论文

大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系: FT 和(U-Th)/He 低温热年代约束

许长海^{①*}, 周祖翼^①, 常远^①, GUILLOT François^②^① 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;^② Univ. Lille Nord de France-Lille 1, Lab. FRE 3298 CNRS (Geosystemes), F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

* E-mail: xchxch@tongji.edu.cn

收稿日期: 2009-07-13; 接受日期: 2010-09-17

国家自然科学基金(批准号: 40872138)、教育部科学技术研究重点项目(批准号: 107042)和上海市优秀学科带头人计划(批准号: 08XD14042)资助

摘要 FT 和(U-Th)/He 低温热年代与区域冷却特性表明, 南大巴山弧形带在 153~100 Ma 时期以快速冷却抬升(1.44~1.90 °C/Ma)为特征, 这一构造期既不同于因秦岭晚造山挤压(J_{1+2})引发的盆地快速沉降, 也不同于 100~45 Ma 时期的缓慢冷却与构造抬升. 这种快速冷却抬升与弧形带两侧的黄陵隆起(160~126 Ma, 冷却速率为 2.22~3.17 °C/Ma)、汉南-米仓山隆起(南部 150~125 Ma, 冷却速率为 4.91 °C/Ma; 北部 150~105 Ma, 冷却速率为 2.11 °C/Ma)存在很好的区域一致性. 综合弧形带与两侧隆起的差异冷却特性以及与大巴山武当地块冷却曲线的对比分析, 本文认为南大巴山弧形构造带形成于 153~100 Ma, 主要与扬子板块总体上主动向北西的推挤作用同时遭受汉南、黄陵两个基底隆起的阻挡促使秦岭造山带被动向南西低角度弧形逆冲推覆过程有关. 南大巴山弧形带及其两侧隆起在约 45 Ma 还经历了一次较为快速的抬升作用, 这一构造抬升在时间上与青藏碰撞造山事件是一致的.

关键词FT 和(U-Th)/He 热年代
冷却特性
大巴山弧形带
两侧隆起

大巴山弧形构造带位于秦岭造山带南部, 其西接汉南-米仓山隆起, 向东止于神农架-黄陵隆起(图 1). 分析这一弧形带的形成与两侧隆起的关系, 对于深化认识东秦岭区域构造演化具有重要意义. 以城口-房县断裂为界, 大巴山构造带包括南大巴山和北大巴山两部分, 它们在变形样式、冲断时间和变质程度上差异性明显. 现有成果表明, 南大巴山弧形带属于上扬子北缘 T_3 - K_1 形成的薄皮逆冲推覆带^[1]; 而北大巴山冲断构造发生在印支期(T_2 - J_1), 并促使下古生

界达到绿片岩相变质, 这种变质作用在南大巴山弧形带突然消失^[2,3]. 根据叠加褶皱^[4], 大巴山早期褶皱轴与秦岭造山带主构造线方向一致, 与晚印支期造山冲断有关; 晚期褶皱轴平行于大巴山弧形构造带, 显然形成于晚侏罗世之后. 南、北大巴山的区域断裂分布也有差异性, 南大巴山断裂主体协调城口-房县弧形断裂分布, 北大巴山断裂总体上平行于造山带主构造线呈北西西向分布, 断裂两端被城口-房县弧形断裂带所截切. 上述变形变质记录反映出两次重

引用格式: Xu C H, Zhou Z Y, Chang Y, et al. Genesis of Daba arcuate structural belt related to adjacent basement upheavals: Constraints from Fission-track and (U-Th)/He thermochronology. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 16341–646, doi: 10.1007/s11430-010-4112-y

图 1 大巴山弧形构造带区域地质简图及样品分布

F₀₁, 城口-房县断裂(勉略缝合带); F₀₂, 坪坝断裂; F₀₃, 镇巴断裂; F₀₄, 鸡鸣寺断裂; F₀₅, 铁溪-巫溪断裂; F₀₆, 鲁家坪断裂; F₀₇, 高桥-八仙街断裂; F₀₈, 红椿坝-曾家坝断裂; F₀₉, 月河断裂; F₁₀, 银杏-间河-鲍峡断裂; F₁₁, 公馆-白河断裂; F₁₂, 酒奠梁-板岩镇断裂; F₁₃, 凤镇-山阳断裂; F₁₄, 商丹缝合带; F₁₅, 西乡-官坝断裂; F₁₆, 年家坝-槐树-国华断裂

要的构造事件, 北大巴山冲断带的形成与晚印支期碰撞造山事件密切相关, 而南大巴山弧形带的形成主要与碰撞后陆内挤压事件有关. 关于南大巴山弧形带的形成机制, 李三忠等^[5]认为主要与 J_3 - K_1 时期扬子板块斜向俯冲秦岭微板块、汉南地块向北楔入引拖曳偏转有关; 张国伟等^[6]认为是由于碰撞后大规模向南的构造推覆(J_2 - K_1)同时受到东、西侧黄陵、汉南隆起的不均一阻挡形成了向 SSW 偏移的不对称南大巴山弧形构造带. 这两种观点很好地将南大巴山弧形带形成与其东、西两侧两个基底隆起联系起来, 或归结于扬子板块向北的推挤作用, 或者归结为造山带向南的推覆作用. 本文应用裂变径迹 (FT) 和 (U-Th)/He 低温热年代方法, 根据南大巴山弧形构造带、黄陵隆起与汉南-米仓山隆起的热年代记录(表 1)以及冷却特性变化, 综合讨论了这一弧形构造带的形成与两侧隆起的关系及其可能的动力来源.

本文应用的低温热史模拟技术是建立在实验退火模型基础之上, 根据磷灰石 FT 颗粒年龄、围限径迹长度和 Dpar 等实测参数, 综合锆石 FT 和锆石、磷灰石(U-Th)/He 年龄及地层年龄和地表温度等约束条件进行的. 反演模拟在地质应用中最为广泛, 它是根据磷灰石 FT 测量数据和退火模型来重建样品未知的热史, 通过重复计算最后获得与测量数据拟合较好的热史曲线集^[7]. 热史模拟质量根据径迹年龄与径迹长度两个 GOF 检验值来判别, 若 GOF 检验值大于 5% 时, 表明模拟热史“可以接受”, 当检验值超过 50% 时, 表明模拟结果是“高质量的”. 本文还综合了中、高温热年代资料来讨论冷却特性变化, 不同测年体系的封闭温度分别选用: 锆石 FT 法(210 ± 40) $^{\circ}\text{C}$ ^[8], 磷灰石 FT 法 $90\sim 120^{\circ}\text{C}$ ^[8], 锆石(U-Th)/He 法 $160\sim 200^{\circ}\text{C}$ ^[9], 磷灰石(U-Th)/He 法 $55\sim 80^{\circ}\text{C}$ ^[10], 锆石 U-Pb 法为 $>800^{\circ}\text{C}$ ^[11], 黑云母 Ar/Ar 法 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ^[12], 角闪石 Ar/Ar 法 $450\sim$

表 1 南大巴山弧形带、汉南-米仓山隆起和黄陵隆起的锆石、磷灰石 FT 与(U-Th)/He 分析

样号	南大巴山弧形带			裂变径迹(FT)定年		
	纬度(N)	经度(E)	地层	锆石(Ma)	磷灰石(Ma)	围限径迹长度(μm)
DB01	32°15.996'	107°55.319'	千佛崖组(J_2q)	209.2 $\pm$ 13.3 (20 个颗粒平均)	109.2 $\pm$ 6.4 (25 个颗粒平均)	12.41 $\pm$ 0.19 (126 条径迹平均)
DB02	32°16.441'	107°56.306'	白田坝组(J_1b)	209.4 $\pm$ 12.9 (20 个颗粒平均)	101.8 $\pm$ 6.0 (25 个颗粒平均)	12.67 $\pm$ 0.19 (125 条径迹平均)
DB03	32°16.471'	107°56.521'	须家河组(T_3x)	178.7 $\pm$ 10.5 (20 个颗粒平均)	87.6 $\pm$ 5.6 (24 个颗粒平均)	13.08 $\pm$ 0.20 (126 条径迹平均)
样号	汉南-米仓山隆起			(U-Th)/He 定年(Ma)		磷灰石 FT 定年与径迹长度
	纬度(N)	经度(E)	地层岩性	锆石	磷灰石	
NQL026	32°45.622'	106°54.155'	晋宁期花岗岩	182.0 $\pm$ 3.2 169.9 $\pm$ 3.0	107.4 $\pm$ 3.8	106.4 $\pm$ 5.8 Ma (54 个颗粒平均) 10.56 $\pm$ 0.22 μm (64 条径迹平均)
NQL027	32°47.903'	106°54.735'	晋宁期花岗岩	152.6 $\pm$ 2.9	113.7 $\pm$ 2.9	133.1 $\pm$ 6.0 Ma (46 个颗粒平均) 11.91 $\pm$ 0.13 μm (127 条径迹平均)
NQL039	33°07.398'	107°23.075'	晋宁期花岗岩	256.9 $\pm$ 5.1 193.8 $\pm$ 3.7 174.8 $\pm$ 3.5	78.4 $\pm$ 1.6 89.2 $\pm$ 1.8	138.8 $\pm$ 10.7 Ma (34 个颗粒平均) 12.57 $\pm$ 0.25 μm (20 条径迹平均)
NQL040	33°04.404'	107°25.255'	晋宁期花岗岩	—	—	113.2 $\pm$ 6.4 Ma (38 个颗粒平均) 12.85 $\pm$ 0.13 μm (110 条径迹平均)
样号	黄陵隆起			(U-Th)/He 定年(Ma)		磷灰石 FT 定年与径迹长度
	纬度(N)	经度(E)	地层岩性	锆石	磷灰石	
YX01	30°51.602'	111°00.301'	晋宁期花岗闪长岩	240.3 $\pm$ 4.6 230.9 $\pm$ 4.5	41.7 $\pm$ 0.8 39.3 $\pm$ 0.8	128.2 $\pm$ 6.9 Ma (45 个颗粒平均) 12.68 $\pm$ 0.14 μm (154 条径迹平均)
YX02	31°03.139'	110°56.853'	晋宁期花岗岩	—	—	136.7 $\pm$ 7.0 Ma (50 个颗粒平均) 12.61 $\pm$ 0.12 μm (154 条径迹平均)
YX03	31°04.687'	110°56.207'	晋宁期花岗岩	178.5 $\pm$ 3.3 203.7 $\pm$ 3.8 147.1 $\pm$ 2.7	71.5 $\pm$ 1.1	—

550°C^[11], 钾长石 Ar/Ar 法 150~350°C^[13], 全岩-单矿物 Rb-Sr (黑云母 Rb-Sr) 法 300~330°C^[14], 白云母 Ar/Ar 法 300~350°C^[15], 以及全岩-矿物 Sm-Nd 法为 600~850°C^[14].

1 南大巴弧形带的 FT 定年与热历史分析

南大巴山弧形带位于城口-房县断裂以南西(图 1), 区域上由冲断变形带、冲断褶皱带和前锋褶皱带组成^[1,16,17], 震旦系至侏罗系地层卷入了这一构造变形. 冲断变形带(城口-房县断裂与坪坝断裂之间)以叠瓦状冲断样式为主, 向下汇聚于震旦系底部滑脱面; 冲断褶皱带内(坪坝断裂和鸡鸣寺断裂之间)的逆

冲断裂与褶皱变形同等发育; 前锋褶皱带以类侏罗山式褶皱(三叠-侏罗系)为主, 该带南缘为铁溪-巫溪弧形隐伏逆冲断裂. 本文选用南大巴山弧形带三个中生代沉积岩样品 DB01~DB03, 分别进行了锆石裂变径迹(ZFT)和磷灰石裂变径迹(AFT)测试分析(表 1), 并对 DB02 和 DB03 进行 AFT 热历史重建(图 2).

DB01 采自中侏罗统千佛崖组(J_{2q})的长英质砂岩, 测得其 25 个颗粒的 AFT 合并年龄为(109.2±6.4) Ma, 包括(105±7)和(45±20) Ma 两个年龄组分, 它们均小于千佛崖组的地层参考年龄(176~161 Ma), 反映了沉积物经埋藏加热导致 AFT 完全退火后的热演化信息. 该样品 126 条围限径迹长度的平均值为(12.41±0.19) μm, 包括(13.9±1.3)和(14.4±0.9) μm 两个长度组分,

图 2 南大巴山弧形带沉积岩 DB02(J_{1b})(a)和 DB03(T_{3x})(b)的 AFT 热历史模拟曲线

时间-温度热史曲线根据锆石、磷灰石裂变径迹数据模拟获得, 反映了南大巴山自秦岭印支期主碰撞造山之后五个重要的构造阶段; 其中, 晚侏罗-早白垩世(153~100 Ma)的快速冷却抬升是促成南大巴山弧形带形成的重要构造事件. 本文热历史图中, 浅灰色围限区代表“可以接受的”热史拟合曲线集(GOF 检验值>5%), 灰色围限区代表“高质量的”热史拟合曲线集(GOF 检验值>50%)

加之 1.99 和 3.10 μm 两个 Dpar 组分, 这些均表明 DB01 沉积物至少有两个物源区, 而且不同物源磷灰石的径迹退火特点也不同, 本文没有对这类复杂物源的沉积样品进行 AFT 热历史模拟. DB01 中 20 个锆石颗粒的 FT 平均年龄为 $(209.2 \pm 13.3) \text{ Ma}$, 其中 5 个颗粒的年龄值 $(107.3 \sim 156.4 \text{ Ma})$ 小于该样品的地层年龄, 说明沉积物在盆地沉降、埋藏至最大深度时加热曾达到锆石 FT 部分退火区间 (PAZ) 的上限温度 (约 $170 \sim 190^\circ\text{C}$).

DB02 采自下侏罗统白田坝组 (J₁b) 的长英质砂岩, 25 个颗粒的 AFT 合并年龄为 $(101.8 \pm 6.0) \text{ Ma}$, 这一年龄值远小于其地层年龄, 它反映了沉积物经埋藏、加热超过磷灰石 PAZ 的盆地热演化信息, 125 条围限径迹长度的平均值为 $(12.67 \pm 0.19) \mu\text{m}$. 测得该样品 20 个颗粒的 ZFT 合并年龄为 $(209.4 \pm 12.9) \text{ Ma}$, 这一年龄值大于白田坝组的地层年龄, 表明沉积物沉降加热没有超过 ZFT 的封闭温度 ($(210 \pm 40)^\circ\text{C}$). DB02 包括 181.9 和 741.4 Ma 两个 ZFT 年龄组分, 它们反映的是物源区而不是盆地的热演化信息, 这两个年龄组分分别与秦岭晚造山期挤压抬升及晋宁期构造岩浆事件有关. 本文应用 HeFTy(1.3c) 软件^[18], 根据 AFT 实测的颗粒年龄、围限径迹长度和 Dpar 等参数对 DB02 进行热史模拟, 退火模型选用 Ketcham 等^[19], 模拟选同一 Dpar 动力学组分 ($\text{Dpar} = 1.31 \sim 2.63 \mu\text{m}$), 曲线拟合采用 Monte Carlo 算法, 曲线数选用 10000 条, 其他约束条件包括地层年龄 ($200 \sim 180 \text{ Ma}$) 和 ZFT 热年龄等. 模拟获得了高质量的热史曲线, 其径迹年龄 GOF 检验值为 0.94, 径迹长度 GOF 检验值为 0.91. DB02 的 AFT 热历史曲线由五分段组成 (图 2(a)), 相应冷却速率变化依次为 $-5.57^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($188 \rightarrow 165 \text{ Ma}$, $22 \rightarrow 150^\circ\text{C}$), $-0.33^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($165 \rightarrow 150 \text{ Ma}$, $150 \rightarrow 155^\circ\text{C}$), $1.44^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($150 \rightarrow 105 \text{ Ma}$, $155 \rightarrow 90^\circ\text{C}$), $0.45^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($105 \rightarrow 45 \text{ Ma}$, $90 \rightarrow 63^\circ\text{C}$) 及 $0.96^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($45 \rightarrow 0 \text{ Ma}$, $63 \rightarrow 20^\circ\text{C}$), 分别对应于沉积物快速沉降加热、盆地趋于构造稳定、快速抬升冷却、缓慢抬升冷却和较快速抬升五个阶段. 快速沉降阶段 ($188 \sim 165 \text{ Ma}$) 与东秦岭晚造山挤压抬升引发的前陆盆地沉降环境是一致的, 盆地沉降幅度在约 150 Ma 达到最大 (155°C). 南大巴山弧形带在 $150 \sim 105 \text{ Ma}$ 时期表现出快速的冷却抬升作用, 这一构造热事件与汉南-米仓山隆起、黄陵两隆起具有很好的可比性和一致性. 该弧形带在 $100 \sim 45 \text{ Ma}$ 时期构造上趋于稳定, 它在 45 Ma 以来发生的较快

速冷却抬升作用可能是对青藏碰撞造山事件的响应.

DB03 采自上三叠统须家河组 (T_3x) 的长英质砂岩, 24 个颗粒的 AFT 合并年龄为 $(87.6 \pm 5.6) \text{ Ma}$, 这一年龄值远小于其地层年龄, 它记录着沉积物经埋藏、加热超过磷灰石 PAZ 以来的盆地热演化信息, 测得其平均围限径迹长度为 $(13.08 \pm 0.20) \mu\text{m}$ (126 条平均). 该样品 20 个颗粒的 ZFT 合并年龄为 $(178.7 \pm 10.5) \text{ Ma}$, 这一年龄值也小于须家河组的地层年龄, 说明沉积物埋藏深度超过了 ZFT 的封闭温度区间 ($(210 \pm 40)^\circ\text{C}$). 这里根据 AFT 的实测数据 (颗粒年龄、围限径迹长度和 Dpar) 对 DB03 进行热历史模拟, 退火模型选用 Ketcham 等^[19], 两个重要约束条件包括 ZFT 年龄 ($178.7 \pm 10.5 \text{ Ma}$) 和地层年龄 ($215 \sim 200 \text{ Ma}$), 模拟选同一动力学组分 $\text{Dpar} = 1.34 \sim 2.40 \mu\text{m}$, 其他约束条件与样品 DB02 一致. 模拟获得了高质量的热史曲线, 其径迹年龄 GOF 检验值为 0.91, 径迹长度 GOF 检验值为 0.76. 与 DB02 一样, DB03 的 AFT 热史曲线包括五分段 (图 2(b)), 其冷却速率变化为 $-7.88^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($205 \rightarrow 180 \text{ Ma}$, $18 \rightarrow 215^\circ\text{C}$), $0.36^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($180 \rightarrow 155 \text{ Ma}$, $215 \rightarrow 206^\circ\text{C}$), $1.90^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($155 \rightarrow 95 \text{ Ma}$, $206 \rightarrow 92^\circ\text{C}$), $0.36^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($95 \rightarrow 45 \text{ Ma}$, $92 \rightarrow 74^\circ\text{C}$), $1.16^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($45 \rightarrow 0 \text{ Ma}$, $74 \rightarrow 22^\circ\text{C}$), 分别对应于盆地快速沉降加热、构造趋于稳定、快速冷却抬升、缓慢冷却抬升以及较快速抬升五个阶段. 第一快速沉降加热段 ($205 \sim 180 \text{ Ma}$) 与秦岭晚造山引发的挤压沉降环境有关, 第二缓慢冷却抬升段 ($180 \sim 155 \text{ Ma}$) 反映了晚造山挤压趋于稳定或由此转入新的构造阶段, 第三快速冷却抬升段 ($155 \sim 95 \text{ Ma}$) 反映了秦岭造山期后的又一次陆内挤压事件, 它在时间上与南大巴山弧形带形成的地质记录是一致的, 这一快速的构造冷却抬升与汉南、黄陵两个基底隆起具有很好的可比性. 发生在 45 Ma 以来的较快速抬升作用在时间上仍与青藏造山域的碰撞挤压事件是一致的.

2 汉南-米仓山隆起的 FT 和 (U-Th)/He 定年与热史分析

汉南-米仓山隆起位于扬子板块北缘, 由晋宁期基性-酸性侵入杂岩和前寒武纪基底组成. 变质基底包括后河杂岩 ($\text{Ar}_3\text{-Pt}_1$) 及三花石群 (Pt_{2+3}); 斜长花岗岩属于汉南侵入杂岩的主体, 包括二里坎、五堵门和喜神坝等大型岩体. 张宗清等^[20]测得五堵门岩体的

全岩-矿物 Sm-Nd 等时线年龄为 (837 ± 26) Ma、全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 (824.8 ± 3.8) Ma、黑云母 Ar-Ar 坪年龄为 (796 ± 20) Ma 以及钾长石 Ar-Ar 年龄为 712 Ma. 凌文黎等^[21]获得了五堵门岩体的锆石 U-Pb 年龄为 (789 ± 10) Ma 以及碑坝岩体的锆石 U-Pb 年龄为 (836 ± 10) Ma, 喜神坝岩体的锆石 U-Pb 年龄为 (778 ± 8) Ma^[22]. 紧邻汉南-米仓山隆起南缘, 由中、古生界地层组成了一背两向的褶皱变形, 褶皱主构造线协调该隆起近东西向分布. 紧邻隆起的 ϵ -T₂ 地层形成不对称倒转向斜, 褶皱两翼倾角随着远离隆起由中常变化到平缓, 以至在最南部形成了两翼很平缓的区域性向斜. 本文选用喜神坝、五堵门两个岩体进行锆石、磷灰石 FT 和 (U-Th)/He 分析(表 1)和 AFT 热史重建(图 3).

NQL026 和 NQL027 采自喜神坝岩体, NQL039 和 NQL040 采自五堵门岩体, 这些样品点分别位于汉南-米仓山隆起的南部和北部. 分析获得了 NQL026 两个锆石颗粒的 (U-Th)/He 年龄分别为 (182.0 ± 3.2) 和 (169.9 ± 3.0) Ma, 一个磷灰石颗粒的 (U-Th)/He 年龄为 (107.4 ± 3.8) Ma, 54 个颗粒的 AFT 合并年龄为 (106.4 ± 5.8) Ma, 围限径迹长度为 (10.56 ± 0.22) μm (64 条径迹长度平均); 测得 NQL027 一个锆石颗粒的 (U-Th)/He 年龄为 (152.6 ± 2.9) Ma, 一个磷灰石的 (U-Th)/He 年龄为 (113.7 ± 2.9) Ma, 46 个颗粒的 AFT 合并年龄为 (133.1 ± 6.0) Ma, 围限径迹长度为 (11.91 ± 0.13) μm (127 条长度平均). 这些低温热年龄均属于冷却年龄, 其大小变化特点符合从锆石 (U-Th)/He, AFT 到磷灰石 (U-Th)/He 封闭温度递减的规律, 因而数据质量可信度高. 对于 NQL026, 其磷灰石 FT 年龄 (106.4 ± 5.8) Ma 与 (U-Th)/He 年龄 (107.4 ± 3.8) Ma 几乎一致, 反映了一次很快速的冷却作用, 推测这种快速冷却可能与断裂活动有关. 这里选用 NQL027 进行 AFT 热历史模拟, 模拟选用实测颗粒年龄和围限径迹长度, 退火模型根据 Laslett 等^[23], 曲线拟合采用 Monte Carlo 算法, 模拟曲线数选用 10000 条, 将锆石、磷灰石 (U-Th)/He 年龄及其封闭温度作为 AFT 热史模拟下限和中间插入点加以约束. NQL027 热史曲线包括三分段(图 3(a)), 其径迹年龄 GOF 检验值为 0.96, 径迹长度 GOF 检验值为 0.91, 其冷却速率变化为 $4.91^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($152 \rightarrow 125$ Ma, $200 \rightarrow 67.5^\circ\text{C}$), $0.02^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($125 \rightarrow 42$ Ma, $67.5 \rightarrow 66^\circ\text{C}$) 和 $0.74^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($42 \rightarrow 0$ Ma, $66 \rightarrow 35^\circ\text{C}$), 依次对应于快速冷却抬升、缓慢冷却抬升和较快速冷却抬

升三个构造阶段. 位于汉南-米仓山隆起北部的五堵门岩体, 分析获得了 NQL039 的 AFT 合并年龄为 (138.8 ± 10.7) Ma (34 个颗粒平均), 平均围限径迹长度为 (12.57 ± 0.25) μm (20 条径迹平均); 测得其三个锆石颗粒的 (U-Th)/He 年龄为 (256.9 ± 5.1) , (193.8 ± 3.7) 和 (174.8 ± 3.5) Ma; 两个磷灰石颗粒的 (U-Th)/He 年龄为 (78.4 ± 1.6) 和 (89.2 ± 1.8) Ma. 由于 NQL039 仅测得的 20 条径迹长度不能满足 AFT 热史模拟所要求的数量, 因此对邻近的 NQL040 样品进行 AFT 分析并获得了 (113.2 ± 6.4) Ma 的合并年龄 (38 个颗粒平均) 以及 (12.85 ± 0.13) μm 的平均围限径迹长度 (110 条径迹平均). 本文选用 NQL039 的锆石、磷灰石 (U-Th)/He 数据作为下限约束和中间插入点, 对 NQL040 进行 AFT 热历史模拟, 退火模型和其他模拟参数选用同 NQL027. NQL040 的模拟热史曲线(图 3(b))由四分段组成, 其冷却速率依次变化为 $0.19^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($230 \rightarrow 150$ Ma, $180 \rightarrow 165^\circ\text{C}$), $2.11^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($150 \rightarrow 105$ Ma, $165 \rightarrow 70^\circ\text{C}$), $0.31^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($105 \rightarrow 40$ Ma, $70 \rightarrow 50^\circ\text{C}$) 和 $0.75^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ($40 \rightarrow 0$ Ma, $50 \rightarrow 20^\circ\text{C}$), 依次对应于汉南隆起的缓慢冷却抬升、快速冷却抬升、缓慢冷却抬升和较快速冷却抬升四个构造演化阶段.

根据上述冷却特性, 汉南-米仓山隆起在碰撞造山期应远离秦岭造山带主体, 因而表现出缓慢的冷却抬升作用(冷却速率为 $0.19^\circ\text{C}/\text{Ma}$, $230 \sim 151$ Ma), 这种缓慢的构造抬升导致隆起南缘 T₂-J₂ 地层中形成四次平行不整合关系, 包括从海相到陆相层序的转变以及陆相层序内部. 这里强调的是, 汉南-米仓山隆起的南部和北部分别于 $152 \sim 125$ 和 $150 \sim 105$ Ma 进入了快速的冷却抬升期, 相应的冷却速率为 4.91 和 $2.11^\circ\text{C}/\text{Ma}$. 这次快速抬升在汉南-米仓山隆起南部结束的时间要比隆起北部早 20 Ma 左右, 快速抬升在南部延续的时间却与黄陵隆起是一致的, 而其在隆起北部延续的时间大体上与南大巴山弧形带的快速抬升期是一致的. 汉南-米仓山隆起南缘现今残留的地层中, 侏罗系和白垩系之间为整合关系, 而且这些沉积物粒度普遍偏细, 与隆起南部快速的构造抬升作用是不相称的, 因此推测紧邻汉南-米仓山隆起南缘应该存在被剥蚀掉的不整合界面. 之后, 汉南-米仓山隆起进入缓慢的冷却抬升期(K₂-E), 而且隆起南侧 ($0.02^\circ\text{C}/\text{Ma}$) 比其北侧 ($0.31^\circ\text{C}/\text{Ma}$) 的冷却速率要低. 从 45 Ma 开始, 汉南-米仓山隆起进入又一较快速的冷却抬升期 ($0.75^\circ\text{C}/\text{Ma}$).

图3 汉南-米仓山隆起侵入杂岩 NQL027 (a)和 NQL040(b)AFT 热历史模拟曲线

时间-温度热史曲线根据磷灰石 FT 及锆石、磷灰石(U-Th)/He 数据模拟获得,反映了汉南-米仓山隆起晚印支期以来四次重要的构造事件,这一隆起在晚侏罗-早白垩世经历了与大巴山弧形带一致的快速冷却抬升作用,这与 230~150 Ma 发生的缓慢冷却抬升事件形成明显对比

3 黄陵隆起的 FT 和(U-Th)/He 定年与热历史分析

黄陵隆起位于扬子北缘,区域上表现为穹窿构造,其核部由基底变质杂岩组成,杂岩核外围被中、

古生界海相碳酸盐与陆相碎屑岩环绕.黄陵隆起核部由崆岭群(Ar-Pt₁)中深变质岩和晋宁期侵入杂岩体组成,侵入杂岩以三斗坪和黄陵庙两岩体为主体,主要由英云闪长岩、奥长花岗岩、花岗闪长岩组成.对于三斗坪闪长岩体,李志昌等^[24]获得了(833±29) Ma

的锆石 U-Pb 年龄和 (833 ± 84) Ma 的全岩 Rb-Sr 等时线年龄, 凌文黎等^[21]应用 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 法测得其岩浆侵位年龄为 (795.3 ± 7.7) Ma. 三斗坪岩体的角闪石 Ar-Ar 坪年龄为 (844.0 ± 4.2) Ma、黑云母 Ar-Ar 坪年龄为 $837.3 \sim 838.7$ Ma^[25], 全岩-单矿物 Rb-Sr 等时线为 (805 ± 5) Ma^[26]. 马国干等^[27]测得黄陵庙岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (819 ± 7) 和 (818 ± 5) Ma. Hu 等^[28]获得了黄陵侵入杂岩的 AFT 年龄为 96~102 Ma; 两个样品的锆石(U-Th)/He 年龄为 143~158 和 181~231 Ma, 两个样品的磷灰石(U-Th)/He 年龄为 39.3~43.6 和 40.3~45.4 Ma. 本文选用三斗坪、黄陵庙两个岩体进行锆石、磷灰石 FT 和(U-Th)/He 分析(表 1)及其时间-温度热历史重建(图 4).

YX01 取自三斗坪晋宁期闪长岩体. 测得该样品的 AFT 合并年龄为 (128.2 ± 6.9) Ma(45 个颗粒年龄平均), 平均围限径迹长度为 (12.68 ± 0.14) μm (154 条径迹平均); 测得其两个锆石的(U-Th)/He 年龄分别为 (240.3 ± 4.6) 和 (230.9 ± 4.5) Ma, 两个磷灰石的(U-Th)/He 年龄分别为 (41.7 ± 0.8) 和 (39.3 ± 0.8) Ma. 这些低温年龄均代表侵入杂岩抬升剥露超过其封闭温度区间以来的冷却年龄. 依据颗粒年龄和围限径迹长度, 选用 Laslett 等^[23]退火模型, 对 YX01 进行 AFT 热历史模拟, 曲线拟合采用 Monte Carlo 算法, 曲线数选用 10000 条, 选用该样品的锆石、磷灰石(U-Th)/He 年龄及其封闭温度作为模拟下限和中间插入点加以约束. YX01 的 AFT 模拟热史曲线包括四分段(图 4(a)), 其冷却速率变化依次为 $0.23^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (235→160 Ma, $183 \rightarrow 166^\circ\text{C}$), $2.22^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (160→123 Ma, $166 \rightarrow 84^\circ\text{C}$), $0.28^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (123→45 Ma, $84 \rightarrow 62^\circ\text{C}$)和 $0.82^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (45→0 Ma, $62 \rightarrow 25^\circ\text{C}$), 对应于缓慢冷却抬升、快速冷却抬升、缓慢冷却抬升和较快速冷却抬升四个构造阶段. YX02 和 YX03 两样品均采自黄陵庙花岗岩体, 测得 YX02 的 AFT 合并年龄值为 (136.7 ± 7.0) Ma(50 个颗粒年龄平均), 围限径迹长度为 (12.61 ± 0.12) μm (154 条径迹平均); YX03 三个锆石颗粒的(U-Th)/He 年龄值分别为 (178.5 ± 3.3) , (203.7 ± 3.8) 和 (147.1 ± 2.7) Ma, 一个磷灰石颗粒的(U-Th)/He 年龄值为 (71.5 ± 1.1) Ma. 由于 YX02 和 YX03 采样位置接近, 这里选用 YX03 的锆石、磷灰石(U-Th)/He 数据作为热史下限约束和中间插入点, 对 YX02 进行 AFT 热历史模拟, 退火模型和其他模拟参数设置与 YX01 相同. 与 YX01 一样, YX02 的 AFT 热史模拟曲线包括四分段(图 4(b)), 冷却

速率依次为 $0.37^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (195→160 Ma, $185 \rightarrow 172^\circ\text{C}$), $3.17^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (160→130 Ma, $172 \rightarrow 77^\circ\text{C}$), $0.20^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (130→45 Ma, $77 \rightarrow 60^\circ\text{C}$)和 $0.56^\circ\text{C}/\text{Ma}$ (45→0 Ma, $60 \rightarrow 35^\circ\text{C}$), 分别对应于两个快速冷却抬升和两个缓慢冷却抬升阶段.

综合上述认为, 秦岭印支期碰撞造山没有对黄陵隆起造成强烈的构造抬升影响, 这一时期(230~160 Ma)黄陵隆起仅表现出缓慢冷却抬升($0.23 \sim 0.37^\circ\text{C}/\text{Ma}$)的作用, 该隆起东部于 T_3 - J_2 进入陆相地层沉积阶段. 这里指出的是, 160~126 Ma 是黄陵隆起一个重要的快速冷却抬升期, 冷却速率达到 $2.22 \sim 3.17^\circ\text{C}/\text{Ma}$; 这一抬升作用不但形成了重庆组(J_3ch)与石门组(K_1s)之间的角度不整合, 而且还导致黄陵隆起东缘整个下白垩统至上白垩统下部形成了约 2000 m 厚的砾岩沉积. 与南大巴山弧形带的快速抬升作用(153~100 Ma)相比, 黄陵隆起快速抬升的特殊性还在于它的启动时间略早, 而结束时间要早约 26 Ma. 126~45 Ma 时期黄陵隆起表现出缓慢冷却抬升($0.20 \sim 0.28^\circ\text{C}/\text{Ma}$)的特点. 45 Ma 以来, 这一基底隆起进入又一较为快速的冷却抬升阶段($0.56 \sim 0.82^\circ\text{C}/\text{Ma}$), 时间上与青藏碰撞造山事件是一致的.

4 南大巴山弧形带的形成及其区域构造控制

勉略与商丹同属于秦岭主造山期(Pt_3 - T)形成的两个重要缝合带, 印支碰撞造山后勉略构造带进入了陆内挤压阶段, 形成了包括大巴山、大别山和康玛三大弧形构造带^[6,29,30]. 南、北大巴山差异变质作用、两期褶皱主构造线展布以及两套断裂体系的交切关系^[2~4], 这些均表明南大巴山弧形带形成于秦岭主碰撞造山之后. 南大巴山卷入弧形带褶皱的地层为 ϵ - J_2 , 弧形带南侧的 J_3 - K_1 地层组成了平缓的区域性向斜, 其褶皱轴向仍大致协调弧形带分布; 弧形褶皱带与区域性向斜之间被铁溪-巫溪逆断裂所分隔, J_3 与 K_1 之间为平行不整合关系(图 5(a)). 这些记录与低温热史曲线均表明, 南大巴山弧形带形成于 153~100 Ma 的快速冷却抬升期, 其冷却速率达到 $1.44 \sim 1.90^\circ\text{C}/\text{Ma}$. 这一快速抬升既不同于因秦岭晚造山挤压(J_{1+2})引发的快速沉降作用, 也不同于 100~45 Ma 时期缓慢的冷却抬升作用. 南大巴山弧形带向南西渐次扩展伴随着低角度逆冲和区域隆拗作用, 形成了弧形带南缘 J_3 - K_1 近 1800 m 厚的陆源细碎屑

图4 黄陵隆起晋宁期侵入杂岩 YX01(a)和 YX02(b)的 AFT 热史模拟曲线

时间-温度热史曲线根据磷灰石 FT 及锆石、磷灰石(U-Th)/He 数据模拟获得,反映了黄陵隆起晚印支期以来四次重要的构造事件,这与汉南-米仓山隆起构造演化存在很好的可比性,黄陵隆起在晚侏罗-早白垩世同样经历了与大巴山弧形带一致的快速冷却抬升作用

沉积。

黄陵隆起事实上是由中、古生界环翼和变质杂岩核组成的区域性穹窿构造。古生界至三叠系地层很清晰地环绕杂岩核分布,而侏罗系至下白垩统更多显现出协调穹窿分布的迹象,上白垩统断陷沉积代表又一

构造环境。因此认为黄陵穹窿至少形成于三叠纪之后、晚白垩世之前;这与从 FT 和(U-Th)/He 数据获得的快速冷却抬升期(160~126 Ma)是一致的,冷却速率达到 2.22~3.17℃/Ma。这一快速抬升形成了 J₃/K₁ 的角度不整合关系,也导致隆起东缘下白垩统至上白垩统下部

图 5 南大巴山弧形带及两侧隆起边缘的中生代、新生代地层柱状图

形成约 2000 m 厚的粗碎屑沉积(图 5(b)), 这与汉南-米仓山隆起南缘同时期形成的细碎屑沉积不同(图 5(c)). 本文还综合了中高温热年代资料^[24-27]绘制了侵入杂岩自晋宁期以来的时间-温度冷却曲线(图 6), 其冷却特点仍然表明黄陵隆起在晚侏罗-早白垩世存在快速的冷却抬升作用, 秦岭两次汇聚造山(加里东期和印支期)没有造成黄陵隆起显著的构造抬升作用. 与南大巴山弧形带的快速抬升期(153~100 Ma)相比, 黄陵隆起快速抬升期(160~126 Ma)的启动时间略早, 而结束时间要早约 26 Ma.

与大巴山弧形带、黄陵隆起一样, 汉南-米仓山隆起在晚侏罗世~早白垩世经历了一次快速冷却抬升作用. 这次构造抬升向南推挤引发隆起南缘中、古生界地层褶皱, 褶皱主构造线方向协调该基底隆起分布. 紧邻汉南-米仓山隆起南缘形成了由 ϵ -T₂ 组成的不对称倒转褶皱, 褶皱倾角随着远离隆起向南由中常变化到平缓, 并在最南侧形成了很平缓的区域性向斜. 在这一大型向斜北翼, J₃-K₁ 地层的倾角(5~15°)明显小于 ϵ -J₂ 的倾角(20~60°), 可能预示着 J₂/J₃ 的不整合关系; T-J₂ 和 J₃-K₁ 这两套地层之间未见被逆断裂分隔, 它们属于位于隆起南缘的区域性凹陷, 因而上侏罗-下白垩统的沉积物粒度普遍偏细(图 5(c)). 本文还综合中、高温热年代资料^[20-22]和低温数据绘制了汉南-米仓山隆起晋宁期以来的冷却曲线(图 7). 与黄陵

图 6 黄陵隆起侵入杂岩晋宁期以来的时间-温度冷却特性变化曲线

时间-温度曲线根据本文低温热年代结合现有中、高温热年代资料^[24-27]和封闭温度获得, 表明黄陵隆起晋宁期以来经历了两次快速冷却(17.97°C/Ma, 832~800 Ma; 2.22°C/Ma, 155~100 Ma)与两次缓慢冷却(0.19°C/Ma, 800~155 Ma; 0.16°C/Ma, 110~40 Ma)四个重要的构造阶段, 加里东和印支期秦岭两次汇聚造山没有造成黄陵隆起显著的抬升作用, 发生在 155~110 Ma 的快速冷却抬升事件与 AFT 热史模拟结果一致

隆起一样, 其冷却特点仍表明汉南-米仓山隆起在 J₃-K₁ 经历过一次快速的冷却抬升作用, 而加里东期和印支期发生在秦岭的两次汇聚造山没有造成这一隆起显著的构造抬升. 这次快速冷却抬升在汉南-米仓山隆起南部(150~125 Ma, 冷却速率为 4.91°C/Ma)要比其北部(150~105 Ma, 冷却速率为 2.11°C/Ma)延续的时间短、冷却抬升速率要大, 这一冷却特性应该作为区域推挤力来自南部的依据之一.

南大巴山弧形带在晚侏罗世~早白垩世快速的抬升作用, 与弧形带两侧的黄陵、汉南-米仓山两个基底隆起具有很好的可比性和一致性. 本文认为, 南大巴山弧形构造带形成于 153~100 Ma, 并与汉南、黄陵两个刚性隆起的阻挡有着很大的关系. 那么, 形成这一弧形构造带究竟与扬子板块主动向北挤压引发造山带向南西逆冲并同时遭遇两个隆起阻隔有关? 还是与秦岭陆内造山挤压引发大巴山主动向南西逆冲并遭受两侧隆起的隔挡有关? 下面简要讨论这一问题.

尽管南大巴山弧形带及其两侧隆起在晚侏罗世~早白垩世一致地经历了快速冷却抬升作用, 但其冷却特点区域上存在差异性, 包括延续的时间和冷却速率变化. 这次快速冷却抬升在汉南-米仓山隆起南部(150~125 Ma, 冷却速率为 4.91°C/Ma)要比其北部(150~105 Ma, 冷却速率为 2.11°C/Ma)延续的时间短、冷却速率要大; 前者与黄陵隆起所经历快速冷却抬升(160~126 Ma, 冷却速率为 2.22~3.17°C/Ma)比较一

图 7 汉南-米仓山隆起晋宁期以来的时间-温度冷却曲线

时间-温度曲线根据本文低温热年代和中、高温热年代资料^[20-22]及其封闭温度获得, 反映了汉南-米仓山隆起晋宁期至白垩纪经历了快速冷却抬升(18.83°C/Ma, 830~800 Ma)、缓慢冷却抬升(0.18°C/Ma, 800~160 Ma)和快速冷却抬升(2.00°C/Ma, 160~100 Ma)三个重要的构造阶段, 这与黄陵隆起存在很好的可比性, 其中 160~100 Ma 快速的冷却抬升事件与 AFT 热史模拟结果是一致的

致, 后者与南大巴山弧形带的快速冷却抬升作用(153~100 Ma, 冷却速率为 $1.44\sim 1.90^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)大体上一致. 因此推测, 南大巴山弧形带的形成首先由黄陵隆起、渐后由汉南-米仓山隆起快速的构造抬升引发, 两隆起抬升延续的时间要比弧形带抬升延续的时间少约 20 Ma, 这说明是由于两隆起抬升和向北推挤作用诱发了大巴山弧形带的形成, 即与扬子板块总体上向北西主动的推挤作用有关. 这一认识也与北大巴山现有的资料^[28,31~37]是一致的. 图 8 显示, 秦岭造山带的三次汇聚造山事件(晋宁期、加里东期和印支期)在北大巴山均有很好的热年代记录. 武当地块在印支造山期表现出快速的冷却抬升作用($7.8^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 240→200 Ma), 这种构造抬升在晚侏罗世~早白垩世时期变得很缓

图 8 武当地块的构造热事件与时间-温度冷却曲线

时间-温度曲线根据现有低温和中、高温热年代资料^[28,31~37]及其封闭温度获得, 反映了北大巴山晋宁期以来五次重要的构造事件, 其中印支期快速冷却抬升和晚侏罗世~早白垩世缓慢冷却两次事件与黄陵、汉南-米仓山两隆起的构造演化特点明显不同

慢(冷却速率仅为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$), 这与黄陵、汉南-米仓山两个隆起同时期的冷却特性截然相反. 甚至在北大巴山以北地区, 现有热年代资料^[28,36,38~44]也没有获得晚侏罗-早白垩世时期一次快速的构造抬升作用. 本文初步认为, 大巴山弧形带形成的主动力源应该与扬子板块总体上主动向北西推挤诱发有关.

5 结论

南大巴山弧形构造带在 153~100 Ma 时期以快速冷却抬升($1.44\sim 1.90^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)为特点, 这一构造阶段既不同于因秦岭晚造山挤压(J_{1+2})引发的快速沉降作用, 也不同于 100~45 Ma 期间缓慢的冷却抬升作用. 这一独特的快速抬升期就是大巴山弧形构造带的形成期.

与南大巴山弧形带一样, 黄陵、汉南-米仓山两个隆起在晚侏罗-早白垩世一致地经历了快速冷却和抬升作用. 这种快速抬升在黄陵隆起发生在 160~126 Ma(冷却速率为 $2.22\sim 3.17^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$), 而在汉南-米仓山隆起南部(150~125 Ma, 冷却速率为 $4.91^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)要比其北部(150~105 Ma, 冷却速率 $2.11^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)延续的时间短、冷却速率要大. 南大巴山弧形带的形成, 与其两侧黄陵和汉南-米仓山刚性隆起的阻挡作用关系密切.

南大巴山弧形带与两侧隆起的差异冷却特性、以及北大巴武当地块冷却特点的不同, 均支持形成这一弧形构造带应该与扬子板块主动向北西的推挤作用有关, 同时遭遇汉南、黄陵两个刚性隆起的阻挡而促使造山带被动向南西低角度弧形逆冲推覆.

致谢 Peter W. Reiners, Lothar Ratschbacher 和 Stuart N. Thomson 给予热情指导, 野外采样和资料整理由张青林、包汉勇、焦若鸿和杨蓉等完成, 两位匿名审稿专家提出了宝贵建议, 在此一并致谢.

参考文献

- 何建坤, 卢华复, 张庆龙, 等. 南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制. 高校地质学报, 1997, 3: 419—428
- 何建坤. 东秦岭造山带南缘北大巴山构造反转及其动力学. 地质科学, 1999, 34: 139—153
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 等. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化. 地质学报, 1986, 60: 237—247
- 董树文, 胡健民, 施炜, 等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆. 地球学报, 2006, 27: 403—410
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 等. 秦岭造山带勉略缝合带构造变形与造山过程. 地质学报, 2002, 76: 469—483
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭-大别山南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 1121—1135
- Ketchum I R A, Donelick R A, Donelick M B. AFTSolve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. Geol Mater Res, 2000, 2: 1—32
- Wagner G, Van Den Haute P. Fission Track Dating. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992. 95—117
- Reiners P W, 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
- 10 Farley K A. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *J Geophys Res*, 2000, 105: 2903—2914
 - 11 Harris, N. Radiogenic isotopes and the interpretation of granitic rocks. *Episodes*, 1996, 19: 107—113
 - 12 Grove M, Harrison T M. $^{40}\text{Ar}^*$ diffusion in Fe-rich biotite. *Am Mineral*, 1996, 81: 940—951
 - 13 Foland K A. Argon diffusion in feldspars. In: Parsons I, ed. *Feldspars and Their Reactions*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. 415—447
 - 14 Yuharal M, Miyazaki T, Ishioka J, et al. Rb-Sr and Sm-Nd mineral isochron ages of the metamorphic rocks in the Namaqualand metamorphic complex, south Africa. *Gondwana Res*, 2002, 5: 771—779
 - 15 Hames W E, Bowring S A. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 124: 161—167
 - 16 李岩峰. 四川盆地东北部中-新生代造山与前陆变形构造叠合关系研究. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 2005. 24—90
 - 17 刘树根, 李智武, 刘顺, 等. 大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化. 北京: 地质出版社, 2006. 51—140
 - 18 Ketcham R A. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Rev Miner Geochem*, 2005, 58: 275—314
 - 19 Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission track annealing kinetics III: Extrapolation to geological time scales. *Am Mineral*, 1999, 84: 1235—1255
 - 20 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 汉南侵入杂岩年龄及其快速冷凝原因. *科学通报*, 2000, 45: 2567—2572
 - 21 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: 387—396
 - 22 赵凤清, 赵文平, 左义成, 等. 陕南汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学. *地质通报*, 2006, 25: 383—388
 - 23 Laslett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite: A quantitative analysis. *Chem Geol (Isotope Geosci)*, 1987, 65: 1—13
 - 24 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
 - 25 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: 1067—1074
 - 26 冯定犹, 李志昌, 张自超. 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, 5: 1—12
 - 27 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
 - 28 Hu S B, Raza A, Min K, et al. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic evolution along a transect from the north China craton through the Qinling orogen into the Yangtze Craton, central China. *Tectonics*, 2006, 25: TC6009, doi: 10.1029/2006TC001985
 - 29 Meng Q R, Zhang, G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 2000, 323: 183—196
 - 30 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26: 193—200
 - 31 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 南秦岭武当群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义. *科学通报*, 2007, 52: 1445—1456
 - 32 蔡志勇, 熊小林, 罗洪, 等. 武当群耀岭河群火山岩的时代归属: 单锆石 U-Pb 年龄的制约. *地质学报*, 2007, 81: 620—625
 - 33 胡健民. 秦岭造山带武当地块古生代伸展构造. 博士后论文. 北京: 中国地质科学院地质与地球物理研究所, 2001. 54—58
 - 34 胡建明, 孟庆任, 马国良, 等. 武当地块基性岩席群及其地质意义. *地质论评*, 2002, 48: 353—360
 - 35 周鼎武, 张成立, 周小虎, 等. 武当地块基性岩墙群 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及其地质意义. *岩石学报*, 1999, 15: 52—69
 - 36 Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 2003, 366: 1—53
 - 37 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 等. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石 U-Pb 年代学. *地质通报*, 2003, 22: 775—781
 - 38 李伍平, 王涛, 王晓霞. 北秦岭灰池子花岗质复式岩体的源岩讨论——元素同位素地球化学制约. *地球科学——中国地质大学学报*, 2001, 26: 269—278
 - 39 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 秦岭沙河湾奥长环斑花岗岩的年龄及其对秦岭造山带主造山期结束时间的限制. *科学通报*, 1999, 44: 981—984
 - 40 Wang F, Lu X X, Lo C H, et al. Post-collisional, potassic monzonite-minette complex (Shahewan) in the Qinling Mountains (central China): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology, petrogenesis, and implications for the dynamic setting of the Qinling orogen. *J Asian Earth Sci*, 2007, 31: 153—166
 - 41 王非, 朱日祥, 李齐, 等. 秦岭造山带的差异隆升特征——花岗岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. *地学前缘*, 2004, 11: 445—459
 - 42 Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? *Geol Soc Am Bull*, 2006, 118: 651—671
 - 43 张宗清, 张国伟, 刘墩一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 2006. 176—301
 - 44 朱铭. 秦岭地区花岗岩的 K-Ar 等时线年龄和 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 1995, 11: 179—192