

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.596



彬县—铜川地区延长组油页岩晚白垩世以来的 抬升剥蚀与冷却历史

于强^{1,2},任战利^{3,4},朱增伍⁵,陶霓^{1,2},王宝江⁶,李长春⁵

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054
2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 陕西西安 710054
3. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069
4. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069
5. 陕西省地质调查中心, 陕西西安 710068
6. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075

摘要:利用古温标与热年代学数据共同恢复油页岩的隆升冷却历史对于研究油页岩成矿的热背景有着重要的理论意义。利用钻孔 ZK900 磷灰石(U-Th)/He 测年数据,结合已有的永参1井磷灰石裂变径迹资料分别获得铜川地区和彬县地区延长组油页岩晚白垩世以来的古地温、抬升冷却期次、抬升冷却速率及剥蚀厚度等数据,并对比了两个地区油页岩经历的构造热演化史的差异性。ZK900 钻孔长6、长9和长10段磷灰石 He 年龄均值依次为 43.83 Ma、31.87 Ma 和 22.88 Ma。铜川地区油页岩晚白垩世以来经历了 97~40 Ma 快速抬升、40~8 Ma 缓慢抬升和 8 Ma 以来快速抬升 3 个阶段,剥蚀厚度及抬升速率分别为 600 m、10.5 m/Ma、10 m、0.3 m/Ma 和 1 290 m、161.3 m/Ma,对应的古温度及冷却速率分别为 100~60 °C、0.70 °C/Ma,60~50 °C、0.22 °C/Ma 和 50~25 °C、2.90 °C/Ma。彬县地区延长组油页岩晚白垩世以来经历了 3 期抬升冷却过程:97~40 Ma,持续抬升冷却(130~75 °C),冷却速率为 0.96 °C/Ma,抬升速率为 14.4 m/Ma,剥蚀厚度 820 m;40~8 Ma 温度基本未变(75~70 °C),抬升/冷却速率均很低,分别为 1.9 m/Ma 与 0.16 °C/Ma,剥蚀厚度 60 m;8 Ma 以来急剧降温(70~31 °C),抬升速率 125 m/Ma,冷却速率 4.88 °C/Ma,剥蚀厚度 1 000 m。彬县—铜川地区三叠系油页岩晚白垩世以来经历了 3 个抬升阶段,始新世 40 Ma 和中新世 8 Ma 为该套油页岩成矿后期冷却的关键时刻。研究表明,彬县地区和铜川地区抬升冷却和剥蚀历史具有一定的差异性,在今后油页岩成矿及后期改造研究中应区别分析。

关键词:热年代学;鄂尔多斯盆地;(U-Th)/He;渭北隆起;油页岩;裂变径迹;构造;石油地质。

中图分类号: P542, P597

文章编号: 1000-2383(2018)06-1839-11

收稿日期: 2018-01-04

Exhumation, Cooling and Erosion History of Triassic Oil Shale since Late Cretaceous, Binxian-Tongchuan Area of Ordos Basin

Yu Qiang^{1,2}, Ren Zhanli^{3,4}, Zhu Zengwu⁵, Tao Ni^{1,2}, Wang Baojiang⁶, Li Changchun⁵

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. The Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China
4. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China
5. Shanxi Geological Survey Center, Xi'an 710068, China
6. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Company Limited, Shanxi, Xi'an 710075, China

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41602128,41630312,41703055);中央高校基本科研业务费资助项目(No.310827171009);中央高校“双一流”引导专项(No.300104282708);鄂尔多斯盆地东南部三叠系油页岩盆地演化模拟专题研究(No.213027170400)。

作者简介:于强(1983—),男,副教授,博士,研究方向为盆地构造热演化史与低温热年代学。ORCID: 0000-0003-4311-2734.E-mail: yuqiang@chd.edu.cn

引用格式:于强,任战利,朱增伍,等,2018.彬县—铜川地区延长组油页岩晚白垩世以来的抬升剥蚀与冷却历史.地球科学,43(6):1839—1849.

Abstract: The recovery of exhumation history of oil shale with the method of geothermometer and thermochronology has scientific significance for the study of thermal background of oil shale mineralization and its reformation. Based on the theory of tectonothermal evolution, the paleogeotemperature, the exhumation-related cooling and the erosion of the Triassic oil shale since Late Cretaceous in the Binxian area and the Tongchuan area were recovered with the fission track data from the well Yongcan1 and the (U-Th)/He data from the drilling well ZK900, respectively. The tectonothermal evolution difference of the two areas are discussed. The average (U-Th)/He ages of the Chang6, Chang9 and Chang10 samples are 43.83 Ma, 31.87 Ma, and 22.88 Ma respectively. Three stages of exhumation-cooling since Late Cretaceous of the Tongchuan area were recovered: 97–40 Ma, fast exhumation; 40–8 Ma, slow exhumation, and 8 Ma to the present, extremely fast exhumation, respectively. The erosion thickness and exhumation rate are 600 m, 10.5 m/Ma and 10 m, 0.3 m/Ma and 1 290 m, 161.3 m/Ma, respectively. The paleotemperature and cooling rate are 100–60 °C, 0.70 °C/Ma and 60–50 °C, 0.22 °C/Ma and 50–25 °C, 2.90 °C/Ma, respectively. Three stages of exhumation-cooling since Late Cretaceous of the Triassic in the Binxian area were recovered: 97–40 Ma, increasing exhumation-cooling (130–75 °C), cooling rate of 0.96 °C/Ma, exhumation rate of 14.4 m/Ma, erosion thickness of 820 m; 40–8 Ma with little changed as 75–70 °C, exhumation rate/cooling rate, 0.16 °C/Ma and 1.9 m/Ma, erosion thickness of 60 m; 8 Ma to the present with sharp cooling as 70–31 °C, exhumation rate of 125 m/Ma, cooling rate of 4.88 °C/Ma, erosion thickness of 1 000 m, respectively. There are three stages for the exhumation-cooling history of the oil shale (Triassic in the Binxian-Tongchuan area). The Eocene (40 Ma) and the Late Miocene (8 Ma) are the critical moments for the cooling of the oil shale during its mineralization. More attention should be paid to the differences of exhumation, cooling, erosion between Binxian area and Tongchuan area when discussing the mineralization of the oil shale and its reformation in the Ordos basin.

Key words: thermochronology; Ordos basin; (U-Th)/He; Weibei uplift; oil shale; fission track; tectonic; petroleum geology.

0 引言

地温场及其演化对油页岩矿的形成、演化及保存有着重要的控制作用。鄂尔多斯盆地内部及周边各个构造单元的构造热演化史,均取得了不同程度的研究成果,以伊陕斜坡研究程度最高。伊陕斜坡古生代—中生代早期的地温梯度较低,中生代晚期地温梯度明显升高,达到 3.3~4.1 °C/100 m,大地热流值为 81~95 mW/m²,之后又迅速降低至现今的平均地温梯度(2.80 °C/100 m)及平均大地热流值(63 mW/m²)(任战利,1995)。渭北隆起在早白垩世末之前为鄂尔多斯盆地的一部分,总体以沉降接受沉积为主,燕山运动中晚期其构造格局开始形成,并在喜山期发展和完善(李三忠等,2009)。

前人对渭北隆起构造热演化史进行了大量研究。盆地西部天深 1 井和盆地北部麒参 1 井、镇川 1 井磷灰石裂变径迹资料表明,天环向斜和伊陕斜坡在 20~23 Ma 以来快速抬升(任战利,1995)。渭北隆起发育具有东西部早(114~106 Ma)、中北部晚(±86 Ma)的特点(王建强等,2010)。渭北地区主要经历了 3 期抬升过程,主要发生在 146~125 Ma、107.0~83.8 Ma 和 40.0~27.3 Ma(肖晖等,2013)。渭北隆起北部及东部韩城、河津地区在 40 Ma 以来抬升冷却加快,特别是在 5 Ma 以来抬升冷却速率

更快(任战利等,2015)。已有研究主要利用针对区域地质构造热演化进行分析,很少聚焦到油页岩固体矿藏上,目前还存在着彬县—铜川地区延长组长⁷³油页岩在晚白垩世以来抬升期次与幅度、冷却历史等问题没有解决,制约了人们对该区域油页岩成矿模式的认识及勘查部署工作。本文利用裂变径迹、(U-Th)/He 和含油气盆地模拟 3 个技术方法,分析了渭北隆起延长组油页岩后期抬升与冷却历史,为后续盆地热演化史与低温热年代学在油页岩成矿及后期改造方面研究提供借鉴。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上的叠合盆地,其构造演化经历了以下 6 个发展阶段:基底岩系形成阶段(太古—早元古代)、大陆裂谷集中发育阶段(中、晚元古代)、槽台对立发展阶段(早古生代)、克拉通拗陷与碰撞边缘形成阶段(晚古生代—中三叠世)、内陆盆地发展阶段(晚三叠世—白垩纪)和周边断陷盆地发育阶段(新生代)。鄂尔多斯盆地彬县—铜川地区发育三叠系油页岩,目前形成了一定规模的油页岩矿藏。该区域三叠系地层自下而上分别为刘家沟组、和尚沟组、二马营组和延长组,各套地层均为整合接触(图 1)。

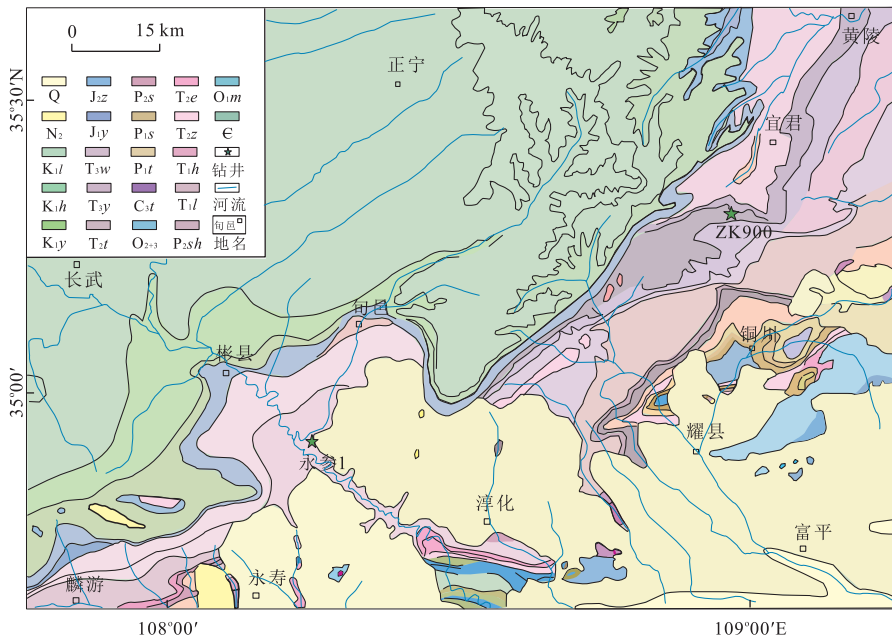


图1 鄂尔多斯盆地彬县—铜川地区地质图

Fig.1 Geological map of the Binxian-Tongchuan area, Ordos basin

Q.第四系;J_{2z}.直罗组;P_{2s}.石盒子组;T_{2e}.二马营组;O_{1m}.马家沟组;N₂.上新统;J_{1y}.延安组;P_{1s}.山西组;T_{2z}.纸坊组;Є.寒武系;K_{1l}.洛河组;T_{3w}.瓦窑堡组;P_{1t}.太原组;T_{1h}.和尚沟组;K_{1h}.华池组;T_{3y}.延长组;C_{3t}.本溪组;T_{1l}.刘家沟组;K_{1y}.宜君组;T_{2t}.铜川组;O₂₊₃.中上奥陶系;P_{2sh}.石盒子组

鄂尔多斯盆地渭北隆起构造单元带内三叠系中—上统延长组均有分布,在彬县—旬邑一带出露不全,延长组三段至瓦窑堡组被抬升剥蚀(周翔等, 2016).油页岩主要发育在长7底和长9顶,即长7³和长9¹两套油页岩,均发育在延长组第二段,以发育灰黑色泥岩和页岩为特征.顶部(长7油层组)和下部(长9油层组)各发育一层油页岩,分别称为“张家滩页岩”和“李家畔页岩”,是鄂尔多斯盆地中生界的主要生油岩.“张家滩页岩”具有分布范围广、厚度较大的特征,其富含动植物化石,有机质丰度高,为最重要的生油层,是盆地内部地层对比的良好标志层,又是延长组重要的生油层.石油部门将第二段按沉积旋回划分出长9油层组、长8油层组和长7油层组.

研究区长7³油页岩发育厚度较大(最大厚度达26.28 m)、含油率大多在5%以上,主要分布在彬县—耀州—宜君—黄龙一带;通过以往彬县—宜君地区的资源量估算,矿床规模可以达到大型—特大型油页岩矿床,因此将长7³油页岩作为本次研究的重点.

总体上研究区长7³油页岩厚度为0.41~26.28 m,一般为5~15 m,平均为9.70 m;含油率一般为3.5%~8.7%,平均为5.6%.彬县—宜君—界

头庙地区油页岩最为发育,厚度大、夹层少、连续性好、规模大,总体产状向北西缓倾.宜川—延川地区长7³油页岩层地表断续出露,长度约150 km,出露厚度为10~20 m.张家滩页岩含油率为0.3%~3.0%,含油率小于3.5%,未达到油页岩品位.宜川北—延长一带和清涧—米脂地区不发育张家滩页岩,亦不发育油页岩.

2 铜川地区(U-Th)/He 样品测试及数据处理

2.1 (U-Th)/He 样品采集及测试

钻孔ZK900为陕西省地质调查中心在金锁关东北太安镇范市村附近部署的一口油页岩探井,该孔从延长组三段开孔,打穿了延长组二段地层,在延长组一段内终孔,终孔进尺530.31 m.编录过程详细划分了岩性层及各组段的分界线,研究者对岩性特征进行了系统观测记录,并对含油页岩地层进行了重点观测记录.钻遇的张家滩页岩主要岩性有黑色油页岩、浅灰色长石砂岩、灰色砂岩、深灰色和灰绿色粉砂岩、灰褐色含油砂岩、灰色和深灰色泥岩以及粉砂质泥岩.黑色油页岩在本段顶部,有油腻感,见

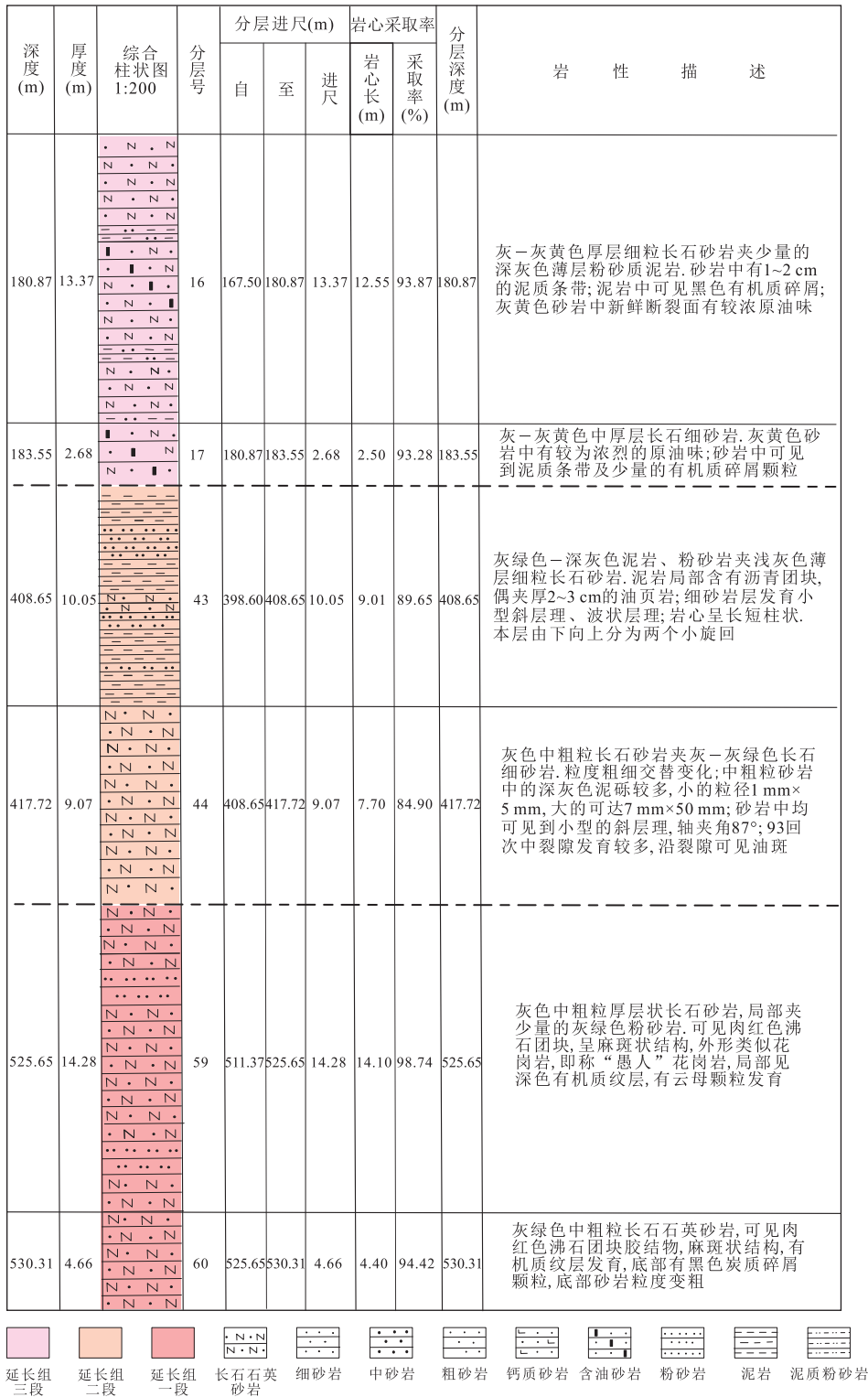


图 2 钻孔 ZK900 地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of drilling ZK900

黑色虚线条隔开 3 块样品的采集层段

沥青颗粒和铁氧化薄膜以及黄色硫磺析出物;砂岩常与泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩形成韵律层.砂岩中见小型包卷层理、水平纹层,泥岩中见植物残片印

模,有机质含量高.

录井及其分析表明,该孔发育两层油页岩,第一层油页岩在214.97~228.79 m,矿体厚度为13.82 m,

表 1 钻孔 ZK900 磷灰石(U-Th)/He 年龄

Table 1 (U-Th)/He ages of apatite, ZK900

样品	${}^4\text{He}(10^{-9} \text{ mL}) \pm$	U(mg/kg) \pm	Th(mg/kg) \pm	Th/U	F_t	Mass(10^{-6} g)	$t_U(\text{Ma})$	$t_F(\text{Ma})$	\pm	S(10^{-6} m)			
ZK900-6-1	0.120 0	0.003 1	5.06	0.14	22.06	0.56	4.47	0.77	7.07	13.63	17.61	0.43	70.9
ZK900-6-2	0.958 7	0.024 0	32.15	0.87	80.71	2.02	2.58	0.71	4.56	33.83	47.58	1.06	54.5
ZK900-6-3*	2.209 2	0.055 5	205.99	5.61	232.63	5.95	1.16	0.70	2.83	24.69	35.24	0.82	51.4
ZK900-6-4	0.304 0	0.007 7	14.44	0.40	34.39	0.93	2.44	0.68	2.83	39.22	57.38	1.25	49.7
ZK900-6-5*	0.405 6	0.010 2	37.31	1.04	98.39	2.68	2.71	0.63	2.49	22.16	35.12	0.71	42.7
ZK900-9-1	17.408 9	0.436 0	278.67	8.01	136.74	3.83	0.50	0.79	6.93	66.54	84.54	2.37	71.0
ZK900-9-2	0.238 9	0.006 0	10.43	0.31	27.08	0.82	2.66	0.71	3.33	35.20	49.85	1.16	53.6
ZK900-9-3*	0.049 6	0.001 3	10.46	0.35	49.29	1.47	4.83	0.57	1.09	16.97	29.52	0.58	37.7
ZK900-9-4*	0.057 0	0.001 5	18.34	0.53	47.64	1.31	2.66	0.57	0.95	16.67	29.33	0.55	36.5
ZK900-9-5	0.149 7	0.003 8	14.59	0.42	6.11	0.18	0.43	0.76	5.41	14.26	18.79	0.51	62.7
ZK900-10-1*	1.090 5	0.027 3	61.22	1.76	38.38	1.03	0.64	0.79	8.21	15.63	19.74	0.55	72.8
ZK900-10-2	0.242 3	0.006 1	26.49	0.83	9.74	0.32	0.38	0.70	2.46	28.27	40.35	1.06	50.3
ZK900-10-3*	0.071 0	0.001 8	2.28	0.08	14.65	0.46	6.59	0.76	6.66	15.32	20.28	0.53	66.2
ZK900-10-4	1.975 6	0.049 5	130.76	3.59	110.20	2.84	0.86	0.75	5.04	20.66	27.46	0.70	61.7
ZK900-10-5	0.550 5	0.013 8	16.01	0.44	53.70	1.36	3.44	0.78	8.45	18.74	24.05	0.58	71.9

注: F_t 为校正系数;校正年龄($F_t \text{ Age}$)=未校正年龄($U \text{ Age}$)/ F_t ;颗粒编号带*的数据可用于古地温恢复;Mass为单颗粒的总重量。

加权平均含油率为 6.3%;第二层油页岩在 436.44~467.47 m,为深灰—黑色泥岩夹灰色细砂岩长石砂岩,偶夹 1~17 cm 的黑色油页岩,具有较高的油页岩勘查及开采潜力.利用高精度 GPS 记录该钻孔的经纬度值和高程值,在延长组地层中分别挑选长 6 底 181.6 m 细砂岩、长 9 段 417.5 m 灰色中细粒砂岩和长 10 段 528.4 m 灰色中粒砂岩,每块样品重量为 4 kg 左右(图 2),保证在室内能分选出足够的热年代研究矿物.

在河北廊坊尚艺岩矿检测技术服务有限公司将挑选好的各个样品粉碎,用常规摇床分选、磁选、重液分离以及介电分离等方法,尽可能分离选出足够多的单矿物.具体来讲,首先清除岩石表面污物、剔除非同期产物(如包裹体、岩脉等)以后,根据岩性和岩石结晶程度将岩石样品粉碎至 40~100 目;然后通过淘洗将样品分为轻、重两部分.对重的部分进行强磁选,去除具有强磁性的部分,保留非强磁部分.对非强磁部分进行电磁选,去除具有电磁性的矿物,保留无磁性的矿物;然后对无磁性矿物进行重液分选,保留重矿物部分;接着对重矿物部分进行高频介电分离,去除金属硫化物,得到以磷灰石为主的样品.最后在双目镜下剔除杂质,获得纯净的磷灰石样品.

将挑选出的磷灰石矿物送至中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室进行测试.在体式显微镜下,从已挑选出来的 3 块样品的磷灰石颗粒中挑选出自形程度高、无包裹体和无裂缝的晶体.拍照并测量样品尺寸,计算 α 校正系数(F_t),再装入铂囊.氦气提取和分析在 AlphachronII 氦同位素质谱仪上进

行.采用 970 nm 二极管激光器加热至 900 °C 提取氦气.通过四极杆质谱仪(quadrupole mass spectrometer)测定 ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ 值; ${}^3\text{He}$ 的含量通过 ${}^4\text{He}$ 标准气体标定,最终计算可得到样品中 ${}^4\text{He}$ 的含量,测量精度优于 1%.在相同的流程下至少进行两次取气和分析过程.完成氦气含量分析的磷灰石样品均加入 25 μL ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{230}\text{Th}$ 浓度分别为 15 $\mu\text{g}/\text{L}$ 和 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 的稀释剂溶液;同时,在含 25 $\mu\text{g}/\text{L}$ ${}^{235}\text{U}$ 和 25 $\mu\text{g}/\text{L}$ ${}^{230}\text{Th}$ 的标准溶液中加入等量稀释剂,其中 7 mol/L 的硝酸可以将磷灰石溶解.磷灰石完全溶解之后,加水稀释即可用于 U、Th 测试.U、Th 元素分析在电感耦合等离子质谱(ICP-MS)上完成,U 和 Th 同位素比值分析不确定度通常小于 2%.

2.2 铜川地区延长组油页岩(U-Th)/He 数据分析

磷灰石(U-Th)/He 的封闭温度是已有定年体系中较低的,因此它能反映低温阶段的热历史信息(Wolf *et al.*, 1998).(U-Th)/He 定年方法的原理是根据磷灰石等矿物颗粒中 U、Th 衰变产生 He 发展起来的.通过测量样品中放射性 He、U 和 Th 的含量,就可以获得(U-Th)/He 的年龄,目前应用较多的是磷灰石(U-Th)/He 定年.

与裂变径迹不同,更低温的(U-Th)/He 定年体系中, α 衰变所产生的 ${}^4\text{He}$ 在矿物晶体内会随着热扩散逐渐散失到晶体外,只有在温度较低的情况下, ${}^4\text{He}$ 才能显著在晶体内得到保存(Farley, 2000).矿物(U-Th)/He 年龄能反映矿物所经受的最后一期封闭温度,即记录矿物经历封闭温度后的构造演化历史.当经历的温度降低至封闭温度,样品从开放

体系转变为封闭体系,磷灰石“时钟”效应开始启动.利用“时钟”启动的时间差、封闭温度差以及地温梯度,就可以揭示该地区时间-温度的动态演化历程以及剥蚀速率和降温速率(袁万明等,2001;胡圣标等,2008;邱楠生等,2010;任战利等,2015).

ZK900 钻孔中 3 块样品共获得 15 个测试年龄(表 1).将同一批次的 Durang 磷灰石标准样品的年龄进行监控,测得的 15 个年龄与参考年龄基本一致,表示本批次测试结果可信,没有出现流程上的差错.测试结果可靠性高,可以用来进行低温热年代学分析与解释.

这里需要说明的是,同一样品内,不同磷灰石颗粒内会存在裂隙,即使通过高倍显微镜下多次筛选也不能保证完全排除,另外在测试过程中辐射损伤也会导致年龄偏低或偏高.He 含量高的一个原因,有可能是颗粒内含有包裹体,其富含 U、Th 元素,但在溶解过程中难溶于硝酸,在加热过程中会释放出来,从而提高了计算的 He 年龄值.这就需要笔者在利用上述测试结果之前,分析并筛选出有价值的 He 年龄数据.

从(U-Th)/He 测试结果可以看出,对于长 6 样品,除了 ZK900-6-1 颗粒外,其余 4 个颗粒的年龄相对集中,He 年龄在 35.12~57.38 Ma,误差范围较小,平均年龄为 43.83 Ma,说明样品质量高并且计算得到 He 年龄准确性高;对于长 9 样品,5 块样品的年龄分布相对分散,除去 ZK900-9-1 颗粒的 84.54 Ma,其余 4 个颗粒的 He 年龄平均值为 31.87 Ma;埋藏较深的长 10 样品中,除 ZK900-10-2 外,其余 4 个颗粒年龄平均值为 22.88 Ma.上述数据表明,长 6、长 9 和长 10 油层组的 He 平均年龄依次减小,这与区域抬升背景一致,能用于抬升冷却历史的模拟.

3 永参 1 井裂变径迹数据解释

永参 1 井磷灰石裂变径迹测试工作是 1992 年在中国科学院高能物理所核技术应用部完成的(任战利,1995).为了更好地分析研究区地质演化过程,笔者对当时样品情况、测试流程、方法进行简要说明.

3.1 已有数据的样品及测试情况

磷灰石矿物是在该实验室挑出来的,裂变径迹年龄是用外探测器法测定的.用环氧树脂将矿物颗粒固定,磨出矿物颗粒内表面并抛光制成光薄片,将光薄片在 25 °C、6.6%的 HNO₃ 中蚀刻 30 s,用于揭

示自发裂变径迹.用低铀白云母作为外探测器形成探测器组件,在反应堆石墨反射层孔道照射.采用标准铀玻璃测量中子注量 φ , $\varphi = 6.172 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$, $N_d = 3\ 346$, $\rho_d = 1.066 \times 10^6 / \text{cm}^2$.中子注量是用 SRM962 铀标准玻璃测得的.照射后将白云母在 25 °C、40%的 HF 中蚀刻 30 min,揭示出诱发径迹.在 1500 倍光学显微镜下测量各径迹的参数.为了便于比较,测试期间将该批样品在 500 °C 退火 1 h 后,在反应堆石墨反射层孔道中照射,再按同样方法制作光薄片并蚀刻出诱发裂变径迹,测量径迹长度.该长度即为不受任何热作用的新生自发裂变径迹长度,经测量 110 个单矿物颗粒后,得出 $L = 16.27 \pm 0.90 \mu\text{m}$.

3.2 彬县地区油页岩晚白垩世以来抬升冷却史恢复

裂变径迹法用于恢复盆地热演化史的原理是,磷灰石中所含的²³⁸U 裂变时产生的碎片在磷灰石中会形成一定长度和密度的径迹,这些径迹仅在某一临界温度(称为封闭温度)以下才能保存,并且具有随温度的升高和受热时间增长,径迹密度减小、长度变短直至完全消失的特性,这一特性称为退火作用.裂变径迹的退火作用不仅有密度的减少,而且有径迹长度的缩短.由于磷灰石中的²³⁸U 自晶体形成后就以恒定的速度不断自发裂变,观测到的裂变径迹产生时间有早有晚,且经历了热史的不同阶段,因而径迹的长度分布包含了温度随时间变化的重要信息(任战利,1995;袁万明等,2001;王非等 2002;沈传波等,2005).

对裂变径迹测试而言,经历不同构造热演化历史的岩石样品,其对应 FT 年龄的含义是不同的.单纯意义上的年代测定,仅提供一个平均年龄,而没有径迹长度的详细数据,可能无任何地质意义.因此需要对多个样品、多个矿物的径迹长度、密度及组合规律进行详细讨论,才能取得较为理想的认识.

在对碎屑颗粒裂变径迹数据解释之前,需要注意经历不同热演化过程的样品,其裂变径迹中值年龄具有不同的地质意义,因此必须对比中值年龄与地层年龄的相对大小,并对样品所经历的最大退火程度做出判断. $P(\chi^2)$ 代表观测值方差与预测方差之间的差别,常被用于对裂变径迹年龄结果的检验.若中值年龄大于地层年龄,一般认为该年龄主要代表物源碎屑年龄,应该属于源区构造事件的残存径迹年龄记录;若中值年龄小于地层年龄且 $P(\chi^2) < 5\%$ 或 $P(\chi^2) = 0$,则该年龄显然属于混合年龄;若中值年龄小于地层年龄且 $P(\chi^2) > 5\%$,此年龄才

表 2 永参 1 井 YC-01 样品磷灰石裂变径迹测试结果

Table 2 Apatite fission-track data of sample YC-01, well Yongcan1

N_s	N_i	$S(10^{-6} \text{ cm}^3)$	$t_i(\text{Ma})$	N_s	N_i	$S(10^{-6} \text{ cm}^3)$	$t_i(\text{Ma})$
13	84	122	28.5	102	625	123	30.1
15	61	155	45.3	21	121	153	32
5	28	90	32.9	74	590	165	23.1
41	280	128	27	11	62	137	32.7
21	145	106	26.7	30	165	106	33.5
23	120	137	35.3	22	130	245	31.2
24	96	154	46	12	100	142	22.1
16	114	155	25.9	10	64	138	28.8

注:颗粒数为 16 个;统计误差 $\sigma=5.802 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$;S 为观测面积; ρ_s 、 ^{238}U 自发裂变径迹密度,为 1.950×10^5 ; ρ_i 、 ^{235}U 诱发裂变径迹密度,为 1.234×10^6 ; γ_{si} 自发径迹数和诱发径迹数之间的相关系数,为 0.979; $P(\chi^2)$ 观测值方差与预测方差之间的概率检验,为 55%; t_i 裂变径迹年龄, $29.1 \pm 2.0 \text{ Ma}$, L 裂变径迹长度, $10.4 \pm 2.6 \mu\text{m}$ 。

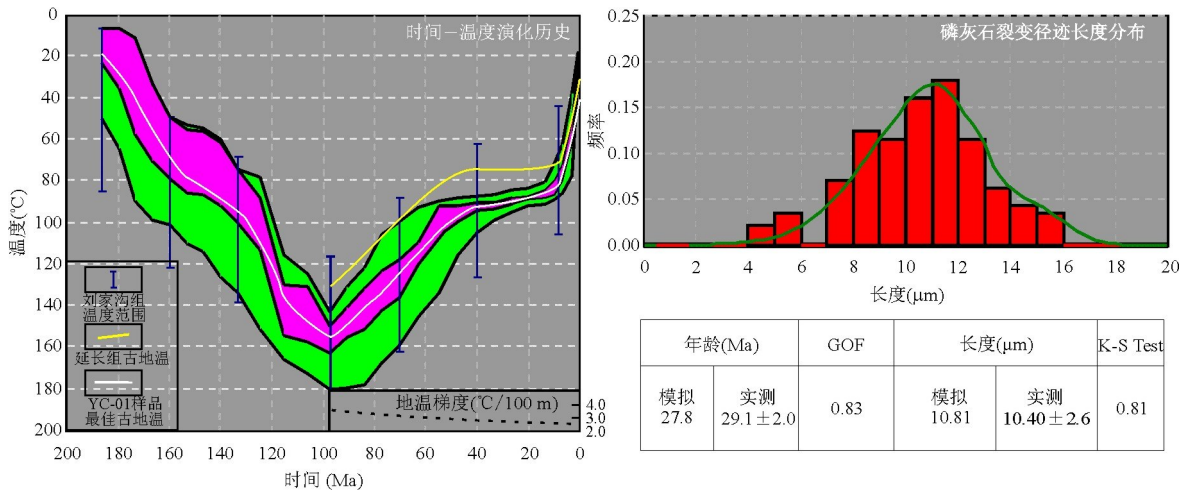


图 3 永参 1 井晚白垩世以来抬升冷却史

Fig.3 Exhumation-cooling history since Late Cretaceous, well Yongcan1

能代表构造抬升冷却事件的真实年龄(曹凯等, 2009). YC-01 样品的 $P(\chi^2)$ 为 55%, 均远大于 5%, 表明该年龄能代表抬升冷却的真实年龄。

永参 1 井有 2 块样品, 编号 YC-01 样品埋深 1 052.64 m, 岩性为中细粒砂岩; YC-02 样品埋深 1 322.64 m, 岩性为中粒砂岩. 永参 1 井磷灰石单颗粒年龄测试结果(任战利, 1995)见表 2, 两个样品的表观年龄分别为 $29.1 \pm 2.0 \text{ Ma}$ 和 $27.3 \pm 2.9 \text{ Ma}$, 远小于地层年龄(245~238 Ma). YC-01 样品属于三叠系刘家沟组, 其磷灰石裂变径迹长度均值为 $10.4 \pm 2.6 \mu\text{m}$ (径迹数 $n=65$)、分布宽度为 $2.6 \mu\text{m}$, 小于未遭受任何热作用的初始长度 $16.27 \mu\text{m}$, 表明该样品曾经历过一定程度的退火作用, 且温度高于 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (退火带底部), 之后在某一时期发生抬升而冷却到现今 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右(根据现今地温梯度 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, 地表温度 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 得出). 已有的径迹长度统计及频率分布仅是针对样品 YC-01 而言的, 样品 YC-02 未统

计相关数据, 因此在本文后面模型建立及热史恢复时, 仅考虑使用 YC-01 的数据。

用实测 R_o 测试数据, 结合公式 $\ln(R_o) = 0.0096 T_{\text{max}} - 1.4$, 获得了该区域三叠系刘家沟组样品经历的最大古地温在 $142 \sim 155 \text{ }^\circ\text{C}$, 以此为约束, 将 YC-01 样品中共计 65 个径迹长度数据和 16 个年龄值输入 HeFTy 模拟软件. 裂变径迹热史模拟采用杜兰戈标准样品地温退火模型, 并采用 Monte Carlo 方法随机模拟 1 000 条温度路径, 其中绿色细线条为可接受的热史轨迹(拟合度 $>5\%$), 红色细线条为较好的热史轨迹(拟合度 $>50\%$), 白色粗线为最佳热史轨迹. 初始径迹长度设定为实验测定的数值($16.27 \mu\text{m}$), 在具体的模拟中选用限制任意搜索项拟合, D_{par} 为 $1.5 \mu\text{m}$ (图 3). 对比模拟数据与实测数据, 利用年龄 GOF 和 K-S Test 两个指标验证拟合情况, 要求两个指标最低都要在 50% 以上才算模拟质量高, 越高越接近实际地质演化情况。

永参 1 井 YC-01 样品实测年龄为 29.1 ± 2.0 Ma, 而通过软件模拟获得“最好”模拟质量情况下 ($GOF = 0.83$, $K-S \text{ Test} = 0.81$), 模拟年龄为 27.8 Ma. 热史模拟的表明(图 3), 样品自形成以来先经历了埋藏增温过程, 温度逐渐升高, 在早白垩世晚期, 地层开始抬升, 样品经历温度下降. 模拟结果显示在刘家沟组 YC-01 样品自早白垩世末(97 Ma) 以来经历了三期抬升冷却阶段: 97~40 Ma 刘家沟组地层持续降温, 温度从 155.0°C 降至 92.0°C , 样品从完全退火带至部分退火带; 40~8 Ma 样品温度变化幅度较低, 从 92.0°C 降至 82.0°C 左右; 8 Ma 以来, 温度急速降低至现今 42°C 左右, 反映了这一期极快速的抬升冷却事件.

对于永参 1 井而言, 刘家沟组 YC-01 样品与延长组长 7^3 油页岩的埋藏深度差为 590 m 左右, 连续沉积未有间断. 在分析两套地层在不同时期温度差异时, 不能仅用现今地温梯度和古埋藏深度计算, 还必须考虑当时的地温梯度和对应的剥蚀厚度. 已有研究认为, 鄂尔多斯盆地南部彬县—铜川一带在晚白垩世达到约 $4.3^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 最大古地温梯度, 之后持续降低至现今 $1.7^\circ\text{C}/100\text{ m}$. 从区域地质演化过程分析可知, 整个过程中地温梯度是逐渐降低的, 不可能是突变型的. 因此基于 YC-01 样品温度轨迹(图 2 中白色实线), 再根据两套地层的埋深差及每个时期的地温梯度就可以计算出该井延长组古地温的演化过程(图 2 中黄色实线).

计算结果表明, 彬县地区延长组在 97~40 Ma 持续降温, 温度从 130.0°C 降低至 75.0°C , 冷却速率为 $0.96^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 从完全退火带冷却至部分退火带; 40~8 Ma 样品温度变化幅度较低, 从 75.0°C 降至 70.0°C 左右, 冷却速率仅 $0.16^\circ\text{C}/\text{Ma}$; 8 Ma 以来, 温度急速降低至现今 31°C 左右, 冷却速率为 $4.88^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 反映了这一期极快速的抬升冷却事件.

4 彬县地区与铜川地区油页岩晚白垩世以来抬升剥蚀历史的差异

古温度是受地温梯度和古埋藏厚度共同约束的 (Yu *et al.*, 2018). 在前面磷灰石裂变径迹模拟获取的油页岩古温度数据及对应的三期阶段 (97~40 Ma, 40~8 Ma 和 8 Ma~现今) 的基础上, 利用 Petromod 软件进行盆地构造热演化史模拟. 对每个抬升阶段赋予相应的剥蚀量, 再进行“正演”模拟, 对

比模拟的古地温演化轨迹是否与裂变径迹计算的温度一致, 若拟合度较低, 就需要调整 3 个阶段对应的剥蚀厚度, 再次模拟并对比结果. 该过程需多次进行, 直到各个阶段古温度都具有较高拟合程度时, 模拟结果才能用于解释抬升时期、速率及幅度 (任战利等, 2006; 于强, 2009; 于强等, 2012).

从图 4a 可以看出, 彬县地区在奥陶纪连续沉积下奥陶统马家沟组、中奥陶统平凉组 and 上奥陶统背锅山组之后, 志留纪、泥盆纪、石炭纪均处于抬升剥蚀或沉积间断阶段, 早二叠世仅有 8 m 山西组沉积, 缺乏伊陕斜坡内广泛发育的太原组沉积. 地层经历后期抬升剥蚀, 不仅白垩系, 并且侏罗系也完全遭受剥蚀, 局部地区三叠系延长组出露地表. 延长组油页岩在 97~40 Ma 持续抬升, 剥蚀厚度可达 820 m, 抬升速率为 $14.4\text{ m}/\text{Ma}$; 40~8 Ma 延长组抬升幅度低, 长 7^3 油页岩埋深抬升近 60 m, 抬升速率仅为 $1.9\text{ m}/\text{Ma}$; 8 Ma 以来, 是该区域主要抬升剥蚀期, 抬升幅度达到 1 000 m, 使得上侏罗统和下白垩统地层完全遭受剥蚀, 上三叠统延长组抬升出露地表, 抬升速率 $125\text{ m}/\text{Ma}$, 与区域抬升冷却地质背景一致.

除去顶部 6.7 m 的黄土层外, ZK900 孔钻遇地层为上三叠统延长组, 按照长庆油田关于延长组的划分方案, 将其划分为长 4+5 至长 10 段 (未钻穿), 再结合该孔的录井和测井资料, 以笔者对黄陵—宜君地区构造热演化史模拟参数为依据 (于强, 2009; 于强等, 2012; Yu *et al.*, 2017), 建立 ZK900 孔的埋藏热演化史图 (图 4b). 在此基础上, ZK900-6 样品取 6-3 和 6-5 两个颗粒的年龄, ZK900-9 样品取 9-3 和 9-4 两个颗粒的年龄, 并取 (U-Th)/He 封闭温度 60°C (Farley, 2000; Tao *et al.*, 2017). 采取与上述彬县地区相似的研究方法, 将 3 个样品的封闭温度和校正后的年龄投影到图 4b, 不断调整各个时期的抬升幅度直至 (U-Th)/He 数据与模拟温度一致时, 所恢复的抬升冷却与剥蚀历史才能更加真实地反映铜川地区地质演化过程.

从模拟得到的数据来看, 铜川地区也经历了 97~40 Ma 快速抬升、40~8 Ma 缓慢抬升和 8 Ma 以来的急速抬升等三期抬升事件, 抬升幅度与速率分别为 600 m、 $10.5\text{ m}/\text{Ma}$, 10 m、 $0.3\text{ m}/\text{Ma}$ 和 1 290 m、 $161.3\text{ m}/\text{Ma}$. 长 7^3 油页岩古地温区间与抬升速率分别为 $100\sim 60^\circ\text{C}$ 、 $0.70^\circ\text{C}/\text{Ma}$, $60\sim 50^\circ\text{C}$ 、 $0.22^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 和 $50\sim 25^\circ\text{C}$ 、 $2.90^\circ\text{C}/\text{Ma}$.

对比图 4 永参 1 井和 ZK900 钻孔的构造热演化史可以看出, 两者在抬升期次与时间基本一致, 都

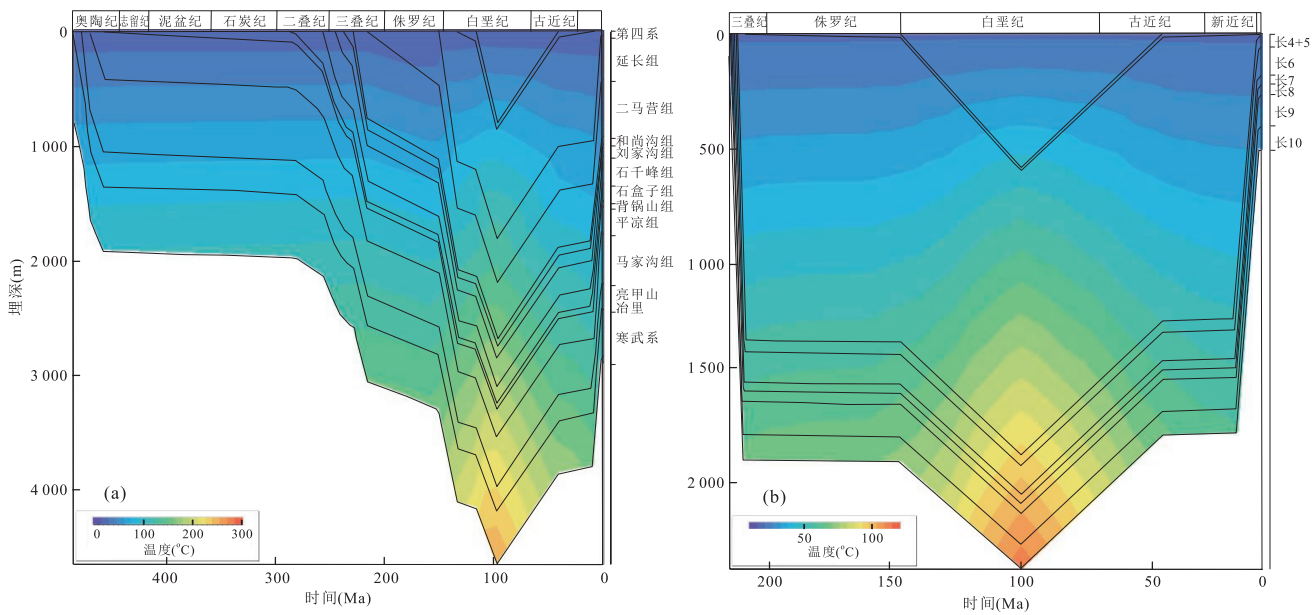


图 4 延长组油页岩构造热演化史

Fig.4 Tectonic thermal evolution history of oil shale, Yanchang Formation

a.永参 1 井;b.ZK900

具有快—慢—快的抬升节奏,8 Ma 以来急剧降温,但是两者在各阶段的抬升速率、幅度及温度变化等方面还存在一定的差异。

古地温是判断富有机质泥岩或泥页岩的生烃能力高低的重要指标。一方面,经历过低温过程的油页岩不具有或仅残留少量不满足工业性生产要求的原油;另一方面,经历过高温过程的油页岩由于以生成气态烃为主,也不是油页岩富集成矿的有利区。彬县地区和铜川地区延长组古地温介于庆阳高温异常区与盆地东部延长地区古地温之间(任战利等,2006; Yu *et al.*, 2017),既有一定的生烃能力,又没经历过大量的排烃作用甚至烃类物质的运移逸散过程。因此从构造热演化史与古地温的角度分析,陕北地区延长组油页岩生成的有限烃类物质,可以较好地吸附或残存于油页岩自身及其粉砂岩—细砂夹层中,有利于油页岩资源的富集与成矿。

5 结论

裂变径迹与(U-Th)/He 双定年技术目前应用于鄂尔多斯盆地油页岩成矿热背景及后期抬升过程等方面研究较少,在国内还没有公开发表关于这方面的研究实例。本文依据实测钻孔磷灰石(U-Th)/He 年龄数据,结合前人发表的钻孔磷灰石裂变径迹数据,采用盆地热演化史模拟技术对陕北地区延

长组油页岩自晚白垩世以来的抬升冷却与剥蚀历史进行这方面的尝试,并取得了一定的认识。

(1)彬县地区刘家沟组自晚白垩世以来经历的古地温演化过程:97~40 Ma 地层持续降温,温度从 155.0 °C 降低至 92.0 °C,样品从完全退火带至部分退火带过渡;40~8 Ma 样品温度变化幅度较低,从 92.0 °C 降至 82.0 °C 左右;8 Ma 以来,温度急速降低至现今 42 °C 左右,反映了这一期极快速的抬升冷却事件。

(2)彬县地区延长组油页岩在 97~40 Ma 期间抬升,剥蚀厚度可达 820 m,抬升速率为 14.4 m/Ma,温度从 130.0 °C 降低至 75.0 °C,冷却速率为 0.96 °C/Ma,从完全退火带冷却至部分退火带;40~8 Ma 延长组抬升幅度低,长 7³ 油页岩抬升速率仅为 1.9 m/Ma,温度变化幅度较低,从 75.0 °C 降至 70.0 °C 左右,冷却速率仅 0.16 °C/Ma;8 Ma 以来是该区域主要的抬升剥蚀期,抬升幅度达到 1 000 m,使得上侏罗统和下白垩统地层完全遭受剥蚀,上三叠统延长组抬升出露地表,抬升速率为 125 m/Ma,与区域极速抬升冷却地质背景一致,温度急速降低至现今 31 °C 左右,冷却速率为 4.88 °C/Ma。

(3)铜川地区延长组长 6、长 9 和长 10 段代表性 He 年龄分别为 35.24 Ma、29.52 Ma 和 20.28 Ma,具有随深度增大,He 年龄逐渐减小趋势。铜川地区经历了 97~40 Ma 快速抬升、40~8 Ma 缓慢抬升和 8 Ma 以来的急速抬升三期抬升事件,抬升幅度与速

率分别为 600 m、10.5 m/Ma, 10 m、0.3 m/Ma 和 1 290 m、161.3 m/Ma。三期抬升冷却阶段对应的古温度及冷却速率分别为 100~60 °C、0.70 °C/Ma, 60~50 °C、0.22 °C/Ma 和 50~25 °C、2.90 °C/Ma。

(4) 彬县地区与铜川地区三叠系延长组油页岩的构造热演化史及古地温演化过程有别。建议在今后对陕北延长组油页岩勘查及成矿模式研究时, 应对不同区域, 尤其是南部彬县地区与东部铜川地区分别加以讨论, 才能更符合实际地质情况。

致谢: 中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室孙敬博助理研究员进行 ZK900 样品(U-Th)/He 测试工作, 两位审稿人及编委提出了有益的修改意见, 在此一并致谢。

References

- Cao, K., Wang, G. C., Liu, C., et al., 2009. Thermochronological Evidence of the Cenozoic Differential Uplift Processes of the West Kunlun and Its Adjacent Area. *Earth Science*, 34 (6): 895—906 (in Chinese with English abstract).
- Farley, K. A., 2000. Helium Diffusion from Apatite: General Behavior as Illustrated by Durango Fluorapatite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B2): 2903—2914. <https://doi.org/10.1029/1999jb900348>
- Hu, S. B., He, L. J., Zhu, C. Q., et al., 2008. Method System of Thermal Reconstruction for Marine Basins. *Oil & Gas Geology*, 29(5): 607—613 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Liu, X., Suo, Y. H., et al., 2009. Triassic Folding and Thrusting in the Eastern Block of the North China Craton and the Dabie-Sulu Orogen and Its Geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (9): 2031—2049 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Wang, J. Y., Mei, Q. H., et al., 2010. Constraints of (U-Th)/He Ages on Early Paleozoic Tectonothermal Evolution of the Tarim Basin, China. *Science China: Earth Science*, 40(12): 1669—1683 (in Chinese).
- Ren, Z. L., 1995. Thermal History of Ordos Basin Assessed by Apatite Fission Track Analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 38(3): 339—349 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Cui, J. P., Guo, K., et al., 2015. Fission-Track Analysis of Uplift Times and Processes of the Weibei Uplift in the Ordos Basin. *Chinese Science Bulletin*, 60 (14): 1298—1309 (in Chinese).
- Ren, Z. L., Zhang, S., Gao, S. L., et al., 2006. Research on Region of Maturation Anomaly and Formation Time in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80 (5): 674—684 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Fan, Y. F., et al., 2005. Advances and Prospects of Apatite Fission Track Thermochronology. *Geological Science and Technology Information*, 24 (2): 57—63 (in Chinese with English abstract).
- Tao, N., Li, Z. X., Danišik, M., et al., 2017. Thermochronological Record of Middle-Late Jurassic Magmatic Reheating to Eocene Rift-Related Rapid Cooling in the SE South China Block. *Gondwana Research*, 46: 191—203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.003>
- Wang, F., Luo, Q. H., Li, Q., et al., 2002. Cooling Event around 30 Ma in the Northern Edge of the Qaidam Basin: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar and Fission Track Thermochronology. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 88—96 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Q., Liu, C. Y., Yan, J. P., et al., 2010. Development Time and Evolution Characteristics of Weibei Uplift in the South of Ordos Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 46 (4): 22—29 (in Chinese with English abstract).
- Wolf, R. A., Farley, K. A., Kass, D. M., 1998. Modeling of the Temperature Sensitivity of the Apatite (U-Th)/He Thermochronometer. *Chemical Geology*, 148 (1—2): 105—114. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00024-2)
- Xiao, H., Li, J. X., Han, W., et al., 2013. The Tectonic Uplift Time and Evolution Characteristics of Weibei Uplift in the South Edge of Ordos Basin. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 33 (5): 576—582, 593 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q., 2009. The Thermal Evolution History of Ordos Basin Mesozoic and Its Relationship with Various Energy Mineral Deposit (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 33—41 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q., Ren, Z. L., Li, R. X., et al., 2017. Paleogeotemperature and Maturity Evolutionary History of the Source Rocks in the Ordos Basin. *Geological Journal*, 52 (S1): 97—118. <https://doi.org/10.1002/gj.3069>
- Yu, Q., Ren, Z. L., Ni, J., et al., 2012. The Thermal Evolution History of Mesozoic, Fuxian Exploratory Area of Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 42 (5): 801—805 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q., Ren, Z. L., Wang, B. J., et al., 2018. Geothermal Field and Deep Thermal Structure of the Tianshan-Altun Region. *Geological Journal*. <https://doi.org/10.1002/gj.3202>
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Wang, L. F., 2001. Apatite and Zircon Fission Track Study on the Mineralization Age and Its Thermal History of Nanliang Gold Deposit, Eastern Hebei, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 21 (2): 225—

230(in Chinese with English abstract).

Zhou, X., He, S., Chen, Z. Y., et al., 2016. Characteristics and Controlling Factors of Source Rocks in Yanchang Formation Sequence Framework, Ordos Basin. *Earth Science*, 41(6): 1055–1066 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.087>

附中文参考文献

- 曹凯, 王国灿, 刘超, 等, 2009. 西昆仑及邻区新生代差异升降的热年代学证据. *地球科学*, 34(6): 895–906.
- 胡圣标, 何丽娟, 朱传庆, 等, 2008. 海相盆地热史恢复方法体系. *石油与天然气地质*, 29(5): 607–613.
- 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 等, 2009. 华北克拉通东部地块和大别—苏鲁造山带印支期褶皱—逆冲构造与动力学背景. *岩石学报*, 25(9): 2031–2049.
- 邱楠生, 汪集暘, 梅庆华, 等, 2010. (U-Th)/He 年龄约束下的塔里木盆地早古生代构造—热演化. *中国科学: 地球科学*, 40(12): 1669–1683.
- 任战利, 1995. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史. *地球物理学报*, 38(3): 339–349.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析. *科学通报*, 60(14): 1298–1309.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地热演化程度异

- 常分布区及形成时期探讨. *地质学报*, 80(5): 674–684.
- 沈传波, 梅廉夫, 凡元芳, 等, 2005. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望. *地质科技情报*, 24(2): 57–63.
- 王非, 罗清华, 李齐, 等, 2002. 柴达木盆地北缘 30 Ma 前的快速冷却事件及其构造意义—— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 及 FT 热年代学制约. *地质论评*, 48(增刊): 88–96.
- 王建强, 刘池洋, 闫建萍, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地南部渭北隆起发育时限及其演化. *兰州大学学报(自然科学版)*, 46(4): 22–29.
- 肖晖, 李建新, 韩伟, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中新生代构造抬升及演化. *西安科技大学学报*, 33(5): 576–582, 593.
- 于强, 2009. 鄂尔多斯盆地南部中生界热演化史及其与多种能源关系研究(硕士学位论文). 西安: 西北大学, 33–41.
- 于强, 任战利, 倪军, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地富县地区中生界热演化史探讨. *西北大学学报(自然科学版)*, 42(5): 801–805.
- 袁万明, 王世成, 王兰芬, 2001. 裂变径迹分析法研究河北南梁金矿床成矿时代及其热历史. *矿物学报*, 21(2): 225–230.
- 周翔, 何生, 陈召佑, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素. *地球科学*, 41(6): 1055–1066. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.087>