

doi: 10.12029/gc20160410

丁超, 陈刚, 郭兰, 等. 鄂尔多斯盆地东北部差异隆升过程裂变径迹分析[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1238–1247.

Ding Chao, Chen Gang, Guo Lan, et al. Differential uplift on the northeast margin of Ordos Basin: Evidence from apatite fission track analysis[J]. Geology in China, 2016, 43(4):1238–1247(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地东北部差异隆升过程裂变径迹分析

丁 超¹ 陈 刚² 郭 兰³ 张文龙² 师晓林² 徐小刚² 刘 腾²

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室地质学系, 陕西 西安 710069; 3. 延长油田股份有限公司, 陕西 延安 716000)

摘要:基于磷灰石裂变径迹(AFT)的分析方法,探讨鄂尔多斯盆地东北缘差异隆升过程及其隆升强度,为鄂尔多斯盆地东北缘(晋西挠褶带府谷—吴堡区段)构造演化历史及其与多种能源矿产耦合关系提供新的认识。不同构造单元及其不同层系样品的AFT分析表明:研究区北段府谷—兴县地区构造抬升相对较早,且经历了白垩纪晚期(86~56 Ma)和古近纪(44~37 Ma)两次隆升过程,平均隆升速率分别为24.5 m/Ma和41.8 m/Ma;研究区中段紫金山地区抬升相对较晚,主控构造事件发生在晚白垩世末期—古近纪早期(68~56 Ma)和古近纪中晚期(35 Ma),平均隆升速率分别为48.8 m/Ma和49.2 m/Ma;研究区南段临县—吴堡地区抬升最晚(35~21 Ma),平均隆升速率为73.9 m/Ma。因此,鄂尔多斯盆地东北缘晚白垩世以来的差异隆升过程具有北段抬升早、中段抬升相对较晚和南段抬升更晚的特点,南北区段统一的强烈构造抬升活动主要发生在古近纪以来的晚近时期,且构造隆升强度由南向北逐渐减弱。结合已有的成矿(藏)年代学资料分析表明,鄂尔多斯盆地东北缘关键构造事件及其隆升强度与多种矿产耦合成矿(藏)事件关系密切,构造事件与成藏(矿)事件呈现出显著的协同耦合特点。

关键词:鄂尔多斯盆地东北缘;中—新生代;磷灰石裂变径迹;差异隆升;隆升速率

中图分类号:P542.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)04-1238-10

Differential uplift on the northeast margin of Ordos Basin: Evidence from apatite fission track analysis

DING Chao¹, CHEN Gang², GUO Lan³, ZHANG Wen-long²,
SHI Xiao-lin², XU Xiao-gang², LIU Teng²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics/ Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Yanchang Oil Field Company, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

收稿日期:2015-04-27;改回日期:2015-11-26

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(2011610111-0006)、大陆动力学国家重点实验室科技部专项基金(BJ14252)、中国地质调查局油气调查项目(1212011220761)、陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1599)西安石油大学博士科研启动基金项目(2014BS04)联合资助。

作者简介:丁超,男,1983年生,博士,讲师,主要从事盆地构造与油气成藏年代学研究工作;E-mail: chaod@xsyu.edu.cn。

通讯作者:陈刚,男,1965年生,教授,博士生导师,主要从事盆地构造与油气地质学研究;E-mail: chengang@nwu.edu.cn。

Abstract: Apatite fission track analysis provides the opportunity for revealing differential uplift processes and uplift rate during the Mesozoic–Cenozoic on the northeast margin (Fugu–Wubao section of Jinxi flexural fold zone) of Ordos Basin, and offers new constraints and knowledge to the whole basin tectonic evolution history and the relationship between tectonic evolution and the coupling coexistence of multiple energy resources. The AFT age of different tectonic units and their different strata reveal that the uplift of Fugu–Xingxian area along the northern section of the study area was earlier during 86–56 Ma in the late Cretaceous and 44–37 Ma in Paleogene with the rate of speed being 24.5 m/Ma and 41.8 m/Ma. The uplift of Zijinshan area of the middle section of the study area was relatively late, and the key tectonic events took place at 68–56 Ma and 35 Ma during the late Cretaceous to middle–late Paleogene, with the rate of speed being 48.8 m/Ma and 49.2 m/Ma respectively. The uplift of Linxian–Wubao area along the south section of the study area was during 35–21 Ma with the rate of speed being 73.9 m/Ma. Therefore, the north section uplifted early, the middle section uplifted relatively late, and the south section uplifted last. What is more, the overall tectonic activation period mainly happened late in Paleogene in Fugu–Wubao section of Jinxi flexural fold zone, and the tectonic uplift rate weakened gradually from the south to the north in the northeast of Ordos Basin. Additionally, the relationship analysis of the tectonic event and the mineralizing chronology revealed that the key structural events and moderate uplift speed controlled reservoir formation time or mineralization time of the coupling coexistence of multiple energy resources on the northeast margin of Ordos Basin, and show the collaborative and coupled relationship between the tectonic events and accumulations.

Key words: northeast margin of Ordos Basin; Mesozoic–Cenozoic; apatite fission track; differential uplift; uplift rate

About the first author: DING Chao, male, born in 1983, lecturer, engages in the study and teaching of petroleum basin structural analysis and oil–gas accumulation chronology, E–mail: chaod@xsyu.edu.cn.

About the corresponding author: CHEN Gang, male, born in 1965, professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of basin structural analysis and petroleum geology; E–mail: chengang@nwwu.edu.cn.

Fund support: Supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 2011610111–0006), State Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Science and Technology (No. BJ14252), Program for the Oil–Gas Prospecting of China Geological Survey (No. 1212011220761), Education Department (No. JK1599) Scientific Research plan projects of Shaanxi Scientific Research Starting Foundation for Doctor of Xi'an Shiyou University (No. 2014BS04).

鄂尔多斯盆地处于中国四大不同构造域活动影响的复合部位,是油、气、铀等多种矿产共同富集的沉积能源盆地^[1–3]。近年来,人们基于裂变径迹(FT)分析方法的鄂尔多斯盆地构造年代学研究主要集中在盆地西部和中南部等地区^[4–17],盆地东北部研究程度相对较低,很大程度上制约着人们对鄂尔多斯盆地动力学演化的整体综合研究,以及对盆地东北部多种矿产共存富集规律的构造控矿规律认识。鄂尔多斯盆地东北缘主要指盆地东缘晋西挠褶带的中北部(吴堡—紫金山—兴县—府谷)区段,北段与走向近东西的伊盟隆起复合叠加,南段与盆地中部38°N附近的马家滩—吴堡东西向走滑断裂带交切,向西与盆地东部斜坡续接,向东隔离石断裂带与吕梁山构造活动隆起带相邻,显然处于多向构造体系的交切叠加、盆地稳定沉降区与边缘活动隆起带的构造转换区带。本次研究在野外地质构造考察的基础上,重点通过对鄂尔多斯盆地东北缘

不同区段、二叠系—中生界不同层位砂岩样品的磷灰石裂变径迹测试分析,探讨分析盆地东北缘—新生代以来的差异隆升过程,并为鄂尔多斯盆地的动力学演化及其多种矿产耦合成矿关系研究提供更窄时间域上的定量年代学约束。

1 地质背景

研究区所在的鄂尔多斯盆地主要由中晚元古代—古生代海相碳酸盐岩沉积与中生代内陆河流—三角洲相沉积叠加而成,其中,中新元古代—古生代该盆地属于华北克拉通陆块的一部分,而其形成一个独立的沉积盆地始于晚三叠世^[2–3]。依据鄂尔多斯盆地中生代以来地层接触的不整合类型、沉积建造组合(图1–b~d)以及区域构造体制转换事件,将研究区沉积地层自下而上划分为三大构造旋回层序:印支旋回构造层序、燕山旋回构造层序和喜山旋回构造层序。印支旋回构造层序主要包括

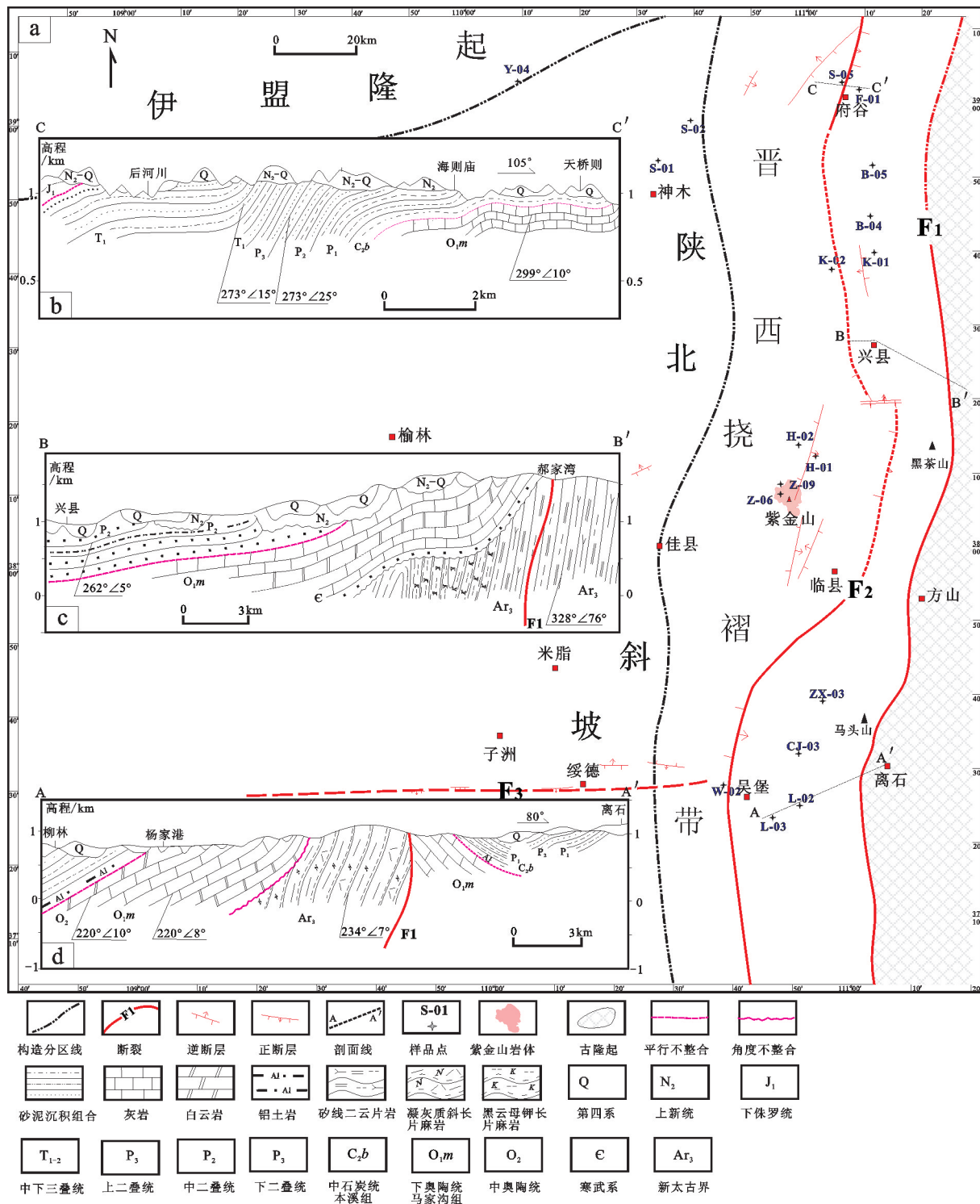


图1 鄂尔多斯盆地东北缘构造略图与样品点位置
 Fig.1 Sketch tectonic geological map and sampling sites on the northeast margin of Ordos Basin

中下三叠统和上三叠统,其顶部与上覆中下侏罗统以平行不整合接触;燕山旋回构造层序主要包括中下侏罗统和上侏罗统以及下白垩统,顶界面广泛发育角度不整合,并被新近系红黏土或第四纪地层覆盖,该层序内部还可进一步细分为下侏罗统与中侏罗统之间的平行不整合、中侏罗统与上侏罗统之间的微角度不整合以及上侏罗统与下白垩统之间的角度不整合;喜山旋回构造层序要包括古近系、新近系以及第四系,而研究区所在的盆地东北缘晚白垩世—古近纪地层几乎全部缺失,新近纪和第四纪的地层以角度不整合覆盖在下白垩统以及更老的地层之上。因此,上述鄂尔多斯盆地东北缘构造旋回层序划分结果表明,研究区在中—新生代至少经历了5期构造事件,而较为重要的区域性构造事件主要发生在晚白垩世以来,同时缺失了晚白垩世至新近纪一亿多年的沉积地层记录。

2 原理方法与样品数据

裂变径迹分析法是沉积盆地构造年代学研究的一种重要方法。在高温背景下,磷灰石裂变径迹(AFT)具有径迹密度减少、径迹长度变短直至完全消失的退火特点,随后的抬升冷却又会在低于其封闭温度条件下形成新的径迹^[18-21]。通过测量矿物中自发裂变径迹密度和外探测器矿物中诱发裂变径迹密度,采用Zeta常数法可以获得矿物的AFT年龄。因此,AFT年龄可以提供沉积盆地经历热事件后抬升冷却的年龄信息。

但是,AFT分析往往存年龄的多解性问题。尤其是径迹年龄的检验概率 $P(\chi^2) < 5\%$ 的混合年龄不具有真正的地质含义,因而需要对其混合径迹年龄进行解析。现今不同学者常用的方法为二项式拟合法,通过对单颗粒裂变径迹年龄进行概率密度坐标图解,然后通过二项式拟合曲线与概率密度曲线拟合,获得不同组分对应的峰值年龄(单颗粒年龄组分所占比例少于10%的峰值年龄一般予以舍弃)^[22-25],其中大于地层沉积年龄的峰值年龄,代表了物源区抬升构造事件的年龄,小于地层沉积年龄的峰值年龄,则代表了沉积地层遭受构造热事件后不同时期的抬升冷却事件年龄。

本文所使用的样品是采自鄂尔多斯盆地东北缘不同区段上古生界—中生界的18块露头砂岩,每

块样品重量都大于5 kg,从北往南比较全面的覆盖了研究区,采样位置如图1-a所示。采集样品时,严格遵循采集新鲜露头样品,仔细挑选的原则。所有样品在中国科学院高能物理研究所进行了磷灰石样品的FT测试分析,每个样品通过常规重液分离法和磁选法分选,分离出测试需要的磷灰石单矿物,将其制成环氧树脂样片,砂纸磨片后,用氧化铬抛光,制成光薄片。在25℃的6.6% HNO₃溶液中蚀刻30 s,揭示其自发径迹;然后将低铀白云母贴在磷灰石光薄片上,将低铀白云母外探测器与矿物一并置入反应堆辐照,照射之后将白云母外探测器在25℃温度下置于40% HF中蚀刻20 min,揭示其诱发裂变径迹密度,中子注量利用CN5铀玻璃标定,根据IUGS推荐的 ξ 常数法计算年龄值,Zeta常数为(357.8±6.9),测试分析结果如表1所示。

3 裂变径迹年龄解析

3.1 研究区北段(府谷—兴县地区)

研究区北段中—新生代沉积地层中,中上三叠统与中下侏罗统地层呈平行不整合接触,第四系或新近系以角度不整合覆盖在侏罗系—三叠系之上(图1-b)。本次研究采集了府谷—兴县地区石炭系—侏罗系的9个砂岩样品(表1),对其进行了磷灰石裂变径迹分析,AFT样品的中心年龄分布在79~44 Ma,径迹长度10.8~12.3 μm ,中心年龄皆小于沉积地层年龄,裂变径迹长度都小于初始裂变径迹平均长度16.5 μm ,说明磷灰石裂变径迹在形成之后均遭受构造热事件的影响而发生部分退火,甚至是完全退火。其中,S-01,S-05,F-01等6个AFT样品径迹年龄未能通过 $P(\chi^2)\%$ 检验($P(\chi^2) < 5\%$ 或 $P(\chi^2) = 0$),径迹长度分布呈现偏左的单峰或是不明显的双峰,中心年龄小于相应的沉积年龄,显示出年龄组分主要为沉积期后不同阶段构造事件混合作用的结果。通过峰值年龄拟合解析,获得了一系列峰值年龄(图2), P_1 主要分布在86~56 Ma, P_2 主要分布在44~37 Ma,结合该区 $P(\chi^2) > 5\%$ 的Y-04,S-02和B-05样品AFT中心年龄,表明研究区北段经历了晚白垩世中晚期和古近纪早中期两次构造抬升事件。

3.2 研究区中段(紫金山地区)

紫金山杂岩体位于晋西挠褶带中段,为一套深层侵入至浅层喷出的偏碱性—碱性岩体^[26-29]。本次

表1 鄂尔多斯盆地东北缘AFT测试分析数据
Table 1 FT data of apatite on the northeast margin of Ordos Basin

| 地区 | 样品 | 层位 | <i>n</i> | $\rho_s(10^5/cm)$ (N_s) | $\rho_i(10^5/cm)$ (N_i) | $\rho_d(10^5/cm)$ (N) | $P(\chi^2)\%$ | 中心年龄 $\pm 1\sigma$ /Ma | 池年龄 $\pm 1\sigma$ /Ma | $L\pm 1\sigma(N)$ / μm |
|----|-------|----------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 北段 | Y-04 | J ₂ | 28 | 2.616(1161) | 5.129(2276) | 8.018(10322) | 98.4 | 78 \pm 4 | 78 \pm 4 | 11.4 \pm 2.2(118) |
| | S-01 | T ₃ | 28 | 2.255(935) | 5.347(2217) | 7.683(10322) | 0 | 57 \pm 5 | 62 \pm 3 | 11.3 \pm 2.0(116) |
| | S-02 | J ₁ | 28 | 2.488(551) | 5.597(1239) | 8.576(10322) | 76.8 | 73 \pm 5 | 73 \pm 4 | 10.8 \pm 2.1(117) |
| | S-05 | T ₁ | 28 | 2.648(683) | 6.362(1641) | 9.470(10322) | 2.5 | 79 \pm 6 | 75 \pm 4 | 11.5 \pm 1.8(106) |
| | F-01 | P ₂ | 28 | 2.229(1047) | 8.042(3777) | 9.247(10322) | 0 | 50 \pm 4 | 49 \pm 2 | 11.5 \pm 2.3(115) |
| | B-04 | P ₂ | 28 | 2.367(991) | 8.033(3364) | 9.693(10322) | 0 | 53 \pm 4 | 55 \pm 3 | 11.6 \pm 2.0(108) |
| | B-05 | P ₂ | 21 | 4.364(441) | 9.678(978) | 8.911(10322) | 53.2 | 77 \pm 5 | 77 \pm 5 | 11.4 \pm 1.9(47) |
| | K-01 | P ₂ | 28 | 1.948(1151) | 6.459(3816) | 8.353(10322) | 0 | 44 \pm 4 | 48 \pm 2 | 11.3 \pm 2.4(128) |
| | K-02 | T ₂ | 28 | 2.254(1208) | 5.717(3064) | 8.911(10322) | 0 | 66 \pm 4 | 67 \pm 3 | 12.3 \pm 2.2(107) |
| 中段 | Z-06 | K ₁ | 28 | 0.784(52) | 2.050(136) | 8.911(10322) | 100 | 65 \pm 11 | 65 \pm 11 | 11.5 \pm 2.1(36) |
| | Z-09 | T ₂ | 28 | 2.744(482) | 8.431(1481) | 9.000(10322) | 81.4 | 56 \pm 4 | 56 \pm 4 | 11.5 \pm 2.1(108) |
| | H-01 | T ₂ | 28 | 1.539(557) | 4.872(1763) | 9.470(10322) | 1.5 | 53 \pm 4 | 57 \pm 3 | 11.1 \pm 2.2(109) |
| | H-02 | T ₃ | 27 | 1.434(512) | 4.168(1488) | 8.911(10322) | 2.1 | 62 \pm 5 | 59 \pm 4 | 11.2 \pm 2.1(119) |
| 南段 | ZX-03 | P ₂ | 28 | 1.407(492) | 5.933(2075) | 7.571(10322) | 54.5 | 35 \pm 2 | 35 \pm 2 | 12.0 \pm 2.1(114) |
| | CJ-03 | P ₂ | 28 | 1.018(435) | 7.598(3246) | 8.800(10322) | 76.7 | 23 \pm 1 | 23 \pm 1 | 11.7 \pm 2.2(109) |
| | L-02 | P ₂ | 28 | 1.414(515) | 9.231(3363) | 9.470(10322) | 98.3 | 28 \pm 2 | 28 \pm 2 | 12.0 \pm 2.3(104) |
| | L-03 | T ₁ | 28 | 3.223(568) | 17.747(3128) | 9.805(10322) | 97 | 34 \pm 2 | 34 \pm 2 | 12.1 \pm 2.5(107) |
| | W-02 | T ₃ | 28 | 0.481(249) | 3.976(2058) | 8.800(10322) | 50.4 | 21 \pm 2 | 21 \pm 2 | 11.3 \pm 2.5(112) |

注:*n*为颗粒数, N_s 为自发FT条数, ρ_s 为自发FT密度, N_i 为云母外探测器记录诱发FT条数, ρ_i 为云母外探测器记录诱发FT密度, N =封闭AFT条数, ρ_d 为中子注量监测器标准铀玻璃组件的诱发径迹密度, $P(\chi^2)\%$ 为检验概率,年龄 $\pm\sigma$ =FT年龄 \pm 标准差, $L\pm s$ =平均FT长度 \pm 标准差。

研究采集了该区下白垩统和中晚三叠统共4块砂岩样品(Z-06, Z-09, H-01, H-02)(表1, 图1-a)。其中, Z-06和Z-09样品AFT年龄分布在65~56 Ma, 均小于地层年龄, 雷达图指示样品的所有单颗粒径迹年龄均落入同一组($P(\chi^2)=100\%$ 或 $P(\chi^2)=81.4\%$)(图3), 径迹长度为11.5 μm , 呈现不对称的单峰或双峰。显示样品经历了退火之后被冷却抬升到部分退火带之上。不同学者对紫金山的侵位时间做了大量研究, 其主要的侵位时间集中在155~135 Ma, 有可能延续到早白垩世晚期100 Ma^[26-29], 导致紫金山岩体周围的地层经历了完全退火, Z-06和Z-09样品的AFT年龄表明, 紫金山地区在岩体大规模侵入之后的晚白垩世末期存在一次构造抬升事件。另一方面, H-01和H-02样品的径迹年龄均小于地层年龄, 径迹长度在11.1~11.2 μm , 但检验概论($P(\chi^2)<5\%$), 说明这两个样品尽管经历了退火, 但AFT年龄

仍为混合年龄, 通过Binom Fit软件对H-01和H-02样品的径迹年龄进行二项式解析(图3), 获得了68~67 Ma和35 Ma两次构造隆升时间。综合上述中生界4块砂岩样品的AFT年龄分析, 研究区中段主要经历了晚白垩世末期和古近纪中晚期的两次构造隆升事件。

3.3 研究区南段(临县—吴堡地区)

研究区南段广泛出露中生界和古生界, 并表现为第四系与二叠系及其下覆地层以角度不整合接触(图1-d), 在临县—吴堡地区采集了W-02、L-03、L-02等5块二叠系—三叠系砂岩样品(表1), 该5块砂岩样品AFT年龄在35~21 Ma, 且雷达图中AFT年龄分布集中($P(\chi^2)>50.4\%$)(图4), 中心年龄与池年龄一致, 反映单一年龄颗粒来自同一组分, 同时径迹长度分布在12.1~11.3 μm , 其分布呈现较窄的单峰形式, 代表了一次单一的构造抬升事件。以上临

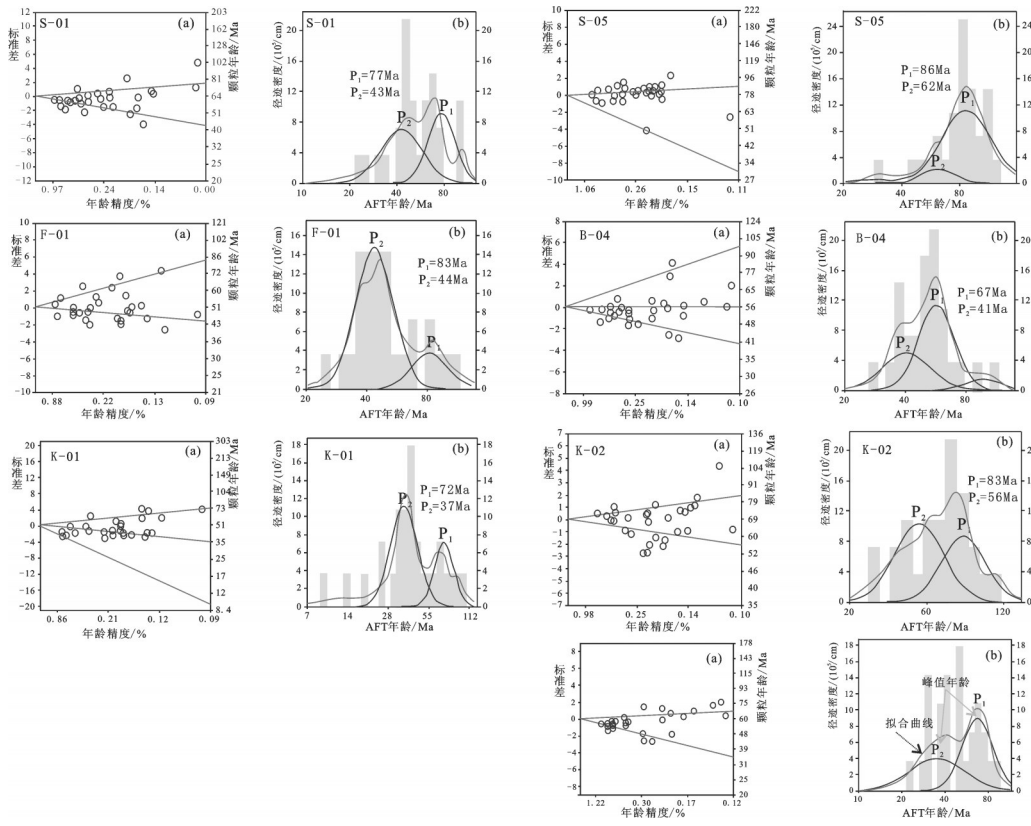


图2 研究区北段AFT年龄分布及峰值拟合

Fig.2 Single-grain-age distribution and peak-fitting of detrital AFT in the northern section of the study area

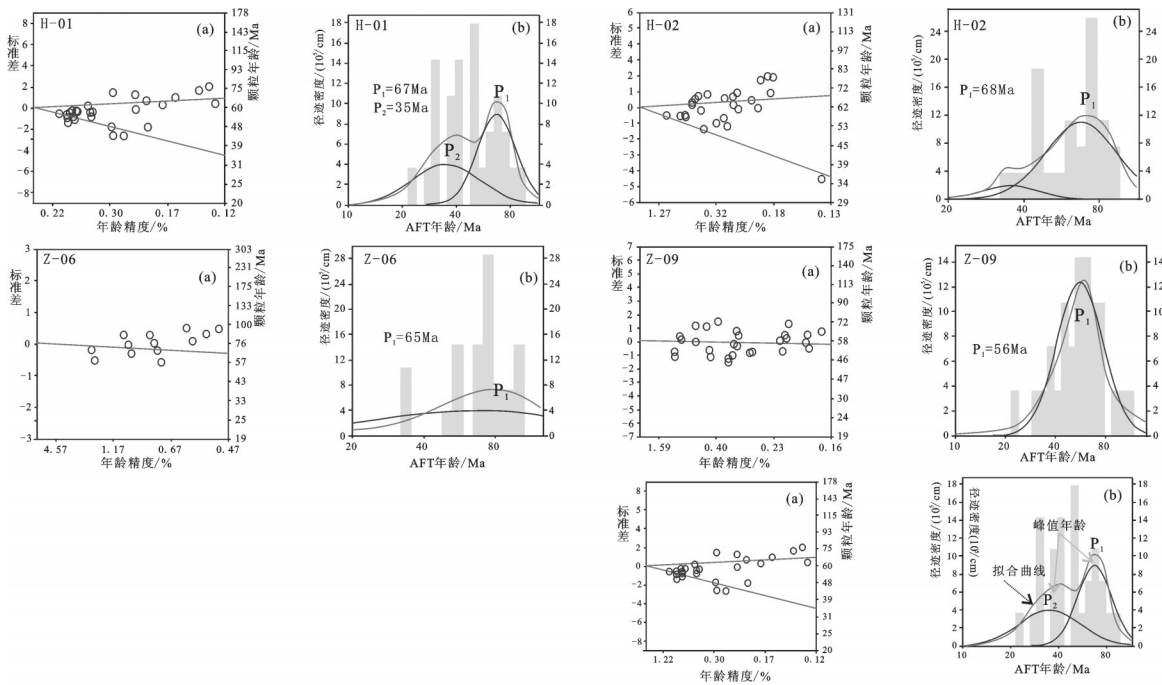


图3 研究区中段AFT年龄分布及峰值拟合

Fig.3 Single-grain-age distribution and peak-fitting of detrital AFT in the middle section of the study area

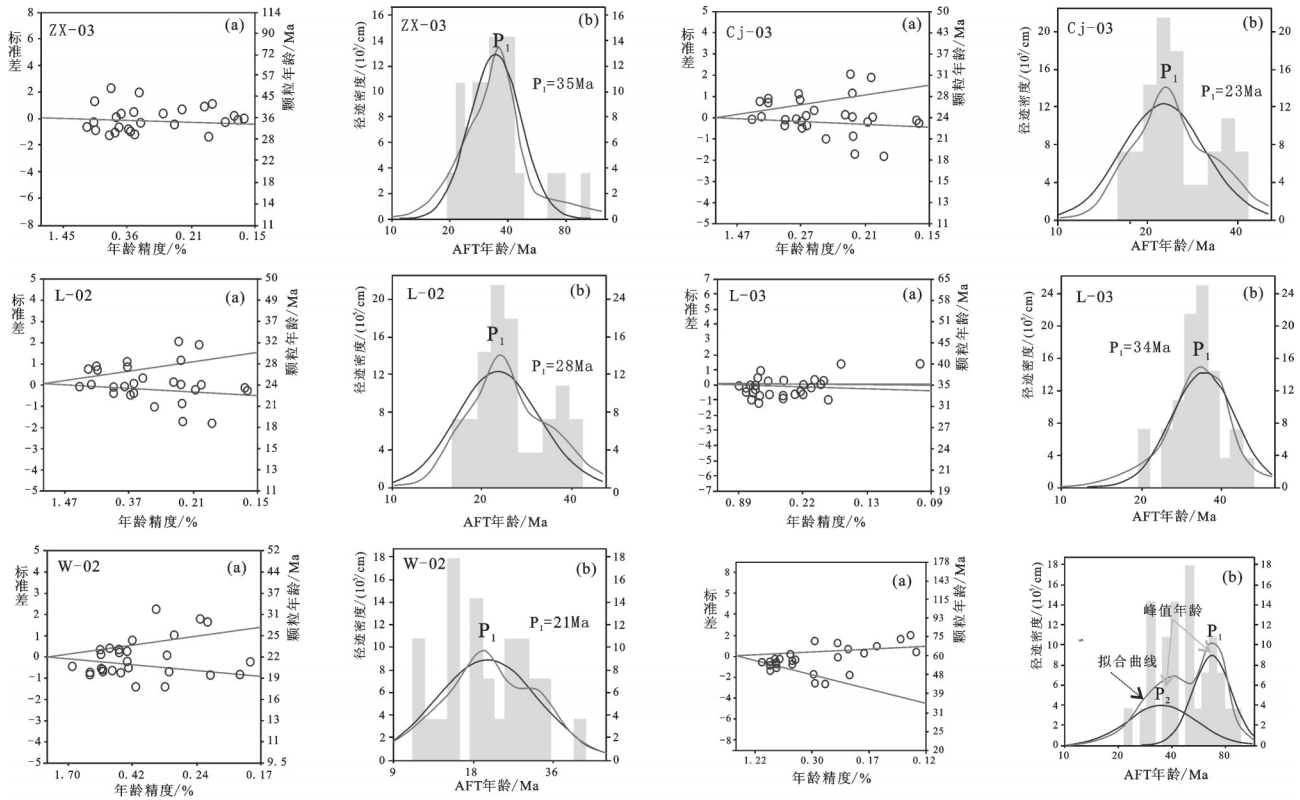


图4 研究区南段AFT年龄分布及峰值拟合

Fig.4 Single-grain-age distribution and peak-fitting of detrital AFT in the southern section of the study area

县—吴堡地区的5块砂岩样品的径迹年龄和径迹长度表明,研究区南段中—新生代的主要构造事件发生在古近纪中晚期(35~21 Ma)。

4 构造隆升速率分析

不同矿物具有不同的封闭温度,通过对不同矿物的同位素测年,可以获得其冷却阀门开启的时间,结合古地温梯度,计算其当时的古埋深,进而确定其抬升速率。根据 Gleadow(2000)^[19]提出的AFT抬升冷却的典型模式,当热史路径为快速冷却型时,其计算公式为:

$$V_{up} = ((T_c - T_o) / G \times 100) / (t_c - t_o) \quad (1)$$

式中: V_{up} 为抬升速率, m/Ma; G 为古地温梯度, $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; T_c 为AFT封闭温度 $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$, T_o 为今地表平均温度 10°C , t_c 为抬出AFT封闭温度带年龄, t_o 为第四纪。

当热史路径为复杂型时,即地层先被抬升到AFT部分退火带的底部,停滞了一段时间,再冷却抬生出AFT部分退火带,计算公式为:

$$V_{up1} = ((T_c - T_p) / G \times 100) / (t_c - t_p) \quad (2)$$

$$V_{up2} = ((T_p - T_o) / G \times 100) / (t_p - t_o) \quad (3)$$

式中: T_p 为AFT部分退火带顶部温度 60°C ; t_p 为抬出AFT部分退火带年龄。

上述分析该区构造抬升事件均发生在晚白垩世以来,结合鄂尔多斯盆地构造热演化史研究,古地温梯度采用分段选值,晚白垩—古近纪为 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 新近纪为 $2.9^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[9,26]。

基于鄂尔多斯盆地东部各区段不同层位的磷灰石裂变径迹分析,获得了研究区三个区段主控构造事件发生的时间。研究区北段构造抬升相对较早,且发生了两次主要构造事件,分别为晚白垩世中晚期 $86\sim 56\text{ Ma}$ 和古近纪早中期 $44\sim 37\text{ Ma}$ 。由于北段的磷灰石径迹年龄多为混合年龄,且通过二项式拟合可以解析出两个小于其地层年龄的峰值年龄,符合 Gleadow(2000)^[19]提出的磷灰石抬升冷却复杂型模式,根据抬升速率计算公式(2)和(3),获得研究区北段晚白垩世中晚期和古近纪早中期平均抬升速率分别为 24.5 m/Ma 、 41.8 m/Ma 。研究区中段

紫金山地区三叠系和白垩系样品共同指示了燕山中期构造热事件之后,该区抬升相对较晚,根据公式(2)和(3),晚白垩世末期和古近纪中晚期以来平均抬升速率分别为48.8 m/Ma和49.2 m/Ma。研究区南段临县—吴堡地区抬升最晚,且为快速抬升构造事件,根据公式(1)计算平均抬升速率为73.9 m/Ma。由此可见,盆地东北缘晚白垩世以来的构造隆升并非一个连续统一的过程,其北段抬升较早,而盆地东北缘区域性隆升主要发生在古近纪以来,且隆升强度表现为南强北弱的特点。

5 讨论

鄂尔多斯盆地多种能源矿产的主成矿时期不仅表现出显著的相关统一性、耦合关联性等特点,而且明显受控于中—新生代大陆动力学体制下盆地多旋回演化—改造过程的关键变革事件及其动—热转换作用。一方面,燕山中期早白垩世盆地东北缘埋藏增温与区域构造岩浆活动的耦合增温作用,使二叠纪和三叠纪地层最高古地温分别达到180℃和130℃以上^[15],有利于该区古生界的天然气和中生界的石油大规模生烃—运聚—成藏。燕山晚期—喜山期盆地东北缘经历了差异隆升过程,其北段抬升较早(86~56 Ma),构造隆升强度相对较弱(24.5 m/Ma),有利于该区油气的调整与保持;而研究区整体构造抬升和定型期主要发生在古近纪以来(62~21 Ma),北段和中段隆升速率相对较慢(41.8~49.2 m/Ma),南段隆升速率较强(73.9 m/Ma),总体呈现为由南向北构造隆升幅度逐渐减弱的趋势。另一方面,已有勘探成果表明^[30-31],鄂尔多斯盆地神木—米脂地区二叠系和三叠系经历了早白垩世的原生油气充注—成藏事件;燕山晚期—喜山期盆地该区上二叠统天然气在古近纪晚期(30 Ma)发生次生成藏,同时还是东胜地区叠加富集铀成矿的主要时期(30~8 Ma)^[32]。由此表明,盆地东北缘晚白垩世以来的主要构造抬升事件以及适度的抬升强度控制着多种矿产耦合成矿(藏)事件的时间,并表现为构造事件与成矿(藏)事件之间的协同耦合。

6 结论

综合上述鄂尔多斯盆地东北缘不同区段构造抬升时间与强度的分析,结合该区多种矿产耦合成

矿(藏)事件的时间,对盆地东北缘晚白垩世以来的差异隆升以及与多种矿产之间的耦合过程得出如下3点结论与认识:

(1) 不同构造单元及其不同层系样品的AFT年龄分析揭示:盆地东北缘晚中生代以来的差异隆升过程具有盆地东北缘北段抬升早,且经历了86~56 Ma、44~37 Ma两个幕次的抬升过程;中段构造隆升相对较晚,构造抬升年龄分别为68~56 Ma和35 Ma;南段构造抬升最晚,主要集中在35~21 Ma。

(2) 基于解析AFT抬升冷却的径迹年龄,分析盆地东北缘不同区段的隆升速率:北段露头区晚白垩世—古近纪发生两次构造隆升过程,晚白垩世中晚期隆升速率较慢,平均为24.5 m/Ma,古近纪早中期隆升相对较快,平均为41.8 m/Ma;中段在晚白垩世末期和古近纪中晚期经历了两次构造抬升,隆升速率分别为48.8 m/Ma和49.2 m/Ma;南段在古近纪中晚期发生一期快速构造抬升事件,其隆升速率为73.9 m/Ma。因此,盆地东北缘的构造激化期主要发生在古近纪,且由南向北构造隆升强度逐渐减弱。

(3) 结合盆地东北缘多种矿产成矿(藏)时间表明,研究区北段—中段晚白垩世中晚期经历一次缓慢抬升过程,有利于古生界—中生界的油气调整与保持;区域性强烈抬升发生在古近纪以来,促使油气发生二次运移—成藏、破坏—逸散以及铀等多种矿产成矿(藏)。

致谢:文中裂变径迹分析实验由中国地质大学袁万明教授等完成,在本论文撰写过程中西北大学任战利研究员、太原理工大学谢晋强讲师等给予的有益启示以及诸多帮助,在此一并表示感谢。

参考文献: (References):

- [1] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 421-726.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 421-726 (in Chinese).
- [2] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1-38.
Yang Junjie. Tectonic Evolution and Oil-gas Reservoir Distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-38 (in Chinese).
- [3] 刘池阳. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-256.
Liu Chiayang. Advances in the Accumulation and Formation for

- Multi-energy Mineral Deposits Coexisting in the Same Basin[M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-256 (in Chinese).
- [4] Zhao Mengwei, Behr H J, Ahrendt H, et al. Thermal and tectonic history of the Ordos basin, China: evidence from apatite fission track analysis, vitrinite reflectance, and K-Ar dating[J]. AAPG Bull., 1996, 80(7):1110-1134.
- [5] 孙少华, 李小明, 龚革联, 等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. 科学通报, 1997, 42(3): 306-309.
Sun Shaohua, Li Xiaoming, Gong Gelian, et al. The tectonic-thermal events in Ordos Basin, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(3): 306-309 (in Chinese).
- [6] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339-349.
Ren Zhanli. Thermal history of Ordos Basin assessed by apatite fission track analysis[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3): 339-349 (in Chinese with English abstract).
- [7] 高峰, 王岳军, 刘顺生, 等. 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, 2003, 24(1): 87-91.
Gao Feng, Wang Yuejun, Liu Shunsheng, et al. Thermal history study in the west of the Ordos basin using apatite fission track analysis[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 24(1): 87-91 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5):617-638.
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-633 (in Chinese with English abstract).
- [9] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(增刊):23-32.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos basin, China[J]. Science in China (Series D), 2007, 50(Supp.): 27-38.
- [10] 陈刚, 孙建博, 周立发, 等. 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), 2007, 37(增刊): 110-118.
Chen Gang, Sun Jianbo, Zhou Lifa, et al. Fission-track-age records of the Mesozoic tectonic events in the southwest section of the Ordos Basin, China[J]. Science in China (Series D), 2007, 50(Supp.): 133-143.
- [11] 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): 375-382.
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): 375-382 (in Chinese with English abstract).
- [12] 赵红格, 刘池洋, 姚亚明, 等. 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, 2007, 27(3): 470-474.
Zhao Hongge, Liu Chiyang, Yao Yaming, et al. Differential uplift in the west margin of Ordos Basin since Mesozoic from the fission track evidence[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, 27(3): 470-474 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘武生, 秦明宽, 漆富成, 等. 运用磷灰石裂变径迹分析鄂尔多斯盆地周缘中生代沉降隆升史[J]. 铀矿地质, 2008, 24(4): 221-232.
Liu Wusheng, Qin Mingkuan, Qi Fucheng, et al. Analysis on the Meso-Neozoic subsidence and uplift history of the periphery of Ordos basin using apatite fission track[J]. Uranium Geology, 2008, 24(4): 221-232 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王建强, 刘池洋, 闫建萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部渭北隆起发育时限及演化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 22-29.
Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Yan Jianping, et al. Development time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south of Ordos basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(4): 22-29 (in Chinese with English abstract).
- [15] 丁超, 陈刚, 李振华, 等. 鄂尔多斯盆地东北部构造热演化史的磷灰石裂变径迹分析[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 581-588.
Ding Chao, Chen Gang, Li Zhenhua, et al. Apatite fission track analysis of tectono-thermal history in the Northeast of Ordos Basin[J]. Modern. Geoscience, 2011, 25(3): 581-588 (in Chinese with English abstract).
- [16] 肖晖, 李建新, 韩伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中生代构造抬升及演化[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5): 576-582.
Xiao Hui, Li Jianxin, Han Wei, et al. The tectonic uplift time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south edge of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(5): 576-582 (in Chinese with English abstract).
- [17] 任战利, 崔军平, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2044-2056.
Ren Zhanli, Cui Junping, Li Jinbu, et al. Tectonic-thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei uplift of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2044-2056 (in Chinese with English abstract).
- [18] 康铁笙, 王世成. 地质热历史研究的裂变径迹法[M]. 北京: 科学出版社, 1991:1-112.
Kang Tiesheng, Wang Shicheng. Fission Track Analysis Methods for Geological History Research[M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-112 (in Chinese).
- [19] Gleadow A J W, Brown R W. Fission Track Thermochronology and the Long-term Denudational Response to Tectonics [C]// Summerfield M J(Ed). Geomorphology and Global Tectonics. Wiley, New York, 2000: 57-75.
- [20] 胡圣标, 张容燕, 周礼成. 油气盆地热历史恢复方法[J]. 勘探家, 1998, 3(4): 52-54.
Hu Shengbiao, Zhang Rongyan, Zhou Licheng. Methods of thermal history reconstruction in oil-gas basin[J]. Petrol Explorationist, 1998, 3(4): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王瑜. 构造热年代学——发展与思考[J]. 地学前缘, 2004, 11

- (40): 435-443.
Wang Yu. Some thoughts on tectono-thermochronology[J]. Earth Science Front, 2004, 11(40): 435-443 (in Chinese with English abstract)
- [22] 周祖翼, 毛风鸣, 廖宗廷, 等. 裂变径迹年龄多成分分离技术及其在沉积盆地物源分析中的应用[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 456-458.
Zhou Zhuyi, Mao Fengming, Liao Zongting, et al. Estimation of the multi-component fission track age data and its application in the provenance study of sedimentary basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 456-458 (in Chinese with English abstract).
- [23] Brandon M T. Decomposition of fission-track grain-age distributions[J]. American Journal of Science, 1992, 292: 535-564.
- [24] Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFT Solve: a program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data[J]. Geological Materials Research, 2000, 2(1): 1-32.
- [25] Yuan Wang Ming, Richard A K, Gao Shaokai, et al. Annealing behavior of alpha recoil tracks in phlogopite[J]. Chemical Geology, 2009, 266: 352-358.
- [26] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3731-3741.
Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3731-3741 (in Chinese with English abstract).
- [27] 肖媛媛, 任战利, 秦江峰, 等. 山西临县紫金山碱性杂岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53(5): 656-663.
Xiao Yuanyuan, Ren Zhanli, Qin Jiangfeng, et al. Geochemistry and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Zijinshan alkaline complex in the Linxian County, Shanxi Province: Geological Implication[J]. Geological Review, 2007, 53(5): 656-663 (in Chinese with English abstract).
- [28] 杨兴科, 晁会霞, 郑孟林, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体 SHRMP 测年地质意义[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 54-63.
Yang Xingke, Zhao Huixia, Zheng Menglin, et al. Geological significance of SHRMP dating of Zijinshan alkali complex in the eastern Ordos basin, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 54-63 (in Chinese with English abstract).
- [29] Ying Jifeng, Zhang Hongfu, Sun Min, et al. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime[J]. Lithos, 2007, 98: 45-66.
- [30] 丁超, 陈刚, 郭兰, 等. 鄂尔多斯盆地东北部上古生界油气成藏期次[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 69-73.
Ding Chao, Chen Gang, Guo Lan, et al. Timing of oil-gas accumulation in the Upper Paleozoic of northeastern Ordos basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(5): 69-73 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 多期次油气成藏流体包裹体间接定年——以鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气藏为例[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1003-1011.
Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, et al. Indirect dating of multi-stage hydrocarbon accumulations by fluid inclusion data: A case study of the Permian hydrocarbon accumulation in the northeast Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1003-1011 (in Chinese with English abstract).
- [32] 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 等. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究[J]. 铀矿地质, 2003, 19(3): 129-136.
Xia Yuliang, Lin Jinrong, Liu Hanbin, et al. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China[J]. Uranium Geology, 2003, 19(3): 129-136 (in Chinese with English abstract).