

黄陵隆起形成(165—100 Ma)的 碎屑岩磷灰石裂变径迹热年代学约束*

刘海军¹ 许长海^{1**} 周祖翼¹ R. A. Donelick²

1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. Apatite to Zircon, Inc. Idaho 83872-9709 USA

摘要 黄陵隆起东部9个碎屑岩的磷灰石裂变径迹(AFT)分析表明: C_2-J_3 碎屑岩的 AFT 热年龄 148—104 Ma(径迹长度为 12.63—13.79 μm)代表了沉积物经埋藏加热和径迹完全退火后的抬升冷却年龄; K_2 碎屑岩的 AFT 热年龄 110—81.5 Ma(径迹长度为 11.22—12.71 μm)表明盆地沉降幅度达到但没有超过 AFT 的部分退火区间(80—120 $^{\circ}\text{C}$); 3个样品进行 AFT 多元组分模拟获得了质量较好的热历史曲线. 黄陵隆起 AFT 的时间—温度演化曲线包括四分段, 即—2.0—2.1 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (425 Ma $\rightarrow$ 320 Ma), 0.2—0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (320 Ma $\rightarrow$ 165 Ma), 1.9—2.7 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (165 Ma $\rightarrow$ 100 Ma)和 0.2—0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (100 Ma 以来). 综合 AFT 年龄、热历史曲线与地层分布等特点, 认为由杂岩核与中、古生界环翼组成的黄陵穹隆形成于 165—100 Ma, 这一快速的冷却抬升事件同时造成了隆起周缘 J_3/K_1 之间的角度不整合以及 K_1-K_2 大套的粗碎屑砾岩堆积.

关键词 AFT 热历史模拟 碎屑岩 黄陵隆起

黄陵隆起(或称为黄陵背斜)位于扬子板块北缘(图1), 构造上表现为中、古生界地层环绕变质杂岩核分布形成的穹隆格局, 其东、西两侧分别为当阳盆地和秭归盆地. 黄陵隆起因其核部出露最老的基底变质岩系成为认识扬子板块早期构造演化的重要窗口, 并在构造学、岩石学和年代学等方面取得了一系列重要成果^[1-12]. 关于黄陵隆起形成的时间, 一种观点认为抬升主要始于晚侏罗世^[13], 另一观点认为黄陵背斜已于晚三叠世褶皱隆升出水面^[14-17], 这两种认识主要基于沉积—构造响应的记录, 缺乏具体的热年代学数据约束. 近年来, 低温热年代学的发展为解决这一问题提供了有效手段, 特别是裂变径迹年代学(FT)和磷灰石多元动力学组分热史模拟技术^[18,19]. 黄陵隆起现有的低温热年代学研究主要限于基底核杂岩^[20,21], 包括锆石、磷灰石裂变径迹和 U-Th/He 方法. Hu 等^[20]认为, 黄陵

隆起经历了缓慢冷却(>100 Ma)和快速冷却(100—40 Ma)两大抬升阶段; 沈传波等^[21]认为黄陵隆起快速冷却抬升发生在 160—98 Ma, 这一抬升期前后均表现出缓慢冷却抬升的构造特点. 本文选用黄陵隆起东部的中、古生界碎屑岩进行磷灰石裂变径迹(AFT)分析, 特别是应用多元动力学组分(颗粒年龄、围限径迹长度和 Dpar 等)进行时间—温度热历史重建, 通过与杂岩核现有的热年代成果综合对比, 获得了黄陵穹状隆起冷却抬升特点及其形成时限.

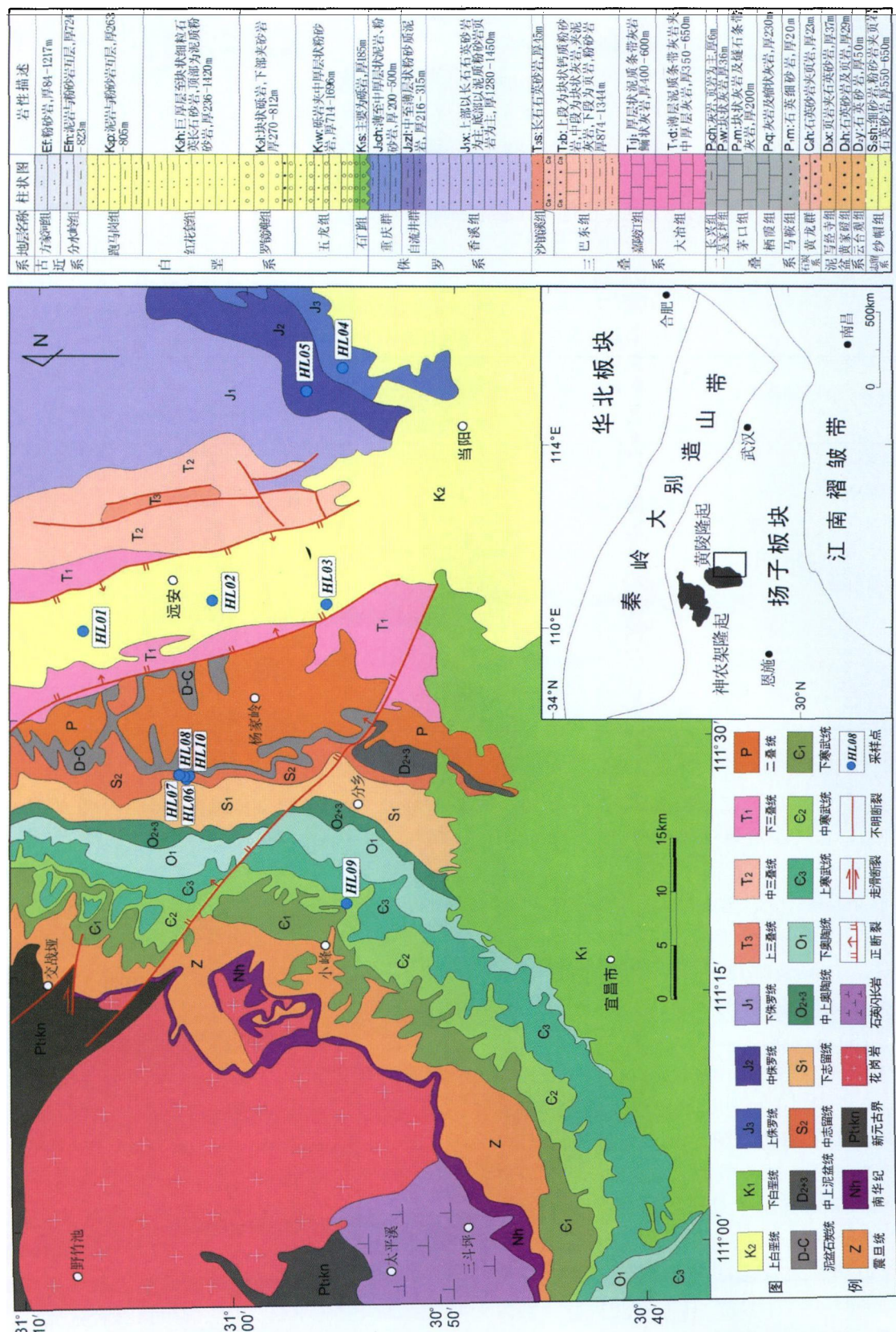
1 AFT 采样、测试分析与结果

黄陵隆起区域上呈现穹隆构造格局, 其核部由基底变质杂岩组成, 包括崆岭群($A_{r_3}-P_{t_1}$)和晋宁期花岗岩侵入体^[7], 杂岩核外围被中、古生界海相碳酸盐岩与陆相碎屑岩环绕(图1). 本文选用黄陵

2009-04-13 收稿, 2009-08-19 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40872138)和上海市优秀学科带头人计划(批准号: 08XD14042)资助项目

** 通信作者, E-mail: xchxch@mail.tongji.edu.cn



隆起东部的碎屑岩进行 AFT 分析, 涉及地层包括覃家庙组(E_2q)、纱帽组(S_2sh)、自流井群(J_2zl)、重庆群(J_3ch)、罗镜滩组(K_2l)、红花套组(K_2h)和跑马岗组(K_2p), 样品的岩性主要为长英质砂岩(图 1, 表 1)。样品均采自新鲜露头, 每个样品重 1.5 kg, 逐样粉碎、分选与烘干后, 在双目镜下挑选磷灰石约 100—150 颗(粒径 80—300 μm)。裂变径迹测试工作在 Apatite to Zircon, Inc. 完成, 主要包括制样、抛光、蚀刻、辐照、径迹测量和年龄计算等。辐照

通量监测使用 CN5 玻璃, AFT 蚀刻条件为 21℃, 5.5 mol/L HNO_3 蚀刻 20.0 s, AFT 年龄计算使用 ξ 值为 113.8 ± 2.9 , AFT 径迹长度测量选用围限径迹长度, 还包括径迹长度与结晶 C 轴的夹角, 长度测量的显微镜放大倍数为 1562.5。本文测量了刻画 AFT 耐退火程度的参数 Dpar, Dpar 是指与结晶 C 轴平行的颗粒抛光面上的裂变径迹蚀刻象的最大直径, 具体实验方法详见文献[22]。此外, 本文还获得了样品 HL10 的锆石裂变径迹(ZFT)测试数据。

表 1 黄陵隆起中、古生界碎屑岩的 AFT 测试分析结果

样号	地层	颗粒	自发径迹		诱发径迹		标准玻璃		Dpar / μm	合并年 龄/Ma	$\pm 1\sigma$ /Ma	围限径迹	
			ρ_s / $10^5 \cdot cm^{-2}$	N_s	ρ_i / $10^5 \cdot cm^{-2}$	N_i	ρ_d / $10^5 \cdot cm^{-2}$	N_d				条数	平均长度/ μm
HL01	跑马岗组(K_2p)	6	10.47	71	25.35	172	47.30	4259	1.86	110	16	11	11.22 ± 0.56
HL02	红花套组(K_2h)	4	16.83	56	55.29	184	47.35	4259	1.87	81.5	12.7	4	12.32 ± 0.64
HL03	罗镜滩组(K_2l)	4	26.27	190	71.63	518	47.40	4259	1.95	98.2	8.8	25	12.71 ± 0.39
HL04	重庆群(J_3ch)	34	11.83	760	30.47	1958	47.46	4259	1.88	104	5	84	13.46 ± 0.17
HL05	自流井群(J_2zl)	7	9.81	152	23.11	358	47.51	4259	1.96	114	12	13	13.76 ± 0.63
HL06	纱帽组(S_2sh)	25	12.21	633	28.53	1479	47.61	4259	1.78	115	6	70	13.03 ± 0.20
HL07	纱帽组(S_2sh)	4	9.82	49	17.83	89	47.66	4259	1.90	148	27	5	12.63 ± 0.78
HL08	纱帽组(S_2sh)	20	10.50	303	24.18	698	47.71	4259	1.80	117	9	46	13.79 ± 0.81
HL09	覃家庙组(E_2q)	3	19.75	67	49.53	168	47.56	4259	1.96	107	16	9	13.28 ± 0.53

本文 9 个碎屑岩的 AFT 测试分析结果见表 1。中寒武统样品 HL09(E_2q)的 AFT 合并年龄为 (107 ± 16) Ma, 它代表盆地沉积后构造抬升的冷却年龄, 其围限径迹长度为 $(13.28 \pm 0.53) \mu m$, Dpar 值为 $1.96 \mu m$ 。中志留统纱帽组(S_2sh)三个样品 HL06, HL07 和 HL08 的 AFT 合并年龄分别为 (115 ± 6) Ma, (148 ± 27) Ma, (117 ± 9) Ma, 相应的围限径迹长度分别为 $(13.03 \pm 0.20) \mu m$, $(12.63 \pm 0.78) \mu m$, $(13.79 \pm 0.81) \mu m$, Dpar 值分别为 $1.78 \mu m$, $1.90 \mu m$ 和 $1.80 \mu m$; 这三组测试数据中, 由于 HL07 可测量的颗粒年龄和径迹长度数量偏少, 因而 AFT 计算结果误差偏大; HL06 和 HL08 的测试分析效果较好, 它们的 AFT 合并年龄 $(115—117)$ Ma 远小于其地层年龄(中志留世), 反映了沉积物经埋藏、加热导致 AFT 完全退火之后的盆地构造热演化信息。中-上侏罗统两个样品 HL04(J_3ch), HL05(J_2zl)的 AFT 合并年龄分别为 (104 ± 5) Ma 和 (114 ± 12) Ma, 相应径迹长度分别

为 $(13.46 \pm 0.17) \mu m$ 和 $(13.76 \pm 0.63) \mu m$, Dpar 值分别为 $1.88 \mu m$ 和 $1.96 \mu m$; 这两个样品的 AFT 年龄也小于其地层年龄(早、中侏罗世), 仍然反映了沉积物埋藏加热、径迹完全退火后的盆地构造热演化信息。对于黄陵隆起东部的上白垩统断陷沉积, 本文获得了三个碎屑岩样品 HL01(K_2p), HL02(K_2h)和 HL03(K_2l)的 AFT 年龄为 (110 ± 16) Ma, (81.5 ± 12) Ma 和 (98.2 ± 8.8) Ma, 这些年龄值接近或略大于其地层年龄, 说明晚白垩世断陷盆地的沉降幅度达到但没有超过 AFT 的封闭温度区间 $(80—120^\circ C^{[23]})$; 测得上白垩统三个样品的围限径迹长度分别为 $(11.22 \pm 0.56) \mu m$, $(12.32 \pm 0.64) \mu m$ 和 $(12.71 \pm 0.39) \mu m$, 其 Dpar 值分别为 $1.86 \mu m$, $1.87 \mu m$ 和 $1.96 \mu m$ 。此外, 本文还获得了中志留统 HL10(S_2sh)的 ZFT 合并年龄为 (181 ± 16) Ma(11 个颗粒平均), 这一年龄值远小于其地层年龄, 反映了沉积物经埋藏、加热导致锆石径迹完全退火后的盆地构造热演化信息。

2 AFT 时间—温度热历史重建

裂变径迹技术的优势不但在于能获得与构造抬升/沉降作用相关的低温热年龄,更重要的是还能获得一段温度随时间变化的低温热演化历史.应用多元动力学组分进行 AFT 热史重建是裂变径迹技术领域近年来取得的重要进展^[24-26],多元组分模拟综合考虑了时间、温度和成分变化对径迹退火的影响.本文选用径迹统计效果好的三个样品 HL04, HL06 和 HL08,根据其颗粒年龄、围限径迹长度和 Dpar 三个测量参数进行 AFT 多元组分热历史模拟,模拟软件使用 HeFTy(v1.3)^[18],AFT 退火模型选用 Ketcham 等^[19],拟合选用限制任意搜索项(CRS),曲线拟合采用 Monte Carlo 算法,拟合曲线数选用 10000 条,其他约束条件包括地层年龄和锆石 FT 年龄. HL04, HL06 和 HL08 三个碎屑岩的多元组分 AFT 热历史模拟结果见图 2.

HL06 和 HL08 均为中志留统纱帽组(S_2sh),这里选用其地层年龄(429—423 Ma,根据 2004 年国际地质年代表)、地表温度(约 20℃)以及 HL10 的 ZFT 年龄(181 ± 16) Ma 及其封闭温度(210 ± 40)℃^[23]作为约束条件对两个样品进行多元组分 AFT 热史模拟.模拟获得了质量较好的热历史曲线,其径迹年龄 GOF 检验值分别为 0.99 和 0.96,径迹长度 GOF 检验值分别为 0.98 和 0.96,它们的时间—温度曲线均由四分段组成. HL06 的冷却特性变化依次为 $-2.0^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (425 Ma $\rightarrow$ 320 Ma, $23^\circ\text{C} \rightarrow 233^\circ\text{C}$)、 $0.3^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (320 Ma $\rightarrow$ 165 Ma, $233^\circ\text{C} \rightarrow 190^\circ\text{C}$)、 $1.9^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (165 Ma $\rightarrow$ 100 Ma, $190^\circ\text{C} \rightarrow 65^\circ\text{C}$)及 $0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (100 Ma 以来, $65^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$); HL08 的冷却特性变化依次 $-2.1^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (425 Ma $\rightarrow$ 325 Ma, $18^\circ\text{C} \rightarrow 230^\circ\text{C}$)、 $0.2^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (325 Ma $\rightarrow$ 160 Ma, $230^\circ\text{C} \rightarrow 192^\circ\text{C}$)、 $2.7^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (160 Ma $\rightarrow$ 105, $192^\circ\text{C} \rightarrow 42^\circ\text{C}$)和 $0.2^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (105 Ma 以来, $42^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$).这两个中志留统样品四分段的冷却特性分别对应于沉积物较快速埋藏加热、缓慢抬升冷却、快速抬升剥露和缓慢冷却抬升四个构造阶段,前两个阶段反映了古生代海相盆地的区域性沉降特点,而发生在 165—100 Ma 期间的快速冷却抬升是一次明显不同于前期区域性沉降作用的构造抬升事件,这次事件对于促使黄陵基底杂岩核与中、古生界地层协调形

成区域性穹窿具有重要意义,这与黄陵隆起东部的重庆群(J_3ch)/石门组(K_1s)角度不整合关系以及白垩系(K_1-K_2)大套粗碎屑砾岩的形成是一致的.黄陵隆起 100 Ma 以来的缓慢抬升作用($0.2-0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$)表明该区域进入了又一个新的构造阶段.

HL04(J_3ch)采自远安地堑以东,远离黄陵穹窿核部(图 1),其 AFT 热历史模拟选用三个约束条件,包括地层年龄(161—145 Ma,根据 2004 国际地质年代表)、地表温度(约 20℃)、以及盆地沉降加热的上限温度(125—165℃).盆地加热上限温度的估算主要是基于其上白垩统的 AFT 样品(HL01—HL03)加热接近或达到 AFT 的封闭温度(100 ± 20)℃^[23]再加上下白垩统平均厚度(约 1350 m)除以平均地温梯度(取 $30^\circ\text{C}/\text{km}$)而获得的. HL04 的 AFT 热史曲线质量较好,其模拟径迹年龄 GOF 检验值为 0.99,模拟径迹长度 GOF 检验值为 0.99,该样品的热历史曲线包括四分段,其冷却速率变化依次为 $-5.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (165 Ma $\rightarrow$ 145 Ma, $20^\circ\text{C} \rightarrow 130^\circ\text{C}$)、 $-0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (145 Ma $\rightarrow$ 125 Ma, $130^\circ\text{C} \rightarrow 140^\circ\text{C}$)、 $2.3^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (125 Ma $\rightarrow$ 95 Ma, $140^\circ\text{C} \rightarrow 70^\circ\text{C}$)和 $0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (95 Ma 以来, $70^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$),分别对应于沉积物快速埋藏加热、缓慢沉降加热、快速抬升剥露、缓慢抬升剥露四个构造阶段;前两个沉降加热阶段反映了由于黄陵穹窿核部抬升作用促使穹窿外缘区的盆地沉降加热,第三个快速抬升阶段(125—95 Ma)代表黄陵穹窿构造抬升作用波及其周缘地区的抬升时限,由于这次快速抬升与剥露作用,导致远安地堑中上白垩统粗碎屑岩中保留了 110—82 Ma 反映物源区的 AFT 热年龄. 95 Ma 以来的缓慢抬升作用($0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$)反映了黄陵隆起东部进入了又一构造发展阶段.

3 关于黄陵隆起形成的时间

关于黄陵隆起形成的时间,实际上就是讨论黄陵穹窿形成的时间,即中、古生界环翼与变质杂岩核组成的区域性穹窿构造是在什么时候形成的.根据杂岩核与中、古生界环翼的协调关系、以及穹窿东部中、古生界地层间相互接触的关系(图 1),至少可以确定黄陵穹窿形成于三叠纪之后、晚白垩世之前;因为古生界至三叠系地层环绕杂岩核分布的穹窿构造轮廓很清晰,侏罗系一下白垩统更多显现

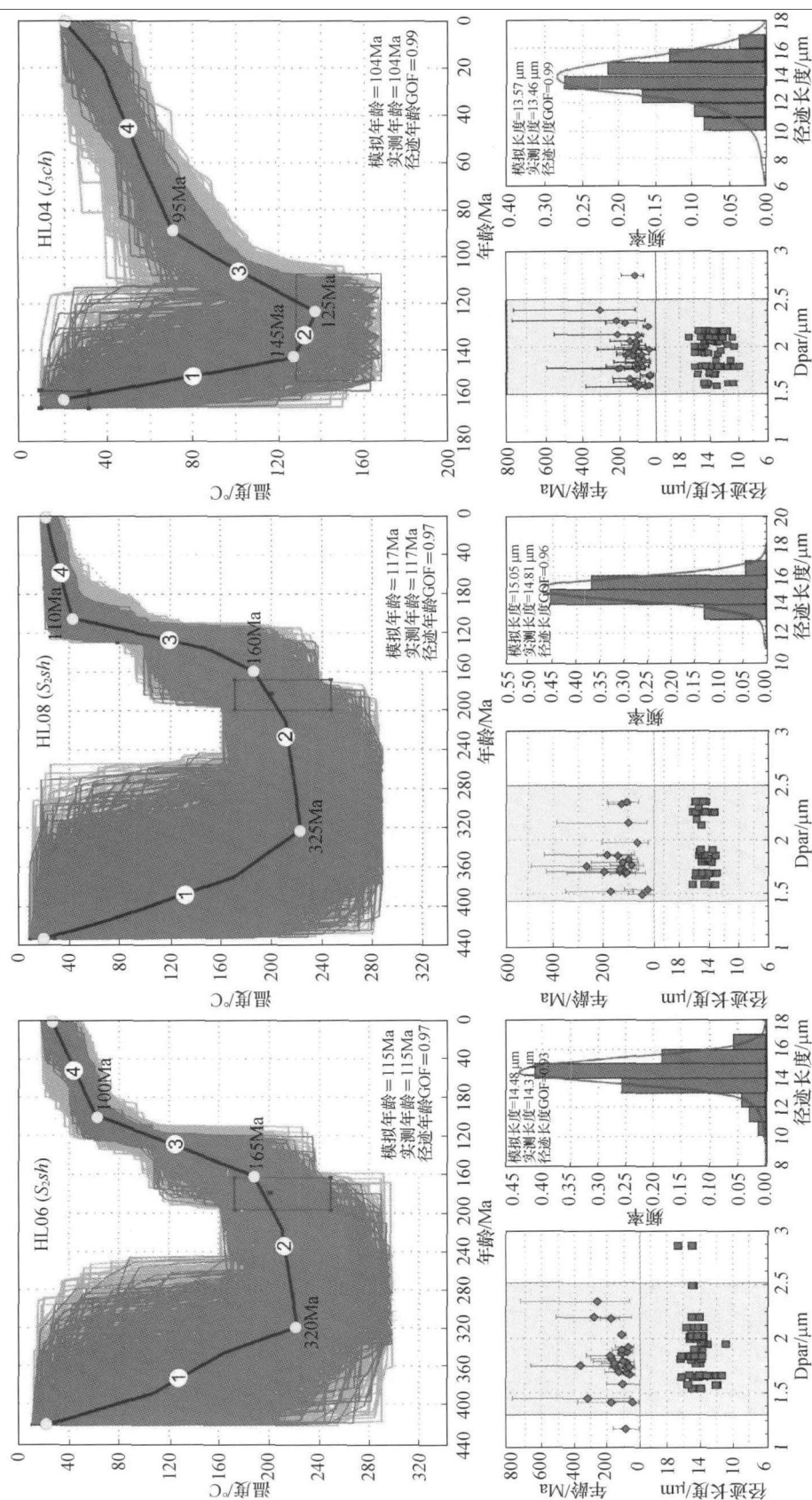


图2 黄陵隆起中、古生界碎屑岩的AFT多元组分热历史模拟曲线

协调穹隆分布的迹象,而上白垩统断陷沉积则表明这一时期构造环境发生了改变.尽管如此,根据沉积地层展布与接触关系仍不能给出黄陵隆起形成的确切时限.

就黄陵核杂岩而言, Hu 等^[20]获得了7个样品的 AFT 年龄为 87—102 Ma, 围限径迹长度为 11.8—12.6 μm ; 5 个样品的锆石 U-Th/He 年龄为 121—309 Ma 和磷灰石 U-Th/He 年龄为 39.3—76.9 Ma. Hu 等^[20]综合这些数据进行了时间—温度热历史模拟, 认为黄陵隆起经历了 100 Ma 之前的缓慢冷却和 100—40 Ma 快速冷却两大构造阶段. 沈传波等^[21]对晋宁期花岗岩开展裂变径迹分析, 获得了 8 个样品的 AFT 年龄为 129—91 Ma, 围限径迹长度为 12.0—13.1 μm , 3 个样品的锆石 FT 年龄为 158—195 Ma. 沈传波等^[21]根据 AFT 热史认为, 黄陵隆起快速冷却抬升发生在 160—98 Ma, 这一抬升期前后均为缓慢冷却的构造特点. 本文根据现有的同位素热年代^[9-13]及其封闭温度^[23,27,28], 综合绘制了黄陵核杂岩自晚元古代以来时间随温度变化的冷却曲线(图 3), 低温热年代数据依据 Hu 等^[20], 相应封闭温度选用: 磷灰石 FT 法为 $100 \pm 20^\circ\text{C}$, 锆石 FT 法为 $210 \pm 40^\circ\text{C}$, 锆石 U-Th/He 法为 160—200 $^\circ\text{C}$ ^[27], 以及磷灰石 U-Th/He 法为 55—80 $^\circ\text{C}$ ^[28].

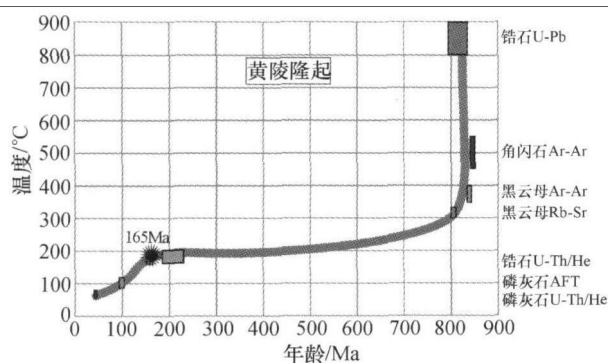


图3 黄陵隆起晋宁期以来的时间-温度冷却特性变化曲线

图 3 表明, 黄陵核杂岩在晋宁期-白垩纪时期表现出快速冷却、构造较稳定和快速冷却三大阶段的冷却变化特性, 其冷却速率变化依次为 13.8 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (830 Ma $\rightarrow$ 790 Ma, 850 $^\circ\text{C} \rightarrow$ 300 $^\circ\text{C}$)、0.2 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (790 Ma $\rightarrow$ 160 Ma, 300 $^\circ\text{C} \rightarrow$ 195 $^\circ\text{C}$) 及 1.6 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (160 Ma $\rightarrow$ 100 Ma, 195 $^\circ\text{C} \rightarrow$ 100 $^\circ\text{C}$). 如果不考虑与晋宁期造山有关的中高温快速冷却作用,

黄陵核杂岩另一次最重要的快速抬升冷却事件就发生在 165—100 Ma, 这一时限与黄陵隆起东部碎屑岩的 AFT 多元组分模拟热史中获得的快速冷却抬升事件 (1.9—2.7 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 165—100 Ma) 是一致的, 而且黄陵核杂岩在 165 Ma 发生的构造转折在 Hu et al.^[20] 模拟热史中也有体现. 因此, 本文将黄陵穹隆形成的时限置于 165—100 Ma, 这一快速的构造抬升作用同时促使穹隆周缘形成 J_3/K_1 之间的角度不整合以及下白垩统至上白垩统下部大套的粗碎屑砾岩堆积, 上白垩统下部的砾岩堆积与这一构造抬升造成与周缘的地势差有关.

4 结论

(1) 黄陵隆起 6 个中寒武统、中志留统和中-上侏罗统碎屑岩的 AFT 年龄分别为 (107 $\pm$ 16) Ma, 148—115 Ma 和 114—104 Ma, 它们反映了沉积物经埋藏加热和 AFT 完全退火后的盆地抬升冷却年龄信息; 3 个上白垩统的 AFT 年龄为 110—81.5 Ma, 表明盆地沉降幅度达到但没有超过 AFT 的部分退火区间.

(2) 根据多元动力学组分模拟技术, 获得了黄陵隆起四分段的 AFT 时间—温度热历史曲线, 其冷却特性依次为 -2.0—-2.1 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (425 Ma $\rightarrow$ 320 Ma), 0.2—0.3 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (320 Ma $\rightarrow$ 165 Ma), 1.9—2.7 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (165 Ma $\rightarrow$ 100 Ma) 和 0.2—0.5 $^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (100 Ma 以来); 第三快速冷却抬升段对应于黄陵隆起形成的时间, 而 100 Ma 以来的缓慢冷却抬升作用更具有区域性特点.

(3) 由变质杂岩核与中、古生界环翼相协调的黄陵穹状隆起形成于 165—100 Ma, 这一快速的冷却抬升事件同时形成了隆起周缘 J_3/K_1 之间的角度不整合以及下白垩统和上白垩统下部大套的粗碎屑砾岩堆积.

参考文献

- 1 马大铨, 李志昌, 肖志发. 鄂西崆岭杂岩的组成、时代及地质演化. 地球学报, 1997, 18(3): 232—241
- 2 熊成云, 韦昌山, 金光富, 等. 鄂西黄陵背斜地区前南华纪古构造格架及主要地质事件. 地质力学学报, 2004, 10(2): 97—112
- 3 Gao S, Zhang BR, Li ZJ. Geochemical evidence for Proterozoic continental arc and continental margin rift magmatism along the

- north margin of the Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 1990, 47: 205—221
- 4 凌文黎, 高山, 郑海飞, 等. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究. *科学通报*, 1998, 43(1): 86—89
- 5 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束. *岩石学报*, 2006, 22(2): 387—396
- 6 杨金香. 黄陵地区孔兹岩系岩石学特征及变质作用探讨. *资源环境与工程*, 2007, 21(3): 26—31
- 7 马大铨, 杜绍华, 肖志发. 黄陵花岗岩基的成因. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(2): 151—161
- 8 Zhang SB, Zheng YF, Zhao ZF, et al. Neoproterozoic anatexis of Archean lithosphere: Geochemical evidence from felsic to mafic intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 2008, 163: 210—238
- 9 冯定犹, 李志昌. 黄陵花岗岩类岩基南部岩体侵入时代和同位素特征. *湖北地质*, 1991, 2(1): 1—12
- 10 李益龙, 周汉文, 李献华, 等. 黄陵花岗岩基英云闪长岩的黑云母和角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其冷却曲线. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1067—1074
- 11 李志昌, 王桂华, 张自超. 鄂西黄陵花岗岩基同位素年龄谱. *华南地质与矿产*, 2002, 3: 19—28
- 12 马国干, 李华芹, 张自超. 华南地区震旦纪时限范围的研究. *中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊*, 1984, (8): 1—29
- 13 Liu SF, Ronald S, Zhang GW. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: Record of continent-continent collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 9—27
- 14 梦繁松. 黄陵背斜东西两侧“香溪群”的对比及岩相古地理概要. *地层学杂志*, 1987, 11(2): 135—140
- 15 戴少武. 中扬子及邻区层序地层与原型盆地演化. *石油与天然气*, 2002, 23(3): 229—235
- 16 严金泉, 郭战峰. 东秦岭—大别造山带南缘印支期以来构造层序耦合特征分析. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 9—14
- 17 徐政语, 卢文忠, 林 炯, 等. 秦岭—大别造山带与江南造山带的差异升降过程: 来自江汉盆地中—新生代沉积记录的证据. *地质科学*, 2005, 40(2): 179—197
- 18 Ketcham RA. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, 58: 275—314
- 19 Ketcham RA, Donelick RA, Carlson WD. Ariability of apatite fission track annealing kinetics III: Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 1999, 84: 1235—1255
- 20 Hu SB, Raza A, Min K, et al. Late Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution along a transect from the north China craton through the Qinling orogen into the Yangtze craton. *Tectonics*, 2006, 25, TC6009, doi 10.1029/2006 TC001985
- 21 沈传波, 梅廉夫, 刘昭茜, 等. 黄陵隆起中—新生代隆升作用的裂变径迹证据. *矿物岩石*, 2009, 29(2): 54—60
- 22 Donelick AR. Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 58: 49—944
- 23 Wagner G, van Den Haute P. *Fission Track Dating*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992
- 24 Ketcham RA, Donelick AR, Donelick DB. AFTSolve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. *Geological Materials Research*, 2000, 2(1): 1—32
- 25 Ketcham RA. Observations on the relationship between crystallographic orientation and biasing in apatite fission-track measurements. *American Mineralogist*, 2003, 88: 817—829
- 26 Ketcham AR, Carter A, Donelick AR, et al. Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *American Mineralogist*, 2007, 92: 799—810
- 27 Reiners PW, Spell T L, Nicolescu S, et al. Zircon(U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 1857—1887
- 28 Farley KA. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluor apatite. *Geophysical Research*, 2000, 105: 2903—2914