

文章编号:1000-0550(2025)04-1412-17

鄂尔多斯地区南部早二叠世山西组源—汇系统差异与构造—沉积格局

李丹^{1,2}, 赵伟波^{3,4}, 胡琮⁵, 刘磊^{1,2}, 虎建玲^{3,4}, 王志伟¹, 陈洪德^{1,2}, 朱淑玥¹, 张靖芪¹, 赵菲¹, 张蕊¹

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开发研究院, 西安 710000

4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

5. 中国石油长庆油田公司勘探事业部, 西安 710018

摘要 【目的】鄂尔多斯地区南部存在秦岭、祁连造山带等多套物源体系,各源—汇系统单元要素定量表征相对薄弱,制约了对不同源—汇系统差异及其约束下构造—沉积充填过程研究。【方法】以下二叠统山西组为研究对象,综合沉积学与地球化学、碎屑锆石定年等手段,阐明了各源—汇系统构造背景、古坡度及沉积体系等单元要素的差异,并重建了南部地区山西组多源—汇系统复合影响下的构造—沉积模式。【结果】(1)鄂尔多斯地区南部在山西组沉积时期存在北祁连、北秦岭西与北秦岭东三大源—汇系统。北祁连源—汇系统轻稀土元素相对富集, δEu 均值为0.60,顺物源方向平均古坡度为 0.045° ;北秦岭西段源—汇系统轻稀土元素明显富集, δEu 均值为0.75,平均古坡度为 0.040° ;北秦岭东段源—汇系统轻稀土元素较为富集, δEu 均值为1.05,平均古坡度为 0.048° ;(2)各源—汇系统接受来自中亚造山带、华北克拉通基底、北秦岭东、西段及北祁连造山带的物源,但以华北克拉通基底为主;(3)各源—汇系统内物源区构造背景均以主动大陆边缘为主,被动大陆边缘次之。【结论】受勉略洋俯冲作用,鄂尔多斯地区南部表现为板块持续汇聚的主动大陆边缘构造背景,北秦岭东段源汇系统源区隆升程度最高,山西晚期相对富砂,以三角洲平原到前缘过渡沉积为主,延伸规模最小;北秦岭西段源汇系统源区隆升程度最低,早期富砂晚期贫砂,以三角洲前缘沉积为主,延伸范围最广;北祁连源汇系统源区隆升程度中等,以三角洲平原向前缘过渡沉积为主,延伸范围适中。

关键词 鄂尔多斯地区;山西组;源—汇系统;锆石 U-Pb 年龄

第一作者简介 李丹,女,1999年出生,硕士研究生,地质学,E-mail: ld1244858968@163.com

通信作者 刘磊,男,研究员,沉积学,E-mail: liulei@cdut.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.093

CSTR 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.093

0 引言

源—汇概念自20世纪90年代末在“大陆边缘源—汇系统研究”提出并应用于沉积学以来^[1],被广泛运用于地表动力学与沉积盆地充填分析等方面^[2-3]。近年来随着多学科交叉支撑下源—汇系统研究的发展,物源分析手段从“定性”走向“定量”^[4],在恢复源

—汇过程及预测沉积物分布规律等方面均取得了一定进展^[5-6]。相对于国际上“洋陆边缘源—汇系统”具有相对宏观和丰富的研究成果^[7-9],我国在古老“源—汇”系统领域的研究仍处于初级阶段。源—汇研究在我国发展的前十年主要集中在控砂机制与对应的构造演化、地貌差异、物源供给等方面,在东部中生代断陷湖盆或者现代沉积研究中取得了一定的成

收稿日期:2023-07-11;**修回日期**:2023-09-11;**录用日期**:2023-10-16;**网络出版日期**:2023-10-16

基金项目: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);中石油长庆油田科研项目(2020-62503,CQYT-CQKTY-2021-JS-2728);[**Foundation**: 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; Research Project of PetroChina Changqing Oilfield, No. 2020-62503, CQYT-CQKTY-2021-JS-2728]

果^[10-11]。随着碎屑锆石物源示踪在古地理重建中的普及,有学者尝试利用高精度 U-Pb 年龄对源—汇过程进行约束^[12],但更多集中在峰值年龄组的对比溯源方面,且锆石定年数据通常受到测试成本与样品数目的限制,更具说服力的平面覆盖或垂向演化的年龄对比研究较为薄弱。因此,当前对于源—汇过程与盆山耦合关系的系统研究,缺乏基于大量数据的半定量—定量分析研究,仍处于以定性研究为主的阶段^[10-11,13-15]。

鄂尔多斯盆地是我国形成历史最早、演化时间最长的沉积盆地之一,石炭至二叠期间在泛大陆拼合背景下完成了海陆转变的过程,前人着重关注这一时期的物源归属与沉积分异规律^[14-15],并在砂体展布与控储成藏规律的研究上取得了一定进展^[16-17]。其中山西组作为海陆转变的关键阶段^[18],大部分研究更多聚焦在盆地中东部的页岩气藏、聚煤规律与致密砂岩气等方面^[19-21]。而南部地区对物源体系的研究更多局限于简单的分区^[22],对沉积特征的研究大多着重探讨内部的砂体发育规律^[23]。目前南部地区所存在的源汇系统的影响范围、物源差异研究相对匮乏;北部物源与南部物源的交汇情况尚不明确;同时整个南部地区的构造背景差异及其控制下的古地理格局仍存在诸多争议,制约着鄂尔多斯地区南部下一步油气资源的勘探^[24]。

鉴于此,本文以山西组为研究对象,结合基础沉积学与稀土元素、碎屑锆石等分析手段,系统划分鄂尔多斯地区南部源—汇系统,在此基础上恢复了鄂尔多斯地区南部的构造背景与物源性质,半定量—定量对比各源—汇系统单元要素差异,进而探讨多物源背景下源—汇系统特征及沉积充填过程,为该区域古地理重建提供一定的理论指导。

1 区域地质概况

1.1 区域构造背景

鄂尔多斯地块是华北地台西南端的次级构造单元,经历了多次构造演化,整体沉积较为稳定,内部沉降缓慢,是一个多旋回克拉通沉积叠置盆地^[14]。盆地所在的华北板块在晚古生代位于东冈瓦纳地区的多板块结合部位^[25],其北部为古亚洲洋域,南部为秦岭—祁连造山带与古特提斯洋盆相接(图 1a),在古特提斯构造域周缘存在祁连造山带、秦岭造山带、走廊过渡带等众多构造单元(图 1b);祁连造山带可分

为北祁连构造带、中祁连地块和南祁连构造带三个地质体,其中,北祁连构造带位于中祁连地块与走廊过渡带之间。作为中央造山带的重要组成部分,秦岭造山带可分为东、西两段并分别与大别—苏鲁造山带和祁连—昆仑造山带相连^[26]。古生代以来鄂尔多斯地区南部构造—沉积演化主要受古特提斯洋俯冲—碰撞过程的控制^[27],早二叠世秦祁造山带受南侧特提斯洋盆俯冲开始隆升造山,与华北板块南缘共同为南部地区供源;至中二叠世,伴随着华北陆块南缘受古特提斯洋的俯冲抬升,秦岭造山带强烈挤压隆升并持续为南部地区供源(图 1c),海水逐渐退出,完成了由海陆过渡向陆相沉积转换的过程。

1.2 地层及沉积背景

鄂尔多斯地区在早古生代晚期具有 1 亿多年的沉积间断,至晚古生代石炭纪中期重新开始沉降,并接受沉积,总体上延续了早古生代晚期西、南两侧凹陷,中部隆起的古构造—沉积格局^[28]。在中央古隆起的東西两侧,发育滨浅海和潮坪相沉积;二叠纪早期,由于两侧海侵面积不断扩大,海水将中央古隆起覆盖,之后随着南北构造—沉积差异进一步增大,在山西组沉积阶段,华北板块与蒙古板块的碰撞导致了北部蒙古—长白—兴安褶皱带、南部秦岭—祁连—昆仑褶皱带的形成,并使其逐渐被抬升为陆地,海水迅速从东西两侧退却,由海相转为陆相,揭开陆相沉积的序幕,从而使干旱气候再次出现。此时期盆地边界南界大致沿兰州—丹凤—洛南一带分布,北界至兴蒙造山带,东界可延伸至华北板块边界处,西界为阿拉善地块西侧^[29]。

在晚古生代研究区从下往上依次沉积了海相沉积为主的上石炭统本溪组(C_2b),海陆过渡沉积体系为主的下二叠统太原组(P_1t)、山西组(P_1s),以及陆相沉积为主的中二叠统石盒子组(P_2sh)等^[30],沉积范围逐渐扩大。此次研究的目的层山西组是当前鄂尔多斯盆地进行天然气勘探的重要层位(图 1d),该时期总体地层厚度表现为南北近物源区较薄,向沉积区逐渐增厚的特征,东西向无明显厚度差异(图 1c)。山西组上覆于太原组之上,与太原组呈整合接触且连续沉积,其底部为“北岔沟砂岩”,发育大套冲刷面。下石盒子组底部“骆驼脖子砂岩”为上覆地层,常作为划分下石盒子组与山西组的标志层。相较于同为海陆过渡沉积的太原组,山西组岩层厚度较大,煤层减少、砂岩增多,广泛分布暗色泥页岩,主体岩

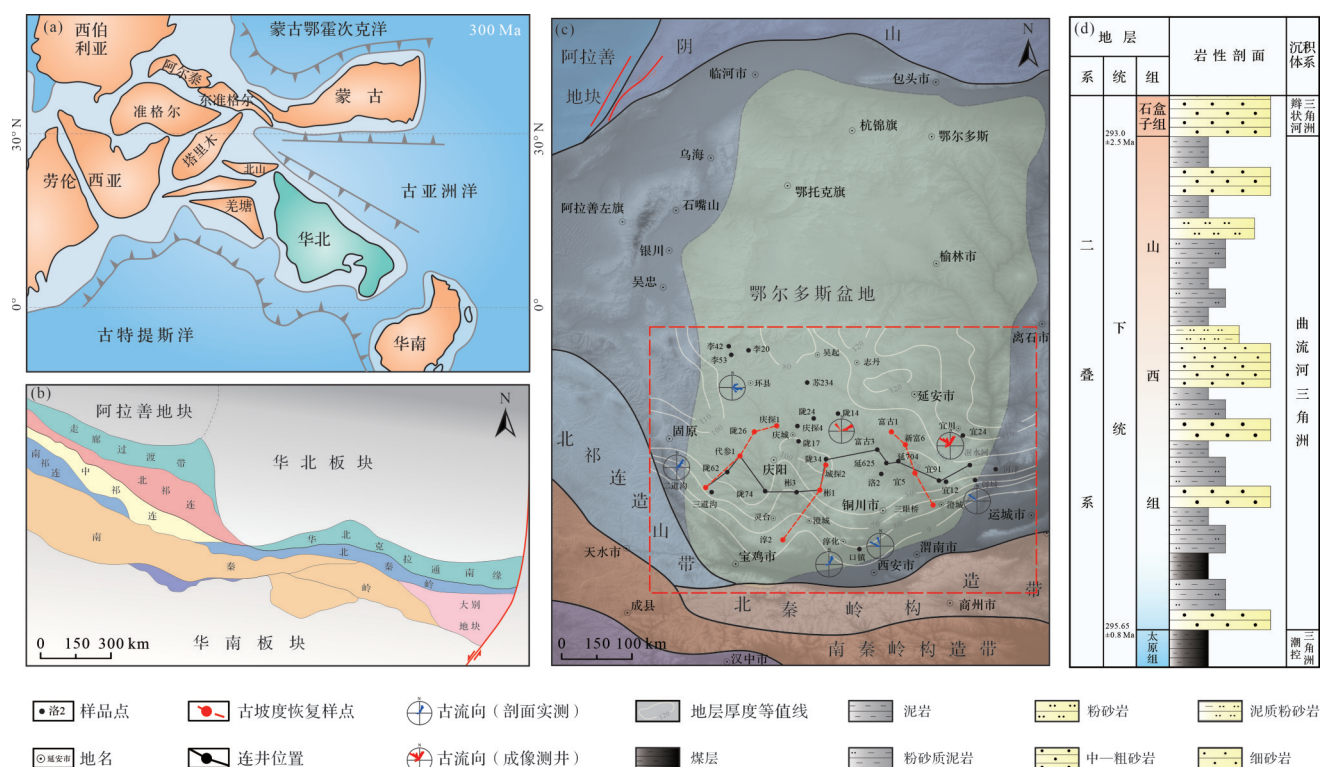


图1 (a) 华北地块 300 Ma 古地理图(据文献[25]修改); (b) 华北板块南部大地构造位置图; (c) 研究区构造位置图(部分古流向结果据文献[14-15]); (d) 地层垂向分布特征(地层及年龄据文献[30]修改)

Fig.1 (a) 300 Ma paleogeographic map of the North China Block (modified from reference [25]); (b) geotectonic location map of the southern North China Plate; (c) tectonic location map of the study area (paleoflow data modified from references [14-15]); (d) vertical strata distribution (strata ages modified from reference [30])

性为粉砂岩、深灰—灰黑色泥岩及中细砂岩互层出现,中下部常有砂岩发育,但其稳定性较差,厚度变化大。在鄂尔多斯地区南部山西组以曲流河三角洲和滨浅海—滨浅湖过渡相沉积为主。三角洲沉积物以灰白色—浅灰色细砂岩为主,滨浅海—滨浅湖沉积物主要为深灰色—灰黑色砂质泥岩^[31]。

2 数据与方法

2.1 样品来源与分析

本研究用于全岩微量、稀土元素分析和锆石 U-Pb 年代学研究的样品源自鄂尔多斯地区南部 6 条剖面 and 31 个钻井岩心(具体样品点位置见图 1c)。为确保实验结果的代表性与可靠性,研究所选取的样品尽可能覆盖整个研究区。在实际采样过程中,优先选择风化蚀变和成岩作用弱的样品,以保证所选样品的可靠性。全岩微量、稀土元素分析在四川省科源工程技术测试中心进行,采用高分辨率等离子体质谱仪(HR-ICP-MS)完成,其分析精度优于 5%;锆石

U-Pb 定年在廊坊诚信地质服务有限公司完成,采用 LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀系统进行 U-Pb 同位素测定。具体的仪器配置与实验方法流程可参见文献[32]。

2.2 数据方法解释

2.2.1 源—汇系统判别

稀土元素是识别物源的重要手段之一,沉积区样本与物源区母岩配分模式曲线基本形态特征的相似性对比是判定源—汇系统范围的常用方法。研究采用 Bonyton^[33]提出的球粒陨石标准化进行处理,并获取不同源—汇系统的 Σ LREE、 Σ HREE、LREE/HREE、 δ Eu 和 δ Ce 等参数。 Σ LREE 和 Σ HREE 分别代表轻、重稀土元素含量和, LREE/HREE 值为轻、重稀土元素的比值,能够反映样品轻、重稀土的分异程度^[34]。同一类岩石中,若该值较大,说明轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损。 δ Eu 和 δ Ce 表示 Eu 和 Ce 的异常程度,当值大于 1 时为正异常,小于 1 时为负异常,等于 1 时为正常。

锆石 U-Pb 法定年广泛运用在大型沉积盆地源—汇系统研究中^[35-36]。该方法可约束地层年龄,识别潜

在物源区、揭示母岩性质,确定造山带抬升剥露的持续时间和速率^[37],重建物源区构造演化史^[38]。通过对比碎屑矿物年龄分布与潜在物源区母岩年龄,可用于寻找潜在物源区,判断沉积物搬运路径,恢复构造运动对盆地充填的控制作用^[39]。Th/U 值与锆石年龄图解被运用于母岩的基本判别,一般情况下, Th/U 大于 0.4 表现为岩浆成因, Th/U 小于 0.1 表现为变质成因^[40]。本研究锆石年龄计算以及谐和图的绘制采用 Isoplot 完成,大于 1.0 Ga 的年龄采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值,小于 1.0 Ga 的年龄选用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值,其中谐和度介于 90%~110% 的锆石被用来统计年龄以生成概率密度分布函数曲线(PDF)^[41]进行视觉分析。此外,研究使用非矩阵多维标度 MDS(Multidimensional scaling)进行批量锆石数据相似(相异)定量分析^[42],它是利用数据之间的相似性对数据进行成分分析,将多维空间中的数据集降维简化投影在低维空间内,并以线连接点的方式呈现,对比研究区样品之间锆石 U-Pb 年龄分布的相似/相异度,能够较好区分具有不同源区特征的沉积物,以确定各源—汇系统交汇范围及其相关物源主次贡献度。绘图采用 IsoplotR 平台^[43],通过计算 MDS 距离生成评估拟合好坏的一种“置信”参数^[42],并形成折线图。连接各样品之间的线条代表样品的相近/相似性,样品之间的实线代表两者最为相近,而样品之间的虚线表明样品之间具有次相关关系,线长与相似性成反比关系。

2.2.2 构造背景判断

沉积岩中微量元素的迁移富集主要受其自身物理化学性质、形成环境以及风化作用过程等因素控制,其含量对沉积环境变化有较高的敏感度,可作为沉积背景识别的重要指标,为沉积物源及古环境恢复和大地构造背景的变迁提供依据^[44]。本文主要根据 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 构造背景三角判别图,区分大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘的源区构造背景及沉积环境^[45-46]。碎屑锆石年龄数据亦可用于约束物源区的构造背景^[47-48],研究将锆石年龄数据利用累积概率分布函数图解(CDF)验证物源相似性并判别其主要构造背景^[47]。具体原理如下:当 CA-DA(碎屑锆石结晶年龄—地层沉积年龄)值在 5% 累计比例下,年龄差值大于 150 Ma,代表沉积背景为拉张伸展环境;反之,则进一步观察在 30% 的累计比例下的 CA-DA 值,当

CA-DA 大于 100 Ma 代表碰撞挤压背景,CA-DA 小于 100 Ma 则为汇聚造山背景。

2.2.3 古厚度(坡度)恢复

沉积(后)坡角由沉积物堆积后形成,反映其沉积方式,一般从其沉积构造或纵向剖面结构得到,而沉积前的地形坡角大小随地形而改变。此外,沉积体系的形成通常有多个期次,前一期的沉积后坡角是后一期的沉积前(古地形)坡角,它不仅是对沉积体系的剖面结构进行分析的关键,同时也是层序地层划分级次的主要判别依据。大地构造背景控制下的古地形特征,直接影响其沉积相类型及特征,因此古地形分析是“源—汇”系统研究的重要部分^[49]。鄂尔多斯盆地山西组内不存在其他剥蚀现象,在后期构造演化中保存较好,地层完整,因此不需要剥蚀量恢复,仅需要通过压实校正来恢复地层原始厚度。本论文结合前人对南部地区古流向的测量结果,选取顺物源区方向的井位,采用压实模拟经验图版计算地层古厚度方法^[50-56](图 2),对研究区山西组原始厚度进行分析,从而计算出该沉积时期的地形坡度。具体步骤为:首先计算出砂地比,结合图版得到古厚度,再根据两口井之间的距离和古厚度差进行地形坡度的计算。

3 结果

3.1 稀土配分模式特征

研究区域轻、重稀土元素分异程度明显,总体表现为轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,配分模式曲线呈左高右低的“右倾型”模式,Ce、Eu 元素均具有不同程度的负异常特征。所有样品在配分模式曲线形态内无明显差异,因此,研究采用统计学方法(聚类分析与相关性分析)对所有稀土样品结果进行分析,环形聚类热图(图 3a)表明所有样本在东西向上具有显著的分异性。结合前人对秦岭、祁连造山带样品稀土元素特征的研究,与研究区样品点的稀土配分模式进行相似性对比筛选,结果表明研究区共可识别出以下 3 类稀土配分模式。(1)宜川—富县地区: ΣLREE 均值为 209.39, ΣHREE 均值为 61.43,轻、重稀土元素之比 LREE/HREE 为 2.66~4.65,平均值为 3.50,分异程度较明显,表明轻稀土元素较为富集。 δEu 均值为 0.79, Eu 负异常且严重亏损; δCe 均值为 1.05, Ce 轻微正异常;(2)耀县—洛川地区: ΣLREE 的均值为 226.91, ΣHREE 均值为

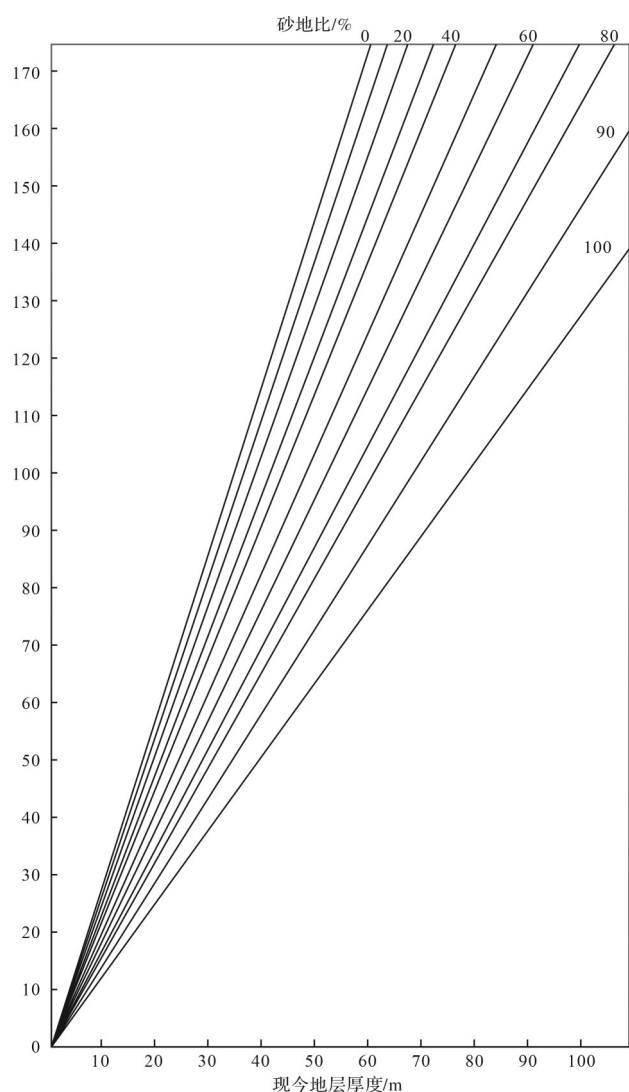


图2 沉积盆地压实模拟算法地层古厚度恢复图版^[49]
Fig.2 Sedimentary basin compaction simulation method paleothickness restoration chart^[49]

54.16, LREE/HREE 为 3.60~5.12, 平均值为 4.34, 轻重稀土发生显著分异, 轻稀土元素富集。 δEu 均值为 0.75, Eu 负异常且严重亏损; δCe 均值为 1.03, Ce 无负异常; (3) 平凉—环县地区: ΣLREE 的均值为 484.43, ΣHREE 均值为 125.89, LREE/HREE 为 3.52~4.21, 平均值为 3.85, 呈现出较强的分异性, 表明轻稀土元素相对富集。 δEu 均值为 0.60, Eu 负异常且严重亏损, δCe 均值为 0.99, Ce 负异常不明显。

基于对样本与源区稀土配分模式特征的差异性对比得出, 研究区存在 3 个方向的物源区(图 3): 宜川—富县地区样品稀土元素配分模式与北秦岭东段涝峪地区花岗闪长岩^[57]稀土元素配分模式具有较强的一致性, 推测研究区物源来自北秦岭东段

(北秦岭东段源—汇系统); 耀县—洛川地区样品稀土元素配分模式与北秦岭西段麟游地区基底^[57]稀土元素配分模式具有较强的一致性, 推测研究区物源来自北秦岭西段(北秦岭西段源—汇系统); 平凉—环县地区样品稀土元素配分模式与北祁连海原地区云母片岩^[58]稀土元素配分模式具有较强的一致性, 推测研究区物源来自北祁连(北祁连源—汇系统)。

3.2 锆石年代学特征

研究对鄂尔多斯地区南部二道沟等 8 处采样点(位置见图 1c)的 665 个锆石测年数据进行图件分析, 相关样品的年龄概率密度分布曲线如图所示(图 4a), 所有年龄数据清晰地记录了新太古代以来华北地区发生的最主要的构造—岩浆事件。根据各数据所处年代可划分为 3 大主要的年龄区间(图 4b), 分别为 323~251 Ma(晚古生代年龄)、550~350 Ma(早古生代年龄)、2 800~1 500 Ma(新太古代—中元古代年龄)。根据稀土配分模式确定的最主要物源归属来看, 各源—汇系统之间的锆石年龄呈现出一定的差异, 结果如下(图 4c): (1) 北秦岭东段源—汇系统内有 12%~19% 的锆石年龄出现在 323~251 Ma 内, 3%~9% 的锆石年龄在 550~350 Ma 内; 其余 74%~85% 的锆石年龄介于 2 800~1 500 Ma, 具有 ~2 500 Ma、~1 800 Ma 两个明显的年龄峰, 所有锆石年龄 Th/U 比值介于 0.03~3.45, 其中比值大于 0.4 的占 81.1%; (2) 北秦岭西段源—汇系统在 323~251 Ma 内的锆石年龄占比较低, 仅为 6%~8%, 1%~3% 的锆石年龄介于 550~350 Ma; 介于 2 800~1 500 Ma 的锆石年龄占比为三大源—汇系统最高, 可达 89%~91%, 具有 ~2 500 Ma 的年龄峰, 所有锆石年龄 Th/U 比值介于 0.06~2.72, 比值大于 0.4 的占 80.6%; (3) 北祁连源—汇系统在 323~251 Ma 内的锆石年龄占比略有增加, 为 9%, 有 4% 的锆石年龄在 550~350 Ma 内; 其余 87% 的锆石年龄均介于 2 800~1 500 Ma, 具有 ~2 500 Ma、~1 800 Ma 两个明显的年龄峰, 所有锆石年龄 Th/U 比值介于 0.01~18.09, 其中比值大于 0.4 的占 78.1%。三大源—汇系统主要锆石年龄峰值区间相同, 表明南部地区主要物质来源组成接近, 但在各年龄区间含量中存在差异, 此外, 碎屑锆石 Th/U 多数大于 0.4, 表明样品所有锆石普遍具岩浆成因特点。

3.3 源区构造背景特征

利用 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 判别图

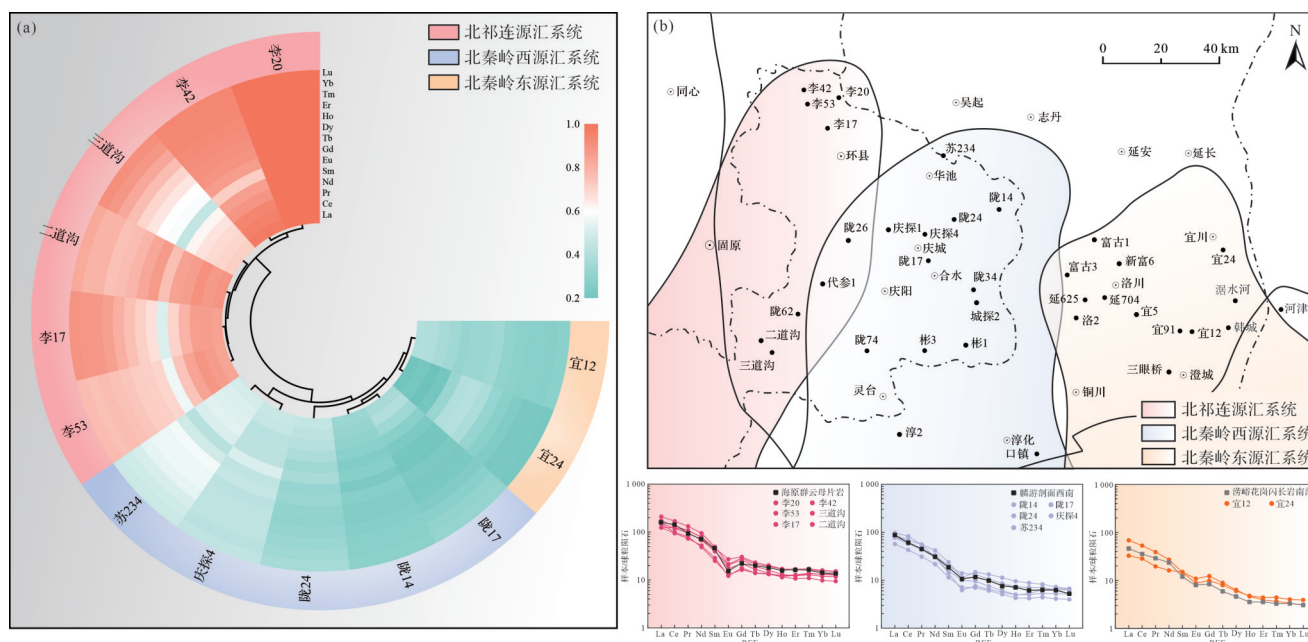


图3 (a)稀土元素数据环形聚类热图(图件使用 <https://www.chiplot.online> 平台绘制);

(b)各源—汇系统山西组稀土元素特征

Fig.3 (a) Ring cluster heat map data of REE (drawn using <https://www.chiplot.online>); (b) distribution of REEs in different source to sink systems of the Shanxi Formation in the study area

对鄂尔多斯地区南部沉积岩样分析结果进行投点,以明确不同物源区构造背景,三类构造判别图解结果基本一致(图5):(1)北秦岭东段源—汇系统在主动大陆边缘和被动大陆边缘的区域与大陆岛弧均有显示,但总体以主动大陆边缘为主(图5a);(2)北秦岭西段源—汇系统以主动大陆边缘与大陆岛弧为主,偶见落入被动大陆边缘环境的样品点(图5a,b);(3)北祁连源—汇系统主要表现为主动大陆边缘与被动大陆边缘的混合背景,偶见大陆岛弧背景样品点落入(图5a,b)。图5c大部分点都落在了主动大陆边缘区域,少量落在了大陆岛弧区域。综上研究认为鄂尔多斯地区南部各物源区构造背景以主动大陆边缘为主,被动大陆边缘次之。

碎屑锆石累计年龄概率曲线图显示(图6):南部地区所有锆石样品(二道沟、苏234、城探2、口镇、洛2、宜24、韩城、河津)前5%年轻的碎屑锆石结晶年龄与地层沉积年龄^[28]之差都小于150 Ma,前30%年轻的碎屑锆石结晶年龄与地层沉积年龄之差均大于100 Ma,表明整个南部地区在山西组沉积期均以碰撞挤压背景(B类型)为主,南部不同物源体系构造活动相对一致,均表现为碰撞挤压背景下的主动大陆边缘,并未出现明显的造山作用。

3.4 古坡度及沉积体系特征

通过选取南部地区山西组近东西向的10口钻井与两处剖面,对该区域砂体的横向展布特征进行分析(图7a),可识别出3大源—汇系统的物源通道及彬3井、延625井两处分水岭。综合前文中对源—汇系统边界的刻画,参考前人对鄂尔多斯地区沉积体系的认识^[28,63],建立了如图7b所示的南部地区沉积相平面特征展布图,研究认为山西组沉积时期研究区主要为曲流河三角洲沉积体系,广泛发育三角洲平原和三角洲前缘两种亚相,三大源—汇系统分别发育:平凉二道沟三角洲(北祁连物源体系)、淳化口镇三角洲(北秦岭西物源体系)、韩城三角洲(北秦岭东物源体系)。各源汇系统内地层厚度具有明显差异,整体呈西厚东薄的特点,具体特征如下:(1)北秦岭东段源—汇系统内具有早期相对贫砂晚期富砂的特征,砂体连通性较好,单河道砂体厚度介于2~7 m,因河道侧向迁移,叠置河道宽度逐渐增大;在延704井处砂体最为发育,为主河道部位,属于三角洲平原到前缘过渡带;(2)北秦岭西段源—汇系统处于东西沉积体系交汇区,单砂体厚度较大,其内部复合砂体由多期次单砂体垂向叠置而成,表现为早期富砂晚期减少的特征,砂体横向连通性中等,在陇34井处沉积厚度与单砂体厚度均为最大,单砂体厚度可至17 m;

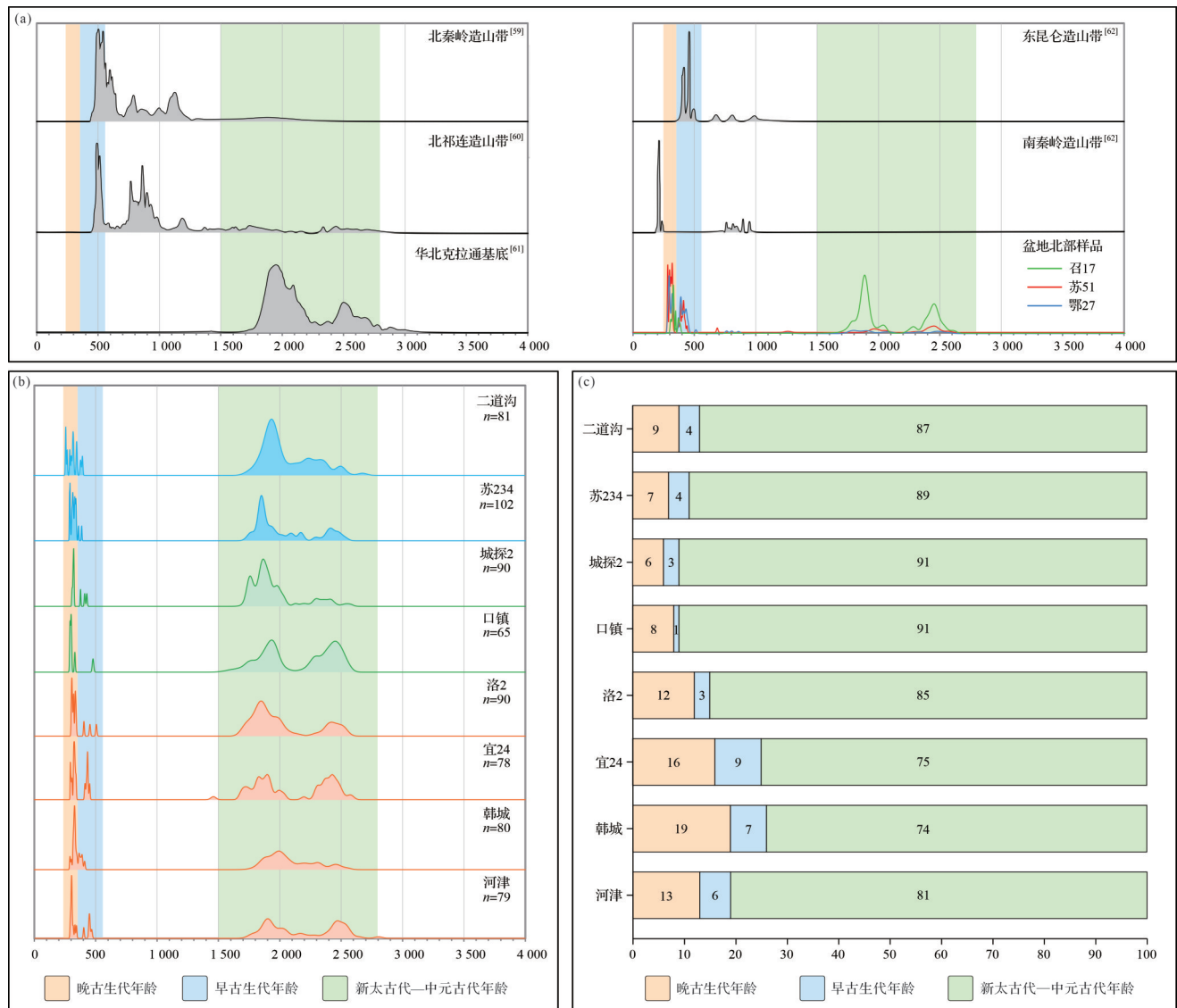


图4 山西组碎屑锆石年龄谱图及年龄组分统计图(源区数据来自文献[59-62])

(a)潜在源区碎屑锆石U-Pb年龄谱;(b)样本碎屑锆石U-Pb年龄组;(c)样本碎屑锆石年龄组占比

Fig.4 Age spectrum and composition for detrital zircons from Shanxi Formation (source data from references [59-62])

(a) U-Pb age spectrum of detrital zircons from potential source areas;(b) detrital zircon U-Pb age groups in the sample;(c) the proportion of detrital zircon age groups in the sample

(3)北祁连源—汇系统砂体表现为西多东少的特征,砂体连通性中等,单砂体厚度介于3~5 m,富砂带表现为向东迁移,为多期中—薄层河流三角洲前缘沉积。

研究选取顺物源方向11口井/剖面,重点对典型标志层北岔沟砂岩所在的山2段的现今厚度数据以及砂地比含量进行了统计,恢复三大最主要三角洲沉积体系的古坡度(表1)。结果表明:(1)宜川—富县地区(北秦岭东段源—汇系统)南北向顺物源方向平均古坡度大致为0.048°;(2)耀县—洛川地区(北秦岭西段源—汇系统)平均古坡度大致为0.040°;

(3)平凉—环县地区(北祁连源—汇系统)平均古坡度大致为0.045°。整体地形平缓,水动力较弱。

4 讨论

4.1 源—汇系统特征差异

源—汇系统的空间分异性是源区、陆源碎屑供给、水动力过程和颗粒性质共同作用的结果^[64-65]。稀土元素在经过搬运沉积后仍具有很强的继承性,极大程度地代表着物源区属性,尽管研究区三大源—汇系统均表现为轻稀土富集、重稀土亏损的共性,但结合具体数据可知北秦岭西段轻、重稀土元素分馏

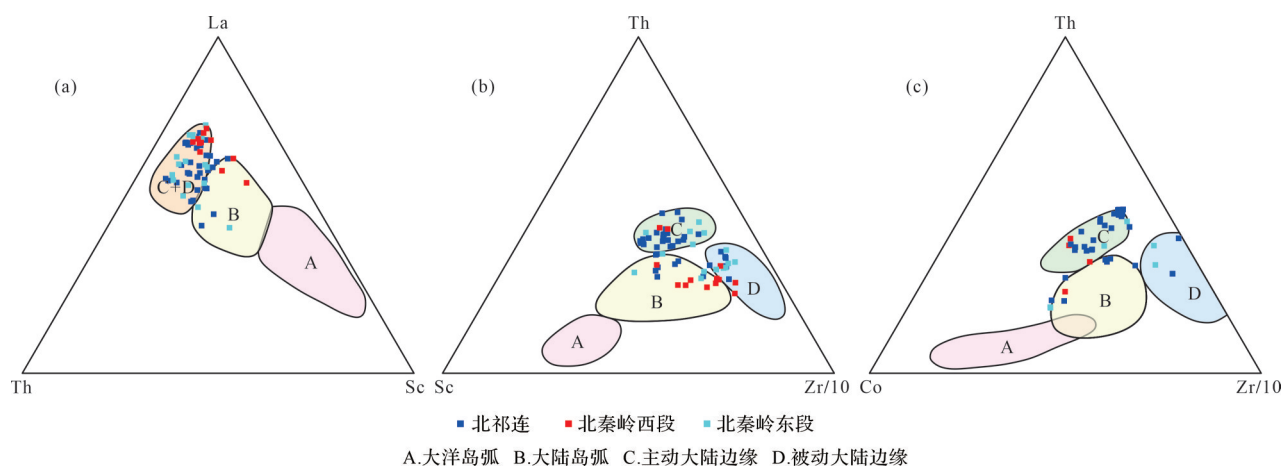


图5 (a) La-Th-Sc、(b) Th-Co-Zr/10、(c) Th-Sc-Zr/10 构造背景判别投点图

Fig.5 Triangular plots of tectonic background of (a) La-Th-Sc, (b) Th-Co-Zr/10, (c) Th-Sc-Zr/10

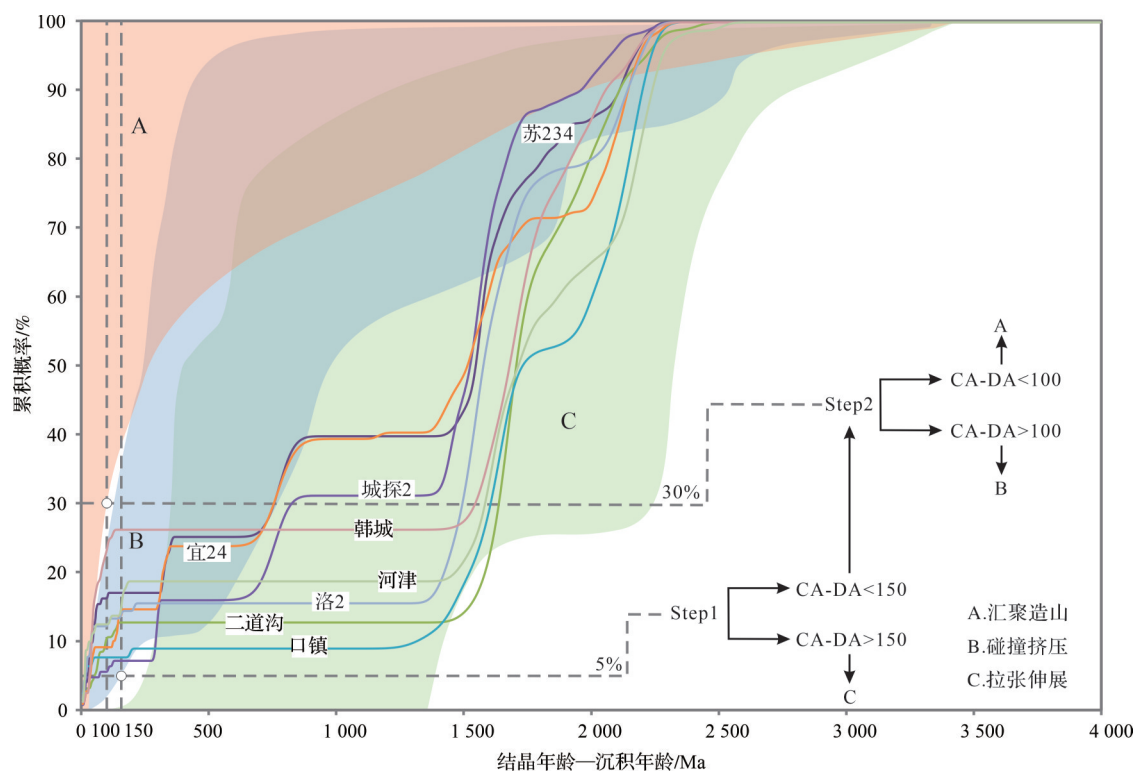


图6 山西组碎屑锆石年龄构造分类图解(底图据文献[47]修改)

Fig.6 Detrital zircon age structure classification for Shanxi Formation (base map modified from [47])

程度明显高于其余两大源—汇系统,推测为在沉积过程中稀土元素的分异程度受到混合、均化等作用的影响^[66]。此外,南部地区在早二叠世之前具有较多的火山活动^[14],而火山碎屑对重稀土具有一定稀释作用,会导致轻、重稀土元素分异更加显著,因此秦岭造山带东段较高的LREE/HREE可能指示了物源区在此时更强烈的构造运动,从而为研究区带来了充足的火山碎屑物质。结合研究区可能物源区的锆石

年龄曲线(图4),可得秦岭—祁连造山带与华北克拉通基底不具有晚古生代(323~251 Ma)的锆石年龄,结合前人在研究区以北样品的锆石年龄研究结果^[67-68],我们认为其主要成因与秦岭古洋盆内勉略洋向北的俯冲作用密切相关,该俯冲作用引发的弧—陆碰撞事件,进一步催生了相应的火山岩以及花岗岩事件^[69-70],该年龄在北秦岭—北祁连—东昆仑中的锆石年龄中均有出现(图4a)。考虑到东昆仑造山带

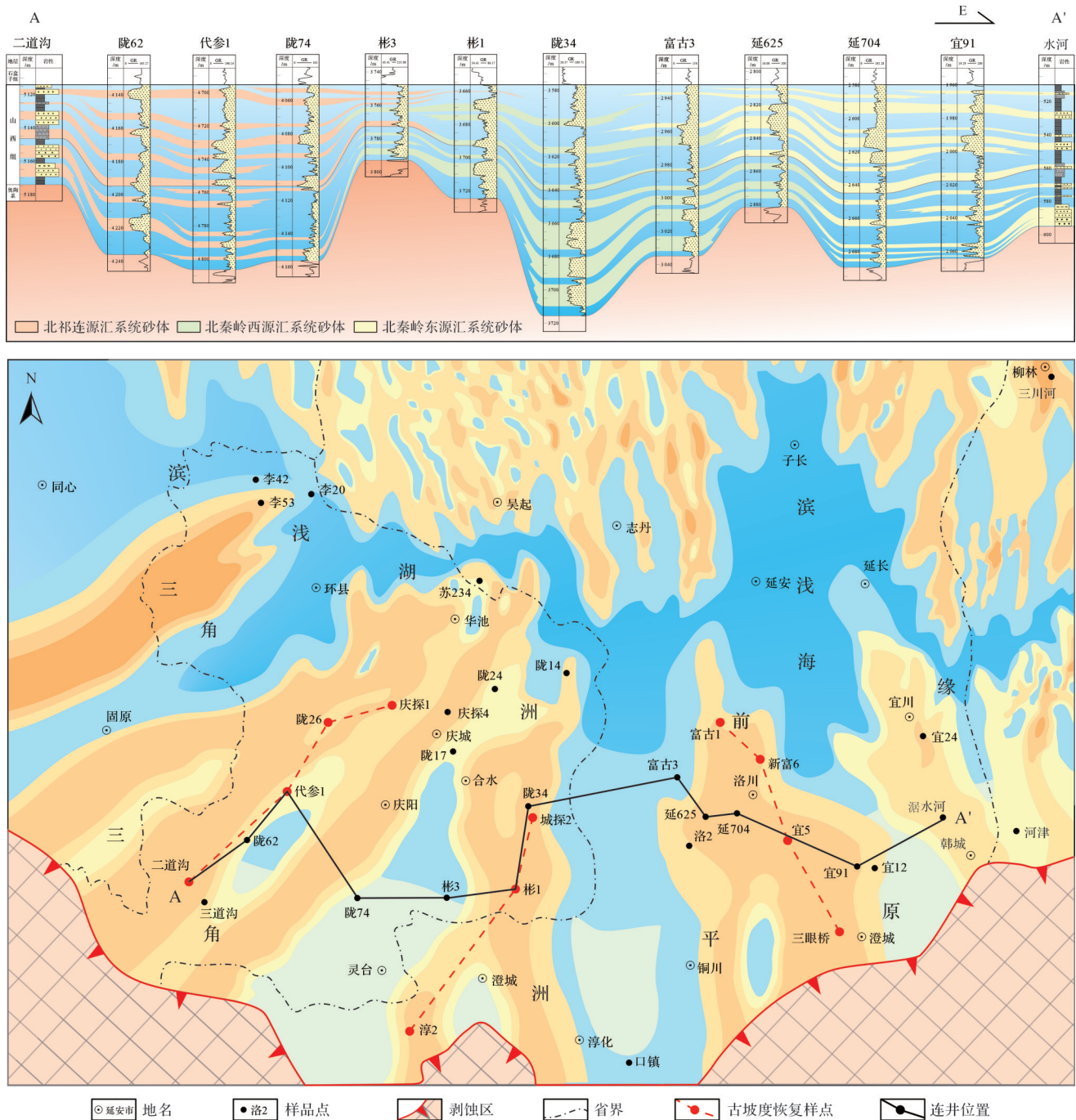


图7 (a)二道沟—沮水河砂体连井图(A—A');(b)南部地区沉积相图(据文献[28, 63]修改)

Fig.7 (a) Erdaogou-Jushuihe sandy sediments connection diagram (A-A'); (b) sedimentary facies map of southern region (modified from references [28, 63])

与南部地区距离过大,位置更近的南秦岭造山带不具有早古生代年龄,且其年龄曲线特征与最西端的二道沟样品差异较大,因此不认为研究区具有来自该处的物质。早古生代年龄的物源应该均出自祁连造山带与北秦岭造山带。此外,~1 800 Ma、~2 500 Ma的新太古代—中元古代年龄贡献通常被认为是来

自华北克拉通基底^[69]。图4b显示,在北秦岭东、西段源汇系统内的样品中,323~251 Ma的年龄与500~400 Ma的年龄占比均具有东高西低的特点,而~1 800 Ma、~2 500 Ma年龄占比与之相反。表明在此时期北秦岭东段的供源能力更强,其隆升程度应大于华北克拉通南缘;而在北秦岭西段源汇系统中,华

表1 南部地区三角洲古坡度恢复

Table 1 Recovery of ancient slope of delta in southern region

范围	平凉—环县地区				耀县—洛川地区				宜川—富县地区		
位置	二道沟	代参1	陇26	庆探1	淳2	彬1	城探2	三眼桥	宜5	新富6	富古1
现今厚度/m	22.00	57.90	52.00	54.00	35.00	37.10	46.00	18.00	29.40	52.00	54.60
砂岩厚度/m	15.00	38.88	26.00	17.00	20.25	21.00	16.50	12.49	12.25	25.37	17.00
砂地比	0.682	0.672	0.500	0.315	0.579	0.566	0.359	0.694	0.417	0.488	0.311
恢复古厚度/m	41	98	109	141	71	74	115	32	69	110	126
距离/m	60.805	36.017	28.839	81.260	30.227	52.007	34.787	25.660			
角度/(°)	0.054	0.017	0.064	0.002	0.078	0.041	0.068	0.036			

北克拉通南缘隆升程度更高,为研究区提供更多物源;向西至北祁连源汇系统,基底供源能力略有减弱,北部造山带与北祁连造山带的供源略有增强。华北克拉通南缘基底为研究区提供了74%~91%的物质来源,是整个研究区最主要的物源。北部造山带物源在所有样本里均有出现,但东侧占比更高、西侧次之,中部最低,表明在山西期北部中亚造山带物源实际已影响全区,其中在东侧延伸范围更大。古坡度结果表明,研究区整体地形平缓,具有中间较缓、两侧略陡的特征,水动力较弱,因此在南部地区以曲流河三角洲沉积为主,其内部砂体以水下分流河道砂体为主。在北秦岭西段源汇系统内,纵向上河道逐渐加宽,单河道砂体厚度减小,砂体多向两侧尖灭于泥岩内,表明三角洲逐渐向水下延伸,水动力条件减弱,供源减小,以三角洲前缘沉积为主;而北祁连源—汇系统与北秦岭东段源—汇系统单砂体厚度较小,但多期叠置发育,且在平面内具有较强的连通性,以三角洲平原向前缘过渡为主。此外,在三大源汇系统中北秦岭东段源—汇系统平均古坡度角最大,也充分表明其源区(北秦岭东段)具有更高的隆升程度,受到更强烈的剥蚀作用。

4.2 不同源—汇系统间的交互影响

为了进一步进行直观对比不同源—汇系统的锆石 U-Pb 数据,对上述锆石年龄数据进行非矩阵多维标度(MDS)统计分析以进一步明确其相关性(图8)。所有样品在 MDS 图中具有显著的分异程度。其中河津、洛2、宜24 锆石年龄成分高度相似,表现出强亲缘关系,结合前文结果可认为来自同一源区,推测以北秦岭东段供源为主;口镇与城探2 具有强亲缘关系,应共同接受北秦岭西段供源,洛2 与口镇、城探2 均表现出一定的相似性,可推测洛2 处于北秦岭东、西段两大源汇系统的交汇区,但相较更倾向于北秦岭东段供源;苏234 与二道沟在图中表现出强相似

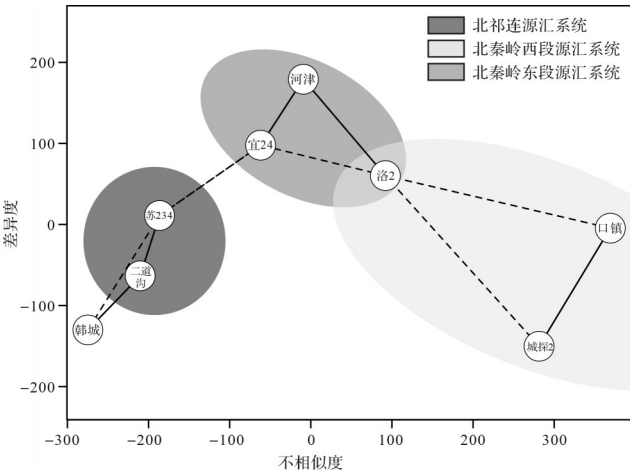


图8 碎屑锆石 U-Pb 年龄非矩阵多维标度(MDS)统计分析图

样品点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.8 Statistical analysis of detrital zircon U-Pb age on non-matrix multidimensional scale (MDS)

性,可认为二者主要接受来自北祁连的物源。此外,韩城与二道沟也表现出一定的相似性,考虑到韩城与二道沟的实际距离相差较远,二者之间的弱相似性应仅局限于部分年龄组合的相似,但与共同物源无关。在所有南部样品点内,口镇与城探2 井样品离散于其余样品点,研究认为这主要与其位置偏南,极少受到北部中亚造山带的影响有关。

5 多“源—汇”系统背景下的沉积充填模式

综合上述构造、地貌、沉积等单元要素特征,本文从板块级别尺度建立了鄂尔多斯地区及周缘的构造—沉积模式(图9)。从板块尺度来看,山西组沉积时期所在的晚古生代处于潘基亚超大陆聚合的关键阶段,在此阶段中北半球多个板块(华北、波罗的、西伯利亚、塔里木、哈萨克斯坦)向中纬度地区汇聚,包

括华北板块在内的多个板块在晚古生代具有顺时针漩涡运动的轨迹,在汇聚与旋转的过程中板块间洋盆逐渐闭合^[71],致使北部地区造山作用逐渐增强。南部地区受秦岭—祁连造山带的影响,微量元素投点及锆石累积曲线均表现出以碰撞挤压为主的主动大陆边缘背景,反映南北秦岭地体之间的勉略洋盆持续的向北俯冲^[72]。4.1 小节结论表明,秦岭造山带东段供源能力强,为研究区输送了更多的火山碎屑物质,故其隆升程度应大于华北克拉通南缘以至于受到更强的剥蚀作用,因此研究推测秦岭造山带东段在山西组沉积期具有更高的地形,秦岭造山带的隆升程度应具有东高西低的特征(图9),这与古坡度结果相一致。祁连造山带隆升程度高于北秦岭西侧但低于北秦岭东侧,该差异结果应当与上述华北板块顺时针旋转导致勉略洋盆俯冲过程中东西向的相对强弱程度有关^[71-72]。在上述汇聚、旋转过程的持续影响中,整个华北陆块被持续抬升,以往研究中提及的“北高南低”的结论可认为是古亚洲洋、勉略洋俯冲/碰撞的先后顺序以及强弱程度差异所致^[73]。受区域

性挤压作用,鄂尔多斯地区形成以三角洲沉积体系为主的海陆过渡环境,山西组初期海水从东南部迅速退却,在现今山西—河南局部地区残余潮坪—开阔台地等海相沉积,至晚期正式进入陆相沉积^[74]。山西组沉积期在全球尺度内属于冰期至间冰期过渡,在鄂尔多斯地区南部三角洲相与滨浅海至滨浅湖的过渡为山西组的主要沉积环境^[14,63]。早二叠世以来大气中CO₂含量逐渐回升,至290 Ma后CO₂含量快速增加,气温回升^[75],在晚古生代后半阶段(305~270 Ma)潘基亚超大陆赤道区域具有长时间的干旱化趋势,且自西向东扩张作用于华北板块所在的东冈瓦纳地区,使得鄂尔多斯地区在山西组沉积期具有温暖潮湿、但逐渐向炎热干旱过渡的趋势^[76]。该条件有利于植物快速生长,大量的植物起到很好的水土固结作用,一定程度阻挡了物源供给,使得河流的侧向迁摆动力不足,水动力条件较弱,坡度整体较小,发育广泛的曲流河三角洲相^[56]。而此时来自北部的三角洲体系规模不断变大,局部已经达到延长一定边地区,与南部三角洲沉积体系相交汇,古地形坡

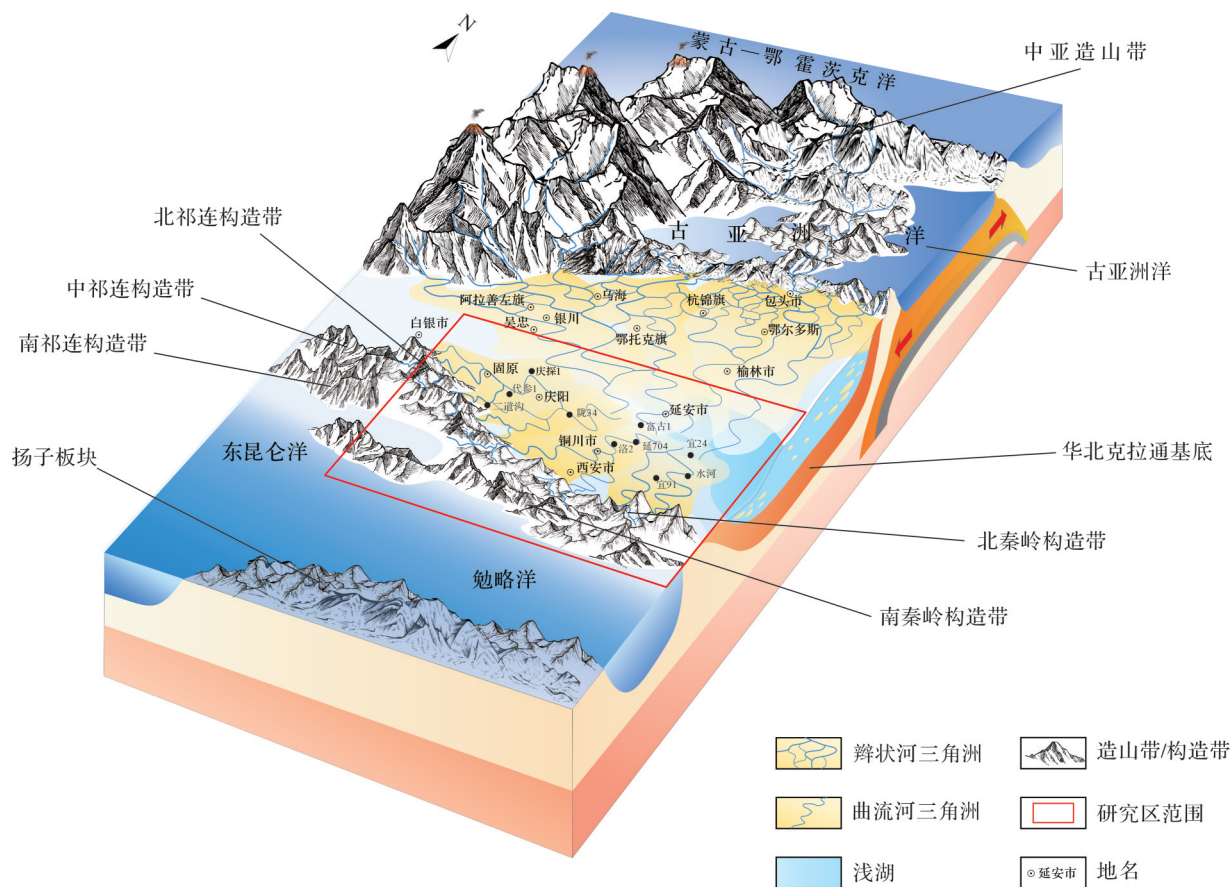


图9 鄂尔多斯地区山西组构造—沉积模式图

Fig.9 Tectonic/sedimentary model of Shanxi Formation in Ordos region

度的陡缓在很大程度上决定着沉积时水动力的强弱:坡度越大,水动力越强,则其控制的三角洲面积越小,因此在宜川—富县地区发育的三角洲延伸规模最小。另一方面从锆石年龄占比结果来看,该区域所对应的北秦岭东段源—汇系统接受了更多的北部中亚造山带物质,北部物源的推进在一定程度上制约了南部三角洲的发育规模。正南部耀县—洛川三角洲平面展布最广,而西南部平凉—环县三角洲延伸至泾川—环县以西地区,展布范围中等。总体来看,北秦岭东段源汇系统早期贫砂晚期富砂,以三角洲平原到前缘过渡带为主,三角洲延伸规模最小;北秦岭西段源汇系统则早期富砂晚期贫砂,以三角洲前缘沉积为主,三角洲延伸范围最广;而北祁连源汇系统砂体垂向上厚度较为均一,但随着供源增强横向展布范围扩大,以三角洲平原向前缘过渡沉积为主。

6 结论

(1) 鄂尔多斯地区南部山西组可识别北祁连、北秦岭西与北秦岭东三大源—汇系统,均表现为Eu严重亏损,其中北祁连源—汇系统轻稀土元素相对富集, δEu 均值为0.60,顺物源方向平均古坡度约为 0.045° ;北秦岭西段源—汇系统轻稀土元素明显富集, δEu 均值为0.75,顺物源方向平均古坡度约为 0.040° ;北秦岭东段源—汇系统轻稀土元素较为富集, δEu 均值为1.05,顺物源方向平均古坡度约为 0.048° 。

(2) 锆石年龄占比显示华北克拉通基底为最主要物源,其次为北秦岭、北祁连造山带与中亚造山带物源。中亚造山带在山西组实际已影响全区,其中在北秦岭东段源—汇系统占比更高。洛2井附近为北秦岭东、西段物源的交汇区域。

(3) 南部地区山西组总体主要为主动大陆边缘环境,被动大陆边缘次之。伴随着勉略洋盆向北俯冲、板块持续汇聚的大地构造背景,北秦岭东段隆升剥蚀作用更强烈,沉积物供给量更大,北祁连造山带隆升程度中等,北秦岭西段隆升程度最低。

(4) 北秦岭东段源汇系统在山西晚期相对富砂,以三角洲平原到前缘过渡沉积为主,延伸规模最小;北秦岭西段源汇系统表现为早期富砂晚期贫砂,以三角洲前缘沉积为主,延伸范围最广;北祁连源汇系统则以三角洲平原向前缘过渡沉积为主,延伸范围

适中。

致谢 中国石油长庆油田为本文提供的样品与部分数据,三位评审专家及编辑部老师对本文提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] Meade R H. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States[J]. *The Journal of Geology*, 1982, 90(3): 235-252.
- [2] 杨守业,韦刚健,石学法. 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 902-910. [Yang Shouye, Wei Gangjian, Shi Xuefa. Geochemical approaches of tracing source-to-sink sediment processes and environmental changes at the East Asian continental margin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 902-910.]
- [3] 解习农,林畅松,李忠,等. 中国盆地动力学研究现状及展望[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 877-887. [Xie Xinong, Lin Changsong, Li Zhong, et al. Research reviews and prospects of sedimentary basin geodynamics in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 877-887.]
- [4] 刘腾,陈刚,徐小刚,等. 物源分析方法及其发展趋势[J]. *西北地质*, 2016, 49(4): 121-128. [Liu Teng, Chen Gang, Xu Xiaogang, et al. Methods and development trend of provenance analysis[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(4): 121-128.]
- [5] Allen P A, Armitage J J, Carter A, et al. The Q_s problem: Sediment volumetric balance of proximal foreland basin systems[J]. *Sedimentology*, 2013, 60(1): 102-130.
- [6] Bhattacharya J P, Copeland P, Lawton T F, et al. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 77-110.
- [7] Wu H C, Zhang S H, Hinnov L A, et al. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial Upper Santonian-Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 407: 82-95.
- [8] Lin C S, Jiang J, Shi H S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: Responses to tectonic processes and changes in sea level[J]. *Basin Research*, 2018, 30(Suppl. 1): 568-595.
- [9] Xie X N, Ren J Y, Pang X, et al. Stratigraphic architectures and associated unconformities of Pearl River Mouth Basin during rifting and lithospheric breakup of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40(2): 129-144.
- [10] 林畅松,刘景彦,胡博. 构造活动盆地沉积层序形成过程模拟:以断陷和前陆盆地为例[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 868-874. [Lin Changsong, Liu Jingyan, Hu Bo. Computer simulation on the formation of depositional sequences in tectonic active

- basin: Case study on rift and foreland basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 868-874.]
- [11] 朱筱敏,陈贺贺,葛家旺,等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 746-762. [Zhu Xiaomin, Chen Hehe, Ge Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 746-762.]
- [12] 张志杰,周川闽,袁选俊,等. 准噶尔盆地二叠系—汇系统与古地理重建[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 3006-3023. [Zhang Zhijie, Zhou Chuanmin, Yuan Xuanjun, et al. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in Junggar Basin, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 3006-3023.]
- [13] 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1851-1870. [Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental Basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.]
- [14] 蒋子文. 鄂尔多斯盆地南部上古生界山1—盒8段物源分析及盆山耦合关系研究[D]. 西安:西北大学, 2020. [Jiang Ziwen. The study of provenance and basin mountain coupling of Shan 1-H8 member, Upper Palaeozoic, southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.]
- [15] 崔凯. 鄂尔多斯盆地南部上古生界山1—盒8段物源及其对盆地南部沉积充填格局的影响[D]. 西安:西北大学, 2019. [Cui Kai. Provenance of the Upper Paleozoic Shan1-He 8 Formation in southern Ordos Basin and its influence on the sedimentary filling pattern[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]
- [16] 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 Shuaikang, 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.]
- [17] 徐延勇,申建,张兵,等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界致密气成藏条件差异性分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 577-583. [Xu Yanyong, Shen Jian, Zhang Bing, et al. Analysis on differences of tight gas accumulation conditions of Upper Paleozoic in central and eastern Ordos Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 577-583.]
- [18] 陈洪德,李洁,张成弓,等. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2213-2229. [Chen Hongde, Li Jie, Zhang Chenggong, et al. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2213-2229.]
- [19] 郭旭升,周德华,赵培荣,等. 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023. [Guo Xusheng, Zhou Dehua, Zhao Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1013-1023.]
- [20] 张春林,张嘉琪,宋泽章,等. 鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组煤系气成藏地质条件与资源潜力预测[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 110-124. [Zhang Chunlin, Zhang Jiaqi, Song Zechang, et al. Gas accumulation conditions and resource potential in coal measure strata of the Permian Shanxi Formation in the eastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 110-124.]
- [21] 彭思钟,刘德勋,张磊夫,等. 鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县地区山西组页岩岩相与沉积相特征[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 47-59. [Peng Sizhong, Liu Dexun, Zhang Leifu, et al. Shale lithofacies and sedimentary facies of the Permian Shanxi Formation, Daning-Jixian area, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(1): 47-59.]
- [22] 贺敬聪. 鄂尔多斯盆地陇东地区盒8段—山1段“源—汇”系统研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2017. [He Jingcong. "Source-to-sink" system research of He8-Shan1 member in Longdong area, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.]
- [23] 张雷,赵培华,侯伟,等. 鄂尔多斯盆地东缘山西组山₂³亚段泥页岩地球化学特征与沉积环境[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(2): 181-193. [Zhang Lei, Zhao Peihua, Hou Wei, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of mudshale in Shan₂³ sub-member of Shanxi Formation, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(2): 181-193.]
- [24] 郭佩,刘池洋,王建强,等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 46-56. [Guo Pei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Considerations on the application of detrital-zircon geochronology to sedimentary provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 46-56.]
- [25] Zhang D H, Huang B C, Meert J G, et al. Micro-blocks in NE Asia amalgamated into the unified Amuria block by ~300 Ma: First paleomagnetic evidence from the Songliao block, NE China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(10): e2021JB022881.]
- [26] Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477-507.]
- [27] 陈刚,王志维,白国娟,等. 鄂尔多斯盆地中生代峰值年龄事件及其沉积—构造响应[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 375-383. [Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Guojuan, et al. Meso-Cenozoic peak-age events and their tectono-sedimentary response in the Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2007, 34(3): 375-383.]
- [28] 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]. 古地理论, 2021, 23(1): 39-52. [Li Wenhui, 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.]
- [29] 翟咏荷, 何登发, 开百泽. 鄂尔多斯盆地及邻区中—晚二叠世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 32-44. [Zhai Yonghe, He Dengfa, Kai Baize. Tectonic-depositional environment and prototype basin evolution of Middle-Late Permian in Ordos Basin and adjacent areas[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 32-44.]
- [30] 申博恒, 沈树忠, 吴琼, 等. 华北板块石炭纪—二叠纪地层时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1181-1212. [Shen Boheng, Shen Shuzhong, Wu Qiong, et al. Carboniferous and Permian integrative stratigraphy and timescale of North China Block[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1181-1212.]
- [31] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604. [Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604.]
- [32] 孙建平. 鄂尔多斯盆地南部太原组—山西组沉积相及页岩气勘探潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 9-10. [Sun Jianping. Research on Taiyuan Formation-Shanxi Formation sedimentary facies and potential shale gas exploration[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017: 9-10.]
- [33] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- [34] 李军, 桑树勋, 林会喜, 等. 渤海湾盆地石炭二叠系稀土元素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 589-596. [Li Jun, Sang Shuxun, Lin Huixi, et al. REE characteristics and its geological significance of the Permo-Carboniferous in Bohaiwan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 589-596.]
- [35] Carlson R W. Absolute age determinations: Radiometric[M]// Gupta H K. Encyclopedia of solid earth geophysics. Dordrecht: Springer, 2011: 1-8.
- [36] 蒋一鸣. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组碎屑锆石 U-Pb 年龄及米兰科维奇旋回: 对源—汇系统及沉积演化的约束[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 133-140. [Jiang Yiming. Detrital zircon U-Pb age and milankovitch cycles of Pinghu Formation in the Pinghu Slope of Xihu Depression: Constraints on source-sink system and sedimentary evolution[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 133-140.]
- [37] Rahl J M, Ehlers T A, Van Der Pluijm B A. Quantifying transient erosion of orogens with detrital thermochronology from syntectonic basin deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 256(1/2): 147-161.
- [38] Dickinson W R, Gehrels G E. U-Pb ages of detrital zircons from Permian and Jurassic eolian sandstones of the Colorado Plateau, USA: Paleogeographic implications[J]. Sedimentary Geology, 2003, 163(1/2): 29-66.
- [39] 陈星渝, 张志杰, 万力, 等. 深时源—汇系统要素的常用定量分析方法[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 89-107. [Chen Xingyu, Zhang Zhijie, Wan Li, et al. Quantitative analysis methods of source-to-sink systems in deep time and its progress[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 89-107.]
- [40] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [41] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [42] Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [43] Vermeesch P. Multi-sample comparison of detrital age distributions[J]. Chemical Geology, 2013, 341: 140-146.
- [44] 杨江海, 杜远生, 朱杰. 甘肃景泰崔家墩下奥陶统阴沟组砂岩化学组分特征及物源区构造背景判别[J]. 古地理论, 2007, 9(2): 197-206. [Yang Jianghai, Du Yuansheng, Zhu Jie. Chemical component characteristics of sandstone and recognition to provenance tectonic setting of the Yingou Formation of Lower Ordovician at Cuijiadun section, Jingtai county of Gansu province[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(2): 197-206.]
- [45] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255-1269. [He Dengfa, Bao Hongping, Kai Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 42(10): 1255-1269.]
- [46] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- [47] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40(10): 875-878.
- [48] 蔡芃睿, 王涛, 王宗起, 等. 大兴安岭中段乐平统一—中三叠统沉积物源分析: 来自重矿物组合及碎屑锆石年代学证据[J]. 岩石学报, 2019, 35(11): 3549-3564. [Cai Pengrui, Wang Tao, Wang Zongqi, et al. Lopingian to Middle Triassic provenance analysis of sedimentary rocks in the Middle segment of the Da Hinggan Mountains: Evidence from the heavy mineral assemblage and the detrital zircon U-Pb ages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(11): 3549-3564.]
- [49] 魏永佩, 陈会鑫. 沉积盆地碎屑岩原始厚度恢复经验图版: 一种快速实用的方法[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 90-93. [Wei Yongpei, Chen Huixin. Recovering plate on initial thickness of clastic rocks in sedimentary basins: A quick and

- practical method[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 90-93.]
- [50] 关振良. 利用压实模拟计算地层古厚度及差异压实量的尝试[J]. *石油实验地质*, 1992, 14(2): 152-158. [Guan Zhenliang. An attempt to calculate the primary thickness and the amount of differential compaction in a Formation with an application of compaction simulations[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1992, 14(2): 152-158.]
- [51] Wang J, He X Z, Pfefferkorn H W, et al. Compaction rate of an early Permian volcanic tuff from Wuda coalfield, inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2013, 87(5): 1242-1249.
- [52] 翁望飞. 鄂尔多斯盆地早白垩世原始地层厚度恢复及后期改造对矿产成矿(藏)的影响[D]. 西安: 西北大学, 2005. [Weng Wangfei. The influence of Early Cretaceous original thickness restoration and Late transformation on mineral mineralization (accumulation) in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2005.]
- [53] 张家强, 李士祥, 周新平, 等. 志丹地区长8₂砂层组缓坡浅水三角洲前缘砂体发育模式及成因[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(1): 36-50. [Zhang Jiaqiang, Li Shixiang, Zhou Xinping, et al. Development pattern and genesis of gentle slope shallow water delta front sand bodies of Chang 8₂ sand set in Zhidan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(1): 36-50.]
- [54] 程昊峰, 李三忠, 彭光荣, 等. 珠江口盆地始新统“源—渠—汇”分析: 以阳江东凹和开平凹陷为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 124-136. [Cheng Haohao, Li Sanzhong, Peng Guangrong, et al. Eocene “provenance-channel-sink” analysis of Pearl River Mouth Basin: A case study of eastern Yangjiang Sag and Kaiping Sag[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 124-136.]
- [55] 杨哲翰, 刘江艳, 吕奇奇, 等. 古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 146-158. [Yang Zhehan, Liu Jiangyan, Lü Qiqi, et al. Paleogeomorphological restoration and its control on gravity flow sand bodies: A case study of the Chang 7₃ submember of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 146-158.]
- [56] 赵晨帆, 于兴河, 付超, 等. 曲流河三角洲—辫状河三角洲控制因素及演化过程探讨[J]. *沉积学报*, 2019, 37(4): 768-784. [Zhao Chenfan, Yu Xinghe, Fu Chao, et al. Control factors and evolution progress of depositional system transition from meandering river delta to braided river delta: Case study of Shan2 member to He8 member, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4): 768-784.]
- [57] 刘春雷, 袁珍, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组沉积物稀土元素地球化学特征及其应用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(2): 267-273. [Liu Chunlei, Yuan Zhen, Li Wenhong, et al. Rare earth elemental characteristics of Yanchang Formation sediment in southeast of Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(2): 267-273.]
- [58] 李天斌, 张学文, 王成, 等. 北祁连山东段海原一带海原群变质岩原岩恢复及其构造背景[J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 194-203. [Li Tianbin, Zhang Xuewen, Wang Cheng, et al. Reconstruction of protoliths of metamorphic rocks and tectonic setting of the Haiyuan Group in the Haiyuan in the eastern segment of the North Qilian Mountains, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1): 194-203.]
- [59] Liang J W, Ma X J, Tao W X. Detrital zircon U-Pb ages of Middle-Late Permian sedimentary rocks from the southwestern margin of the North China Craton: Implications for provenance and tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 2020, 88: 250-267.
- [60] Sun J P, Dong Y P. Stratigraphy and geochronology of Permian-Carboniferous strata in the western North China Craton: Insights into the tectonic evolution of the southern Paleo-Asian Ocean [J]. *Gondwana Research*, 2020, 88: 201-219.
- [61] Sun J P, Dong Y P. Triassic tectonic interactions between the Alxa Massif and Ordos Basin: Evidence from integrated provenance analyses on sandstones, North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 169: 162-181.
- [62] Xie X Y. Provenance and sediment dispersal of the Triassic Yanchang Formation, southwest Ordos Basin, China, and its implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 335: 1-16.
- [63] 肖红平. 鄂尔多斯盆地山西组—盒8段沉积体系与有利储层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Xiao Hongping. Depositional system and favorable reservoir of Shanxi Formation-He 8 member in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [64] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 422-432.
- [65] Jia J M, Wang C, Su M, et al. Provenance and dispersal patterns of sediments on the continental shelf of northern South China Sea: Evidence from detrital zircon geochronology[J]. *Marine Geology*, 2023, 457: 107013.
- [66] 陈全红. 鄂尔多斯盆地上古生界沉积体系及油气富集规律研究[D]. 西安: 西北大学, 2007. [Chen Quanhong. Research on sedimentary systems and hydrocarbons enrichment of the Upper Palaeozoic of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2007.]
- [67] 韩会平, 武春英, 白清华, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗地区上古生界砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 643-653. [Han Huiping, Wu Chunying, Bai Qinghua, et al. Zircon U-Pb dating of clastic sandstone in the Upper Paleozoic from Wushenqi area, Ordos Basin and its geological significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 643-653.]
- [68] 林孝先. 陆源碎屑岩盆地综合物源分析: 以鄂尔多斯盆地北

- 部山西组为例[D]. 成都:成都理工大学,2011. [Lin Xiaoxian. A synthetic thought of provenance analysis in the terrigenous clastic rock basin: An example in the Lower Permian Shanxi Formation, northern Ordos basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.]
- [69] 王涛,王晓霞,田伟,等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. 中国科学:地球科学,2009,39(7):949-971. [Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, et al. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. Science China Earth Sciences, 2009, 39(7): 949-971.]
- [70] Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. Lithos, 2011, 122(1/2): 39-56.
- [71] 李江海,李维波,王洪浩,等. 晚古生代泛大陆聚合的全球构造背景:板块漩涡运动轨迹含义的探讨[J]. 地质学报,2014,88(6):980-991. [Li Jianghai, Li Weibo, Wang honghao, et al. Global tectonic setting during the Late Paleozoic convergence of pangea: Discussion of plate vortex trajectory[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(6): 980-991.]
- [72] 赖绍聪,张国伟,董云鹏,等. 秦岭—大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及其时空分布[J]. 中国科学:地球科学,2003,33(12):1174-1183. [Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, et al. Geochemistry and regional distribution of ophiolites and associated volcanics in Mianlüe suture, Qinling-Dabie Mountains[J]. Science China Earth Sciences, 2003, 33(12): 1174-1183.]
- [73] 常嘉,陈世悦,王琼,等. 低可容空间浅水三角洲沉积层序及聚煤模式:以渤海湾地区下二叠统山西组为例[J]. 古地理学报,2022,24(2):361-374. [Chang Jia, Chen Shiyue, Wang Qiong, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of shallow water delta systems under low accommodation conditions: A case study from the Lower Permian Shanxi Formation in Bohai Bay region[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(2): 361-374.]
- [74] 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. [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.]
- [75] Montañez I P, McElwain J C, Poulsen C J, et al. Climate, $p\text{CO}_2$ and terrestrial carbon cycle linkages during Late Palaeozoic glacial-interglacial cycles[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(11): 824-828.
- [76] Heavens N G, Mahowald N M, Soreghan G S, et al. A model-based evaluation of tropical climate in Pangaea during the Late Palaeozoic icehouse[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 425: 109-127.

Source-to-Sink System Differences and Structure-Sedimentary Pattern of the Early Permian Shanxi Formation in the Southern Ordos Region

LI Dan^{1,2}, ZHAO WeiBo^{3,4}, HU Cong⁵, LIU Lei^{1,2}, HU JianLing^{3,4}, WANG ZhiWei¹, CHEN HongDe^{1,2}, ZHU ShuYue¹, ZHANG JingQi¹, ZHAO Fei¹, ZHANG Rui¹

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

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

5. Department of Exploration, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] Several provenance systems exist in the southern Ordos region, including the Qinling and Qilian orogenic belts. Quantitative knowledge of the elements of each source-to-sink system is relatively weak, which restricts the study of the differences between source-to-sink systems and also the structure-sedimentary filling process constrained by them. [Methods] This study used sedimentology, geochemistry and detrital zircon dating, etc., to examine the differences between unit elements in the early Permian Shanxi Formation (e.g., tectonic setting, paleoslope and depositional system of each source-to-sink system). These were clarified by reconstructing a structure-sedimentary model of the Shanxi Formation influenced by combinations of the various source-to-sink systems in the southern basin. [Results] (1) Three major source-to-sink systems were active during the sedimentary period in the southern Ordos area of the Shanxi Formation: North Qilian, and the eastern and western regions of North Qinling. The North Qilian system is enriched in light REE; the mean δEu is 0.60, and the mean paleoslope in the source direction is 0.045° . Light REE are obviously enriched in the source-to-sink system in the western part of North Qinling, with an average δEu of 0.75 and an average paleoslope of 0.04° ; and in the eastern part of North Qinling the average δEu value is 1.05 and average paleoslope is 0.048° . (2) The source-to-sink systems were derived from the Central Asian orogenic belt, the North China Craton basement, the eastern and western areas of North Qinling and the North Qilian orogenic belt, but the North China Craton basement was the main source. (3) An active continental margin dominated the tectonic background of the provenances of all source-to-sink systems, and was followed by a passive continental margin. [Conclusions] Due to Mianlue Ocean subduction, the tectonic setting of the southern Ordos region was an active continental margin with continuous plate convergence. The source area in eastern North Qinling experienced the greatest uplift. The late Shanxi was relatively sand-rich, dominated by transitional deposits from the delta plain to the front, and having the smallest extension. The source region in the western part of North Qinling had the lowest uplift, with rich sand in the early stage and poor sandy sediments later. The source region of North Qilian had moderate uplift, and was dominated by the delta plain transporting deposits to the front margin.

Key words: Ordos region; Shanxi Formation; source-to-sink system; zircon U-Pb age