引用格式:田朝阳,陈虹,刘新社,等,2023.鄂尔多斯西缘牛首山—罗山地区裂变径迹年龄与中生代构造抬升 [J].地质力学学报,29 (5):599-617.DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023030

Citation: TIAN Z Y, CHEN H, LIU X S, et al., 2023. Fission track ages and Mesozoic tectonic uplift in the Niushoushan-Luoshan area on the western edge of the Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 599-617. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2023030

鄂尔多斯西缘牛首山—罗山地区裂变径迹年龄与中生代构造 抬升

田朝阳^{1,2},陈 虹^{2,3},刘新社⁴,公王斌^{2,5},赵伟波⁴,康 锐⁴ TIAN Zhaoyang^{1,2}, CHEN Hong^{2,3}, LIU Xinshe⁴, GONG Wangbin^{2,5}, ZHAO Weibo⁴, KANG Rui⁴

- 1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;
- 2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
- 3. 中国地质调查局极地地学研究中心,北京 100081;
- 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院,陕西西安 710018;
- 5. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室,北京 100081
- 1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
- 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 3. Reasearch Center of Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;
- 4. Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China;
- 5. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Fission track ages and Mesozoic tectonic uplift in the Niushoushan-Luoshan area on the western edge of the Ordos Basin

Abstract: The western margin of the Ordos Basin and its adjacent regions have undergone a complex tectonic evolution from the Mesozoic to the Cenozoic era. However, the question of tectonic uplift since the Cenozoic era remains a topic of contention, and the regional thermal evolution history necessitates precise chronological evidence. Situated close to the thrust belt within the western margin of the Ordos Basin, the Niushoushan-Luoshan area holds pivotal significance in unraveling the Mesozoic tectonic events within the basin's confines. Through a meticulous exploration employing apatite fission track (AFT) analysis and thermal history simulation, this study delineates the Mesozoic uplift sequence and its temporal confines in the Niushoushan-Luoshan area. The results reveal that the Mesozoic uplift within this region predominantly occurred during the Middle Jurassic period (170 Ma) to the end of the Early Cretaceous (110 Ma). Furthermore, we observe a slightly earlier onset of uplift in the Luoshan area (170 Ma) compared to the Niushoushan area (160 Ma). This uplift is primarily attributed to the north-eastward extrusion of the Qilian orogenic belt. Combining our findings with existing research, we propose that the Cenozoic uplift in the western margin of the Ordos Basin and its adjacent areas started during the Late Triassic, comprising two distinct phases: the first phase unfolding from the Late Triassic (220 Ma) to the end of the Early Jurassic (185 Ma), and the second phase occurring from the Middle Jurassic (175 Ma) to the end of the Early Cretaceous (110 Ma); the uplift in the Niushoushan-Luoshan area is part of the second phase of uplift along the western margin of the Ordos Basin. The two Cenozoic tectonic uplift phases along the western margin of the Ordos

基金项目:中国地质调查局地质调查项目 (DD20221644);国家自然科学基金项目 (41472195);中国石油前瞻性基础性科技项目 (2021DJ2101) This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20221644), the Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41472195) and the Prospective and Fundamental Science and Technology Project of PetoChina (Grant No. 2021DJ2101). 第一作者:田朝阳 (1997—),男,在读硕士,主要从事鄂尔多斯西缘及其邻区构造演化研究。E-mail: tianzhaoyang1@ qq. com 通讯作者:陈虹 (1982—),男,博士,副研究员,主要从事区域构造、大陆变形与活动构造研究。E-mail: chhzxm8281@163. com 收稿日期: 2023-03-07;修回日期: 2023-06-21;责任编辑:吴芳

Basin display characteristics of north-to-south and southwest-to-northeast propagation, respectively. It is inferred to be associated with the Late Triassic collision between the North China and South China blocks, as well as the movement of the Lhasa Block converging toward the northeast during the Middle to Late Jurassic.

Keywords: chronology; fission track; Ordos; tectonic uplift; Niushoushan-Luoshan; Mesozoic

摘 要:鄂尔多斯盆地西缘及其邻区经历了中—新生代复杂的构造演化过程,其中生代以来的构造隆升 和区域热演化历史研究仍需要进一步的年代学证据。牛首山—罗山地区紧邻鄂尔多斯盆地西缘的冲断带, 其中生代的隆升过程对于研究盆地西缘中生代构造事件具有非常重要的意义。文章通过磷灰石裂变径迹 (AFT)分析及热史模拟限定牛首山—罗山地区中生代的隆升过程及其时限,结果表明该地区中生代抬升 主要发生在中侏罗世 (170 Ma)—早白垩世末 (110 Ma),罗山地区的抬升 (170 Ma)要略早于牛首山地 区 (160 Ma),这期抬升主要与祁连造山带向北东方向挤出有关。综合分析已有研究成果表明,鄂尔多斯 盆地西缘及其邻区中生代抬升的启动时间为晚三叠世,整体可分为两期:第一期抬升发生在晚三叠世 (220 Ma)—早侏罗世末期 (185 Ma);第二期抬升发生于中侏罗世 (175 Ma)—早白垩世末 (110 Ma), 牛首山—罗山地区的抬升则属于鄂尔多斯盆地西缘第二期抬升的一部分。鄂尔多斯盆地西缘中生代两期 构造抬升分别显示出由南向北、由西南向东北方向传递的特征,推测与晚三叠世华北、华南板块碰撞以 及中—晚侏罗世拉萨地块向北东方向汇聚有关。

关键词:年代学;裂变径迹;鄂尔多斯;构造抬升;牛首山—罗山;中生代 中图分类号: P542 文献标识码:A 文章编号:1006-6616 (2023) 05-0599-19 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023030

0 引言

鄂尔多斯盆地西缘处于鄂尔多斯地块与青藏 高原东北缘的过渡地区,是中国大陆内部中—新 生代构造变形最为强烈的地区之一(Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004; 朱国胜, 2015; 寇琳琳 等, 2021; 李艺豪等, 2022),其构造演化过程对 于研究鄂尔多斯盆地、秦岭-祁连造山带的中—新 生代构造演化和青藏高原东北缘新生代期间向东 北方向的扩展都具有非常重要的意义。

近年来,众多学者针对鄂尔多斯盆地西缘的 中-新生代构造演化过程开展了大量研究(Zheng et al.,2006;陈虹等,2013;王伟涛等,2013, 2014;公王斌等,2016;Peng et al.,2019),然而 由于新生代的构造改造作用强烈,关于该地区中 生代的构造抬升过程,还存在诸多争议。对于鄂 尔多斯盆地西缘南部,已有研究普遍以晚侏罗世 芬芳河组砾岩为标志,结合强烈的逆冲构造和褶 皱变形,认为该地区在晚侏罗世开始进入挤压环 境(赵红格,2003;张进等,2004;张岳桥和廖 昌珍,2006)。这与基于磷灰石裂变径迹(AFT) 得出的鄂尔多斯盆地西缘南部中生代抬升的启动 时间为中一晚侏罗世(170~150.9 Ma)是基本一 致的(高峰等,2000;宋友桂等,2013;李斌, 2019;马静辉和何登发,2019)。但是也有学者通 过锆石裂变径迹 (ZFT) 结合沉积构造研究认为鄂 尔多斯盆地西缘南部在晚三叠世 (213~194 Ma) 已经开始隆升(陈刚等, 2007; 彭恒, 2020)。关 于盆地西缘南部中生代抬升期次的划分也存在争 议,大多数学者认为盆地西缘南部在中生代存在 中侏罗世—晚侏罗世和晚侏罗世—早白垩世两期 构造抬升事件(高峰等,2000;宋友桂等,2013; 李斌, 2019), 也有学者认为存在三期五次构造抬 升事件(陈刚等, 2007)。对于盆地西缘的中北 部,AFT研究相对较少,已有研究普遍认为其抬 升启动时间为中—晚侏罗世(赵红格等, 2007a; 马静辉和何登发, 2019), 也有学者通过构造分析 结合古地磁研究认为盆地北部在晚三叠世与阿拉 善地块之间存在碰撞事件(张进等, 2000)。普遍 认为其抬升期次有两期,不过抬升时限存在争议, 有学者认为抬升发生在中—晚侏罗世与早白垩世 末 (马静辉和何登发, 2019), 也有学者将抬升时 间限定在晚侏罗世—早白垩世初和早白垩世中晚 期(赵红格等, 2007a)。这些研究结果显示,盆 地西缘中生代的构造演化争议集中在启动时间和 构造期次划分上。

牛首山—罗山地区位于鄂尔多斯盆地与青藏 高原东北缘的结合位置,紧邻西缘冲断带,研究 该地区中生代的隆升过程对于理解盆地西缘的隆 升机制以及对邻区中生代构造事件的响应具有非 常重要的意义。赵红格等(2007b)通过 ZFT 研究 得出该地区抬升的启动时间为中—晚侏罗世,马 静辉和何登发(2019)应用 AFT 热史模拟方法也 得到了类似的结论、不过样品数量均相对较少。 同时由于盆地西缘广泛存在的白垩纪以来的构造 热事件, 该地区已有的 AFT 表观年龄较为年轻, 介于 110.8~72 Ma (赵红格等, 2007b; 李斌, 2019;马静辉和何登发,2019),与鄂尔多斯西缘 整体 AFT 年龄范围差距较大。因此,目前针对牛 首山—罗山地区中生代构造隆升的研究还较为薄 弱,缺乏约束其具体隆升时限的数据。文章利用 AFT 方法,通过分析牛首山—罗山地区采集的9块 砂岩样品来约束其中生代的隆升时限、并综合已 有的热年代学数据探讨鄂尔多斯盆地西缘中生代 的隆升历史。此次研究揭示了鄂尔多斯西缘中生 代的隆升过程,支持鄂尔多斯盆地西缘中生代抬 升的启动时间为晚三叠世,且隆升期次分为两期, 同时限定了牛首山—罗山地区中生代的隆升时限。

1 地质背景

牛首山—罗山一带出露的地层主要包括奥陶 系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系 和第四系(马寅生,2003),其中大面积出露的为 中奥陶统米钵山组,中生代地层主要出露下三叠 统五佛寺组(T₁w)、中侏罗统延安组(J₂y)、中 侏罗统直罗组(J₂z)、上侏罗统安定组(J₃a)以 及下白垩统庙山湖组(K₁ms)。三叠系与侏罗系、 侏罗系与白垩系之间均为不整合接触,古近系和 新近系与下伏地层之间也为不整合接触(Wang et al.,2011)。第四系主要为上更新统马兰黄土和全 新统冲洪积物(图1)。

牛首山-罗山断裂带(青铜峡-固原断裂带) 是新生代以来构造变形强烈的青藏高原东北缘与 相对稳定的鄂尔多斯地块的边界断裂(任纪舜等, 1980;汤锡元和郭忠铭,1992;顾其昌,1996)。 断裂带两侧地质、地貌特征存在明显差异,其西 南侧为祁连山加里东期构造带,中新世以后强烈 隆升,地貌上表现为一系列不对称的弧形山地和 盆地(宋友桂等,2001);东侧和北侧分别为鄂尔 多斯地块和阿拉善地块,地貌上表现为北北东向 的贺兰山山系、银川盆地和黄土高原,晚白垩世 已经开始隆升(赵红格等, 2007a)。断裂带南段 整体呈南北走向,到青铜峡以北转为北西--北西 西向,由南至北穿过甘肃华亭马峡口,经固原、 小罗山、大罗山、牛首山、青铜峡至三关口、地 表可追踪长度约400 km (马寅生, 2003)。该断裂 带由南向北主要由4条次级断裂组成,分别为北北 东向的固原断裂、北北西向的罗山东麓断裂、北 西向的牛首山断裂以及北西向的三关口断裂(公 王斌等, 2016; 图 1)。断裂带不同位置的几何学 和运动学特征具有明显差异 (Chen et al., 2015)。 固原断裂以逆冲及右行走滑运动为主(马寅生, 2003);罗山东麓断裂是一条以右旋走滑为主的全 新世活动断裂 (闵伟等, 1993); 牛首山断裂以挤 压逆冲及右行走滑为主(陈虹等, 2013); 三关口 断裂的走滑性质仍存在争议(陈虹等, 2013; 雷 启云等, 2016)。

2 样品与测试方法

根据研究区现今的地貌格局,在牛首山—罗山 地区奥陶纪地层中的砂岩、粉砂岩层中共采集了9 块样品,其中牛首山地区5块,罗山地区4块。为 了保证实验的准确性,样品采集剖面近平行于弧形 断裂带,以排除新生代构造活动的影响(图2)。

测试在中国地质大学(北京)裂变径迹实验 室完成,具体试验方法参考袁万明等(2007)。磷 灰石的分离采用传统的岩石破碎方法进行粗选, 然后利用电磁选、重液选等手段进行单矿物提纯。 接着将磷灰石颗粒置于载玻片上,用环氧树脂滴 固,然后进行研磨和抛光至矿物内表面露出,在 接近 25 ℃下用 7%的 HNO, 蚀刻 30 s 以显示自发径 迹。随后将低铀白云母外探测器与矿物样品一起 入反应堆辐照,该过程在中国原子能科学研究院 (CIAE) 421 反应堆中完成。之后在 25 ℃下用 40%的 HF 蚀刻 20 s 以显示诱发径迹,中子注量利 用 CN5 铀玻璃标定。自发径迹和诱发径迹密度选 择平行晶体学 c 轴的柱面观测 (Ketcham et al., 2007a),水平封闭径迹长度依照 Green (1986) 建 议的程序测定。年龄值根据 IUGS 推荐的 ξ (416± 24.7) 常数法和标准裂变径迹年龄方程 (Hurford and Creen, 1982) 计算,测试结果见表 1。需要注 意的是, 对测得样品的年龄值需进行 X^2 检验, 当 泊松分布检验概率 $P(\chi^2) > 5\%$ 时,说明样品年龄



图1 牛首山—罗山地区区域地质简图及构造地貌特征 (据陈虹等, 2013 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of the Niushoushan-Luoshan area and morphologic characteristics (revised from Chen et al., 2013)

值服从泊松分布,样品颗粒年龄属于同一组分, 样品中心年龄可代表冷却事件的发生时限;如果 *P*(*X*²)<5%,说明样品年龄值不服从泊松分布, 年龄值为不同组分年龄的混合,此时必须用单颗 粒年龄雷达图与高斯拟合曲线法对其进行分解, 得到不同组分的峰值年龄,从而得到不同期次冷 却事件的发生时限(陈刚等,2007;许立青等, 2016)。

3 裂变径迹年龄分析

牛首山 5 块样品的表观年龄分布在 143~111 Ma, 罗山 4 块样品的表观年龄分布在 146~131 Ma, 9 块样品的表观年龄均小于沉积地层的年龄,代表 采样层经历埋藏增温后冷却至 AFT 封闭温度以前 的冷却年龄。牛首山 5 块样品的裂变径迹长度分布



a—牛首山、罗山样品位置平面图; b—牛首山、罗山样品位置剖面图

图 2 AFT采样位置图

Fig. 2 AFT sampling locations

(a) Plans of the sample locations in the Niushoushan and Luoshan areas; (b) Profiles of the sample locations in the Niushoushan and Luoshan area

在 12.5~12.9 μm, 罗山 4 块样品的裂变径迹长度 分布在 12.3~12.7 μm, 其中样品 EXC214 的自发 径迹较少,因此没有平均径迹长度数据,9块样品 的裂变径迹长度均小于初始裂变径迹的平均长度 16.5 μm (表 1)。9 块样品中有 8 块的 *P*(X²) > 5%,且径迹长度表现为单峰,这说明样品经历了 较为简单的冷却历史并具备单一的年龄平均值, 其中值年龄可代表最近一次的冷却年龄,剩余一

块样品 EXC050 的径迹长度也呈现单峰,但是其 P(X²) <5%,表明其年龄组分主要为沉积后不同 时期构造事件混合作用的结果(图3)。

利用单颗粒年龄雷达图、年龄分布图及年龄 高斯拟合曲线对样品的年龄进行分析,给出不同 年龄组分对应的最佳高斯拟合年龄,并提供不同期 次构造事件的样品冷却年龄记录。高斯拟合曲线的峰 值年龄见图 4,曲线基本呈现出单峰或不明显的双

表 1 牛首山—罗山地区 AFT 测试分析数据表

Table 1 AFT test analysis data table for the Niushoushan-Luoshan area

岱旦旦	亚母水标	高程/	亚民占	采样	颗粒数/	ρs (Ns) /	ρi (Ni) /	ho d (Nd) /	$P(\chi^2)$ /	中值年龄	L (N) /	
件吅丂	木杆尘协	m	木杆点	地层	n	$(10^{5}/cm^{2})$	$(10^{5}/cm^{2})$	$(10^{5}/cm^{2})$	%	$\pm 1\sigma/Ma$	μm	
EXC049	37°45′23″N 105°59′08″E	1365	牛首山	0_2mb	28	7.072 (942)	11.247 (1498)	10.474 (7312)	83. 50	136±10	12.7±1.6 (105)	
EXC050	37°45′19″N 105°59′12″E	1419	牛首山	0_2mb	28	6.334 (1366)	10.780 (2325)	10.477 (7312)	0.15	121±10	12.9±1.4 (104)	
EXC052	37°45′54″N 105°59′14″E	1528	牛首山	0_2mb	28	4.595 (716)	6.835 (1065)	10.330 (7312)	48.00	141±12	12.8±1.4 (114)	
EXC053	37°46′05″N 105°59′15″E	1635	牛首山	O_2mb	28	6.068 (1134)	11.859 (2216)	10.481 (7312)	8.30	111±8	12.7±1.3 (103)	
EXC055	37°46′21″N 105°59′05″E	1762	牛首山	O_2mb	28	4.680 (1064)	8.629 (1962)	10.179 (7312)	34.40	114±8	12.5±1.7 (106)	
EXC214	37°18′14″N 106°16′55″E	2610	罗山	O_2mb	4	13.449 (138)	19.555 (204)	10.477 (7312)	44.00	146±18	—	
EXC215	37°18′16″N 106°17′02″E	2564	罗山	O_2mb	28	7.864 (824)	12.950 (1357)	10.475 (7312)	45.80	131±10	12.3±1.8 (107)	
EXC217	37°17′01″N 106°16′56″E	2435	罗山	0_2mb	14	6.634 (566)	9.939 (848)	10.473 (7312)	51.30	144±12	12.7±1.7 (119)	
EXC219	37°15′46″N 106°16′38″E	2174	罗山	0_2mb	28	5.775 (1489)	8.680 (2238)	10.470 (7312)	10. 20	143±11	12.6±2.5 (103)	

备注:n为样品颗粒数; ρs 、 ρi 、 ρd 分别为样品的自发裂变径迹密度、诱发裂变径迹密度和标准铀玻璃产生在白云母外探测器上的诱发裂变径迹密度;N s、N i、N d分别为与 ρs 、 ρi 、 ρd 相对应的径迹数目;P(χ^2)为 χ^2 统计值;N为所测径迹数目。



图 3 牛首山—罗山地区 AFT 长度分布图



峰。将样品的裂变径迹年龄及高斯拟合峰值年龄投图(图 5),投图时需注意 EXC050 的 $P(X^2) < 5\%$,这样的混合年龄不能直接用于地质解释(Kohn and Green, 2002; He et al., 2017),需采用其高斯拟合

峰值年龄,从图 5 可见裂变径迹所记录的年龄在罗山 地区要比牛首山地区略大,表示罗山地区的冷却事件 启动时间要早于牛首山。牛首山—罗山地区冷却事件 的发生时限基本在中侏罗世—早白垩世。



a—单颗粒年龄分布雷达图; b—单颗粒年龄分布直方图

图4 牛首山—罗山地区 AFT 年龄组分分解图

Fig. 4 Estimating age populations in a mixed distribution of AFT analysis in the Niushoushan-Luoshan area(a) Radar plot of single particle age distribution; (b) Single particle age distribution histogram

4 热史模拟

由于磷灰石退火性质和地质条件的局限性, AFT 表观年龄的地质意义十分有限,不能直接表 征特定构造事件的发生时间(Ketcham, 2005; Gallagher, 2012;程璐瑶等, 2021)。故应用 HeFTy 软件对牛首山—罗山地区的样品进行热演化史模 拟,判断其可能经历的构造热历史,并获得其冷 却事件的发生时限。根据牛首山—罗山地区的地 质背景和裂变径迹参数确定模拟初始条件,反演 模拟时选用的多元动力学退火模型 (Ketcham et al., 2007b),原始径迹长度选为 16.3 μm,径 迹热处理选取 Ketcham (2005)模型。时间-温度



图 5 牛首山—罗山地区样品裂变径迹年龄分布图

Fig. 5 Distribution of fission track ages in the Niushoushan-Luoshan area

历史中最大温度设为 160 ℃,现今地表温度为 20 ℃,最大时间设为 220 Ma,磷灰石的部分退火 带的温度范围为 120~60 ℃。每件样品均以模拟出 100 条较好的热史曲线为终止反演计算的条件。最 后将模拟所得到的年龄和径迹长度与实测的结果 进行对比,其中对裂变径迹长度的模拟结果通过 K-S 值进行评价,对裂变径迹年龄的模拟结果通过 年龄拟合度 Age COF 值进行评价。当 Age COF 值 和 K-S 值均大于 0.5 时,表明模拟结果较好;当二 者值均大于 0.05 时,表明模拟结果可以接受(张 志诚和王雪松, 2004; 高少华, 2014)。

在热史模拟中选取结果比较好的6件样品进行分析,其中牛首山的4件样品模拟得到的平均年龄值分别为136 Ma、127 Ma、143 Ma和114 Ma,Age GOF 值在0.95~1.00之间,K-S值在0.39~0.56之间,说明模拟结果比较可信;罗山2件样品模拟得到的平均年龄值分别为141 Ma、143 Ma,Age GOF 值分别为0.99、0.98,K-S值分别为0.42、0.35,表明模拟结果比较可信(表2)。

表 2 代表性样品磷灰石热史模拟检测 K-S 值与 Age GOF 值统计表

1		Statistical of K-5	value and Age GOF	value of the mermai mistory	simulation te	st for representative s	amples of aparite	
Ì	样品号	· K-S值	模拟径迹长度/μm	实测径迹长度/μm	Age GOF 值	模拟年龄值/Ma	实测年龄值/Ma	
	EXC049	9 0.45	12.95±1.43	12.67±1.56	0.95	136	136±10	
	EXC050	0 0.39	13.15±1.40	12.93±1.37	1.00	127	127±9	
	EXC052	2 0.54	12.92±1.40	12.81±1.38	1.00	143	143 ± 11	
	EXC055	5 0.56	12.56±1.85	12.48±1.71	0.99	114	114±8	
	EXC215	5 0.42	12.81±1.64	12.33±1.82	0.99	141	140 ± 10	
	EXC217	7 0.35	12.91 ± 1.65	12.68 ± 1.74	0.98	143	144 ± 12	

备注: K-S 值表示径迹长度与实测值的吻合程度; Age GOF 值是模拟年龄值与测试年龄值的吻合程度; 若 K-S 值、Age GOF 值均大于 0.05, 表明结果比较可信, 若二者均大于 0.5, 表明结果可信。

从温度演化路径可以看出,牛首山4件样品在 晚侏罗世(160~150 Ma)开始进入一个相对快速 的冷却阶段,早白垩世(130~110 Ma)冷却速度 开始变缓;罗山2件样品在中侏罗世(170~ 165 Ma)进入快速冷却阶段,早白垩世(135~ 130 Ma)冷却速度变缓。因样品的热史模拟曲线 在新生代时已经不在退火带范围内,故不能代表 其新生代构造事件的发生时限,文章不做讨论 (图 6)。综上,牛首山—罗山地区中生代冷却事件 的启动时间为中侏罗世(170 Ma),由南部罗山地 区开始,这与之前的裂变径迹年龄分布图所显示的结果基本一致,中侏罗世 (170 Ma)—早白垩世 (110 Ma) 是这一期冷却事件的主要发生时间。

5 讨论

5.1 牛首山—罗山地区抬升速率分析

通过 AFT 年龄分析与热史模拟得出牛首山—罗 山地区中侏罗世(170 Ma)—早白垩世(110 Ma) 存在冷却事件,结合已有研究认为其代表的是一



图中浅色区域为可接受的拟合路径区域,深色区域为拟合较好的路径区域,黑色实线表示最佳拟合路径;实测与模拟长度均为径迹长 度,μm

a一牛首山地区 AFT 热史模拟图; b-罗山地区 AFT 热史模拟图

图6 牛首山—罗山地区 AFT 热史模拟图

Fig. 6 Thermal history based on AFT inverse modeling in the Niushoushan-Luoshan area

(a) AFT thermal history simulation of the Niushoushan area; (b) AFT thermal history simulation of the Luoshan area

The light area in the figure is the acceptable fitting path area, the dark area is the better fitting path area, and the black solid line represents the best fitting path. Both measured and simulated lengths are track lengths (μm)

期区域性的构造隆升(马静辉和何登发,2019)。 根据前面的测试结果可以计算该地区的抬升速率, 为了保证计算的准确性,作以下假设:①已知现 今地表温度;②已知该地区的古地温梯度;③古 地温梯度值为常数。计算公式为:

$$U = (\theta - T_0) \div (K \times F) \tag{1}$$

U 为抬升速率, m/Ma; θ 为矿物的封闭温度, C; K 为地温梯度, C/100 m; T_0 为年平均地表 温度, C; F 代表裂变径迹年龄, Ma。

根据已有的鄂尔多斯盆地西缘的热演化研究, K取4℃/100 m, T_0 为25℃, θ 取110℃(赵红格等, 2007b)。需要注意的是该公式计算得出的 是后期抬升速率,即磷灰石进入退火带以来的抬 升速率。

通过公式计算得到牛首山地区晚侏罗世--早

白垩世的平均抬升速率为 17.2 m/Ma,罗山地区中 侏罗世—早白垩世的平均抬升速率为 15.1 m/Ma。 可见在这期抬升中牛首山地区的抬升速率是要略 大于罗山地区的,但是,罗山采样层的海拔比牛 首山要高将近 1000 m (图 7),可以推测有两种可 能性:①在中侏罗世之前罗山地区存在至少一期 抬升;②进入新生代后,罗山地区的抬升速率远 大于牛首山地区。基于边界断裂时代和构造位置 的差异,文中更倾向于第一种可能。对于边界断 裂形成时代,牛首山—罗山地区的地震解译数据 表明,罗山断裂很可能形成于早古生代(任文军 等,1999),而牛首山断裂形成于中生代(王伟涛 等,2013)。对于构造位置的差异,根据早期裂变 径迹研究结果,鄂尔多斯盆地西缘南部在晚三叠 世—早侏罗世发生了构造隆升,造成盆地逆时针 旋转 45°以上,并向北移动(马醒华等,1993;杨 振宇和 Besse,2000;张进等,2000,2004)。该时 期罗山地区刚好处在盆地中线附近,而晚三叠世 盆地西部边界位于河西走廊盆地的西部(甘肃马 良沟附近;阮壮等,2021),中侏罗世早期边界则 是在桌子山—石沟驿—六盘山一线的东侧(张泓 等,2008),这表明罗山地区从稳定的盆地内部变 成了盆地的边界。罗山地区在此次构造事件中经 受了盆地旋转所产生的挤压而发生了构造隆升, 而牛首山地区位于罗山地区的北西方向,所以罗 山地区一定程度上减弱了这期隆升对牛首山地区 的影响。不过关于两者之间的差异性隆升,由于 缺乏年代学数据的限定,上述推论仍需要进一步 研究。



图 7 牛首山—罗山磷灰石裂变径迹年龄-高程图 Fig. 7 Age and altitude of fission track samples in the Niushoushan-Luoshan area

5.2 鄂尔多斯西缘及邻区中生代隆升历史

文章筛选出了在鄂尔多斯西缘及其邻区已取 得的中生代 AFT 年龄数据,发现这些年龄数据的 跨度相当大,基本介于 215.6~65 Ma,这表明该区 域中生代以来经历了多期次构造热事件(图 8)。 其中 80~65 Ma 的年龄大范围分布在鄂尔多斯西 缘,这与西缘广泛存在的白垩纪以来的构造热事 件相对应,并对中生代早期的构造热事件造成了 一定程度的掩盖。由于已有研究普遍认为该期构 造热事件代表的是中—新生代印度板块北移并与 欧亚大陆碰撞的过程(马静辉和何登发,2019; 彭恒,2020),所以文章认为这期构造事件并非严 格意义上的中生代构造事件,不做详细讨论。晚 白垩世之前(>100 Ma)的年龄纪录在盆地西缘及 邻区零星分布,在西缘南部地区相对集中,且在 静宁地区还存在 215.6 Ma 的晚三叠世 AFT 年龄记 录。这表明该区域中生代的构造运动主要是受西 南部板块或地块的影响(图 8)。

通过牛首山—罗山地区 AFT 热史模拟结合已 有研究,认为牛首山--罗山地区经历了中侏罗世 (170 Ma)—早白垩世(110 Ma)的隆升过程,并 且具有南早北晚的特点。基于上述特点,重点收 集鄂尔多斯西缘南部的 AFT 热史模拟数据,需要 注意的是同一区域不同时代岩石地层对于同一构 造事件的记录不同。因此,以三叠系砂岩样品为 主进行收集,另有部分侏罗系砂岩与古生界花岗 岩样品,一方面尽量减小采样层不同所导致的误 差,另一方面使样品 AFT 表观年龄小于采样层年 龄(表3)。将热史模拟数据整理分期,可以得出 盆地西缘南部及邻区中生代冷却事件的启动时间 基本在晚三叠世 (220 Ma), 由南部的平凉地区开 始,结合西缘南部已有的隆升研究认为其代表的 是西缘南部区域性隆升事件的启动时间(陈刚等, 2007; 彭恒, 2020), 并且西缘南部隆升期次分为 两期: 一期晚三叠世 (220 Ma)—早侏罗世 (185 Ma), 主要影响盆地西缘的南部地区, 整体 由南向北传递,快速抬升阶段的持续时间短,向 南至鄂尔多斯盆地南缘可以观测到这期抬升的早 期热年代学记录,向北在月亮山古生界花岗岩样 品中仍可以观测到这期抬升(图 9a):二期中侏罗 世 (175 Ma)—早白垩世末 (110 Ma), 由海原地 区向东北方向的牛首山--罗山地区传递,到达时 间为中侏罗世 (170 Ma),随后向牛首山东部的石 沟驿地区传递,到达时间为晚侏罗世(160 Ma), 整体抬升范围大,持续时间长,显示出由西南向 东北的传递性隆升(图 9b)。可见,文章 AFT 数 据揭示的牛首山—罗山地区的抬升属于盆地西缘 南部二期抬升的一部分。

5.3 中生代构造演化过程

根据磷灰石裂变径迹的热史模拟数据及已有研究,得出牛首山—罗山地区的抬升起始于中侏罗世(170 Ma),由南部的罗山地区开始,北部牛首山地区在晚侏罗世(160 Ma)开始抬升,整体抬升结束于早白垩世末期(110 Ma)。所以位于鄂尔多斯西缘的牛首山—罗山地区主要经历了中侏罗世(170 Ma)—早白垩世(110 Ma)阶段的构造抬升。而盆地西缘南部的抬升则是在晚三叠世(220 Ma)就已经开始,大致可以分为早期的晚三叠世(220 Ma)—早侏罗世(185 Ma),该期抬升



图中数字为裂变径迹中值年龄/Ma

图 8 鄂尔多斯西缘及邻区中生代 AFT 样品年龄分布图

Fig. 8 Age distribution of Mesozoic AFT samples from the western edge of Ordos and adjacent areas

The numbers in the figure represent the median age ($Ma\,)$ of the fission track.



灰色区域代表快速冷却的发生时限

a—一期抬升; b—二期抬升

图 9 鄂尔多斯西缘南部及其邻区 AFT 热史模拟数据统计图

Fig. 9 Statistical chart of the AFT thermal history simulation data in the southern part of the western edge of the Ordos Basin and its adjacent areas

(a) Phase-I uplift; (b) Phase-II uplift

The grey area represents the time limit for rapid cooling

表 3 鄂尔多斯西缘南部已有 AFT 热史模拟样品数据

Table 3	AFT thermal	history	simulation	sample	data i	in the	southern	part o	of the	western	edge	of the	Ordos	Basin
---------	-------------	---------	------------	--------	--------	--------	----------	--------	--------	---------	------	--------	-------	-------

采样区域	样品号	采样地层		年龄/Ma		$\frac{P(\chi^2)}{/\%}$	文献来源
海原	9-4	Pz	花岗岩	130±7	12.2±2.0	20.00	Lin et al. , 2011
海原	HFE11	$\mathbf{P}z$	花岗岩	132.7±7.2	12.28±0.2	-	Duvall et al., 2013
	SG16	Т	砂岩	89±6	12.6±2.0	0.10	
了边区	SG24	Т	砂岩	79±5	12.8±2.1	0.90	
有闪痒	CS40	Т	砂岩	91±6	12.7±2.0	0.00	马静辉和何登发,2019
	MS44	Κ	砂岩	72±5	13.1±1.6	5.60	
罗山	LS88	Т	砂岩	72±4	12.8±2.1	75.90	
	HY-1	Т	砂岩	116.6±5.2	13.65 ± 1.05	97.43	
海原	HY-2	Т	砂岩	110.1±4.9	13.51 ± 1.00	85.78	
	HY-3	J	砂岩	117.6±4.4	13.55±1.11	24.12	
	XY-1	Т	砂岩	158.5±12.1	13.79±1.16	18.76	彭桓 2020
平凉	XY-2	Т	砂岩	157.1±9.3	13.68±1.2	71.03	岁旦,2020
	XY-3	Т	砂岩	168.7±10.4	13.45±0.94	94.48	
日言山	HSZ-1	Pz	花岗岩	158.4±8.9	13.13±1.09	91.69	
万元山	HSZ-2	Pz	花岗岩	145±11.2	12.67±1.07	36.76	
平凉	XY3	Т	砂岩	168.7±10.4	12.24±0.16	94.48	王建强等, 2020
哪足夕斯声势	WB5	Т	砂岩	172.9±7.6	11.9±0.2	15.93	7haaa at al 2019
郭小夕别肖练	WB6	Т	砂岩	185.6±7.9	12.3±0.4	24.05	Znang et al., 2018

备注: 表中采样区域按图 8 中出现的地名进行划分, 具体采样地点见样品对应的参考文献

主要由盆地西缘的南部向北部传递;晚期的中侏 罗世(175 Ma)—早白垩世(110 Ma),该期抬升 主要由盆地西缘的西南部向北东方向传递。由于 采样地层与样品岩性的限制,单一裂变径迹年代

学揭示的隆升过程具有局限性,还需结合区域上 的构造变形与沉积记录。

印支期鄂尔多斯盆地西缘及其所在的华北板 块受华南板块和西伯利亚板块南北向挤压(郭庆 银, 2010), 至晚三叠世—早侏罗世华北板块与华 南板块在勉略缝合带附近发生碰撞,并在碰撞期间 形成了秦岭-大别造山带 (Meng and Zhang, 1999; Dong et al., 2012; 郭润华等, 2017), 这一碰撞 事件导致华北板块南部隆起,并影响了鄂尔多斯 盆地西缘南部与祁连山地区,同时期的构造事件 在盆地西缘南部及其邻区广泛存在(陈刚等, 2007; Liang et al., 2013; 赵晓辰等, 2016; 彭恒 等, 2018; Zhang et al., 2018, 2019; 彭恒, 2020)。 并且在盆地西南缘平凉、固原等地区热史模拟曲 线的冷却启动点由南向北逐渐年轻,且快速冷却 的持续时间短,表明了这期抬升由南向北的传递 性,以及抬升的快速性。另外,陈刚等(2007) 在盆地西缘南部得到的 ZFT 年龄也显示出由南向 北逐渐年轻的特征,并认为盆地西缘南部晚三叠 世发育反 S 型构造体系,而且秦岭-祁连造山带前 缘的策底--崆峒山--口镇地区上三叠统与下侏罗 统之间呈平行不整合接触,并发育上三叠统粗碎 屑类磨拉石沉积,这种不整合接触关系在北部的 香山---卫宁北山---石沟驿地区同样存在。此外, Guo et al. (2018) 在鄂尔多斯西缘南部华亭县中 侏罗统延安组中,测出了 213 Ma 的碎屑锆石 (U-Pb)峰值年龄,表明其物源岩(秦岭—祁连地 区的晚三叠世花岗岩) 经历了快速剥蚀; 彭恒 (2020) 在盆地西缘南部地区测试的 AFT 样品年龄 为 215.6 Ma, 远远大于其地层时代, 而且通过了 卡方检验,说明样品未曾退火,也表明其物源区 于晚三叠世发生了快速的隆升剥蚀。王建强等 (2020) 也发现了许多关于这期抬升的记录: 盆地 西缘南部三叠纪末期的剥蚀具有南强北弱的特点, 南部大范围内延长组地层残缺不全:晚三叠世延 长组凝灰岩厚度由南向北逐渐减小,且发育冲积 扇和扇三角洲,同时鄂尔多斯西南地区普遍存在 浊积岩、震积岩等同沉积构造变形;而且灵台地 区的钻探中还发现了晚三叠世的火成岩侵入体。 上述证据均表明鄂尔多斯盆地西缘南部存在晚三 叠世—早侏罗世这期构造隆升事件(图 10a)。通 过对牛首山—罗山地区中侏罗世—早白垩世的抬 升速率计算和样品所在海拔差异, 推测晚三叠 世---早侏罗世的隆升事件对罗山地区也造成了一 定的影响,从而使牛首山、罗山发生了差异抬升, 这可能与鄂尔多斯盆地晚三叠世—早侏罗世的逆 时针旋转有关(图 10a;马醒华等, 1993;杨振宇 和 Besse, 2000; 张进等, 2000, 2004), 同时贺兰 山地区广泛存在的三叠系与侏罗系角度不整合也 暗示由于盆地旋转,这期抬升不只局限于盆地西 缘南部(马静辉和何登发, 2019)。但是具体的响 应机制仍需要进一步的年代学数据。



a—晚三叠世—早侏罗世; b—中侏罗世—早白垩世

图 10 鄂尔多斯盆地西缘及其邻区中生代隆升模式图

Fig. 10 Mesozoic uplift model of the west edge of the Ordos Basin and its adjacent areas

(a) Late Triassic-Early Jurassic; (b) Middle Jurassic-Early Cretaceous

晚侏罗世---早白垩世为燕山运动的主变形期

块在其南北两边缘持续受到来自华南板块和蒙古-鄂霍茨克洋关闭所产生的挤压作用,在其南北边 缘产生了逆冲推覆作用(葛肖虹, 1989; 和政军 等, 1998),同时,其东西两侧由于古太平洋与班 公湖-怒江洋(中特提斯洋)向东亚大陆俯冲也处 于挤压状态 (李三忠等, 2022; 赵越等, 2022)。 不过有学者指出,中一晚侏罗世为鄂尔多斯西缘 构造应力场发生变化的时期、由印支期近南北向 的挤压过渡到燕山期近东西向的挤压 (董树文等, 2007, 2008)。因此,鄂尔多斯西缘及邻区的构造 演化,应主要归因于其西南部的特提斯构造域和 东边古太平洋俯冲消减的共同影响。中--晚侏罗 世,受特提斯构造域影响,拉萨板块向北东方向 汇聚,致使祁连山东部、走廊过渡带向东逐渐逆 冲推覆至鄂尔多斯西缘南部之上。由于祁连山地 区的强烈隆升,产生了北东向的挤压,在祁连山 与北秦岭的接合部位形成了一些显示北东向挤压 以及东西向剪切的特征构造(张维吉等, 1994; 刘池洋等, 2005; 李奋其等, 2022)。地震解译结 果也表明晚侏罗世---早白垩世早期,鄂尔多斯盆 地西缘南部发生了强烈的逆冲变形 (Darby and Ritts, 2002; 欧阳征健等, 2012), 并且, 这些逆 冲断裂大多没有错断白垩纪地层(李斌, 2019)。 此外,卫宁北山--香山--六盘山地区在该时期形 成了统一的向北东方向凸出的弧形构造带(陈刚 等,2007)。鄂尔多斯西缘南部及祁连山地区广泛 存在着这期构造事件的热年代学记录(高峰等, 2000; 彭恒, 2020; 王建强等, 2020; 彭恒等, 2022)。同时,下白垩统与其下覆地层普遍存在着 角度不整合,而且晚侏罗世(芬芳河组沉积期) 和早白垩世(宜君组沉积期)均有较厚的砾岩沉 积层 (王建强等, 2011; 赵晓辰, 2017)。这些证 据均表明盆地西缘南部存在中侏罗世--早白垩世 这期构造隆升事件。因此,在大区域尺度上鄂尔 多斯西缘南部在燕山期的抬升可能与西南部拉萨 地块向北东方向汇聚的远程效应有关。而牛首 山—罗山地区位于鄂尔多斯地块与祁连造山带的 结合位置, 受祁连造山带北东向挤压的影响也开 始抬升(图10b)。另外,通过牛首山—罗山地区 抬升速率的计算,发现牛首山地区的平均抬升速 率要大于罗山地区,这可能与研究区西北部的阿 拉善地块对鄂尔多斯西缘的挤压逐步变强有关, 已有研究表明中--晚侏罗世阿拉善地块向东挤出,

且其东侧受力最强,并在贺兰山东部形成了一系 列南北向的反冲断层(马静辉和何登发,2019; 白东来,2021)。故推测该时期,牛首山地区同时 受到西南、西北两个方向的挤压,隆升速率加快。

综上,依据裂变径迹年代学结合地层不整合、 沉积砾岩以及断裂活动等相关地质证据,可初步 构建出鄂尔多斯盆地西缘及其邻区中生代时期两 阶段的构造隆升模式(图10)。鄂尔多斯西缘抬升 的启动时间基本确定在晚三叠世(220 Ma),抬升 期次分为晚三叠世(220 Ma)—早侏罗世末期 (185 Ma)及中侏罗世(175 Ma)—早白垩世末 (110 Ma)两期,不过由于早期抬升时鄂尔多斯盆 地发生了逆时针旋转,所以盆地西缘的中北部地 区对于南部晚三叠世构造事件的响应过程要更为 复杂,并不是单纯的由南向北的传递性隆升,尤 其要考虑阿拉善地块对鄂尔多斯西缘构造抬升的 影响(张进等,2000,2004),具体的响应机制仍 有待商榷。

6 结论

(1)牛首山—罗山地区磷灰石裂变径迹测年结果显示,其中生代抬升的时限为中侏罗世(170 Ma)—早白垩世末(110 Ma),罗山地区的抬升启动时间(170 Ma)要早于牛首山地区(160 Ma)。

(2)裂变径迹测年与构造-沉积演化过程的综合分析表明,鄂尔多斯盆地西缘中生代抬升的启动时间为晚三叠世(220 Ma),并且经历了晚三叠世(220 Ma)—早侏罗世末期(185 Ma)与中侏罗世(175 Ma)—早白垩世末(110 Ma)两期构造抬升过程,分别显示出由南向北、由西南向东北方向传递的特征。

(3) 牛首山—罗山地区中生代的隆升过程属 于鄂尔多斯盆地西缘第二期抬升的一部分,在小 区域尺度上主要与祁连造山带向北东方向挤出有 关。鄂尔多斯西缘中生代两期隆升过程则分别与 晚三叠世华北、华南板块碰撞以及中—晚侏罗世 拉萨地块向北东汇聚的远程效应有关。

致谢:感谢邱亮教授在数据解释方面的帮助。

References

BAI D L, 2021. Characteristics and genetic mechanisms of intraplate tectonic deformation in the western Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum. (in Chinese with English abstract)

- CHEN G, SUN J B, ZHOU L F, et al., 2007. Fission-track-age records of the Mesozoic tectonic-events in the southwest margin of the Ordos Basin, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (S2): 133-143.
- CHEN H, HU J M, GONG W B, et al., 2013. Cenozoic deformation and evolution of the Niushou Shan-Luo Shan fault zone in the northeast margin of the Tibet Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 20 (4): 18-35. (in Chinese with English abstract)
- CHEN H, HU J M, GONG W B, et al., 2015. Characteristics and transition mechanism of late Cenozoic structural deformation within the Niushoushan-Luoshan fault zone at the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 73-88.
- CHENG L Y, TANG X Y, LI Y, 2021. Research progress of factors affecting apatite fission track annealing [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 127-134. (in Chinese with English abstract)
- DARBY B J, RITTS B D, 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: the intraplate Western Ordos fold-thrust belt, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 205 (1-2): 13-24.
- DONG S W, ZHANG Y Q, LONG C X, et al., 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement [J]. Acta Geologica Sinica, 81 (11): 1449-1461. (in Chinese with English abstract)
- DONG S W, ZHANG Y Q, CHEN X H, et al., 2008. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic [J]. Acta Geoscientica Sinica, 29 (3); 306-317. (in Chinese with English abstract)
- DONG S W, ZHANG Y Q, LI H L, et al., 2019. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia: Commemorating 90th years of the "Yanshan Orogeny" [J]. Science China Earth Sciences, 61 (12): 1888-1909.
- DONG Y P, LIU X M, ZHANG G W, et al., 2012. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraints on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 47: 123-142.
- DUVALL A R, CLARK M K, KIRBY E, et al., 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis [J]. Tectonics, 32 (5): 1190-1211.
- GALLAGHER K, 2012. Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117 (B2): B02408.
- GAO F, WANG Y J, LIU S S, et al., 2000. Thermal history study in the west of the Ordos Basin using Apatite Fission Track analysis [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 24 (1): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- GAO S H, 2014. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the transverse structure in the middle of west margin of Ordos Basin and its significance to oil and gas accumulation [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- GE X H, 1989. The history of formation of intraplate orogenic belts in the

north China paleoplate [J]. Geological Review, 35 (3): 254-261. (in Chinese with English abstract)

- GONG W B, SHI W, CHEN H, et al., 2016. Quaternary active characteristics of the Liumugao fault in the northern segment of the Niushoushan-Luoshan fault [J]. Journal of Geomechanics, 22 (4): 1004-1014. (in Chinese with English abstract)
- GREEN P F, 1986. On the thermo-tectonic evolution of northern England: evidence from fission track analysis [J]. Geological Magazine, 123 (5): 493-506.
- GU Q C, 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Ningxia Hui autonomous region [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese with English abstract)
- GUO P, LIU C Y, WANG J Q, et al., 2018. Detrital-zircon geochronology of the Jurassic coal-bearing strata in the western Ordos Basin, North China: Evidences for multi-cycle sedimentation [J]. Geoscience Frontiers, 9 (6): 1725-1743.
- GUO Q Y, 2010. Tectonic evolution at the western margin of Ordos Basin with respect to metallogenesis of sandstone type uranium deposits [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- GUO R H, LI S Z, SUO Y H, et al., 2017. Indentation of North China Block into Greater South China Block and Indosinian Orocline [J]. Earth Science Frontiers, 24 (4): 171-184. (in Chinese with English abstract)
- HE P J, SONG C H, WANG Y D, et al., 2017. Cenozoic exhumation in the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau: Evidence from detrital fission track thermochronology in the Jiuquan Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122 (8): 6910-6927.
- HE Z J, LI J Y, NIU B G, et al., 1998. A Late Jurassic intense thrusting-uplifting event in the Yanshan-Yinshan area, Northern China, and its sedimentary response [J]. Geological Review, 44 (4): 407-418. (in Chinese with English abstract)
- HURFORD A J, GREEN P F, 1982. A users' guide to fission track dating calibration [J]. Earth and Planetary Science Letters, 59 (2): 343-354.
- KETCHAM R A, 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 58 (1): 275-314.
- KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al., 2007a. Improved measurement of fission-track annealing in apatite using caxis projection [J]. American Mineralogist, 92 (5-6): 789-798.
- KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al., 2007b. Improved modeling of fission-track annealing in apatite [J]. American Mineralogist, 92 (5-6): 799-810.
- KOHN B P, GREEN P F, 2002. Low temperature thermochronology: from tectonics to landscape evolution [J]. Tectonophysics, 349 (1-4): 1-4.
- KOU L L, LI Z H, DONG X P, et al., 2021. The age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section in Longde, the northeastern margin of the Tibetan Plateau, and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 1051-1064.

(in Chinese with English abstract)

- LEI Q Y, ZHANG P Z, ZHENG W J, et al., 2016. Dextral strike-slip of Sanguankou-Niushoushan fault zone and extension of arc tectonic belt in the northeastern margin of the Tibet Plateau [J]. Science China Earth Sciences, 59 (5): 1025-1040.
- LI B, 2019. Thrust structure and its effect on hydrocarbon in the western margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- LI F Q, ZHANG S Z, LI J, et al., 2022. Definition of Mid-Late Jurassic Peripheral Foreland Basin in the northern margin of Lhasa Block [J]. Earth Science, 47 (2): 387-404. (in Chinese with English abstract)
- LISZ, SUOYH, ZHOUJ, et al., 2022. Tectonic evolution of the South China Ocean-Continent Connection Zone: Transition and mechanism of the Tethyan to the Pacific tectonic domains [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 683-704. (in Chinese with English abstract)
- LIY H, DUXX, LITX, 2022. Characterization of the Holocene extensional structures in the Wuwei Basin, northeastern margin of the Tibetan Plateau, and their formation mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 28 (3): 353-366. (in Chinese with English abstract)
- LIANG W T, ZHANG G W, LU R K, et al., 2013. Extrusion tectonics inferred from fabric study of the Guanzizhen ophiolitic mélange belt in the West Qinling orogen, Central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 345-357.
- LIN X B, CHEN H L, WYRWOLL K H, et al., 2011. The uplift history of the Haiyuan-Liupan Shan region northeast of the present Tibetan Plateau: Integrated constraint from stratigraphy and thermochronology [J]. The Journal of Geology, 119 (4): 372-393.
- LIU C Y, ZHAO H G, WANG F, et al., 2005. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 79 (6): 737-747. (in Chinese with English abstract)
- LIU J H, 2009. Apatite Fission Track (AFT) Analysis of the Cenozoic Extensional Exhumation and Uplift of the Helan Shan and the Qinling Mountains, and Frictional Heating along Active Faults [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator. (in Chinese with English abstract)
- MA J H, HE D F, 2019. Meso-Cenozoic tectonic events in the Helanshan Tectonic Belt and its adjacent areas: Constraints from unconformity and fission track data [J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (4): 1121-1142. (in Chinese with English abstract)
- MA X H, XING L S, YANG Z Y, et al., 1993. Paleomagnetic study since Late Paleozoic in The Ordos Basin [J]. Acta Geophysica Sinica, 36 (1): 68-79. (in Chinese with English abstract)
- MA Y S, 2003. The neotectonic activity and the evaluation of geological hazards risk in the upper reaches of the Yellow River [M]. Beijing: Geology Press, 1-278. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q R, ZHANG G W, 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: controversy and reconciliation [J]. Geology, 27 (2): 123-126.

- MIN W, CHAI Z Z, WANG P, et al., 1993. The study on the paleoearthquakes on the eastern piedmont fault of the Luoshan mountains in Holocene [J]. Plateau Earthquake Research, 5 (4): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG Z J, CHEN H D, FENG J P, 2012. Structural characters and evolution of the mid-south section at the west margin of Ordos Basin [J]. Geoscience, 26 (4): 691-695. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, WANG J Q, ZATTIN M, et al., 2018. Late Triassic-Early Jurassic uplifting in Eastern Qilian Mountain and its geological significance: Evidence from apatite fission track thermochronology [J]. Earth Science, 43 (6): 1983-1996. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, WANG J Q, LIU C Y, et al., 2019. Thermochronological constraints on the Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Haiyuan-Liupanshan region, northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 183: 103966.
- PENG H, 2020. Fission-track thermochronological analysis and its geological significance in the southwestern Ordos Block and its surroundings [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, LIU X Y, LIU C Y, et al., 2022. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos basin margin [J]. Acta Geologica Sinica, 96 (2): 387-402. (in Chinese with English abstract)
- REN J S, JIANG C F, ZHANG Z K, et al., 1980. Geotectonic evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 10-65. (in Chinese with English abstract)
- REN W J, ZHANG Q L, ZHANG J, et al., 1999. The plate tectonic formation of the Central Paleo Uplift in The Ordos Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 23 (2): 191-196. (in Chinese with English abstract)
- RUAN Z, LUO Z, YU B S, et al., 2021. Middle-Late Triassic basin prototype and tectonic paleographic response in the Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 28 (1): 12-32. (in Chinese with English abstract)
- SONG L J, MU Q H, LI A R, et al., 2013. Fission-track thermal evolution history in the formation age of Yaoshan Formation [J]. Coal Geology & Exploration, 41 (4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- SONG Y G, FANG X M, LI J J, et al., 2001. The Late Cenozoic uplift of the Liupan Shan, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 44 (S1): 176-184.
- SONG Y G, QIAN L B, LI Y, 2013. Fission track evidence of tectonic uplift in Liupanshan area since cretaceous [C] //Proceedings of the First National Youth Geological Congress. Fuzhou: 121-124. (in Chinese)
- TANG X Y, GUO Z M, 1992. The study and petroleum prospect of thrust nappe in the west margin of Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [M]. Xi'an: Northwest University Press. (in Chinese with English abstract)

- WANG J Q, JIA N, LIU C Y, et al., 2011. Fabric analysis of Yijun gravels of Lower Cretaceous in the southwestern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29 (2): 226-234. (in Chinese with English abstract)
- WANG J Q, LIU C Y, ZHAO H G, et al., 2020. Uplift and exhumation events and thermochronological constraints at the end of Triassic in southwestern Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 36 (4): 1199-1212. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUELLER J T, et al., 2001. Presentday crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements [J]. Science, 294 (5542): 574-577.
- WANG W T, ZHANG P Z, KIRBY E, et al., 2011. A revised chronology for Tertiary sedimentation in the Sikouzi basin: Implications for the tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 505 (1-4): 100-114.
- WANG W T, ZHANG P Z, LEI Q Y, 2013. Deformational characteristics of the Niushoushan-Luoshan fault zone and its tectonic implications [J]. Seismology and Geology, 35 (2): 195-207. (in Chinese with English abstract)
- WANG W T, ZHANG P Z, ZHENG D W, et al., 2014. Late Cenozoic tectonic deformation of the Haiyuan fault zone in the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 21 (4): 266-274. (in Chinese with English abstract)
- XU L Q, LI S Z, GUO L L, et al., 2016. Impaction of the Tan-Lu Fault Zone on uplift of the Luxi Rise: Constraints from apatite fission track thermochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 32 (4): 1153-1170. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z Y, BESSE J, 2000. Early Triassic paleomagnetic results from southern part of the Sichuan Basin and its tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geology, 35 (1): 77-82. (in Chinese with English abstract)
- YUAN W M, BAO Z K, DONG J Q, et al., 2007. Zircon and apatite fission track analyses on mineralization ages and tectonic activities of Tuwu-Yandong porphyry copper deposit in northern Xinjiang, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (12): 1787-1795.
- ZHANG H, JIN X L, LI G H, et al., 2008. Original features and palaeogeographic evolution during the Jurassic-Cretaceous in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 10 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J, MA Z J, REN W J, 2000. The mechanism of the difference between the northern part and the southern part of the fold and thrust belt on the Western edge of The Ordos Basin, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 24 (2): 124-133. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J, MA Z J, REN W J, 2004. Tectonic characteristics of the western Ordos thrust-fold belt and the causes for its north-south segmentation [J]. Acta Geologica Sinica, 78 (5): 600-611. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, LIU C Y, HE X Y, 2019. Discovery of kilometer-scale uplift and exhumation related to the Late Indosinian movement in the northern Ordos Basin, North China [J]. Acta Geologica Sinica-

English Edition, 93 (1): 231-232.

- ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data [J]. Geology, 32 (9): 809-812.
- ZHANG S H, LIU C Y, YANG M H, et al., 2018. Latest Triassic to Early Jurassic thrusting and exhumation in the southern Ordos Basin, North China: Evidence from LA-ICP-MS-based apatite fission track thermochronology [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 92 (4): 1334-1348.
- ZHANG W J, MENG X X, HU J M, et al., 1994. Tectonic characteristics and orogenic process of the junction of the Qilian-North Qinling orogenic belt [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1-150. (in Chinese t).
- ZHANG Y Q, LIAO C Z, 2006. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin [J]. Geology in China, 33 (1): 28-40. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z C, WANG X S, 2004. The issues of application for the fission track dating and its geological significance [J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, 40 (6): 898-905. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H G, 2003. Structural characteristics and the evolution in western Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H G, LIU C Y, WANG F, et al., 2007a. Uplift and evolution of Helan Mountain [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (S2): 217-226.
- ZHAO H G, LIU C Y, YAO Y M, et al., 2007b. Differential uplift in the west margin of Ordos Basin since Mesozoic from the fission track evidence [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 37 (3): 470-474. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO X C, LIU C Y, WANG J Q, et al., 2016. Mesozoic-Cenozoic tectonic uplift events of Xiangshan Mountain in northern North-South Tectonic Belt, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 32 (7): 2124-2136. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO X C, 2017. Mesozoic tectonic evolution and late reformation of the Northern North-South Tectonic Belt, China [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y, GAO H L, ZHANG S H, et al., 2022. A brief century review of the "Yanshan Movement" and its founder [J]. Acta Geologica Sinica, 96 (5): 1510-1523. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG D W, ZHANG P Z, WAN J L, et al., 2006. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 248 (1-2): 198-208.
- ZHU G S, 2015. Analysis of Meso-Cenozic structural characteristics and prediction of favorable oil and gas zone in Liupanshan Basin [D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白东来,2021. 鄂尔多斯盆地西缘板内构造变形特征及其成因机制 [D]. 北京:中国石油大学 (北京).

- 陈刚,孙建博,周立发,等,2007.鄂尔多斯盆地西南缘中生代构 造事件的裂变径迹年龄记录 [J].中国科学(D辑:地球科 学),37(S1):110-118.
- 陈虹, 胡健民, 公王斌, 等, 2013. 青藏高原东北缘牛首山-罗山 断裂带新生代构造变形与演化 [J]. 地学前缘, 20 (4): 18-35.
- 程璐瑶, 唐晓音, 李毅, 2021. 磷灰石裂变径迹退火影响因素研究 进展 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 127-134.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,等,2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山 运动新诠释 [J]. 地质学报,81 (11):1449-1461.
- 董树文,张岳桥,陈宣华,等,2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造 体系的形成与变形特征 [J]. 地球学报,29 (3): 306-317.
- 董树文,张岳桥,李海龙,等,2019. "燕山运动"与东亚大陆晚 中生代多板块汇聚构造:纪念"燕山运动"90周年 [J].中国 科学:地球科学,49 (6):913-938.
- 高峰,王岳军,刘顺生,等,2000.利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔 多斯盆地西缘热历史 [J]. 大地构造与成矿学,24 (1): 87-91.
- 高少华,2014. 鄂尔多斯盆地西缘中部横向构造带中新生代演化改造及其油气意义 [D]. 西安:西北大学.
- 葛肖虹, 1989. 华北板内造山带的形成史 [J]. 地质论评, 35 (3): 254-261.
- 公王斌,施炜,陈虹,等,2016. 牛首山-罗山断裂带北段柳木高 断裂第四纪活动特征 [J]. 地质力学学报,22 (4):1004-1014.
- 顾其昌, 1996. 宁夏回族自治区岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质 大学出版社.
- 郭庆银,2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 郭润华,李三忠,索艳慧,等,2017. 华北地块揳入大华南地块和 印支期弯山构造 [J]. 地学前缘,24 (4):171-184.
- 和政军,李锦铁,牛宝贵,等,1998. 燕山—阴山地区晚侏罗世强 烈推覆—隆升事件及沉积响应 [J]. 地质论评,44 (4): 407-418.
- 寇琳琳,李振宏,董晓朋,等,2021. 青藏高原东北缘隆德观音店 剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义 [J]. 地质力学学报,27 (6):1051-1064.
- 雷启云,张培震,郑文俊,等,2016. 青藏高原东北缘三关口−牛 首山断裂的右旋走滑与弧形构造带扩展 [J]. 中国科学:地球 科学,46 (5):691-705.
- 李斌,2019. 鄂尔多斯盆地西部冲断带构造与控油气因素研究 [D]. 西安:西北大学.
- 李奋其,张士贞,李俊,等,2022. 拉萨地块北缘中晚侏罗世周缘 前陆盆地的厘定 [J]. 地球科学,47 (2):387-404.
- 李三忠, 索艳慧, 周洁, 等, 2022. 华南洋陆过渡带构造演化: 特提斯构造域向太平洋构造域的转换过程与机制 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 683-704.
- 李艺豪,杜星星,李天秀,2022. 青藏高原东北缘武威盆地内部全 新世伸展构造特征及其成因机制 [J]. 地质力学学报,28 (3): 353-366.
- 刘池洋,赵红格,王锋,等,2005.鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性 [J].地质学报,79(6):737-747.
- 刘建辉, 2009. 贺兰山、秦岭山脉新生代伸展隆升及断层摩擦生热

磷灰石裂变径迹分析 [D]. 北京:中国地震局地质研究所.

- 马静辉,何登发,2019. 贺兰山构造带及邻区中—新生代构造事件:来自不整合面和裂变径迹的约束 [J]. 岩石学报,35 (4): 1121-1142.
- 马醒华,邢历生,杨振宇,等,1993.鄂尔多斯盆地晚古生代以来 古地磁研究 [J].地球物理学报,36 (1):68-79.
- 马寅生,2003. 黄河上游新构造活动与地质灾害风险评价 [M]. 北京:地质出版社,1-278.
- 闵伟,柴炽章,王萍,等,1993.罗山东麓断裂全新世古地震研究[J].高原地震,5(4):97-102.
- 欧阳征健,陈洪德,冯娟萍,2012.鄂尔多斯盆地西缘中南段构造特征与演化 [J].现代地质,26 (4):691-695.
- 彭恒,王建强,ZATTIN M,等,2018. 晚三叠世—早侏罗世祁连 山东部隆升的裂变径迹年代学证据及地质意义 [J]. 地球科学, 43 (6): 1983-1996.
- 彭恒,2020.鄂尔多斯地块西南邻区裂变径迹热年代学分析及地质 意义 [D].西安:西北大学.
- 彭恒,刘显阳,刘池洋,等,2022.鄂尔多斯盆地西南缘中生代中 晚期构造体制转化过程及其动力学背景 [J].地质学报,96 (2):387-402.
- 任纪舜,姜春发,张正坤,等,1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京:科学出版社,10-65.
- 任文军,张庆龙,张进,等,1999.鄂尔多斯盆地中央古隆起板块 构造成因初步研究 [J]. 大地构造与成矿学,23 (2):191-196.
- 阮壮,罗忠,于炳松,等,2021.鄂尔多斯盆地中—晚三叠世盆地 原型及构造古地理响应 [J].地学前缘,28 (1):12-32.
- 宋立军,牟秋环,李爱荣,等,2013. 宁夏固原炭山窑山组形成时 代的裂变径迹热史约束 [J]. 煤田地质与勘探,41 (4):1-4.
- 宋友桂,方小敏,李吉均,等,2001. 晚新生代六盘山隆升过程初 探 [J]. 中国科学: D辑,31 (增刊): 142-148.
- 宋友桂,千琳勃,李云,2013. 白垩纪以来六盘山地区构造隆升的 裂变径迹证据 [C] //第一届全国青年地质大会论文集. 福州: 121-124.
- 汤锡元,郭忠铭,1992. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探 [M]. 西安:西北大学出版社.
- 王建强, 贾楠, 刘池洋, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地西南部下白垩统 宜君组砾岩砾组分析及其意义 [J]. 沉积学报, 29 (2): 226-234.
- 王建强,刘池洋,赵红格,等,2020. 鄂尔多斯盆地西南部三叠纪 末抬升剥蚀事件及热年代学记录 [J]. 岩石学报,36 (4): 1199-1212.
- 王伟涛,张培震,雷启云,2013. 牛首山-罗山断裂带的变形特征 及其构造意义 [J]. 地震地质,35 (2): 195-207.
- 王伟涛,张培震,郑德文,等,2014. 青藏高原东北缘海原断裂带 晚新生代构造变形 [J]. 地学前缘,21 (4):266-274.
- 许立青,李三忠,郭玲莉,等,2016. 郑庐断裂带对鲁西隆升过程 的影响:磷灰石裂变径迹证据 [J]. 岩石学报,32 (4): 1153-1170.
- 杨振宇, BESSE J, 2000. 四川盆地南缘早三叠世古地磁结果及其 构造意义 [J]. 地质科学, 35 (1): 77-82.
- 袁万明,保增宽,董金泉,等,2007.新疆土屋—延东斑岩铜矿区 成矿时代与构造活动的裂变径迹分析 [J].中国科学 D 辑:地

球科学, 37 (10): 1330-1337.

- 张泓,晋香兰,李贵红,等,2008.鄂尔多斯盆地侏罗纪—白垩纪原始面貌与古地理演化 [J].古地理学报,10 (1):1-11.
- 张进,马宗晋,任文军,2000. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南北差异 的形成机制 [J]. 大地构造与成矿学,24 (2): 124-133.
- 张进,马宗晋,任文军,2004. 鄂尔多斯西缘逆冲褶皱带构造特征 及其南北差异的形成机制 [J]. 地质学报,78 (5):600-611.
- 张维吉,孟宪恂,胡建民,等,1994. 祁连山-北秦岭造山带接合 部位构造特征与造山过程 [M].西安:西北大学出版社, 1-150.
- 张岳桥,廖昌珍,2006.晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多 斯盆地改造 [J].中国地质,33 (1):28-40.
- 张志诚,王雪松,2004. 裂变径迹定年资料应用中的问题及其地质 意义 [J]. 北京大学学报 (自然科学版),40 (6):898-905.

赵红格, 2003. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化 [D]. 西安:

西北大学.

- 赵红格,刘池洋,王锋,等,2007a.贺兰山隆升时限及其演化 [J].中国科学 D辑:地球科学,37 (S1):185-192.
- 赵红格,刘池洋,姚亚明,等,2007b.鄂尔多斯盆地西缘差异抬 升的裂变径迹证据 [J].西北大学学报(自然科学版),37 (3):470-474.
- 赵晓辰, 刘池洋, 王建强, 等, 2016. 南北构造带北部香山地区 中-新生代构造抬升事件 [J]. 岩石学报, 32 (7): 2124-2136.
- 赵晓辰,2017. 中国南北构造带北部中生代构造演化与后期改造 [D]. 西安:西北大学.
- 赵越,高海龙,张拴宏,等,2022. 回眸燕山运动:致敬"燕山运动"的创建者和中国地质学会的奠基人翁文灏 [J]. 地质学报,96 (5):1510-1523.
- 朱国胜,2015. 六盘山盆地中新生代构造特征分析及有利油气区预测 [D]. 西安:长安大学.