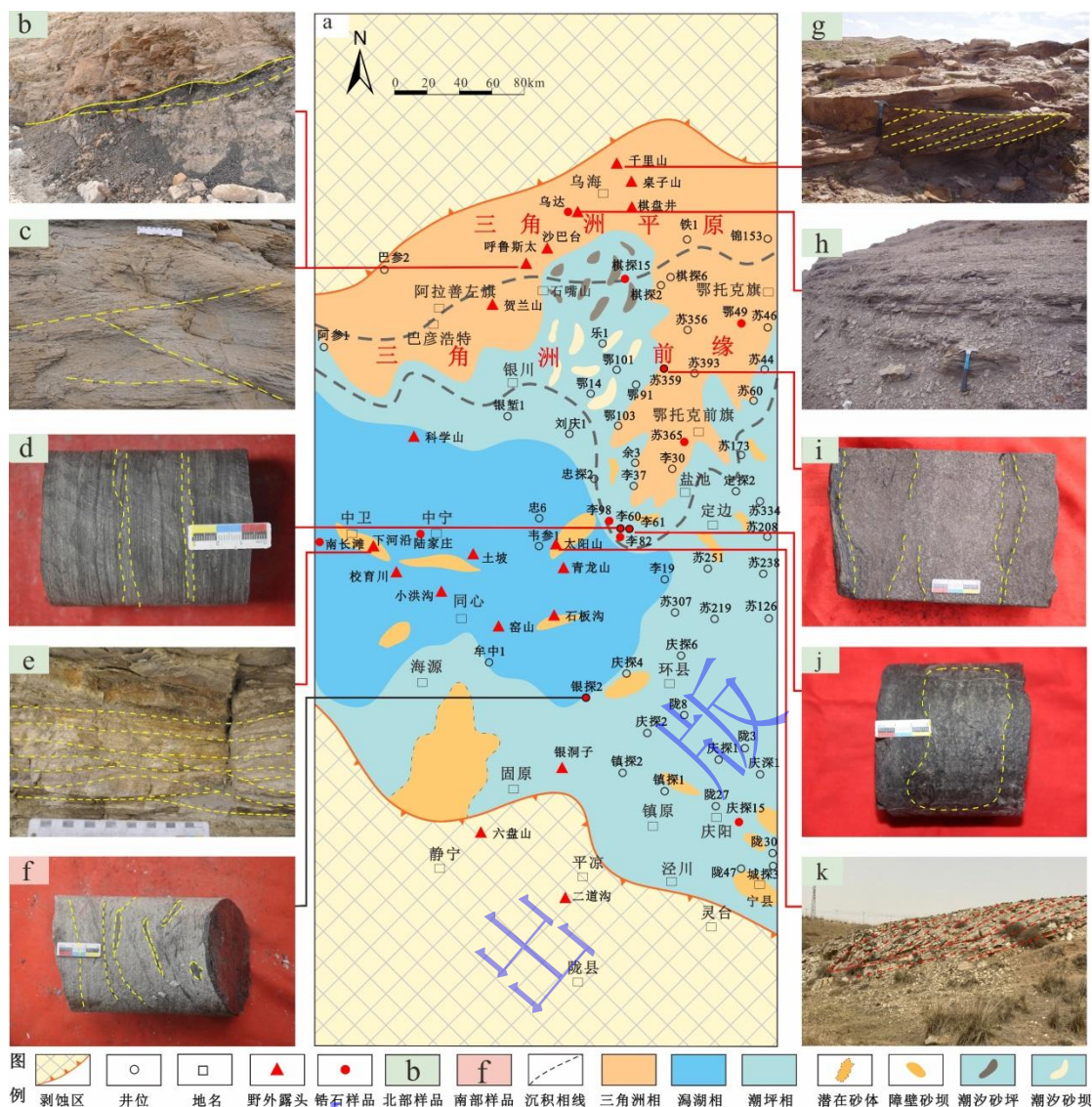


图6 鄂尔多斯盆地西部太原组沉积相图

(a) 鄂尔多斯盆地西部太原组沉积相图；(b) 太原组顶煤，三角洲平原沉积相，呼鲁斯太剖面；(c) 灰白色细砂岩，槽状交错层理，潮汐层理，太原组潮控三角洲沉积相，呼鲁斯太剖面；(d) 李60井，3946.31 m，黑色泥岩，透镜状层理，太原组潟湖—潮坪沉积相；(e) 砂岩夹薄层粉砂质泥岩，潮汐层理，太原组障壁砂坝沉积相，下河沿剖面；(f) 银探2井，2550.72 m，细砂岩，含泥质条带，有煤线，太原组障壁砂坝沉积相；(g) 细砂岩，板状交错层理，太原组三角洲平原沉积相，千里山剖面；(h) 页岩，太原组上部，太原组三角洲平原沉积相，乌达剖面；(i) 苏359井，3915.78 m，砂泥互层，三角洲前缘潮沉积相；(j) 李61井，4176.4 m，灰质泥岩，见大量生物扰动，层面见黄铁矿，太原组潟湖—潮坪沉积相；(k) 潮汐层理，多期次潮汐砂坝，太原组潟湖—潮坪沉积相，太阳山剖面

Fig.6 Sedimentary facies map of Taiyuan Formation, western Ordos Basin

太原组沉积早期（图 1c），水域面积小，河流搬运作用占主导，向盆地输入大量的碎屑物质，形成以砂岩为主的地层。太原组沉积中期（图 1c），水域面积广，有利于浅海环境中的生物生长繁殖，形成以灰岩为主的地层。太原组沉积晚期（图 1c），水域面积小，仅存于地貌低部位，北部三角洲向盆地输入大量的陆源碎屑物质，形成以砂岩为主的地层。

多层砂岩与灰岩为特征，反映间歇性海侵过程^[2,18,41,73]。

北部受造山带的影响，阿拉善地块和阴山地区发育碰撞环境为主的远源—辫状河三角洲（图 6c, g），物源供给强，向盆地输入大量砂体。相比之下，南部处于北秦岭构造带陆内拉张沉降阶段以及拉张—俯冲构造转换阶段^[74]，构造活动稳定，隆升幅度小以沉降为主^[15]。气候温暖湿润，阳光充足，海水清澈，生物碎屑及藻类大量繁殖，有利于灰岩的发育^[44,75-76]。南部砂体规模较小且呈点状分布，以北祁连构造带供源为主，北秦岭构造带几乎不供源。研究区主要发育南北两个沉降中心，其中北部位于乌达—沙巴台—石嘴山一带、巴彦浩特一带，而南部位于庆探、庆阳一带^[2]。

4.2.2 南北物源体系差异

北部样品锆石年龄来源较为复杂，北部（A 组、B 组）样品锆石年龄主要来自阴山造山带和阿拉善地块，其次为华北克拉通基底（图 2），东北部（A 组）样品锆石年龄峰值与晚古生代华北板块北缘受兴蒙大洋板块向南俯冲、碰撞有较强的相关性^[21]。此外，砂体向南边伸展、古流向整体为南方向（图 4a）。物源影响范围可至苏 365 井至定边一带。而西北部（B 组）棋探 15 锆石年龄峰值表现出阿拉善与华北地块碰撞拼合事件的强相关性，与此同时能与阿拉善地块的花岗闪长岩相对应^[65]，新太古代—古元古代占比减少，华北克拉通基底物源沉积控制减弱，古流向为自北西向南东方向（图 4a），物源影响范围可能延伸至中西部南长滩—陆家庄—李 98 一带（图 6a）。研究区南部（D 组）地区受华北板块缓慢隆升影响相对于北部程度较低^[15]，庆探 15 的构造背景为拉张伸展（图 5），物源供给弱，新太古代—古元古代占比较北部大幅减少，出现大量 400~500 Ma 的锆石年龄（图 2），表现出北秦岭、北祁连构造带强相关。中西部（C 组）样品表现出物源区为碰撞挤压和汇聚造山构造背景（图 5），说明西南部可能相对于南部庆探 15 地区砂体较为发育，结合 4.1.3 小节分析结果，我们推测研究区中西部物源贡献主要来自北祁连构造带和阿拉善地块的火山灰沉积。

受南北部物源供给的影响，李 82、李 98 表现出南北物源交互影响的特征，~443 Ma、~437 Ma 的峰值与阿拉善地块、华北地块碰撞拼合事件有关^[59]，同时能与北秦岭、北祁连微块体于加里东运动时期向北俯冲撞击而产生的构造岩浆热事件相对应^[69]。李 82 和李 98 从构造背景来看（图 5），形成于造山期，推测是北侧远距离搬运至此，而南部多为近源沉积，古流向存在多向和自北向南（图 4a），因此推测北部阿拉善地块和阴山造山带对交汇

区的物源影响更大。

4.3 盆地西部太原组古地理格局

多数学者通过轻矿物、阴极发光、重矿物、古流向、岩屑组合等多种手段综合分析,认为盆地西部太原组北部物源主要来自盆地北部的阿拉善地块、阴山造山带和伊盟隆起,南部物源主要来自秦岭—祁连构造带和盆地西南周缘地区^[2,12-14,19,27,77]。本次研究采用碎屑锆石年代学方法,并综合分析古流向、砂体厚度特征以及源区构造背景分析,不仅佐证了研究区北部(A组、B组)物源来自阿拉善地块和阴山造山带,还发现华北克拉通基底和中亚造山带为盆地北部贡献了部分物源,北部物源供给强,甚至影响至盆地中部地区,李98、李82一带可能位于南北物源交汇区。佐证了南部物源来自秦岭—祁连构造带,但物源区更加详细,研究区南部地区以北祁连构造带提供主要物源,北秦岭构造带提供微弱物源,推测西南部砂体更发育。

早二叠世太原组时期,随着古亚洲洋的俯冲闭合,华北板块北部随着褶皱造山带大面积隆升,形成了新的增生造山带物源供给区^[60](图7)。北部(A组、B组)沉积物主要来自碰撞挤压和汇聚造山构造背景^[62](图5),盆地海相沉积不断向南超覆,物源碎屑不断向南搬运,盆地北部往中部地区主要发育冲积扇—河流—三角洲平原及前缘^[27](图6a)。三角洲平原砂体主要分布于研究区东北部阴山造山带和西北部阿拉善地块两大源区,研究区东北部三角洲前缘砂体受海水潮汐及波浪作用形成条带状潮汐砂坝(图6d, i, j),西北部地势较低,水体深度较大,形成潮坪—潟湖沉积环境^[41]。东北部受洋壳持续俯冲的影响,阴山造山带的碎屑物质输入多于阿拉善地块,且沉积砂体搬运距离远可达盆地中部苏365井—定边一带(图7)。

研究区南部北秦岭构造带,在早古生代商丹洋闭合发生陆—陆碰撞造山作用,并与华北板块南缘挤压碰撞,北秦岭、北祁连构造带在早古生代晚期褶皱并隆起^[72](图7)。太原组时期,北秦岭与北祁连构造带处于古特提斯洋扩张—俯冲—碰撞的构造环境^[74],在拉张构造背景下物源供给较弱,近源沉积,发育潮坪—潟湖(图7),砂岩发育较少。此外,南部潮下带水动力强,阳光充足,海水清澈,生物碎屑和藻类大量繁殖,生物死亡之后遗体在海底堆积,有利于灰岩的发育^[44,75-76]。吴忠—同心—环县—镇原地区水体深度不等,存在多个坳陷区,以潟湖—潮坪环境为主,局部发育障壁砂坝。研究区中西部(C组)表现出物源区为碰撞挤压和汇聚造山构造背景(图5),推测中西部物源供给可能相对南部更强,

西南部砂体更为发育，往盆地中部地区砂体受海侵背景下潮流影响，呈孤岛状的砂坝形式分布（图7）。

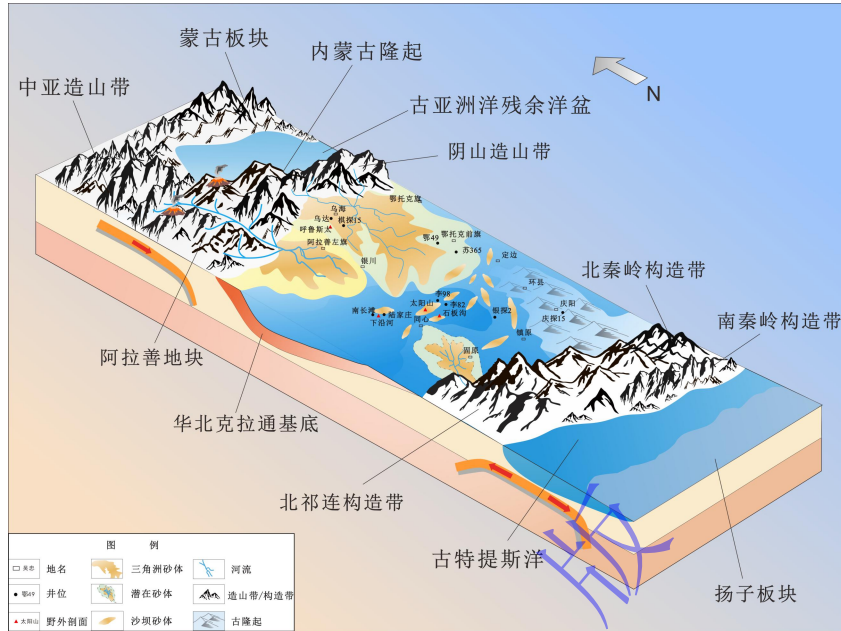


图7 鄂尔多斯盆地西部太原组古地理模式图

Fig.7 Geological map of the Paleozoic Taiyuan Formation geographic pattern in the western Ordos Basin

5 结论

(1) 潜在的物源区为四个区域：东北部主要接受来自阴山造山带和华北克拉通基底的沉积物，西北部主要受阿拉善地块的沉积物影响，中亚造山带提供部分物源，南部则接受来自北祁连构造带的碎屑物质，北秦岭构造带几乎不供源。

(2) 太原期研究区北部显示出自北向南的古流向特征，南部古流向整体为东西向。基于锆石年龄分布特征分析，东北部（A组）地区太古代—古元古代（1 600~2 600 Ma）的锆石年龄占比最大，而西北部（B组）地区锆石年龄（419~541 Ma）占主导地位，南部（D组）地区具有~451 Ma、~912 Ma年龄峰值。东北部样品体现了物源区为碰撞挤压和汇聚造山构造背景，西北部样品体现了物源区为碰撞挤压和汇聚造山构造背景，而南部样品体现了物源区为拉张伸展构造背景。

(3) 研究区北部源区经历了显著的隆升，形成了潮汐—三角洲复合沉积体系。砂体分布广泛，厚度较大，其影响范围扩展至盆地的中部地区。相较于西北部，东北部的物源区碎屑物质供给更强，导致该区域的砂体延伸距离更远；南部整体隆升程度低于北方，物源供给较弱，近源沉积，以潮坪—潟湖为主；东南部是以潟湖—潮坪环境为主的沉积体系；

西南部推测有砂体发育。

致谢 衷心感谢审稿专家的精心指导和宝贵意见。同时，也要感谢成都理工大学沉积地质研究院韩勇博士、朱淑玥博士、张蕊硕士、赵菲硕士和闫心宇硕士，他们为本文提供了宝贵的建议和无私的帮助，衷心地表示感谢！

参考文献 (References)

- [1] 翟光麾. 鄂尔多斯盆地西部上古生界烃源岩研究[D]. 西安: 西北大学, 2021: 1-64. [Zhai Guanghui. Study of Upper Paleozoic hydrocarbon source rocks in western Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 1-64.]
- [2] 王岚. 鄂尔多斯西缘地区二叠系太原组、山西组沉积体系研究[D]. 西安: 西北大学, 2005: 1-58. [Wang Lan. Research on sedimentary system of Permian Taiyuan and Shanxi Formation in western area of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2005: 1-58.]
- [3] 廖昌珍, 张岳桥, 温长顺. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义[J]. 地质学报, 2007, 81 (4): 466-474. [Liao Changzhen, Zhang Yueqiao, Wen Changshun. Structural styles of the eastern boundary zone of the Ordos Basin and its regional tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(4): 466-474.]
- [4] 侯中帅, 陈世悦, 王越, 等. 鄂尔多斯盆地东缘保德地区上古生界层序地层与沉积相特征[J]. 古地理学报, 2018, 20 (2): 231-243. [Hou Zhongshuai, Chen Shiyue, Wang Yue, et al. Characteristics of sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Upper Paleozoic in Baode area, eastern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(2): 231-243.]
- [5] 沈玉林, 郭英海, 李壮福, 等. 鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组层序地层特征[J]. 地球学报, 2009, 30 (2): 187-193. [Shen Yulin, Guo Yinghai, Li Zhuangfu, et al. Sequence stratigraphy of Benxi-Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(2): 187-193.]
- [6] 冯琦. 鄂尔多斯盆地西缘中南段构造特征及演化与油气赋存[D]. 西安: 西北大学, 2021: 1-86. [Feng Qi. Structural characteristics, evolution and hydrocarbon occurrence in the Middle south section of the western margin of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 1-86.]
- [7] 曹代勇, 徐浩, 刘亢, 等. 鄂尔多斯盆地西缘煤田构造演化及其控制因素[J]. 地质科学, 2015, 50 (2): 410-427. [Cao Daiyong, Xu Hao, Liu Kang, et al. Coalfield tectonic evolution and its controlling factors at the western margin of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 410-427.]
- [8] 朱世发, 崔航, 陈嘉豪, 等. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征: 以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例[J]. 沉积学报, 2021, 39 (1): 126-139. [Zhu Shifa, Cui Hang, Chen Jiahao, et al. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow water delta: Case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 126-139.]
- [9] 刘二虎, 陈志鹏, 王起琮, 等. 鄂尔多斯盆地靖边地区马家沟组中上组合天然气成因类型[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42 (2): 324-334. [Liu Erhu, Chen Zhipeng, Wang Qicong, et al. Genetic types of natural gas from upper & middle assemblage of Majiagou Formation in Jingbian area, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(2): 324-334.]
- [10] 夏雨晴, 付斯一, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地西部石炭系羊虎沟组致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 矿物岩石, 2023, 43 (2): 82-94. [Xia Yuqing, Fu Siyi, Huang Daojun, et al. Characteristics and control factors of Carboniferous Yanghugou Formation tight sandstone reservoir in western Ordos Basin[J]. Mineralogy and Petrology, 2023, 43(2): 82-94.]
- [11] 崔明明, 李进步, 王宗秀, 等. 辫状河三角洲前缘致密砂岩储层特征及优质储层控制因素: 以苏里格气田西南部石盒子组8段为例[J]. 石油学报, 2019, 40 (3): 279-294. [Cui Mingming, Li Jinbu, Wang Zongxiu, et al. Characteristics of tight sand reservoir and controlling factors of high-quality reservoir at braided delta front: A case study from member 8 of Shihezi Formation in southwestern Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(3): 279-294.]

- [12] 陈全红, 李文厚, 刘昊伟, 等. 鄂尔多斯盆地上石炭统一中二叠统砂岩物源分析[J]. 古地理学报, 2009, 11 (6): 629-640. [Chen Quanhong, Li Wenhong, Liu Haowei, et al. Provenance analysis of sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(6): 629-640.]
- [13] 虎建玲, 王琳霖, 陈琴, 等. 鄂尔多斯盆地西南部早—中二叠世源—汇充填过程及构造—沉积格局[J]. 天然气地球科学, 2024, 35 (1): 41-58. [Hu Jianling, Wang Linlin, Chen Qin, et al. The Early-Middle Permian source to sink filling process and its tectonic-sedimentary response in the southwestern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(1): 41-58.]
- [14] 张靖芪, 虎建玲, 谢远飞, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘晚石炭—中二叠世沉积背景特征与演化[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.007>. [Zhang Jingqi, Hu Jianling, Xie Yuanfei, et al. Depositional background and evolution of Late Carboniferous–Middle Permian, northwestern margin of the Ordos Basin, China[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.007>.]
- [15] 陈孟晋, 汪泽成, 郭彦如, 等. 鄂尔多斯盆地南部晚古生代沉积特征与天然气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33 (1): 1-5. [Chen Mengjin, Wang Zecheng, Guo Yanru, et al. Late Paleozoic sedimentary systems and gas potential in the south Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 1-5.]
- [16] 陈全红, 李文厚, 胡孝林, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析[J]. 地质学报, 2012, 86 (7): 1150-1162. [Chen Quanhong, Li Wenhong, Hu Xiaolin, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1150-1162.]
- [17] 郭艳琴, 王美霞, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地西缘北部上古生界沉积体系特征及古地理演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50 (1): 93-104. [Guo Yaqin, Wang Meixia, Guo Bincheng, et al. Sedimentary system characteristics and paleogeographic evolution of Upper Paleozoic of northern west margin, Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 93-104.]
- [18] 陈洪德, 侯中健, 田景春, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化研究[J]. 矿物岩石, 2001, 21 (3): 16-22. [Chen Hongde, Hou Zhongjian, Tian Jingchun, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and Tectono-Sedimentary evolution in Ordos Basin during Late Palaeozoic[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 16-22.]
- [19] 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 Wenhong, 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.]
- [20] 陈全红, 李克永, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组—太原组扇三角洲沉积与油气聚集的关系[J]. 中国地质, 2010, 37 (2): 421-429. [Chen Quanhong, Li Keyong, Zhang Daofeng, et al. The relationship between fan delta and hydrocarbon accumulation in Benxi- Taiyuan Formation, Ordos Basin[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 421-429.]
- [21] 雷琳琳, 赵红格, 邵晓州, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘晚三叠世早期物源组成: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄的指示[J]. 沉积学报, 2020, 38 (6): 1258-1271. [Lei Linlin, Zhao Hongge, Shao Xiaozhou, et al. Provenance composition of the early Late Triassic, northwestern Ordos Basin: Indications from detrital zircon U-Pb ages[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(6): 1258-1271.]
- [22] 黄家国. 鄂尔多斯盆地西缘页岩气勘探潜力与资源评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1-72. [Huang Jiaguo. Shale gas exploration potential and resource evaluation in the western margin of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 1-72.]
- [23] Li Z H, Qu H J, Gong W B. Late Mesozoic basin development and tectonic setting of the northern North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 115-139.
- [24] 孙振飞. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠纪煤系黑色页岩沉积及地化特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1-62. [Sun Zhenfei. Sedimentary and geochemistry characteristics of coal-bearing black Shales of Permo-Carboniferous in the eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 1-62.]
- [25] 李蒙. 鄂尔多斯西缘奥陶纪沉积与构造演化研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 1-184. [Li Meng. Analysis of sedimentary and tectonic evolution of the western margin of Ordos area in Ordovician[D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 1-184.]

- [26] 朱淑玥, 刘磊, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源—汇系统特征及古地理格局[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1430-1450. [Zhu Shuyue, Liu Lei, Hu Jianling, et al. Characteristics of the source-to-sink system and paleogeographical pattern from the Upper Carboniferous Yanghugou Formation in western margin of the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1430-1450.]
- [27] 翟咏荷. 鄂尔多斯盆地及邻区晚古生代原型盆地恢复及演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 1-100. [Zhai Yonghe. Tectonic-depositional environment and proto-type basin evolution of the Carboniferous and Permian Ordos area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020: 1-100.]
- [28] 王栋. 阿拉善与华北地块晚古生代构造关系—来自沉积和物源方面的约束[D]. 西安: 西北大学, 2019: 1-79. [Wang Dong. Late Paleozoic tectonic relationship between Alxa and North China blocks: Constraints from sedimentology and provenance[D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 1-79.]
- [29] 张丽琪. 北祁连—阿拉善地块南缘古生代碰撞后岩浆作用及深部过程[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 1-81. [Zhang Liqi. Post-collisional Magmatism and geodynamic process from the North Qilian Orogen to southern margin of the Alxa block, NW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 1-81.]
- [30] 周瑞. 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[D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 1-163. [Zhou Rui. Study on the relationship between sedimentation and Tectonism of Late Paleozoic-early Mesozoic sediments in the North-central North China Craton[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 1-163.]
- [31] Diwu C R, Sun Y, Zhang H, et al. Episodic tectonothermal events of the western North China Craton and North Qinling Orogenic Belt in central China: Constraints from detrital zircon U-Pb ages[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 107-122.
- [32] Liu L, Liao X Y, Wang Y W, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 58-81.
- [33] 李正辉. 贺兰构造带古生代构造演化: 碎屑锆石年代学制约[D]. 西安: 西北大学, 2018: 1-183. [Li Zhenghui. Paleozoic tectonic evolution in the Helanshan tectonic belt: Constraints from U-Pb geochronology of Detrital Zircon[D]. Xi'an: Northwest University, 2018: 1-183.]
- [34] 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), 2002, 32(7): 538-549. [Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly[J]. Science China (Seri. D), 2002, 32(7): 538-549.]
- [35] 蒋子文. 鄂尔多斯盆地南部上古生界山1—盒8段物源分析及盆地耦合关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2020: 1-128. [Jiang Ziwen. The study of provenance and basin mountain coupling of Shan1-H8 member, Upper Palaeozoic, southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2020: 1-128.]
- [36] 刘凯, 王任, 石万忠, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区下石盒子组多物源体系: 来自矿物学及碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 540-554. [Liu Kai, Wang Ren, Shi Wanzhong, et al. Multiple provenance system of Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, northern Ordos Basin: Evidence from mineralogy and detrital zircon U-Pb chronology[J]. Earth Science, 2021, 46(2): 540-554.]
- [37] 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 722-745. [Zhai Mingguo. Tectonic evolution of the North China craton[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 722-745.]
- [38] 闫德宇. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界煤中稀土元素地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1-155. [Yan Deyu. Geochemistry characteristics of rare earth elements in the Upper Paleozoic coal of eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 1-155.]
- [39] 李克永, 杨文鹏, 徐帅康, 等. 鄂尔多斯盆地中南部上古生界层序与岩相古地理演化[J]. 古地理学报, 2023, 25(1): 75-92. [Li Keyong, Yang Wenpeng, Xu Shuikang, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies palaeogeography evolution of the Upper Paleozoic in central-southern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(1): 75-92.]
- [40] 潘冬. 鄂尔多斯盆地上古生界沉积体系特征及构造演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 1-92. [Pan Dong. Sedimentary systems' feature and tectonic evolution of the Upper Palaeozoic of the Ordos Basin[D]. Beijing: China University of

- Geosciences (Beijing), 2013: 1-92.]
- [41] 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.]
- [42] 刘雯, 赵群, 邱振, 等. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气成藏条件研究现状与展望[J]. 天然气地球科学, 2023, 34 (5): 868-887. [Liu Wen, Zhao Qun, Qiu Zhen, et al. Research status and prospect of accumulation conditions of transitional facies shale gas in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(5): 868-887.]
- [43] 赵剑. 鄂尔多斯盆地西缘太原组沉积特征[J]. 石化技术, 2021, 28 (10): 138-139. [Zhao Jian. Sedimentary characteristics of Taiyuan Formation in the western margin of Ordos Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(10): 138-139.]
- [44] 付金华. 鄂尔多斯盆地太原组致密灰岩天然气成藏地质特征与勘探潜力[J]. 地学前缘, 2023, 30 (1): 20-29. [Fu Jinhua. Accumulation characteristics and exploration potential of tight limestone gas in the Taiyuan Formation of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 20-29.]
- [45] Dickinson W R, Gehrels G E. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic Eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau: Evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment[J]. GSA Bulletin, 2009, 121(3/4): 408-433.
- [46] 高伊雪, 邱昆峰, 于皓丞, 等. 碳酸盐矿物激光原位 U-Pb 定年基本原理、分析方法与地质应用[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41 (4): 786-803. [Gao Yixue, Qiu Kunfeng, Yu Haocheng, et al. Principle, methods, and geological applications of carbonates LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(4): 786-803.]
- [47] 王平, 陈玺贇, 朱龙辰, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学定量物源分析的基本原理与影响因素: 以现代河流砂为例[J]. 沉积学报, 2022, 40 (6): 1599-1614. [Wang Ping, Chen Xiyun, Zhu Longchen, et al. Principles and biases of quantitative provenance analysis using detrital zircon U-Pb geochronology: Insight from modern river sands[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1599-1614.]
- [48] 张凌, 王平, 陈玺贇, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学数据获取、分析与比较[J]. 地球科学进展, 2020, 35 (4): 414-430. [Zhang Ling, Wang Ping, Chen Xiyun, et al. Review in detrital zircon U-Pb geochronology: Data acquisition, analysis and comparison[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(4): 414-430.]
- [49] Ludwig K R. User's manual for ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [50] Saylor J E, Jordan J C, Sundell K E, et al. Topographic growth of the Jishi Shan and its impact on basin and hydrology evolution, NE Tibetan Plateau[J]. Basin Research, 2018, 30(3): 544-563.
- [51] Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [52] 高微. 碳酸盐岩成像测井资料处理与应用研究[D]. 武汉: 长江大学, 2012: 1-66. [Gao Wei. Imaging logging datum processing and application research in carbonate reservoir[D]. Wuhan: Yangtze University, 2012: 1-66.]
- [53] 杨世夺, 蔡军, 龚宏杰, 等. 多井电阻率成像测井古水流方向分析方法及实例应用[J]. 测井技术, 2013, 37 (3): 322-326. [Yang Shiduo, Cai Jun, Gong Hongjie, et al. Application of multi-well resistivity imaging data to paleocurrent direction analyses and case study[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(3): 322-326.]
- [54] Folkestad A, Veselovsky Z, Roberts P. Utilising borehole image logs to interpret delta to estuarine system: A case study of the subsurface Lower Jurassic cook formation in the Norwegian northern North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1): 255-275.
- [55] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40(10): 875-878.
- [56] Wang A D, Liu Y C. Neoproterozoic (2.5-2.8 Ga) crustal growth of the North China Craton revealed by zircon Hf isotope: A synthesis[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2): 147-173.
- [57] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup[J]. Earth Science Reviews, 2004, 67(1/2): 91-123.
- [58] 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质岩系形成时代的初步研究[J]. 中国地质, 2007, 34 (2):

- 251-261. [Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, et al. Chronology of the Precambrian metamorphic series in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 251-261.]
- [59] 田荣松. 阿拉善地块北缘晚古生代构造演化[D]. 南京: 南京大学, 2021: 1-162. [Tian Rongsong. Late Paleozoic Tectonic evolution in the northern margin of the Alxa block[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021: 1-162.]
- [60] 屈红军, 韩星, 陈硕, 等. 鄂尔多斯盆地东北部上古生界碎屑锆石测年及盆山耦合探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(3): 501-513. [Qu Hongjun, Han Xing, Chen Shuo, et al. U-Pb dating of detrital zircon from the Upper Paleozoic Clastic rocks and basin-mountain coupling of the northeastern Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(3): 501-513.]
- [61] 李梦琪. 华北板块北缘东段吉中地区二叠纪—中生代构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 1-132. [Li Mengqi. Permian-Mesozoic tectonic evolution in central Jilin region, eastern part of northern margin of the North China block[J]. Changchun: Jilin University, 2023: 1-132.]
- [62] 蒋小洁, 刘松楠, 周丽云, 等. 同构造岩浆流动与相对稳定环境下岩体侵位的差异性及其对华北北缘晚古生代晚期: 早中生代构造演化的约束[J]. *地质通报*, 2024, 43(9): 1636-1649. [Jiang Xiaojie, Liu Songnan, Zhou Liyun, et al. Difference of the syn-tectonic magmatic flow and granite emplacement under stable tectonic environment and its constrain on the Late Paleozoic to early Mesozoic tectonic evolution in the northern margin of North China plate[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1636-1649.]
- [63] 刘持恒, 李子颖, 贺锋, 等. 鄂尔多斯盆地西北部下白垩统物源定量分析研究[J]. *地学前缘*, 2024, 31(3): 80-99. [Liu Chiheng, Li Ziyang, He Feng, et al. Quantitative analysis of provenance in the Lower Cretaceous of the northwestern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(3): 80-99.]
- [64] 王梓桐, 王根厚, 张维杰, 等. 阿拉善地块南缘志留纪花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(5): 586-600. [Wang Zitong, Wang Genhou, Zhang Weijie, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Silurian granodiorite in the southern margin of Alxa Block, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(5): 586-600.]
- [65] 叶珂, 张磊, 王涛, 等. 阿拉善雅布赖山二叠纪中酸性岩浆岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(6): 901-928. [Ye Ke, Zhang Lei, Wang Tao, et al. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of the Permian intermediate acid igneous rocks from the Yabulai Mountain in western Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(6): 901-928.]
- [66] 冷馨. 阿拉善地块北大山地区晚古生代岩浆活动与构造意义[D]. 西安: 长安大学, 2020: 1-73. [Leng Xin. Late Paleozoic magmatism and its tectonic significance in the Beidashan area of the Alxa block[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020: 1-73.]
- [67] 马泽民. 阿拉善地块南缘北大山地区下盐滩岩体岩石成因与地质意义[D]. 西安: 长安大学, 2019: 1-66. [Ma Zemin. Study on Petrogenesis of Xiayantan intrusion in Beidashan area, southern Margin of Alax block, and its geological significance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019: 1-66.]
- [68] Zhang J, Li J Y, Xiao W X, et al. Kinematics and geochronology of multistage ductile deformation along the eastern Alxa block, NW China: New constraints on the relationship between the North China Plate and the Alxa block[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 57: 38-57.
- [69] 刘会彬. 西秦岭北缘新阳—元龙韧性走滑剪切带特征及其地质意义[D]. 西安: 长安大学, 2007: 1-64. [Liu Huibin. Characteristics of Xinyang-Yuanlong ductile strike-slip shear zone and geology significance in the north margin of west Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 1-64.]
- [70] Dong Y P, Zhang X N, Liu X M, et al. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 104: 84-98.
- [71] 方特. 华北南缘二叠系沉积物源特征及隆升过程[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023: 1-65. [Fang Te. Sediment provenance characteristics and uplift process of Permian in southern margin of North China[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023: 1-65.]
- [72] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. *西北地质*, 2003, 36(1): 1-10. [Feng Yimin,

- Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, et al. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling Orogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 2003, 36(1): 1-10.]
- [73] 郭英海, 刘焕杰. 鄂尔多斯地区晚古生代的海侵[J]. *中国矿业大学学报*, 1999, 28 (2): 126-129. [Guo Yinghai, Liu Huanjie. Transgression of Late Paleozoic era in Ordos area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(2): 126-129.]
- [74] 吴晨, 陈宣华, 丁林. 祁连造山带构造演化与新生代变形历史[J]. *地学前缘*, 2023, 30 (3): 262-281. [Wu Chen, Chen Xuanhua, Ding Lin. Tectonic evolution and Cenozoic deformation history of the Qilian orogen[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 262-281.]
- [75] 赵玉茹, 高达, 胡明毅, 等. 古气候和海平面变化对浅水碳酸盐岩高频层序及有利储层的控制: 以川中地区龙王庙组为例[J]. *中国地质*, 2024, 51 (2): 577-591. [Zhao Yuru, Gao Da, Hu Mingyi, et al. Controls of paleoclimate and sea-level changes on the high-frequency sequence of shallow-water carbonates: A case study of the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 577-591.]
- [76] 魏红红. 鄂尔多斯地区石炭—二叠系沉积体系及层序地层学研究[D]. 西安: 西北大学, 2002: 1-110. [Wei Honghong. Research on Permian-Carboniferous depositional systems and the sequence stratigraphy of Ordos area[D]. Xi'an: Northwest University, 2002: 1-110.]
- [77] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. *沉积学报*, 1998, 16 (3): 44-51. [Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, et al. Late Paleozoic sedimentary system and Paleogeographic evolution of Ordos area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 44-51.]

Detrital Material Source and Paleogeographic Reconstruction of Taiyuan Formation in Western Ordos Basin

MA XianCheng¹, LIU Lei^{1,2}, WANG ZhiWei¹, HU AiPing^{3,4}, HU JianLing^{4,5}, HU Cong³, WANG Feng^{1,2}, LI Dan¹, ZHANG ChengGong^{1,2}, FU SiYi^{1,2}, CHEN HongDe^{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. Department of Exploration, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

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

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

Abstract: [Objective] The Taiyuan Formation of Permian system in Ordos Basin has the characteristics of large thickness, wide distribution, and rich types of oil and gas resources, which indicates a substantial potential for exploration. At present, the study of this formation is mainly concentrated in the eastern part of the basin, while the exploration and study of Taiyuan Formation in the western part of the basin need to be further discussed due to the complex and variable tectonic pattern and sedimentary evolution. [Methods] The detrital material source, tectonic setting and paleogeographic evolution of Taiyuan Formation in western Ordos Basin are systematically studied by means of outcrop observation, drilling sample collection, detrital zircon U-Pb dating and paleo-flow analysis. [Results] The sediments in the northeastern part of the study area (Group A) are mainly from the Yinshan orogenic belt under the collision-compressional tectonic background, with strong provenances. The delta plain, delta front,

tidal sand ridge and tidal sand bar are successively developed in the middle of the basin. The sediments in the northwest (Group B) are derived from the Alxa block under the collisional compression and convergent orogenic tectonic background, and the delta plain, delta front and lagoon-tidal flat develop successively towards the middle of the basin. The sediments in the southern (Group D) area came from the North Qilian and North Qinling tectonic belts under the extension-subduction-collision tectonic environment of the Paleo-Tethyan Ocean. The central paleo-uplift of the Taiyuan Period was slow, the provenance-supply was weak, and the mainly developed barrier island-barrier tidal flat deposits. **[Conclusions]** The northern part of the study area is characterized by high uplift and strong provenance supply in the context of collision and convergence orogenic structures, and large tide-delta complex system, while the southern part is characterized by weak provenance supply in the context of tensile extension structures, and is dominated by tidal flat and lagoon. This study not only deepens the understanding of the sedimentary system and provenance supply mechanism in the western Ordos Basin, but also provides a new perspective and reference for the reconstruction of the tectono-sedimentary evolution process and paleogeographic pattern in the western Ordos Basin.

Key words: detrital zircon; provenance analysis; western Ordos Basin; paleogeographic pattern; Taiyuan Formation

