

北淮阳地区裂变径迹记录的地质意义

李小明^{1*}, 曹代勇², 连会青¹

(1.华北科技学院 安全工程学院,北京 101601;2.中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:为了揭示北淮阳地区古生界杨山煤系的构造热演化特点,探讨该区燕山运动以来构造-热历史,了解地壳浅部构造热过程提供依据,本文应用刻画温度与时间关系较好的锆石、磷灰石裂变径迹技术(FT),对该区杨山煤系的6个古生界碎屑岩进行热演化分析.研究表明:95 Ma±以前,北淮阳地区石炭系地层处于磷灰石径迹完全退火带温度范围内,至95 Ma±才抬升至脱离完全退火带的位置,并经历了一个缓慢的抬升过程,至31~47 Ma±快速抬升;较大年龄差异的存在极有可能是商城岩体异常高温所致;发生于燕山期的岩浆活动对锆石径迹发生退火作用有一定的影响,2个锆石样品开始脱离完全退火带的时间为130 Ma±和140 Ma±,对应的锆石年龄更可能是中生代印支-燕山期较强烈的构造-热事件的地质响应.

关键词:北淮阳;裂变径迹;构造-热事件;地质意义

中图分类号:P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)02-0016-06

Geological Significance of Fission Track Recorded in Beihuaiyang Area, China

Li Xiaoming¹, Cao Daiyong², Lian Huiqing¹

(1.College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2.College of Geoscience & Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics of tectonic-thermal evolution of paleozoic of Yangshan coal series in Beihuaiyang area, to investigate the tectonic-thermal history in the area since Yanshan movement, and provided the basis for understanding the earth's crust shallow tectonic-thermal proces, detailed zircon and apatite fission track analysis (FT), which depict a good corresponding relationship between temperature and time, on six Palaeo-Mesozoic clastic rocks was carried out. The results shows that Carboniferous strata of North Huaiyang area is in annealing range of apatite fission track before 95 Ma±, to about 95 Ma±, is raised to the position from fully annealed strip, and experienced a slow uplift process, rapid uplift on the perion of 31 to 47 Ma±. The great age differences most likely is caused by abnormal high temperature of Shangcheng Rock; Magmatic activity occurred in Yanshanian has some influence on annealing effect of Zircon fission track, the beginning time, two zircon samples started off completely annealing zone, is 130 Ma± to140 Ma±, corresponding zircon age are more likely to be the geological response of strong tectonic-thermal events from Indosinian to yanshanian in Mesozoic.

Keywords: Beihuaiyang area; fission track; tectonic-thermal events; geological significance

裂变径迹技术主要研究的是矿物中径迹密度和径迹长度在地质历史时期的变化规律,而二者的变化都与其经历的古地温演化密切相关,把径迹因受热而发生的密度减小、长度缩短的现象称为退火.径迹密度大小与矿物中铀的含量以及矿物的年龄成正比,并受所经历的热史影响,也正因为如此,我们一方面可

收稿日期:2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272179);国家重点研发计划重点专项课题资助项目(2017YEC0804108)

*通信作者,E-mail:lixm@ncist.edu.cn

以依据径迹密度算求矿物的年龄,另外也可根据年龄的变化得到矿物的热演化史信息.径迹长度在其所经历的温度较高时将会缩短甚至消失,而由于单条径迹的形成时间不同以及经历的热史差异,因此,径迹长度的分布能反映退火程度以及退火与时间的关系,对地质热历史分析至关重要.

将冷却年代与封闭温度结合起来,这是应用热年代学定量约束造山带热演化史关键之所在,也是大别造山带近年来重要的研究进展之一^[1-3].中、高温热年代(锆石 U/Pb, 角闪石与黑云母 Ar/Ar)及其封闭温度(800~300 °C)^[4]能有效揭示造山带在中、深层次(30~10 km)差异冷却及其剥露历史,而低温热年代(锆石、磷灰石裂变径迹(FT)与(U-Th)/He等)及其封闭温度(200~70 °C)则是约束造山带在浅层次(7~2 km)冷却与剥露过程的重要手段^[1,5-6],热年代还有助于揭示区域冷却、剥露过程中构造样式的变化特点^[1,7-8].裂变径迹定年方法是20世纪60年代开始兴起的一种同位素年代学方法,磷灰石裂变径迹和锆石裂变径迹可以分别记录岩石经历的小于120 °C和小于350 °C的低温热历史的详细信息,为研究上地壳岩石冷却剥露过程提供有效工具.自Nasser(1989)提出将裂变径迹用于研究盆地热史以来,这种方法得到了广泛的应用,应用范围逐渐扩展到热史、构造史、沉积物来源、地层年代等方面.

本文测定了大别山北麓北淮阳地区有限样品的磷灰石和锆石裂变径迹年龄,试图通过对裂变径迹年龄及分布样式的分析,初步研究该区燕山运动以来构造-热历史,为了解地壳浅部构造热过程提供依据.

1 区域地质背景

北淮阳地区位于大别造山带外缘,受造山带影响,杨山煤系构造变形强烈,褶皱、断裂发育,一系列平行排列的轴向北西-南东的褶皱和走向逆冲断层构成杨山煤系的基本构造格局^[9-10].

北淮阳地区的上古生界为活动大陆边缘沉积,晚古生代以来经历了弧后裂陷盆地→前陆盆地→构造反转→隆升伸展等多期构造-热事件.中国南、北大陆自晚古生代以来的相互作用等构造-热事件,必然在煤系后期演化方面留下深刻的烙印,导致杨山煤系含煤层数较多,但极不稳定、煤层厚度变化大、煤级高,明显不同于华北地区相近时代煤层^[11-12].

北淮阳地区晚古生代地层在豫皖交界商城至金寨一带出露较好,包括西部的杨山煤系和东部原梅山群的一部分^[9-12],延伸长度超过100 km,中间被中生代商城岩体分隔,北淮阳地区裂变径迹年龄分布如图1所示.目前该区上古生界自下而上分为6组:泥盆系上统花园墙组(D3h),石炭系下统杨山组(C_{1y}),石炭系中统道人冲组(C_{2d}),胡油坊组(C_{2h}),杨小庄组(C_{2y}),石炭系上统双石头组(C_{3sh}).其中杨山组为主要含煤层位,杨小庄组含极不稳定煤层.

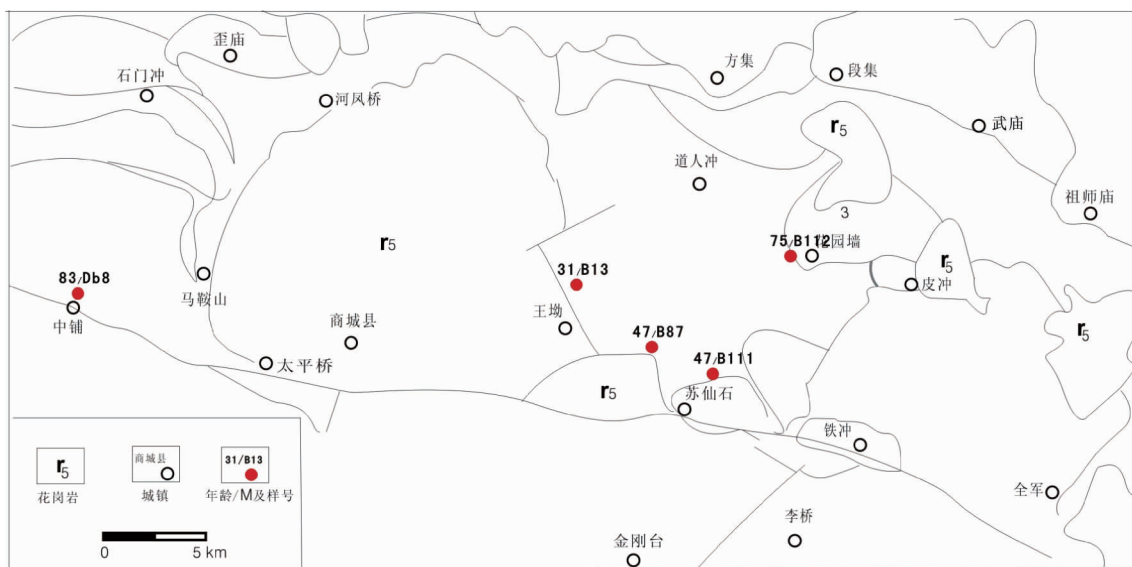


图1 北淮阳地区裂变径迹年龄分布

2 样品与实验

研究区为北淮阳杨山煤系,采样点位置见图1,样品岩性及层位见表1.在5件样品中,实际获得磷灰

石裂变径迹分析结果 4 件, 锆石裂变径迹分析结果 2 件.

裂变径迹测试是在北京安普泰得科技有限公司进行的, 由袁万民教授完成全部样品的测试工作. 实验时, 先将样品粉碎, 采用常规方法富集重矿物后, 分别通过磁选和重液分选, 得到尽可能足量的磷灰石和锆石单矿物. 将若干磷灰石和锆石颗粒放在聚四氟乙烯板上, 滴加调配好的环氧树脂和聚四氟乙烯, 并盖一干净玻片, 在 70 °C 下烘 18 h 使之固化, 将制好的样片抛光为光薄片. 磷灰石在恒温 25 °C 的 6.6% HNO₃ 溶液中蚀刻 30 s; 锆石样蚀刻条件为 8 gNaOH+11.5 gKOH 溶液 220 °C 恒温蚀刻 33 h. 采用外探测器法定年, 将低铀白云母紧贴在光薄片上, 与 CN5 标准铀玻璃一起构成定年组件. 将样品均置于反应堆内辐照, 中子注量为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. 年龄计算采用 Zeta 常数法, 其优点是不受 ²³⁸U 衰变常数数值的影响, 经 2~3 次辐射, 并分别测年后确定的. 揭示诱发裂变径迹, 实验室锆石和磷灰石 Zeta 常数分别为 $349.3 \pm 3.5 (1\sigma)$ 和 $\xi = 322.1 \pm 3.6 (1\sigma)$. 裂变径迹长度是指封闭径迹长度, 通过自动化测量系统直接测出. 裂变径迹测定结果列于表 1.

表 1 裂变径迹分析结果

实验号	原样号	采样点	岩性	层位	n	ρ_s	ρ_i	ρ_d	P/%	Central	Pooled	$L \pm$	
						$/10^5 \text{ cm}^{-2}$ (N_s)	$/10^5 \text{ cm}^{-2}$ (N_i)	$/10^5 \text{ cm}^{-2}$ (N)		Age /Ma ($\pm 1\sigma$)	Age /Ma ($\pm 1\sigma$)	$1\sigma/\mu\text{m}$ (N)	
LIXM38	B111	谭冲西	细砂岩	C _{2h}	26	5.002 (301)	18.730 (1 127)	9.237 (10 438)	99.6	47 (± 3)	47 (± 3)	12.0 \pm 2.4 (123)	
LIXM39	B112	皮冲小学	石英砂岩	C _{1y}	13	8.798 (532)	20.524 (1 241)	9.134 (10 438)	82.9	75 (± 5)	75 (± 5)	9.9 \pm 2.3 (98)	
磷灰石	LIXM40	B13	塘湾	碳质页岩	C _{3y}	21	1.318 (139)	7.331 (773)	9.032 (10 438)	97.1	31 (± 3)	31 (± 3)	12.7 \pm 2.3 (87)
	LIXM41	B87	樊家湾	粉砂岩	C _{2h}	21	3.471 (166)	12.588 (602)	8.929 (10 438)	100.0	47 (± 4)	47 (± 4)	12.0 \pm 2.4 (30)
		DB8	变长英砂岩	C _{1y}	15	16.96 (792)	8.65 (404)	3.400 (2 646)	82.7	83.3 (± 4.9)		12.9 \pm 0.4 (32)	
	LIXM22	B112	皮冲小学	石英砂岩	C _{1y}	21	54.820 (2 063)	13.393 (504)	3.005 (4 878)	22.6	81 (± 6)	81 (± 5)	
锆石	LIXM22	B87	樊家湾	粉砂岩	C _{2h}	9	71.429 (581)	23.973 (195)	3.829 (4 878)	46.8	75 (± 7)	75 (± 7)	

注: DB8 据文献[1]; n 为颗粒数; P(χ^2) 为 χ^2 检验概率; ρ_s 为自发裂变径迹密度; N_s 为自发裂变径迹条数; ρ_i 为诱发裂变径迹密度; N_i 为诱发裂变径迹条数; ρ_d 为 铀标准玻璃的诱发裂变径迹密度; N 为铀标准玻璃的诱发裂变径迹条数; Central Age $\pm 1\sigma$ 为裂变径迹中值年龄 ± 1 标准差; Pooled Age $\pm 1\sigma$ 为裂变径迹池年龄 ± 1 标准差; $L \pm 1\sigma$ 为封闭径迹平均长度 ± 1 标准差; N 为封闭径迹数目

3 测试结果讨论

测试结果如表 1, 图 2 和图 3 所示. 所有测试样品均采自研究区石炭系的杨山组与胡油坊组煤系地层, 且就研究区受构造-热影响的不同单元进行了有针对性的采样, 各个样品测试的颗粒数不同, 磷灰石均在 13 粒以上, 锆石在 9 粒以上.

1) 磷灰石测试样品的 χ^2 检验值 P(χ^2) 最小值为 82.7%, 有的甚至达到 100%, 锆石测试样品的 χ^2 检验值 P(χ^2) 最小值为 22.6%, 均远大于 5%, 表明测试样品中的磷灰石和锆石裂变径迹单颗粒年龄属于同一年龄组.

2) 磷灰石经历了相似的热演化过程: 同一样品不同颗粒年龄组群分析表明, 绝大部分年龄数据点都落在标准化年龄的 ± 2 范围内(图 2 左图). 说明样品中不同磷灰石颗粒经历的最后热事件是相似的, 裂变径迹计年体系启动是单一成因的, 因而可避免年龄值的多解性, 其年龄值能较好地约束研究区的构造热活动. 锆石亦经历了相似热的演化过程(图 3 左图).

3) 磷灰石由于其相对较低的退火温度, 因而其缺失了对石炭系煤系地层可能发生于早期的构造-热事件的“记忆”, 其中值年龄和池年龄值明显小于所处煤系地层的年龄, 且本次所测试样品的中值年龄与池年龄均相等. 磷灰石裂变径迹分析显示了如下特点:

a) 年龄值可分为 75~83 Ma \pm 和 31~47 Ma \pm 这 2 个年龄组, 其封闭径迹的平均长度在 (9.9~12.9) \pm

(0.4~2.4) μm 之间,亦明显小于(16.3 \pm 0.9) μm 的诱发径迹初始长度值;显示经高温退火后短径迹与后期抬升冷却过程中新生长径迹的复合叠加特征,也说明了这些样品曾经历过异常高温退火和后来的抬升冷却,具有复杂的热演化史。

b)由图 2 右图可以看出,磷灰石裂变径迹单颗粒年龄值基本小于 95 Ma.这说明 95 Ma 以前,北淮阳地区石炭系地层处于磷灰石径迹完全退火带温度范围内;至 95 Ma \pm 才抬升至脱离完全退火带的位置,并经历了一个缓慢的抬升过程;至 31~47 Ma \pm 快速抬升,长径迹也逐渐增多。

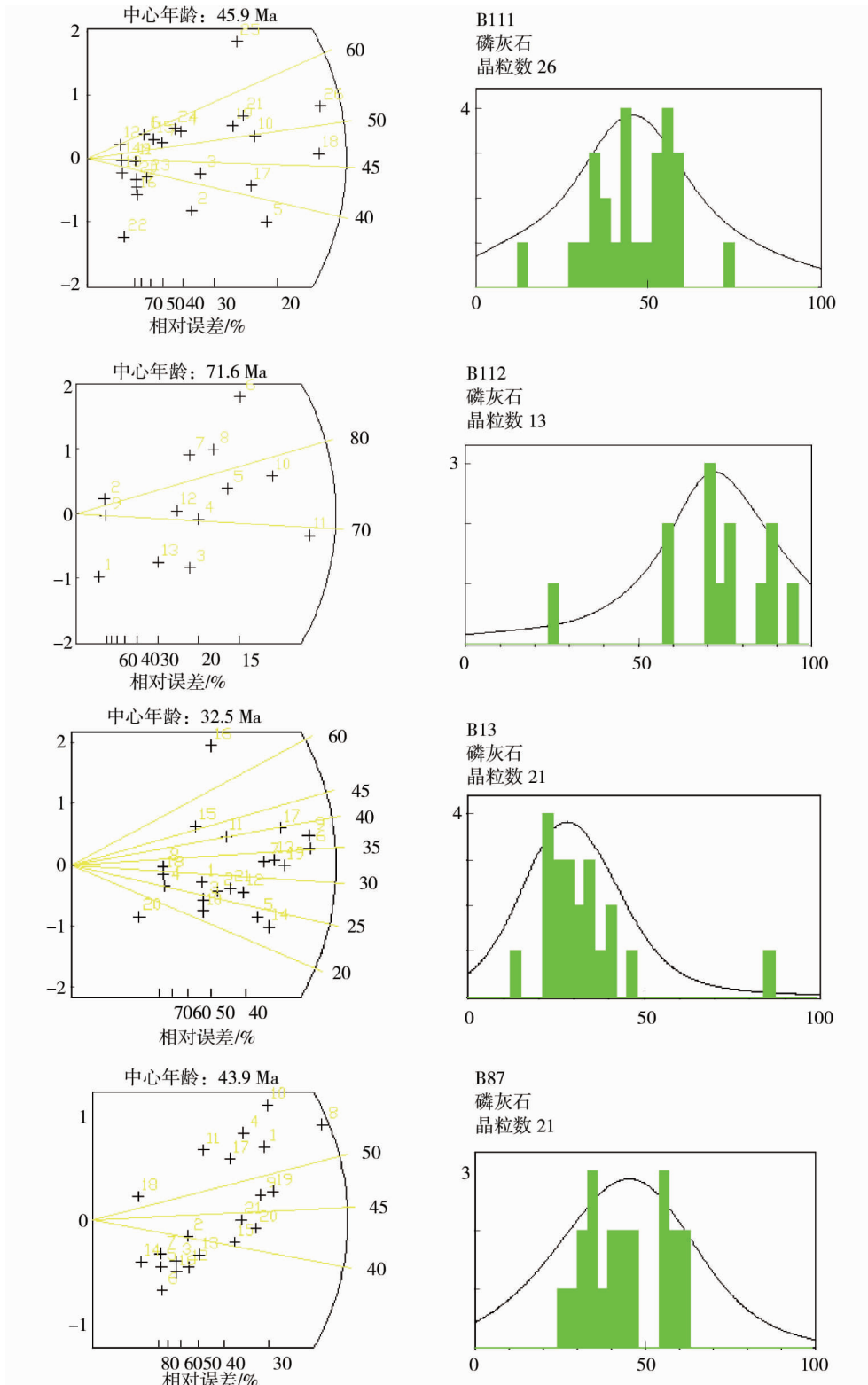


图 2 北淮阳地区磷灰石裂变径迹单颗粒年龄雷达图、单颗粒年龄分布直方图

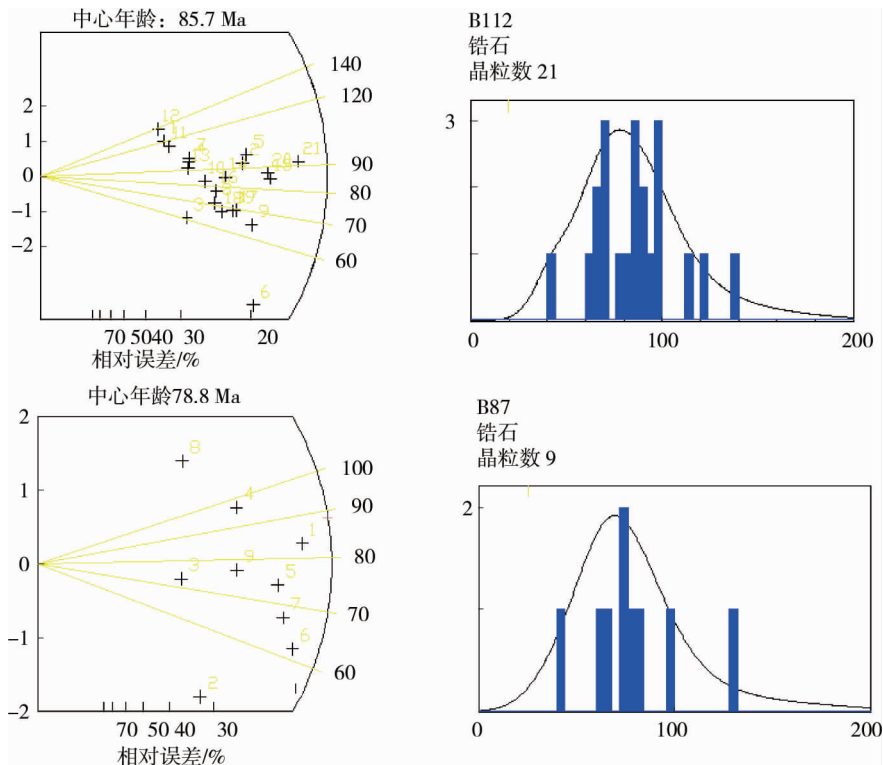


图3 北淮阳地区锆石裂变径迹单颗粒年龄雷达图、单颗粒年龄分布直方图

c)就中值年龄和池年龄而言,取于商城岩体附近的 B13, B87, B111 样品比远离它的样品 Db8 及 B112 的年龄要年轻,而从它们的单颗粒年龄分布直方图也可看出相似的趋势(图 2 右图),较大年龄差异的存在极有可能是商城岩体异常高温所致。

4)鉴于锆石较高的退火温度,因而研究区同一样品的锆石裂变径迹年龄较磷灰石裂变径迹年龄老(表 1)。相关研究表明,地层中的锆石发生退火说明地层经历的古温度要高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5-6]。据马昌前等(1995) [13] 研究,根据同位素年龄测定结果,可以确定大别山区在 $133\sim 117\text{ Ma}$ 之间,曾经发生过一次强烈的构造岩浆热事件,并伴随有强烈的韧性剪切变形。而 2 个锆石样品开始脱离完全退火带的时间为 $130\text{ Ma}\pm$ 和 $140\text{ Ma}\pm$ (图 3),对应的锆石年龄更可能是中生代印支-燕山期较强烈的构造-热事件的地质响应。

5)锆石裂变径迹年龄明显小于煤系地层年龄,存在如下可能:即样品在沉积埋藏后经历过高于锆石径迹封闭温度的高温热事件,即锆石发生了完全退火;样品在沉积埋藏后经历的最高古地温没有达到锆石径迹完全退火的温度,这种情况下的径迹年龄反映锆石只经历部分退火。在 10 Ma 地质时代尺度下,锆石裂变径迹的部分退火带温度区间为 $262\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Yamada, et al. 2007),而地层经历的最大古地温可由最大镜质组反射率推断得到。根据文献 [14],北淮阳石炭系煤系地层样品的 R_{omax} 值介于 $3.66\%\sim 5.62\%$,所对应的最大古地温区间 $61.9\sim 397.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在 137 Ma 为 $397\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过其封闭温度。

研究区商城岩体的侵入时间介于 $133\sim 117\text{ Ma}$ [13],即岩体侵入时间明显早于 $75\sim 81\text{ Ma}\pm$ 的锆石裂变径迹年龄,这说明发生于燕山期的岩浆活动对锆石径迹发生退火作用有一定的影响。还有一种可能是深成变质作用使得石炭系煤层经历接近锆石径迹封闭温度的高温退火事件,而有关研究区埋藏史分析表明 [10],在约 $137\text{ Ma}\pm$,石炭系煤系地层埋深达到最大,约 11.389 km ,最高古地温达 $397.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到了锆石退火的封闭温度,可使其完全退火。

6)所测得的裂变径迹年龄往往不能直接解释为构造-热事件发生的时间,而径迹长度分布特征也包含着丰富热史信息。Green 等(1988)认为,在存在不连续加速剥露的地区,平均径迹长度和年龄关系可能表现为一种反映差异冷却记录的 U 形特征模型,即“香蕉图”模式。研究区磷灰石裂变径迹年龄-平均径迹长度的“香蕉图”也具有十分明显的 U 型特征,如图 4 所示。

由图 4 可见:自 $85\text{ Ma}\pm$ 开始,随着裂变径迹年龄的减小,至 $60\text{ Ma}\pm$ 时裂变径迹平均长度达 $11.0\text{ }\mu\text{m}$ 的最小值;接下来,裂变径迹平均长度值随着年龄的减小而增大,至 $31\text{ Ma}\pm$ 时达到 $12.7\text{ }\mu\text{m}$ 。由“香蕉图”模式

可知,其每一个的波峰和波谷所在的时间点代表的是加热事件与冷却事件的启动时间,而波峰与波谷之间的时间间隔反映了加热时间或冷却时间的长短.但需要注意的是,加热事件与冷却事件的启动时间可能与波峰、波谷对应的时间点不一致,这要进一步结合径迹长度的分布情况才能判断.由“香蕉图”所大致反映出的加热与冷却的启动时间点与张守仁^[10]通过有机质反演古地温所得结果大体一致.

4 结论

1) 测试样品的 χ^2 检验及同一样品不同颗粒年龄组群分析表明:磷灰石和锆石裂变径迹单颗粒年龄属于同一年龄组,裂变径迹计年体系启动是单一成因的.

2) 磷灰石及锆石裂变径迹特点说明研究区经历了使磷灰石和锆石径迹发生明显退火的构造-热事件.

3) 磷灰石由于其相对较低的退火温度,缺失了对石炭系煤系地层可能发生于早期的构造-热事件的“记忆”,其年龄值明显小于所处煤系地层的年龄.95 Ma 以前,北淮阳地区石炭系地层处于磷灰石径迹完全退火带温度范围内;至 95 Ma \pm 才抬升至脱离完全退火带的位置,并经历了一个缓慢的抬升过程;至 31~47 Ma \pm 快速抬升.较大年龄差异的存在极有可能是商城岩体异常高温所致.

4) 在约 137 Ma \pm ,石炭系煤系地层埋深达到最大,约 11.389 km,最高古地温达 397.4 °C,达到了锆石退火的封闭温度,可使其完全退火.发生于燕山期的岩浆活动对锆石径迹发生退火作用有一定的影响,2 个锆石样品开始脱离完全退火带的时间为 130 Ma \pm 和 140 Ma \pm ,对应的锆石年龄更可能是中生代印支-燕山期较强烈的构造-热事件的地质响应.

5) 研究区磷灰石裂变径迹年龄-平均径迹长度的“香蕉图”也具有十分明显的 U 型特征,由“香蕉图”所大致反映出的加热与冷却的启动时间点与张守仁通过有机质反演古地温所得的结果大体一致.

参考文献:

- [1] 许长海,周祖翼, VanDenHaute P, 等.大别造山带磷灰石裂变径迹(AFT)年代学研究[J].中国科学:地球科学,2004,34(7):622-634.
- [2] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, et al. Exhumation of ultrahigh pressure continental crust in east central China: late Triassic-early Jurassic tectonic unroofing[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B6): 13339-13364.
- [3] 陈江峰,谢智,刘顺生,等.大别造山带冷却年龄的⁴⁰Ar-³⁹Ar 和裂变径迹年龄测定[J].中国科学:B 辑,1995, 25(10): 1086-1092.
- [4] Harris N. Radiogenic isotopes and the interpretation of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 107-113.
- [5] Wagner G, Haute P V D. Fission track dating[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [6] Wolf R, Farley K, Kass D. Modeling of the temperature sensitivity analysis of the apatite(U-Th)/He thermochronometer[J]. Chemical Geology, 1998, 148(1/2): 105-114.
- [7] Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B6): 13303-13338.
- [8] 许长海,周祖翼,马昌前,等.大别造山带 140~85 Ma 热穹伸展作用——年代学约束[J].中国科学:D 辑,2001,31(11): 925-937.
- [9] 曹代勇,占文峰,李小明.商城岩体侵位对杨山煤系构造格局的影响[J].中国矿业大学学报,2007, 36(3): 320-324.
- [10] Cao D, Zhan G S, Li X, et al. Deformation and metamorphism of coal in Yanshan formation in the Beihuaiyang area, China [J]. Western Pacific Earth Sciences, 2004, 4(1): 15-28.
- [11] 马文璞.大别山北麓的石炭系及其大地构造意义[J].地质学报,1991,65(1): 17-26.
- [12] 李宝芳,马文璞,张惠良,等.大别山北麓石炭纪盆地沉积和构造研究[J].地质前缘,2000,7(3): 153-165.
- [13] 马昌前,杨坤光,唐仲华,等.华中大别高压变质地体的形成和差异岩石隆升-剥露:来自火成岩的证据[J].地球科学,1995,20(5): 515-520.
- [14] 张守仁.造山带外缘煤的演化特征研究及其应用[D].北京:中国矿业大学,2001.

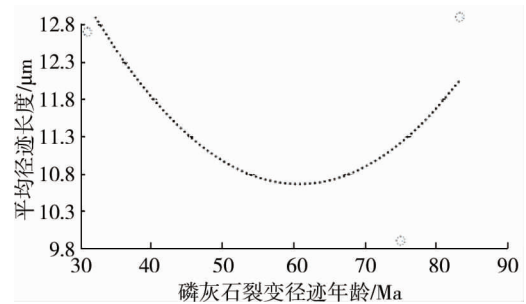


图4 磷灰石裂变径迹年龄-平均径迹长度