

# 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

陈刚\* 孙建博 周立发 章辉若 李向平 李向东

(大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069)

**摘要** 运用锆石和磷灰石裂变径迹(FT)分析方法, 探讨分析了鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的 FT 年龄分布与峰值年龄事件. 结果表明: (i) 早期构造事件主要发生在 213~194 Ma $\pm$ , 峰值年龄为 205 Ma, 并以晚三叠世构造隆升及其前缘粗碎屑沉积为其地质响应. (ii) 中期构造事件至少包含两个幕次, 一次发生在 165~141 Ma $\pm$ , 峰值年龄为 150 Ma; 二次发生在 115~113 Ma $\pm$ , 峰值年龄为 114 Ma; 其地质响应主要表现为晚侏罗世一早白垩世的逆冲推覆及其前缘粗碎屑沉积. (iii) 晚期构造事件主要表现为至少两个幕次的区域隆升作用, 一次发生在 100~81 Ma $\pm$ , 峰值年龄为 90 Ma; 二次发生在 66~59 Ma $\pm$ , 峰值年龄接近 63 Ma. 结合成矿年代学资料分析认为, 峰值年龄事件的极端环境效应和构造转换相对平稳期的适度活动, 有可能是鄂尔多斯盆地多种矿产耦合成矿、共存富集的关键因素.

**关键词** 鄂尔多斯盆地 中生代 裂变径迹(FT)年龄 不整合 构造事件

鄂尔多斯盆地是油、气、煤、铀等多种矿产共存富集的沉积能源盆地. 长期以来, 人们对于该盆地的构造演化及其燕山期构造热事件与油气生成、运聚成藏关系等的相关研究, 取得了不少重要突破和进展<sup>[1-8]</sup>. 已有勘探成果表明, 鄂尔多斯盆地是在古生代华北克拉通海相-滨浅海相盆地基础上发育形成的中生代内陆河湖相沉积盆地, 晚白垩世以来经历了以盆地抬升剥蚀和周缘断陷为主体的后期改造过程; 盆地中多种矿产尤其是油气的成藏阶段与中生代构造演化、主要构造热事件之间表现出明显的关联性. 近年来, 关键构造事件对盆地动力学演化及其多种矿产成矿作用的重要性愈来愈受到重视<sup>[9-15]</sup>, 鄂尔多斯盆地形成演化的构造事件年代学及其关键构造事件与多种矿产耦合成矿关系问题, 正在成为人们极

为关注的研究热点<sup>[16-23]</sup>.

基于盆地内钻井岩芯样品的磷灰石裂变径迹(FT)和伊利石K-Ar测年或热释光分析, 人们从不同角度讨论了鄂尔多斯盆地中生代构造热事件的时限. 任战利等<sup>[17,18]</sup>和赵孟为等<sup>[19,20]</sup>分别给出了 140~110 和 170~160 Ma热事件的不同年龄时限; 孙少华等<sup>[21]</sup>和高峰等<sup>[22]</sup>则认为中生代存在多期次的构造热事件, 分别给出了 215, 135, 72 或 170, 130, 75 Ma的事件年龄. 最近, 刘池洋等<sup>[23]</sup>对盆地及邻区FT年龄的统计分析, 给出了 149~144, 124~117 和 95~65 Ma中生代构造事件的时限. 显然, 对鄂尔多斯盆地中生代演化过程的主要构造事件、尤其是燕山期构造热事件的确切时限, 目前在认识上仍然存在较多争议或较宽时间域的不确定性.

收稿日期: 2006-07-03; 接受日期: 2006-12-18

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2003CB214601)、教育部长江学者和“油气盆地”创新团队发展计划项目(编号: IRT0559)共同资助

\* E-mail: [chengang@nwu.edu.cn](mailto:chengang@nwu.edu.cn)

鄂尔多斯盆地西南缘位于鄂尔多斯稳定地块与祁连-秦岭造山带之间的接合部位(图 1), 主要包括马家滩-平凉-陇县区段的盆地西缘构造带(I<sub>1</sub>)和渭北隆起区段的盆地南缘构造带(I<sub>2</sub>), 并以青铜峡-固原断裂与其西侧的走廊-六盘山弧形构造带(II)紧密相连, 区域上构成了盆地西南缘的“反S型”构造体系<sup>[24]</sup>. 该区特殊的构造位置、复杂的构造变形和较好的古生界—中生界露头, 不仅有可能细节地记录着盆地及邻区中生代演化的构造事件信息, 同时为运用FT方

法进行事件年代学研究提供了理想的采样和分析条件. 本文重点通过鄂尔多斯盆地西南缘不同层位砂岩露头样品的锆石和磷灰石FT测试分析, 结合区域野外地质勘察、最新勘探成果和裂变径迹资料, 探讨分析盆地西南缘中生代的FT峰值年龄事件记录及其地质响应, 客观认识盆地中生代构造演化阶段和事件年代学序列, 尤其是关键构造事件在更窄时域的峰值年龄分布, 以为盆地动力学演化和多种矿产耦合成矿关系研究提供重要基础和定量年代学约束.

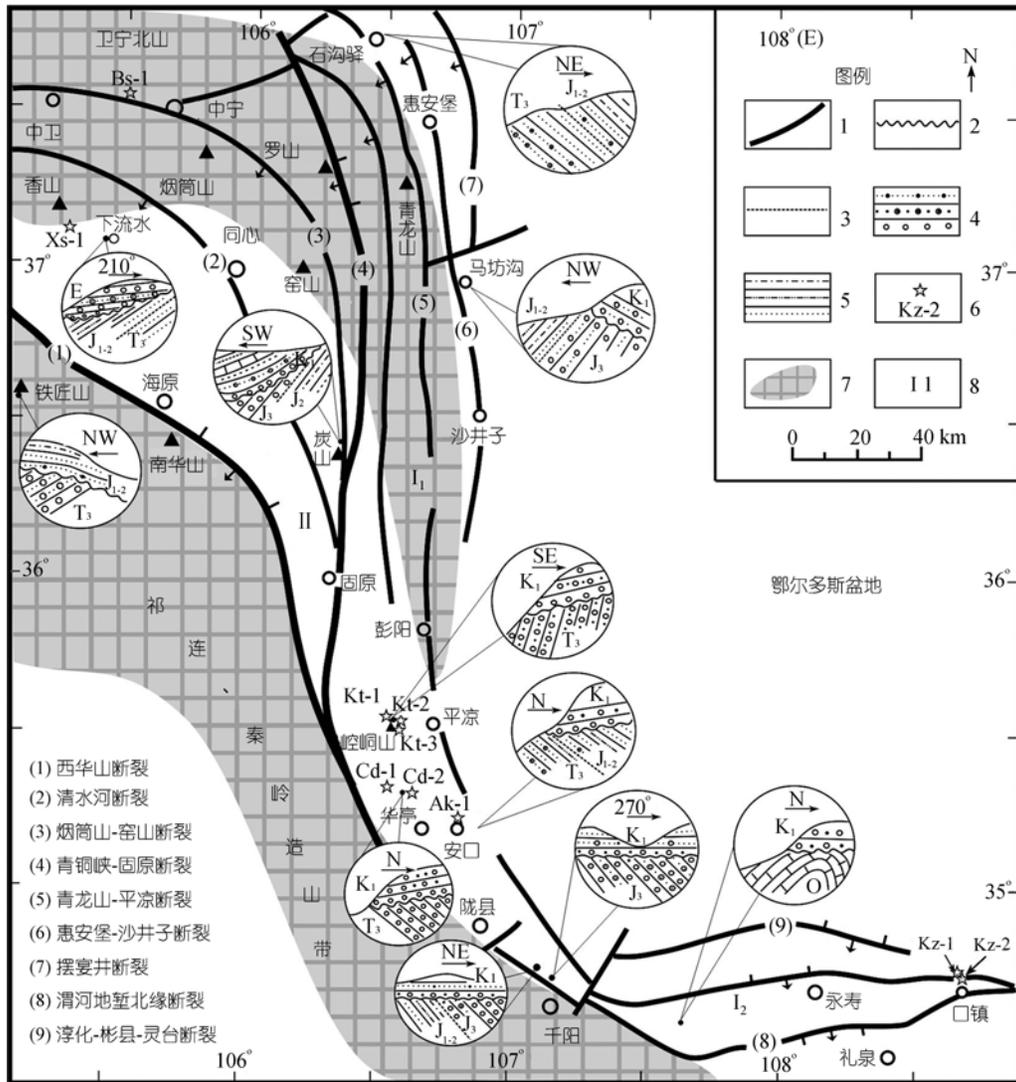


图 1 鄂尔多斯盆地西南缘构造格架、地层不整合分布与样品点位置

1. 断裂; 2. 角度不整合; 3. 平行不整合; 4. 砂(砾)岩; 5. 泥质砂岩; 6. 采样点位置及编号; 7. 秦祁造山带和卫宁北山-彭阳弧形古隆起; 8. 构造单元分区. I<sub>1</sub>为盆地西缘构造带; I<sub>2</sub>为盆地南缘构造带; II为六盘山弧形构造带. 采样点 GPS 坐标: Kz-1 为 34°44'40"N, 108°41'09"E; Kz-2 为 34°44'39"N, 108°41'10"E; Ak-1 为 35°13'11"N, 106°47'13"E; Cd-1 为 35°20'51"N, 106°28'18"E; Cd-2 为 35°19'34"N, 106°35'01"E; Kt-1 为 35°34'47"N, 106°26'54"E; Kt-2 为 35°34'10"N, 106°29'51"E; Kt-3 为 35°32'46"N, 106°32'27"E; Xs-1 为 37°05'22"N, 105°15'01"E; Bs-1 为 37°30'57"N, 105°33'23"E

## 1 原理方法与样品数据

锆石、磷灰石 FT 分析是盆地热演化史和构造热年代学研究的一种重要方法手段<sup>[22-34]</sup>。这两种矿物在高温背景下具有径迹密度减少、长度变短直至完全消失的退火特性, 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。通过测量矿物中  $^{238}\text{U}$  自发 FT 和  $^{235}\text{U}$  诱发 FT 的密度, 采用 Zeta 常数法可以获得矿物的 FT 年龄<sup>[25-28]</sup>。但是, 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<sup>[29-34]</sup>。已有研究表明, 来自较大埋深的钻井岩芯样品, FT 分析往往存在方法的局限性和年龄的多解性问题; 地面露头或浅于 FT 部分退火带上限深度的岩石样品, 被认为是利用 FT 方法解析构造事件年龄的最佳样品条件。

近年来, 对样品进行矿物颗粒 FT 年龄分析的方法主要有  $P(\chi^2)$  概率检验法、视图法和高斯拟合法<sup>[35-41]</sup>。其中,  $P(\chi^2)$  概率检验法可以根据样品中矿物颗粒的 FT 年龄是否服从泊松分布, 分离出最年轻的似合理径迹年龄组<sup>[35]</sup>, 并计算获得相应的中值 (Central) 年龄、均值 (Mean) 年龄或池 (Pooled) 年龄 (也称聚合年龄)。对于从完全退火带反弹至冷却带的样品, 概率检验  $P(\chi^2) > 5\%$ , 可采用中值年龄来代表样品经历高温退火之后的真实抬升冷却年龄; 但对于经历复杂热历史或从部分退火带反弹至冷却带的样品, 概率检验  $P(\chi^2) < 5\%$  或  $P(\chi^2) = 0$ , 这种情况下的

中值年龄实际上属于比真实冷却年龄偏大的混和年龄, 只能近似代表样品抬升冷却的最大年龄或物源碎屑的残存年龄记录。雷达视图法与高斯峰拟合法的结合, 可以判别样品中矿物颗粒的 FT 年龄是否属于同一组分, 并通过年龄频率分布和高斯拟合曲线等方法对混和年龄数据进行分组解析<sup>[36-44]</sup>, 给出与不同年龄组分对应的最佳高斯拟合年龄, 提供经历不同构造热事件样品抬升冷却的准确年龄记录。

本文对鄂尔多斯盆地西南缘 3 个重点露头区段的上古生界—中生界不同层系采集了 10 块砂岩样品, 每块样品重量不低于 5 kg, 在中国科学院高能物理研究所进行了 10 个磷灰石样品和 5 个锆石样品的 FT 测试分析, 采样位置及编号如图 1 所示。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和锆石单矿物, 将其分别制成环氧树脂样片和聚全氟乙丙烯塑料样片, 并研磨和抛光为光薄片。磷灰石在 25℃ 的 6.6%  $\text{HNO}_3$  溶液中蚀刻 30 s, 锆石在 220℃ 的 8 g  $\text{NaOH}+11.5$  g  $\text{KOH}$  溶液中蚀刻 30 h, 分别揭示其自发径迹; 然后将低铀白云母分别贴在磷灰石和锆石光薄片上, 将低铀白云母外探测器与矿物一并置入反应堆辐照, 揭示其诱发裂变径迹密度分别为  $72.92 \times 10^5$  和  $10.34 \times 10^5$ , 中子注量利用 CN5 铀玻璃标定, 根据 IUGS 推荐的  $\xi$  常数法计算年龄值<sup>[25-29]</sup>, 磷灰石和锆石的 Zeta 常数分别为  $357.8 \pm 10.8$  和  $127.1 \pm 6.4$ 。测试分析结果如表 1 所示。

表 1 鄂尔多斯盆地西南缘磷灰石和锆石 FT 测试分析数据<sup>a)</sup>

地区	样品	层位	矿物	$n$	$N_s$	$\rho_s$ / $10^5\text{cm}^{-2}$	$N_i$	$\rho_i$ / $10^5\text{cm}^{-2}$	$P(\chi^2)$ /%	均值年龄 $\pm 1\sigma/\text{Ma}$	中值年龄 $\pm 1\sigma/\text{Ma}$	池年龄 $\pm 1\sigma/\text{Ma}$	$L \pm \sigma/(N)$ / $\mu\text{m}$
香山	Xs-1a	C	磷灰石	21	168	2.662	3588	56.854	94.2	60±5	65±6	65±6	13.2±1.7/(99)
	Xs-1b	C	锆石	23	3580	125.152	1107	38.699	0	210±18	194±18	213±13	
卫宁	Bs-1a	C	磷灰石	19	309	5.644	5757	105.145	81.4	64±3	65±4	65±4	12.9±1.4/(93)
	Bs-1b	C	锆石	18	3959	138.878	1220	42.797	0	214±14	206±16	213±13	
崆峒山	Kt-1	K <sub>1</sub>	磷灰石	22	194	2.145	3046	33.681	0.5	77±10	81±9	83±7	11.9±1.8/(113)
	Kt-2	K <sub>1</sub>	磷灰石	21	388	3.987	5509	56.609	0	83±10	89±11	100±6	12.6±1.8/(111)
	Kt-3a	T <sub>3</sub>	磷灰石	21	261	2.576	1602	15.811	7.6	52±19	55±5	56±5	11.7±2.2/(69)
	Kt-3b	T <sub>3</sub>	锆石	20	5237	161.932	1079	33.364	0	363±42	304±32	311±19	
策底   安口	Cd-1	K <sub>1</sub>	磷灰石	16	357	3.492	7855	76.835	10.7	56±4	59±5	60±4	13.1±2.5/(114)
	Cd-2a	T <sub>3</sub>	磷灰石	14	73	1.084	1196	17.762	67.6	87±10	86±11	86±11	12.8±1.8/(114)
	Cd-2b	T <sub>3</sub>	锆石	19	4265	121.875	679	19.403	0	432±35	385±44	402±27	
渭北   口镇	Ak-1	J <sub>2</sub>	磷灰石	14	369	4.55	4485	55.304	17.0	111±7	115±9	118±7	12.8±1.2/(104)
	Kz-1	T <sub>2</sub>	磷灰石	15	120	1.023	2245	19.144	83.8	59±6	63±6	63±6	12.2±1.8/(110)
	Kz-2a	P <sub>3</sub>	磷灰石	17	74	1.246	3520	25.916	15.1	61±6	59±6	59±5	12.7±1.9/(90)
	Kz-2b	P <sub>3</sub>	锆石	19	4799	121.745	1326	33.639	0	281±37	213±32	241±15	

a) 地层年龄来自 International Stratigraphic Chart (F M Gradstein 等编, 2004),  $n$  = 颗粒数,  $N_s$  = 自发 FT 条数,  $\rho_s$  = 自发 FT 密度,  $N_i$  = 诱发 FT 条数,  $\rho_i$  = 诱发 FT 密度,  $P(\chi^2) = \chi^2$  检验概率, 年龄  $\pm \sigma$  = FT 年龄  $\pm$  标准差,  $L \pm \sigma$  = 平均 FT 长度  $\pm$  标准差,  $N$  = 封闭 FT 条数

## 2 裂变径迹年龄解析

### 2.1 香山-卫宁北山地区

研究区北段香山和卫宁北山石碳系的两个砂岩样品(Xs-1, Bs-1), 磷灰石裂变径迹(AFT)分析在  $P(\chi^2) > 5\%$  条件下给出了两个极为接近的  $(65 \pm 4)$  和  $(65 \pm 6)$  Ma 中值年龄(图 2(a), (b)), 并与高斯拟合年龄  $(62 \text{ Ma} \pm)$  相当一致, 雷达图指示样品的所有单颗粒径迹年龄均落入同一组, 显然属于经历完全退火后反弹至未退火带的冷却年龄, 表明该区在  $65 \text{ Ma} \pm$  存在一次构造抬升事件。

上述两个样品锆石裂变径迹(ZFT)分析得到的中值年龄则属于小于地层年龄但  $P(\chi^2) = 0$  的混合年龄情况(图 2(c), (d)), 雷达图指示样品的 FT 年龄至少包含新、老两个组分。其中, 香山 Xs-1b 样品的 ZFT 中值年龄为  $(194 \pm 18)$  Ma, 与之相应的高斯拟合年龄为  $153 \text{ Ma} \pm$ ; 卫宁北山 Bs-1b 样品的 ZFT 中值年龄为  $(206 \pm 16)$  Ma, 对应  $165 \text{ Ma} \pm$  和  $230 \text{ Ma} \pm$  两个高斯拟合年龄。显然, 这两个样品年轻年龄组分的 ZFT 高斯拟合年龄基本相近, 共同指示了  $165 \sim 153 \text{ Ma} \pm$  的一次构造抬升事件; 较老组分的高斯拟合年龄与 ZFT 中值年龄在误差范围内大致相当, 暗示这一地区早期的构造抬升有可能始于  $230 \text{ Ma} \pm$ , 主要发生在  $206 \sim 194 \text{ Ma} \pm$ 。

由此认为, 现今被新生代中卫断陷盆地分隔的香山和卫宁北山, 它们在中生代时期应该是具有相似构造热演化史的统一构造单元, 共同经历了至少 3 次的主要构造抬升事件。ZFT 年龄记录了较早的两次构造事件, 分别发生在  $206 \sim 194 \text{ Ma} \pm$  和  $165 \sim 153 \text{ Ma} \pm$ ; AFT 年龄则记录了较晚时期  $65 \text{ Ma} \pm$  的一次构造抬升事件。

### 2.2 崆峒山-安口地区

(1) 崆峒山: 西缘南段崆峒山剖面下白垩统 2 块砂岩样品(Kt-1, 2)的 AFT 分析结果表明, 其 AFT 中值年龄为小于地层年龄但  $P(\chi^2) < 5\%$  或  $P(\chi^2) = 0$  的混合年龄情况(图 3(a), (b)), 两个样品的 AFT 中值年龄分布在  $80 \sim 89 \text{ Ma} \pm$ , 总体代表了下白垩统样品经历部分退火之后的最早抬升时间。其中, Kt-1 样品的 AFT 中值年龄  $(81 \pm 9)$  Ma 与高斯拟合年龄  $(71 \text{ Ma} \pm)$  在误差范围内基本一致; Kt-2 样品给出了  $85 \text{ Ma} \pm$  和  $223 \text{ Ma} \pm$  的两个高斯拟合年龄, 前者与该样品的 AFT 中值年龄  $(89 \pm 11)$  Ma 非常接近, 后者显然是物源碎屑残存的早期事件年龄记录。

对该区上三叠统砂岩样品(Kt-3)分别进行了 AFT 和 ZFT 测试分析, 其 AFT 中值年龄在  $P(\chi^2) = 7.6\%$  条件下为  $(55 \pm 5)$  Ma, 与高斯拟合年龄  $(43 \text{ Ma} \pm)$  大致接近(图 3(c)), 指示该区白垩纪末期以来存在一次构造抬升事件; ZFT 中值年龄为大于地层年龄且  $P(\chi^2) = 0$  的混合年龄情况(图 3(d)), 雷达图和高斯拟

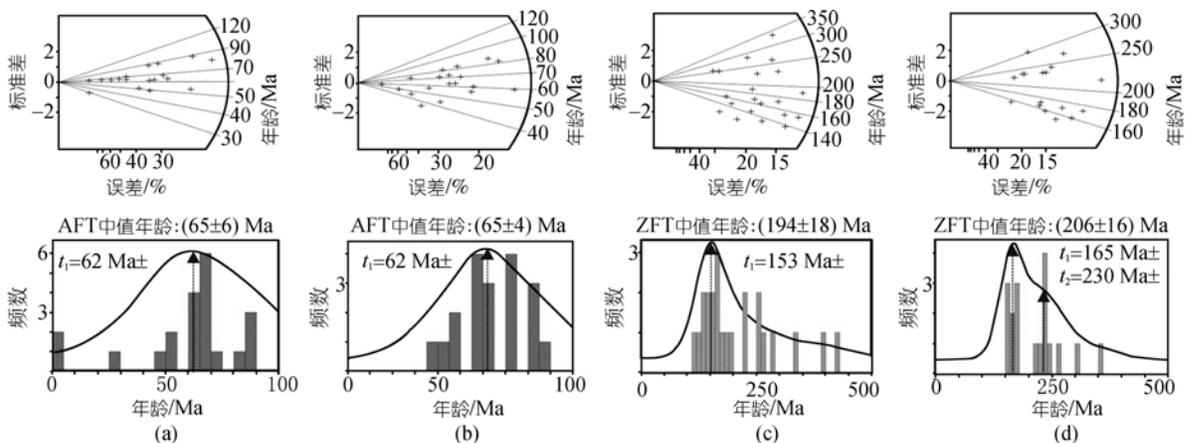


图 2 香山-卫宁北山地区磷灰石、锆石样品的 FT 年龄组分及其统计分布

(a)和(b)为香山、卫宁北山的石碳系 Xs-1a 和 Bs-1a 砂岩 AFT, (c)和(d)为香山、卫宁北山的石碳系 Xs-1b 和 Bs-1b 砂岩 ZFT。

图中第一行为样品的 FT 年龄组分雷达图, 第二行为样品的 FT 年龄频数分布和高斯拟合曲线及其指示的高斯拟合年龄( $t_i$ )

合曲线均显示其 ZFT 年龄至少应包含两个年龄组, 高斯拟合曲线主要给出了与年轻年龄组对应的 210 Ma± 的一次构造抬升事件, 而与较老年龄组对应的高斯拟合年龄(560 Ma±)应属于源碎屑残存的早期事件年龄记录。

(2) 安口-策底: 崆峒山南侧相邻的安口剖面中侏罗统砂岩样品(Ak-1)的 AFT 分析结果表明, AFT 中值年龄为小于地层年龄且  $P(\chi^2) > 5\%$  的冷却年龄情况(图 4(a)), 而且中值年龄(115±9) Ma 与高斯拟合年龄(114 Ma±)极为接近, 共同表明这该区存在 114 Ma± 的一次构造抬升事件。

安口西侧相连的策底剖面下白垩统和上三叠统 2 块砂岩样品(Cd-1, 2a)的 AFT 分析结果显示, 其 AFT 中值年龄总体为小于地层年龄且  $P(\chi^2) > 5\%$  的冷却年

龄情况(图 4(b), (c)), 两个样品的 AFT 中值年龄分别为(59±5) 和(86±11) Ma。其中, 上白垩统 Cd-1 样品的 AFT 中值年龄与相应的高斯拟合年龄(51 Ma±)基本一致, 上三叠统 Cd-2a 样品的 AFT 中值年龄与相应的高斯拟合年龄(66 Ma±)在误差范围内大致接近, 表明这一地区存在 66~51 Ma± 的一次构造抬升事件。

策底剖面上三叠统样品(Cd-2b)的 ZFT 分析结果表明(图 4(d)), ZFT 中值年龄在  $P(\chi^2) = 0$  条件下为(385±44) Ma, 雷达图和高斯拟合曲线均显示为混合年龄, 并给出了 145 Ma±, 230 Ma± 和 395 Ma± 三个高斯拟合年龄。其中, 145 Ma± 的高斯拟合年龄显然指示了中生代中期的一次构造事件, 而后两个较老的高斯拟合年龄应该属于物源碎屑残存的早期事件年龄记录。

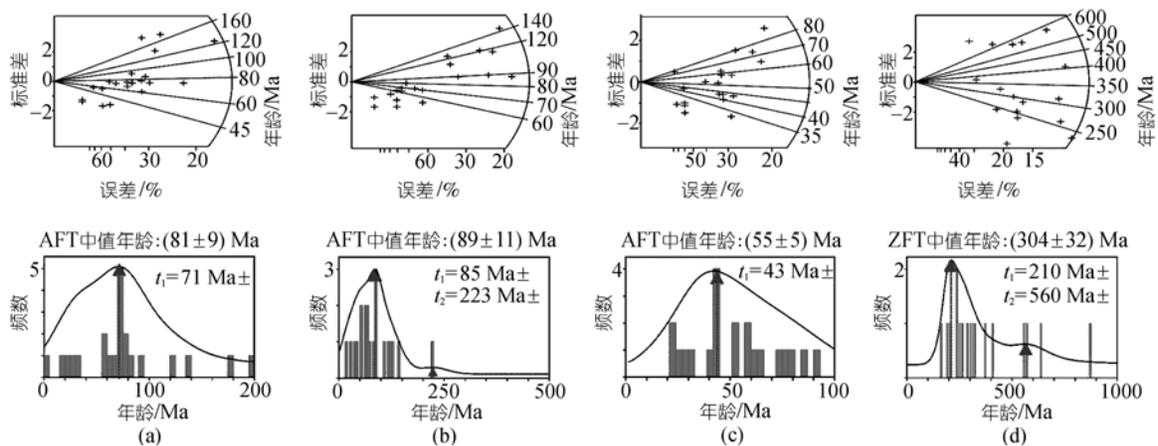


图 3 崆峒山剖面磷灰石、锆石样品的 FT 年龄组及其统计分布

(a)和(b)为山下白垩统 Kt-1 和 Kt-2 砂岩 AFT, (c)和(d)为上三叠统 Kt-3a 和 Kt-3b 砂岩的 AFT 和 ZFT。图示说明同图 2

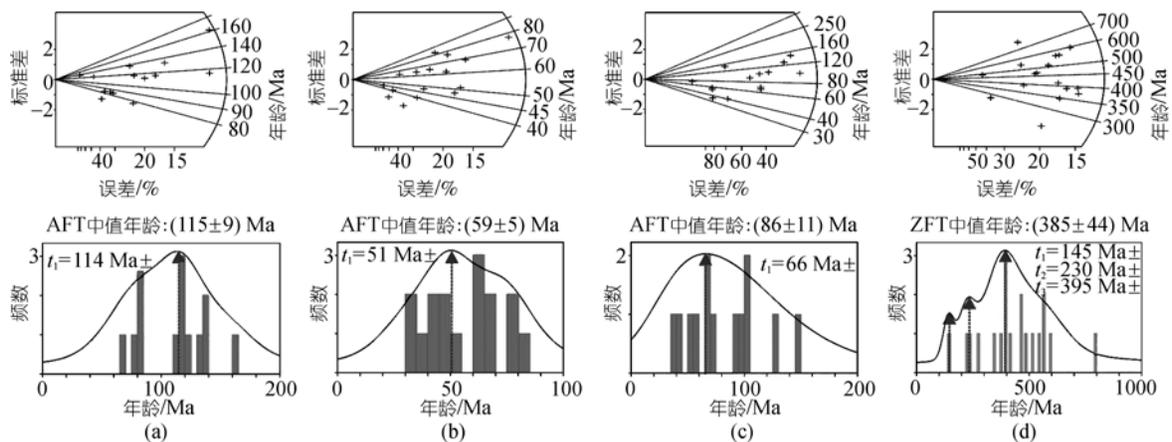


图 4 安口-策底剖面磷灰石、锆石样品的 FT 年龄组及其统计分布

(a)安口中侏罗统 Ak-1 砂岩 AFT, (b)和(c)为策底下白垩统及上三叠统 Cd-1 和 Cd-2a 砂岩 AFT, (d)策底下三叠统 Cd-2b 砂岩 ZFT。图示说明同图 2

由此可以看出, 盆地西南缘南段的崆峒山-安口地区, FT 分析至少给出了 5 次中生代构造事件的年龄记录. 中生代早期的峰值年龄有 210, 223 和 230 Ma, 并以崆峒山剖面上三叠统 ZFT 样品给出的 210 Ma $\pm$  高斯拟合年龄最为显著, 代表了晚三叠世构造事件的峰值年龄. 中生代中期的早白垩世前后至少包含有两次构造事件的峰值年龄记录, 一是上三叠统 ZFT 样品给出的 145 Ma $\pm$  高斯拟合年龄, 二是中侏罗统样品 AFT 中值年龄和高斯拟合年龄给出的 114 Ma $\pm$  的峰值年龄. 中生代晚期的 AFT 中值年龄与高斯拟合年龄主要分布在 89~51 Ma, 其中包含 80~70 Ma $\pm$  和 66~51 Ma $\pm$  两组峰值年龄, 有可能指示这一地区晚白垩世前后存在两次构造抬升事件.

### 2.3 南缘口镇地区

盆地南缘的口镇地区, 中三叠统和上二叠统 2 块砂岩样品(Kz-1, 2a)的 AFT 分析结果表明, 其 AFT 中值年龄为明显小于地层年龄且  $P(\chi^2) > 5\%$  的冷却年龄(图 5(a), (b)), 两块样品的 AFT 中值年龄分别为(59 $\pm$ 6)和(63 $\pm$ 6) Ma, 并与其相应的高斯拟合年龄基本一致, 表明这一地区在 63~59 Ma $\pm$  存在一次显著的构造抬升事件.

对该区上二叠统砂岩样品(Kz-2b)进行了 ZFT 年龄分析, ZFT 中值年龄为小于地层年龄但  $P(\chi^2) = 0$  的混和年龄(图 5(c)), 中值年龄接近(213 $\pm$ 32) Ma. 雷达图和高斯拟合曲线显示有可能包含四组年龄, 两个较年轻年龄组对应的高斯拟合年龄分别为 165 Ma $\pm$  和 113 Ma $\pm$ , 两个较老年龄组对应的高斯拟合年龄分别为 298 Ma $\pm$  和 560 Ma $\pm$ . 前者有可能指示这一地区早白垩世前后存在两次构造抬升事件, 后者显然属于碎屑物源中残存的早期事件年龄记录.

因此, 盆地南缘口镇地区中生代至少经历过 3 次重要的构造抬升事件: 一是 ZFT 年龄分组解析所提供的 165 Ma $\pm$  和 113 Ma $\pm$  两次构造抬升事件信息; 二是 AFT 冷却年龄指示的 63~59 Ma $\pm$  的一次构造抬升事件.

## 3 峰值年龄事件及其地质响应

### 3.1 中生代早期峰值年龄事件

区域上, 秦岭-祁连古洋盆最终闭合的强烈碰撞造山作用主要发生在印支期, 碰撞山体的持续挤压隆升可延续至早燕山期<sup>[23,24,45]</sup>, 这是研究区及其更大范围由古生代板块构造环境转向中生代陆内变形体制的一次重大构造变革事件. 位于造山带北麓弧形构造转折部位的鄂尔多斯盆地西南缘, 开始发育反 S 型构

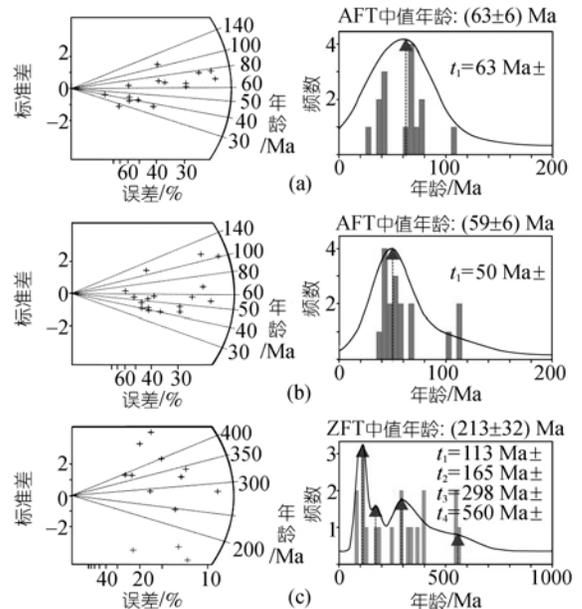


图 5 口镇地区砂岩 AFT 和 ZFT 年龄组及其统计分布 (a)和(b)为中三叠统和上二叠统 Ak-1 和 Ak-2a 砂岩 AFT, (c)上二叠统 Ak-2b 砂岩 ZFT. 图中左列为 FT 年龄组雷达图, 右列为 FT 年龄频数分布和高斯拟合曲线及其指示的高斯拟合年龄( $t_i$ )

造体系. 这次构造事件在盆地西南缘的锆石 FT 年龄记录, 主要分布在 213~194 Ma $\pm$ , 峰值年龄接近 205 Ma $\pm$ (图 6). 值得注意的是, 反 S 型构造体系内侧的策底-崆峒山-口镇地区, 不同层系样品的 FT 峰值年龄较大, 主要集中在 213~210 Ma $\pm$ ; 而外侧的香山-卫宁北山地区则相对较小, 主要集中在 206~194 Ma $\pm$ , 一定程度上反映了印支期秦岭-祁连(简称秦-祁)造山过程由南向北的递进变形效应及其相邻盆地西南缘的差异隆升特点. 在此背景下, 反 S 型构造体系内侧秦-祁造山隆起带前缘的策底-崆峒山-口镇地区, 上三叠统与下侏罗统之间呈明显的平行不整合关系, 并在构造走向转折突变的策底-崆峒山地区发育上三叠统粗碎屑类磨拉石沉积(图 1, 6); 反 S 型构造体系外侧的香山-卫宁北山-石沟驿地区, 同样存在上三叠统与下侏罗统之间的平行不整合关系, 但石沟驿剖面可以见到的上三叠统扇三角洲粗碎屑沉积, 其厚度和粒度都明显小于策底-崆峒山地区, 暗示石沟驿之西可能存在一个范围有限、幅度较低的晚印支期隆起. 夹持于反 S 型构造体系内、外两侧隆起带之间的六盘山地区和其以东的鄂尔多斯盆地, 则发育稳定的晚三叠世内陆河湖相含煤碎屑岩沉积, 暗示香山-卫宁北山-石沟驿低幅度隆起的范围相对局限, 石沟驿以南至固原炭山可能并不存在以往认识上的近南北向隆起带, 这与该区段缺少三叠纪 FT 年龄记录的事实相吻合.

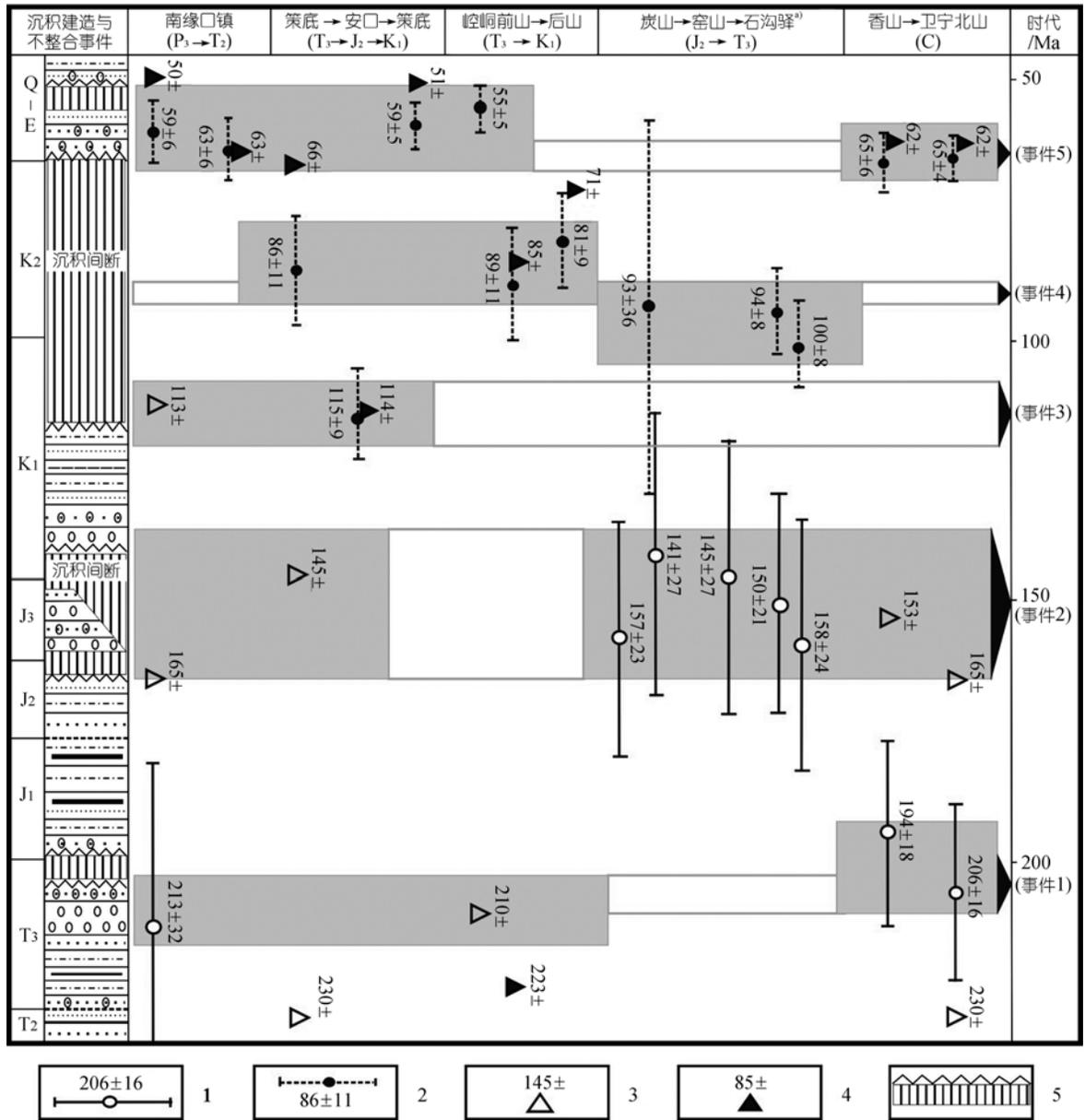


图 6 盆地西南缘锆石、磷灰石 FT 峰值年龄分布与地层不整合及构造事件的对比关系

1. 锆石 FT-Central 年龄及标准差(Ma); 2. 磷灰石 FT-Central 年龄及标准差(Ma); 3. 锆石 FT 高斯拟合年龄(Ma); 4. 磷灰石 FT 高斯拟合年龄(Ma); 5. 沉积间断与地层不整合构造事件; a) 据文献[23~24]

### 3.2 中生代中期峰值年龄事件

早中侏罗世，鄂尔多斯盆地及其相邻的六盘山地区，总体处于一种弱伸展的内陆拗陷环境，广泛发育区域可比的内陆河湖相含煤碎屑岩沉积。晚侏罗世—早白垩世的燕山中期，秦-祁造山带进入了强烈的多旋回陆内造山过程<sup>[45]</sup>，位于造山带北麓的盆地西南缘反S型构造体系发生了以逆冲推覆为主要表现

形式的陆内变形。相关区域资料表明，晚侏罗世，卫宁北山-香山-六盘山地区形成了统一的弧形构造隆起带，不仅中下侏罗统遭受剥蚀和上侏罗统普遍缺失，而且在盆地西南缘发育复杂的逆冲推覆变形及其前缘以上侏罗统芬芳河组为代表的活动型粗碎屑沉积(图 1, 6); 早白垩世，反S型构造体系内、外两侧古隆起带再次突现，并呈现为前缘冲断隆升、后缘伸展断陷的沉积构造面貌，反S型构造体系内、外两侧古隆

起之间的六盘山地区发育六盘山群内陆河湖相断陷沉积, 向北超覆于香山-卫宁北山至窑山-炭山的弧形冲断隆起带之上, 并在其前缘发育志丹群粗碎屑沉积。显然, 盆地西南缘燕山中期的构造事件具有多幕次的复杂变形特点, 不同区块的样品给出了与之相应的多组FT年龄记录。研究区普遍存在 165~141 Ma 的ZFT年龄记录, 峰值年龄接近 150 Ma (图 6), 指示中燕山早期一次显著的区域构造变形隆升事件; 而峰值年龄接近 114 Ma 的FT年龄记录, 则主要见于安口-口镇地区, 指示中燕山晚期的构造抬升事件在盆地南缘表现最为显著。

### 3.3 中生代晚期峰值年龄事件

晚白垩世, 并有可能延续至古近纪早期, 是中国东、西部重大构造体制转换与叠加复合的重要时期<sup>[14,23-24,45]</sup>。鄂尔多斯盆地西南缘及其相邻区域范围, 普遍缺失这一时期的沉积地层记录, 下白垩统及其下伏地层遭受不同程度的隆升剥蚀, 中生代鄂尔多斯盆地消亡并全面进入后期改造过程。从盆地西南缘普遍发育下白垩统的高角度冲断及其相关的宽缓褶皱变形, 以及下白垩统与古近系之间的微角度不整合关系<sup>[1-8,23,24]</sup>分析, 研究区晚白垩世的构造作用主要表现为较长时期的整体隆升-剥蚀, 兼有不同程度的挤压冲断变形。盆地西南缘磷灰石样品的FT年龄分布特点表明, 中生代晚期构造事件的冲断变形和隆升剥蚀作用并非一个连续过程, 至少包含两个主要幕次的构造抬升事件(图 6)。较早一次构造事件主要发生在 100~81 Ma, 峰值年龄接近 90 Ma, 而且具有北早(100~93 Ma)、南晚(89~81 Ma)的事件年龄分布特点; 较晚一次构造事件主要发生在 66~59 Ma 的晚白垩世末期, 峰值年龄平均接近 63 Ma, 并有可能延续至古近纪早期的 59~50 Ma。

## 4 结论认识与相关问题讨论

综合上述认为, 鄂尔多斯盆地西南缘中生代至少经历了 3 期 5 次的主要构造事件(图 6): (i) 中生代早期构造事件主要发生在晚三叠世的 213~194 Ma, 峰值年龄接近 205 Ma, 主要以地层间平行不整合关系为标示的构造隆升和山前粗碎屑类磨拉石沉积为其重要的地质响应, 反映了秦-祁造山带印支期碰撞造山过程在鄂尔多斯盆地西南缘产生的构造效应。(ii) 中生代中期至少包含两个幕次的构造事件, 一次主要发生在晚侏罗世的 165~141 Ma, 峰值年龄接近 150 Ma, 第二次主要发生在早白垩世晚期的

115~113 Ma, 峰值年龄接近 114 Ma。尤其是最为显著的晚侏罗世构造事件, 主要以地层间角度不整合关系为标示的逆冲推覆变形及其山前活动型粗碎屑类磨拉石沉积为其重要的地质响应, 反映了秦-祁造山带燕山中期强烈陆内造山过程在鄂尔多斯盆地西南缘产生的构造效应。(iii) 中生代晚期构造事件在中国东、西部重大构造体制转换叠加的背景下, 主体表现为区域性的整体隆升-剥蚀, 其中至少包含两个主要幕次的强烈构造隆升事件, 一次主要发生在晚白垩世早中期的 100~81 Ma, 峰值年龄接近 90 Ma; 第二次主要发生在晚白垩世末期的 66~59 Ma, 峰值年龄接近 63 Ma。

值得注意的是, 盆地西南缘中生代中期强烈构造变形事件的两组峰值年龄之间和中生代晚期强烈构造隆升事件后期, 大致相当于 150~114 Ma 和 63 Ma 之后构造转换相对平稳的两个地质时期, 则是鄂尔多斯盆地油、气、煤、铀等多种矿产大规模耦合成矿的重要时期<sup>[4, 17-23,46,47]</sup>。已有勘探成果表明, 鄂尔多斯盆地多种矿产耦合成矿、共存定位的峰值时代主要有两期<sup>[23,46-51]</sup>。一是有机矿产的峰值成矿年龄主要分布在早白垩世的 140~120 Ma, 与砂岩型铀矿的第一主成矿期(140 Ma)基本一致; 二是盆地后期改造、有机矿产最终定位或油气藏破坏逸散过程主要发生在晚白垩世以来, 与砂岩型铀矿化的第二主成矿期(60~20 Ma)近于同步。显然, 多种矿产耦合成矿的峰值年龄主要发生在中生代中晚期强烈构造变形或隆升的峰值年龄事件之间或紧随其后的相对平稳期。由此认为, 关键构造事件及其相关的极端环境效应, 有可能是促成盆地各种成矿(藏)要素和作用向着有利于多种矿产耦合成矿方向发展的重要基础; 中生代中晚期峰值年龄事件引发的异常构造-热液活动和水岩相互作用及其相关的物理化学、生物化学作用与成矿参数的联动转换, 为多种矿产耦合成矿提供了必要的先决条件; 峰值年龄事件之间和随后构造转换相对平稳期的适度构造活动环境, 则有可能是影响和制约多种矿产耦合成矿并最终统一定位的关键因素。

**致谢** 西北大学刘池洋、任战利教授和赵红格、郝建荣博士, 中国科学院高能物理研究所袁万明博士等, 在课题研究、样品分析和论文撰写过程中给予了多方帮助和有益启示, 在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 汤锡元, 郭忠铭. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探. 西安: 西北大学出版社, 1992. 1—126

- 2 周鼎武, 赵重远, 李银德, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系. 北京: 地质出版社, 1994. 59—166
- 3 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989. 222—370
- 4 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社, 2002. 39—213
- 5 刘少峰, 杨士恭. 鄂尔多斯盆地西缘南北差异及其形成机制. 地质科学, 1997, 32(3): 397—408
- 6 张进, 马宗晋, 任文军. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲褶皱带构造特征及其南北差异的形成机制. 地球学报, 2004, 78(5): 600—609
- 7 陈刚, 周鼎武. 陕西淳化口镇-圣人桥地区地层变形特征及其地质意义. 西北大学学报(自然科学版), 1994, 24(2): 163—166
- 8 陈刚. 中生代鄂尔多斯盆地陆源碎屑成分及其构造属性. 沉积学报, 1999, 17(3): 409—413
- 9 胡圣标, 汪集旻. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 1995, 2(4): 171—180
- 10 李思田. 盆地动力学与能源资源——世纪之交的回顾与展望. 地学前缘, 2000, 7(3): 1—7
- 11 翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用. 地球学报, 2002, 23(2): 97—102
- 12 席先武, 杨立强, 王岳军, 等. 构造体制转换的温度场效应及其耦合成矿动力学数值模拟. 地学前缘, 2003, 10(1): 47—52
- 13 付明希, 胡圣标, 汪集旻. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(6): 514—520
- 14 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转换的关键时限. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(10): 913—920
- 15 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 2004, 11(3): 285—294
- 16 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据. 地学前缘, 2005, 48(1): 157—164
- 17 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究. 北京: 石油工业出版社, 1999. 16—103
- 18 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 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, 2006, 80(5): 674—682
- 19 赵孟为. K-Ar 测年法在确定沉积岩成岩时代中的应用——以鄂尔多斯盆地为例. 沉积学报, 1996, 14(3): 11—21
- 20 Zhao M W, 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. AAPG Bull, 1996, 80(7): 1110—1134
- 21 孙少华, 李小明, 龚革联, 等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究. 科学通报, 1997, 42(3): 306—309
- 22 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. 大地构造与成矿学, 2003, 24(1): 87—91
- 23 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. 地质学报, 2006, 80(5): 617—633
- 24 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性. 地质学报, 2005, 79(6): 737—747
- 25 Gleadow A J W, Duddy I R, Lovering J F. Fission track analysis: a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. Aust Petrol Explor Assoc J, 1983, 23: 93—102
- 26 Naeser C W. Thermal history of sedimentary basins: fission-track dating of subsurface rocks. In: Scholle P A, Schluger R P, eds. Aspect of diagenesis. SEPM special Publication. 1979, 26: 109—112
- 27 Wagner G A, Van den Haute P. Fission-track-dating. Dordrecht: Enke Verlag-Kluwer Academic Publishers, 1992. 180—285
- 28 Green P F, Duddy I R, Laslett G M, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Qualitative modeling techniques and extensions to geological timescales. Chem Geol, 1989, 79: 155—182
- 29 Hurford A J, Green P F. A users, guide to fission-track dating calibration. Earth Planet Sci Lett, 1982, 59: 343—354[DOI]
- 30 王瑜. 构造热年代学——发展与思考. 地学前缘, 2004, 11(40): 435—443
- 31 吴中海, 吴珍汉. 裂变径迹法在研究造山带隆升过程中的应用介绍. 地质科技情报, 1999, 18(4): 27—32
- 32 康铁笙, 王世成. 地质热历史研究的裂变径迹法. 北京: 科学出版社, 1991. 25—40
- 33 周中毅, 潘长春. 沉积盆地古地温测定方法及其应用. 广州: 广东科技出版社, 1992. 1—103
- 34 胡圣标, 张容燕, 周礼成. 油气盆地热历史恢复方法. 勘探家, 1998, 3(4): 52—54
- 35 Galbraith R F, Laslett G M. Statistical models for mixed fission track grain ages. Nucl Tracks Radiat Meas, 1993, 21: 459—470 [DOI]
- 36 Galbraith R F. The Radial Plot: graphical assessment of spread in ages. Nucl Tracks Radiat Meas, 1990, 17: 207—214[DOI]
- 37 Brandon M T. Probability density Plot for fission track grain age samples. Radiat Meas, 1996, 26(5): 663—676[DOI]
- 38 Brandon M T. Decomposition of fission track grain age distributions. Am J Sci, 1992, 292: 535—564
- 39 闫义, 林炯, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行物源区示踪的综合研究. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 184—188
- 40 周祖翼, 毛凤鸣, 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. 沉积学报, 2001, 19(3): 456—458
- 41 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 碎屑颗粒热年代学. 地震地质, 2000, 22: 25—34
- 42 Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, et al. Fission track lengths in the apatite annealing zone and the interpretation of mixed ages. Earth Planet Sci Lett, 1986, 78: 245—254[DOI]
- 43 Fitzgerald P G, Sorkhabi R B, Redfield T F, et al. Uplift and denudation of the central Alaska Range: a case study in the use of apatite fission track thermochronology to determine absolute uplift parameters. J Geophys Res, 1995, 100: 20175—20191[DOI]
- 44 Hu S B, O'Sullivan P B, Raza A, et al. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, Northern China: A Cenozoic rifted and local pull-apart basin. Phys Earth Planet Inter, 2001, 126(3-4): 221—235[DOI]
- 45 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 171—282
- 46 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展. 北京: 科学出版社, 2005. 1—25
- 47 陈刚, 李向平, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地构造与多种矿产的耦合成矿特征. 地学前缘, 2005, 12(4): 535—541
- 48 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. 铀矿地质, 2003, 19(3): 129—136
- 49 吴仁贵, 陈安平, 金达淦, 等. 沉积体系分析与河道砂岩型铀矿成矿条件讨论. 铀矿地质, 2003, 19(2): 94—99
- 50 赵凤民. 外生成渗入型铀矿床的形成模式和及其找矿前景. 矿床地质, 2002, 21(Suppl): 888—892
- 51 陈肇博, 赵凤民. 可地浸型铀矿床的形成模式和在中国的找矿前景. 国外铀金地质, 2002, 19(3): 127—133