

南太行山中新生代隆升过程: 磷灰石裂变径迹证据

李庶波^{1,2}, 王岳军^{1,2}, 张玉芝^{1,3}, 张立敏^{1,2}, 梁浩^{1,2}, 邱惟^{1,2}

(1.中山大学 地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275; 2.广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275; 3.中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 南太行山地区地处华北陆块中部, 是研究华北岩石圈减薄、克拉通活化期间山脉隆升与剥露机制的理想场所。本文对太行山南麓的中生代岩浆岩和元古宙变质岩开展了磷灰石裂变径迹低温热年代学研究, 获得了相关样品的磷灰石径迹年龄和径迹长度。研究表明, 南太行山地区磷灰石裂变径迹表观年龄集中在 75~32 Ma 之间, 峰值径迹长度在 11 μm 以上, 为宽带单峰分布。综合考虑裂变径迹反演, 南太行山地区初始隆升始于 100 Ma 前, 晚白垩世以来的剥蚀去顶量在 3 km 以上。100~50 Ma 的构造抬升相对平静, 50~40 Ma 及 10 Ma 左右以来隆升速度加快, 是太行山地区的主要隆升期。南太行山区域上表现为北早南晚的倾伏式差异隆升格局, 其新生代隆升与华北东部同期的快速沉降相耦合。以上资料有利于更好认知华北陆块中-新生代冷却史及岩石圈减薄地表响应。

关键词: 磷灰石裂变径迹; 中-新生代隆升; 构造热历史; 南太行山

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)03-0460-010

0 引言

1956 年陈国达先生提出, 并在此后的文章中详细阐明了“地台活化”的理论(地洼学说)(陈国达, 1956, 1959, 1960)。该理论打破了百年来槽台学说的传统观点, 为大地构造学开辟了一条新的思路。之后活化构造理论作为地洼学说新概念使用, 并不断充实完善(陈国达, 1997)。活化构造理论以中国东部中-新生代活化区为例, 研究了大陆岩石圈活化构造的特征及地质表现(林舸, 2005)。活化构造理论自创立以来, 在地壳构造发展和岩石圈运动方面, 得到了长足的发展, 特别是华北克拉通活化受到较多关注。

华北克拉通(华北地台)经中元古代到晚古生代的长期稳定后, 自中生代开始重新活化(邓晋福等, 1994; 翟明国和卞爱国, 2000; 陈智超等, 2007; 王霞, 2012), 岩石圈发生了强烈的减薄作用, 并伴有规模巨大、特征独特的中生代岩浆活动(陈斌等, 2002, 2005; 刘红涛等, 2002; Wang et al., 2003, 2006; 彭头平等, 2004)。这些中生代侵入岩常以杂岩体形式产出(Zheng et al., 2001; Zhang et al., 2004; 牛利锋和张宏福, 2005), 并已广泛出露地表, 表明华北地区自中生代以来至少有千米量级上覆盖层被剥露去顶, 或者说华北地区在中-新生代岩石圈活化和减薄的同时, 其山脉隆升幅度应有相当规模。

太行山被认为是华北克拉通东、西块体经中元

收稿日期: 2014-07-01; 改回日期: 2014-12-24

项目资助: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB440901)、国家自然科学基金项目(41190073, 41372198)和中山大学高校基本事业费联合资助。

第一作者简介: 李庶波(1989-), 男, 博士研究生, 从事构造热年代学研究。Email: lishubo@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 张玉芝(1984-), 女, 博士, 主要从事岩石大地构造研究。Email: zhangyz@gig.ac.cn

古代碰撞拼贴的东侧边界(Zhao et al., 1990, 2000, 2001; Zhang et al., 2009),也是中生代岩浆岩带的西界(陈斌等, 2002)。它同时是华北克拉通东部减薄岩石圈和西侧鄂尔多斯巨厚岩石圈的过渡地带(Zhao et al., 2001; 徐义刚, 2006)、第二级阶梯分界线和地球物理梯度带。因此对太行山地质过程的理解能更好地阐明华北克拉通的形成、演化及其地貌过程(龚明权, 2010)。前人针对太行山的造山过程及其相关的岩浆作用开展过较多研究:如马杏垣(1989)认为太行山穹窿为太古宙片麻岩穹窿;罗照华等(1997)将太行山造山过程分为早期伸展、主期挤压和晚期均衡三个阶段;张岳桥等(2003a, 2003b)认为太行山南段新近纪以来经历了两次重要的引张变形期。但是对太行山地区中生代以来的冷却史及其时序格架等方面的研究相对薄弱,对该地区去顶剥露的时空格局仍不清晰,因而限制了对华北克拉通地壳减薄(华北地台活化)期间山脉隆升过程和剥露机制的完整理解。

近十余年来,构造-热年代学取得了显著的进展,成为精确恢复构造热演化史的一种有效方法(Gleadow et al., 1983; Naeser et al., 1989; 王瑜, 2004; 周雁等, 2013)。其中裂变径迹年代学以其载体矿物较低的封闭温度在研究地质隆升剥蚀历程方面显示出明显优势(郑勇等, 2009),被广泛应用于造山带、沉积物源、大地构造演化和盆地热史等方面的研究(丁林, 1997; Fitzgerald, 1997; Liu et al., 2001; Gleadow et al., 2002; Willett et al., 2003; 李小明等, 2005; 雷永良等, 2008)。作者在野外工作的基础上,对太行山南麓中生代岩浆岩和元古宙变质岩开展了磷灰石裂变径迹测试,获得了相关样品的径迹年龄和径迹长度,通过系统的热模拟研究,恢复了太行山中生代的隆升面貌及多阶段差异性隆升格局,取得了新认识。

1 区域背景

太行山过渡带东西宽 50~150 km,南北长约 700 km,总体上呈 NNE 向展布,东临华北平原,西接五台山,南北分别与秦岭-大别和燕山造山带相接(罗照华等, 1997),是华北克拉通“中部带”的重要地质界线(Zhao et al., 2001)。太行山作为山脉,形成于新生代(龚明权, 2010),但作为华北陆块组成部分,则有着漫长的地质演化历史。华北陆块以迁西群为初始陆核,经新太古代增生、阜平运动变质和五台期岩浆

侵入等一系列构造运动之后,形成了初始的结晶基底。其上发育元古宇、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及下白垩统,缺失志留系-下石炭统和上白垩统。该地区自古元古代吕梁运动之后,经剥蚀夷平,基底形成阶段结束,太行山穹窿形成(王岳军等, 2003),之后开始脉动态势的盖层发展期。至晚三叠世,太行山深断裂带活动,太行山崛起,华北陆块形成东隆西拗的构造格局。侏罗纪-白垩纪的燕山运动使东部断块活动更加强烈,太行山地区受到 NW-SE 向的挤压,整体呈 NNE 向背斜褶皱构造。晚白垩世以来,该区进入差异性抬升阶段,曾有过大幅度的抬升剥蚀(任战利, 1995, 1999)。喜马拉雅运动时期,华北陆块因 NW-SE 向的拉张,孕育出新生代的断陷和裂谷盆地,华北陆块沉降中心转移至渤海湾,结束了东升西降的历史(龚明权, 2010)。

南太行山地区处于太行山过渡带中部,主要包括河北省南部的邯郸-石家庄地区和河南西北的安阳-林县一带(图 1)。区内出露的主要地层有:太古宇、元古宇基底岩系,以中太古界阜平群角闪岩相-麻粒岩相变质岩、新太古界五台群绿片岩相-角闪岩相绿岩带和元古宇滹沱系、长城系、蓟县系等低绿片岩相火山-沉积岩系为代表;古生代沉积盖层,主要有早古生代浅海相碳酸盐岩和泥页岩建造及晚古生代海陆交互煤系地层;中生代三叠纪和部分白垩纪地层缺失,多出露侏罗系及下白垩统火成岩;新生代区域抬升强烈,地层以砂岩、砾岩、黏土岩为主。

区内中生代岩浆作用以一套中基性侵入岩体为主要产出形式,总体呈 NNE 向带状分布,多以小岩盖或岩株产出(牛利锋和张宏福, 2005),代表岩体有符山岩体、东冶岩体及固镇岩体等(图 1)。这些岩体的主要岩性为钙碱性富闪长岩、闪长岩、辉长岩等,缺失相应成分喷出岩(黄福生和薛绥洲, 1990; 许文良和林景仟, 1990; 许文良, 1992; 谭东娟和林景仟, 1994; 许文良等, 2004; Wang et al., 2006),其形成时间为早白垩世(Wang et al., 2006; Zhang et al., 2009)。样品多呈中细-粗粒或斑状结构,块状构造,矿物成分主要为角闪石、斜长石、黑云母、钾长石等(彭头平等, 2004)。

太古宙-古元古代基底岩系和中生代中基性侵入岩作为南太行山地区标志性火成岩,形成演化明显受到区域性构造热事件影响,其热历史记录该区复杂的构造过程。

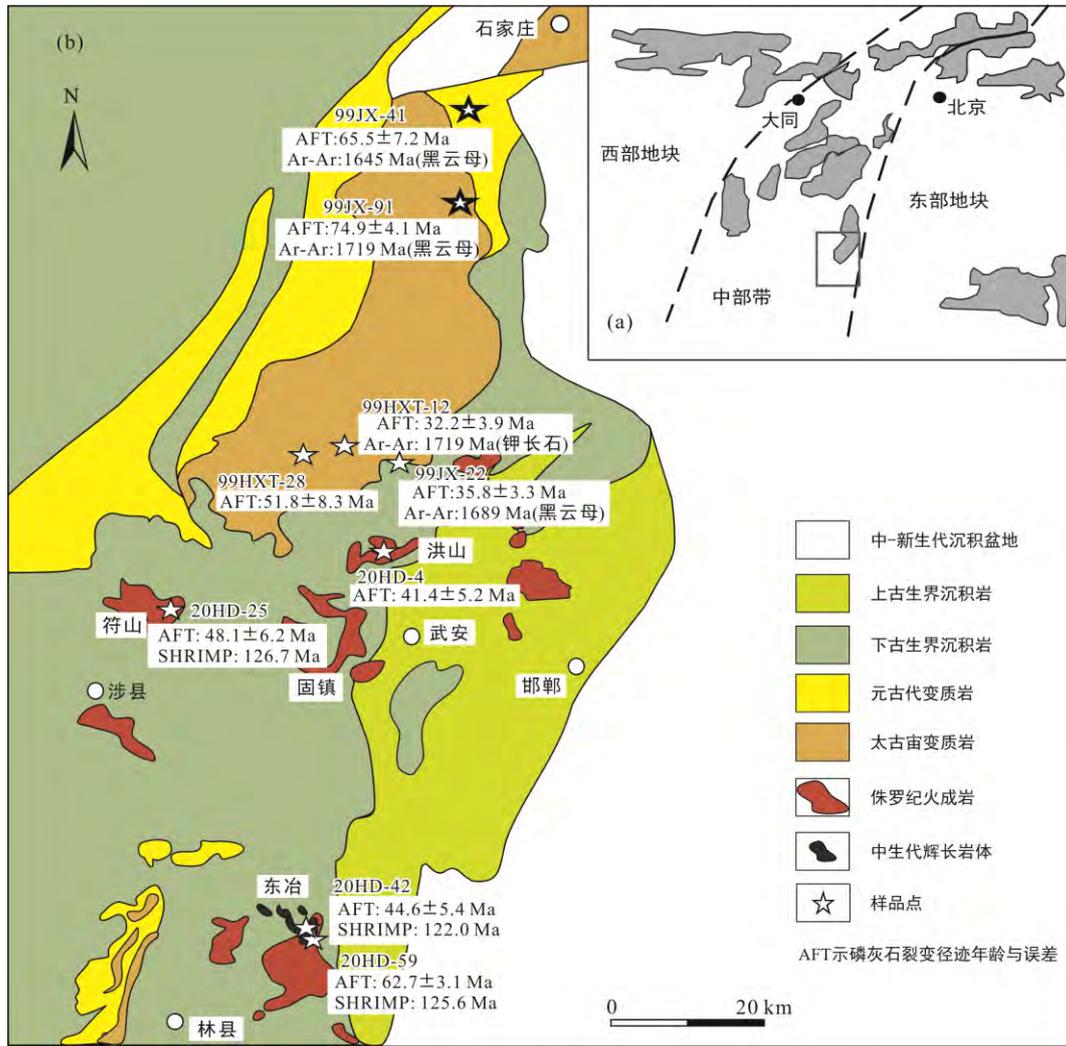


图 1 华北克拉通大地构造简图(a, 引自 Zhao et al., 2001)与南太行山区域地质图(b)

Fig.1 Tectonic outline of the study area in the North China Craton (a), and locations of the samples from the South Taihang Mountains (b)

2 裂变径迹分析结果

2.1 裂变径迹分析原理

裂变径迹分析法在山脉抬升、沉积物源、大地构造演化和盆地热史等研究领域应用广泛,其原理为矿物中所含的 ^{238}U 在天然状态下发生自发裂变。裂变产生高能碎片在矿物中形成径迹。裂变径迹具有随温度增高,径迹密度减少、长度变短直至完全消失“退火”的特性。因条件限制,目前裂变径迹分析常使用磷灰石、锆石等矿物。磷灰石裂变径迹在 100 Ma 以内退火温度约为 60~125 (部分退火带 PAZ),即当温度大于 125 时,所有裂变径迹全部愈合,裂变径迹不再保存,年龄为零。低于 60 时,径迹

会完整保存下来(Gleadow et al., 1983; Naeser et al., 1989)。如果后期发生一次快速冷却事件,使样品所处的温度小于退火温度,裂变径迹开始保存,矿物的裂变径迹体系的时钟也重新启动。曾完全退火的样品则记录了几乎相同的年青的裂变径迹年龄,代表其快速抬升或冷却事件发生的时间,裂变径迹的封闭径迹长度分布模式主要有诱发型、火山岩型、基性岩型、双峰型及混合型,代表了“事件年龄”、“冷却年龄”和“混合年龄”等裂变径迹年龄。应用磷灰石裂变径迹资料分析热历史及其对应的山脉抬升冷却年龄和过程,关键是前完全退火带或冷却带的解释,即年龄型式的确定(Gleadow et al., 1983; Naeser et al., 1989; 任战利等, 2014)。太行山地区热演化程度高,磷灰石裂变径迹分析多为基性岩型封闭径迹长

度分布, 裂变径迹的准确解释对确定该区构造事件时间、抬升冷却年龄及过程等提供了条件。

2.2 样品处理及分析结果

样品均采自野外新鲜露头, 远离新生代活动断裂带, 且未受到后期构造事件的明显改造。所采的每个样品重约 1.5~2 kg, 相对高程差 150 m 以内, 岩性主要为黑云斜长片麻岩、闪长岩、花岗闪长岩, 具体采样位置及岩性特征见图 1 和表 1。其中 99JX-41、

99JX-91、99HXT-28、99HXT-12 及 99HXT-22 为黑云斜长片麻岩或片麻状花岗岩, 其单矿物 Ar-Ar、K-Ar 年龄在 1800 Ma 左右, 代表了太行山古元古代末期变质穹窿的形成时间(王岳军等, 2003; Wang et al., 2003)。其他样品采自中生代中-基性侵入岩体, 如 20HD-4、20HD-25、20HD-42 和 20HD-59 分别采自洪山正长岩, 符山、固镇和东冶闪长岩或辉长岩样品。

表 1 南太行山古元古代黑云母斜长片麻岩和中生代闪长岩样品的磷灰石裂变径迹测试分析结果

Table 1 Apatite fission track results of the Paleoproterozoic biotite plagioclase gneiss and the Mesozoic diorite from the South Taihang Mountains

样品号	采样地点	岩性	N (粒)	$\rho_s(10^5\text{cm}^{-2})$ (N_s)	$\rho_i(10^5\text{cm}^{-2})$ (N_i)	$\rho_d(10^5\text{cm}^{-2})$ (N_d)	$t \pm \Delta t$ (Ma)	$P(\chi^2)$ (%)	$L \pm \Delta L$ (μm) (n)
20HD-4	邯郸洪山正长岩体	早白垩世正长岩	26	7.60 (95)	16.480 (206)	4.174 (5156)	41.4 \pm 5.2	77	12.66 \pm 2.25(8)
20HD-25	涉县符山闪长岩体	早白垩世闪长岩	15	8.94 (95)	16.659 (177)	4.174 (5156)	48.1 \pm 6.2	30	10.67 \pm 2.86(13)
20HD-42	林县东冶辉长岩体	早白垩世辉长岩	26	8.93 (106)	17.936 (213)	4.174 (5156)	44.6 \pm 5.4	36	11.63 \pm 2.68(6)
20HD-59	林县东冶闪长岩体	早白垩世闪长岩	1	5.60 (72)	8.000 (103)	4.174 (5156)	62.7 \pm 3.1	15	9.48 \pm 1.68(8)
99HXT-12	路罗-浆水公路叉口东	古元古代黑云母斜长片麻岩	19	4.18 (94)	11.644 (262)	4.174 (5156)	32.2 \pm 3.9	95	11.37 \pm 1.57(6)
99HXT-22	邢台城计乡坡底村东	古元古代黑云母斜长片麻岩	24	7.83 (181)	19.632 (454)	4.174 (5156)	35.8 \pm 3.3	68	12.50 \pm 3.01(10)
99HXT-28	邢台龙泉寺西	古元古代黑云母斜长片麻岩	10	7.20 (63)	12.46 (109)	4.174 (5156)	51.8 \pm 8.3	95	9.72 \pm 1.54(8)
99JX-41	元氏县黑水河村东	古元古代黑云母斜长片麻岩	11	16.00 (150)	21.87 (205)	4.174 (5156)	65.5 \pm 7.2	25	9.72 \pm 1.38(5)
99JX-91	赞皇县千根村西	古元古代片麻状花岗岩	23	24.45 (764)	29.216 (913)	4.174 (5156)	74.9 \pm 4.1	88	12.11 \pm 0.32(17)

N 为样品矿物颗粒数, ρ_s 和 ρ_i 分别为样品自发裂变径迹和诱发裂变径迹密度, ρ_d 为标准铀玻璃 UB2 产生在白云母外探测器的诱发裂变径迹密度, 而 N_s 、 N_i 和 N_d 分别为 ρ_s 、 ρ_i 和 ρ_d 相对应的径迹数目; t 为裂变径迹年龄 (Δt 为标准误差); $P(\chi^2)$ 为 $(n-1)$ 个自由度 χ^2 值的几率, 即 Chi-sq 检验概率, 当 $P(\chi^2) > 5\%$ 时认为所测单颗粒年龄属于同组年龄, 否则为不同年龄组。 $L \pm \Delta L$ 为平均径迹长度和标准误差, n 为封闭径迹长度的径迹数。

样品制备按照逐个碎样、摇床、磁选、电磁选和重液分选, 之后经烘干, 在双目镜下人工挑选磷灰石颗粒 100~150 粒, 粒径在 60~150 μm 之间。将磷灰石颗粒放入聚四氟乙烯样品模具内, 并在显微镜下放置为均匀条带形, 滴入环氧树脂后, 室温下 24 h 静置固化。制好的样品用不同粒度级别标准的 M20、M7 和 M3.5 刚玉粉初磨出内表面, 再经 Cr_2O_3 抛光成光薄片。在 25 $^\circ\text{C}$ 下用 1% HNO_3 蚀刻 3 min, 揭示自发裂变径迹 (刘顺生等, 1984)。用外探测器法进行裂变径迹年龄测定, 将纯净的低铀含量白云母片紧密贴合在光薄片上, 将白云母与光薄片分别标记, 使矿物与云母上的诱发裂变径迹能一一对应。然后将白云母、光薄片与标准铀玻璃 UB2 及年龄标准样 FC3 一起, 用纯净的铝箔包好, 送中国原子能反应堆辐照。经反应堆照射冷却后, 将云母置于恒温 25 $^\circ\text{C}$ 的 40% HF 中蚀刻 55 min 以揭示诱发裂变径迹, 应用 AUTOSCAN 系统进行裂变径迹密度和长度的测量。所有样品分析数据见表 1。

3 磷灰石裂变径迹结果讨论

对南太行山所采磷灰石裂变径迹样品的径迹密度及表观年龄测量可见, 所有单颗磷灰石裂变径迹数较多, 样品 $P(\chi^2)$ 均远大于 5%, 样品单颗粒属于同组年龄, 数据可信。9 个磷灰石样品的裂变径迹年龄变化于 74.9~32.2 Ma 之间, 标准差为 3.1~8.3 Ma。所测磷灰石裂变径迹的表观年龄均小于样品成岩年龄, 说明磷灰石样品形成之后受后期热事件影响而发生退火, 该表观年龄即为退火时的热事件年龄, 记录了该区磷灰石在隆升过程中经过退火带的时限, 代表了岩石剥露去顶的冷却年龄, 说明南太行山地区古近纪存在一次抬升冷却事件。

区内磷灰石裂变径迹结果主要分为两类: 一类以中生代中基性侵入岩体为代表, 该类岩体磷灰石裂变径迹年龄多集中在 50~40 Ma 之间, 说明其主要隆升期为 50~40 Ma; 另一类以古元古代变质岩为代表, 该类磷灰石裂变径迹年龄明显小于成岩年龄,

裂变径迹表观年龄跨度大, 从 80~30 Ma 不等, 且由北向南有依次减小的态势。就区域隆升过程来说, 中生代中基性侵入岩磷灰石裂变径迹年龄多为“未扰动基性岩型”径迹长度分布, 代表了岩体较快速通过磷灰石退火带的“事件年龄”-“冷却年龄”过渡, 为其侵位上升的延续。而古元古代变质岩磷灰石受多种构造运动影响, 裂变径迹记录了多期次构造活动, 径迹年龄为“冷却年龄”-“混合年龄”过渡年龄, 对区域抬升指示性更强。太古宙、元古宙磷灰石裂变径迹年龄分布由南向北依次增加, 南太行山地区表现为北早南晚的倾伏式抬升, 与喜山期区内 NW-SE 向构造力源一致。

4 抬升冷却历史模拟

4.1 模拟原理

由裂变径迹分析原理可知, 裂变径迹退火与温度相关: 随着温度升高, 径迹密度与长度减小。而温度与时间互补, 短时间高温、长时间低温可以使裂变径迹达到相同退火程度。因此根据磷灰石裂变径迹年龄和长度分布即可进行热史反演, 从而获得温度随时间变化的更多信息。热史反演采用 Laslett et

al. (1987)的扇形退火模型, 利用 AFTsolve 模拟软件对磷灰石进行径迹长度模拟, 得到温度 T 与时间 t 的关系如下:

$$g(r) = \{[(1-r^{2.7})/2.7]^{0.35} - 1\} / 0.35 = -4.87 + 0.000168T(\ln t + 28.12)$$

其中, r 为径迹长度与初始径迹长度比, T 为温度, t 为时间。

同时, 利用正演模拟预测磷灰石裂变径迹年龄与长度分布之间的模型, 将预期值与观测值对比, 找出最佳正演模型(时间-温度曲线), 该方法能更好地发掘出先前未考虑到的数据信息, 增加了裂变径迹模拟在地质热信息分析中的可信度。

4.2 模拟结果与抬升冷却历史分析

太行山地区 9 个磷灰石样品的封闭径迹长度变化如图 2, 模拟径迹长度分布与实测值总体一致, 为宽带单峰分布, 多数样品误差在 1.5 μm 以上, 表明裂变径迹形成之后退火, 或者在退火带经过了长时间的相对稳定, 磷灰石裂变径迹缓慢冷却至退火带之上。

以南太行山地区地表年平均气温 20 为基准, 假设当时地温梯度为 30 /km, 定量模拟磷灰石温度-时间演化曲线与区域隆升速率, 从南太行山地区模拟的抬升冷却历史来看(图 3), 大致可以分为两类:

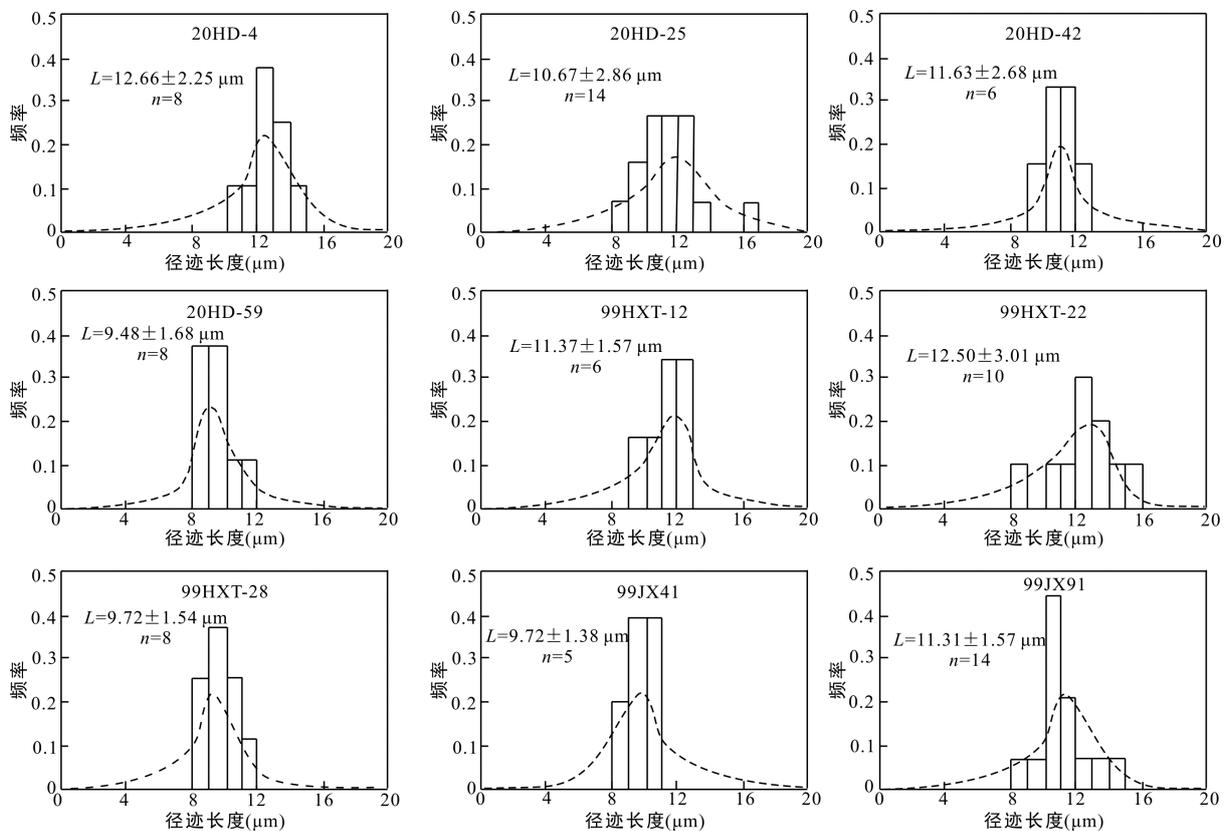
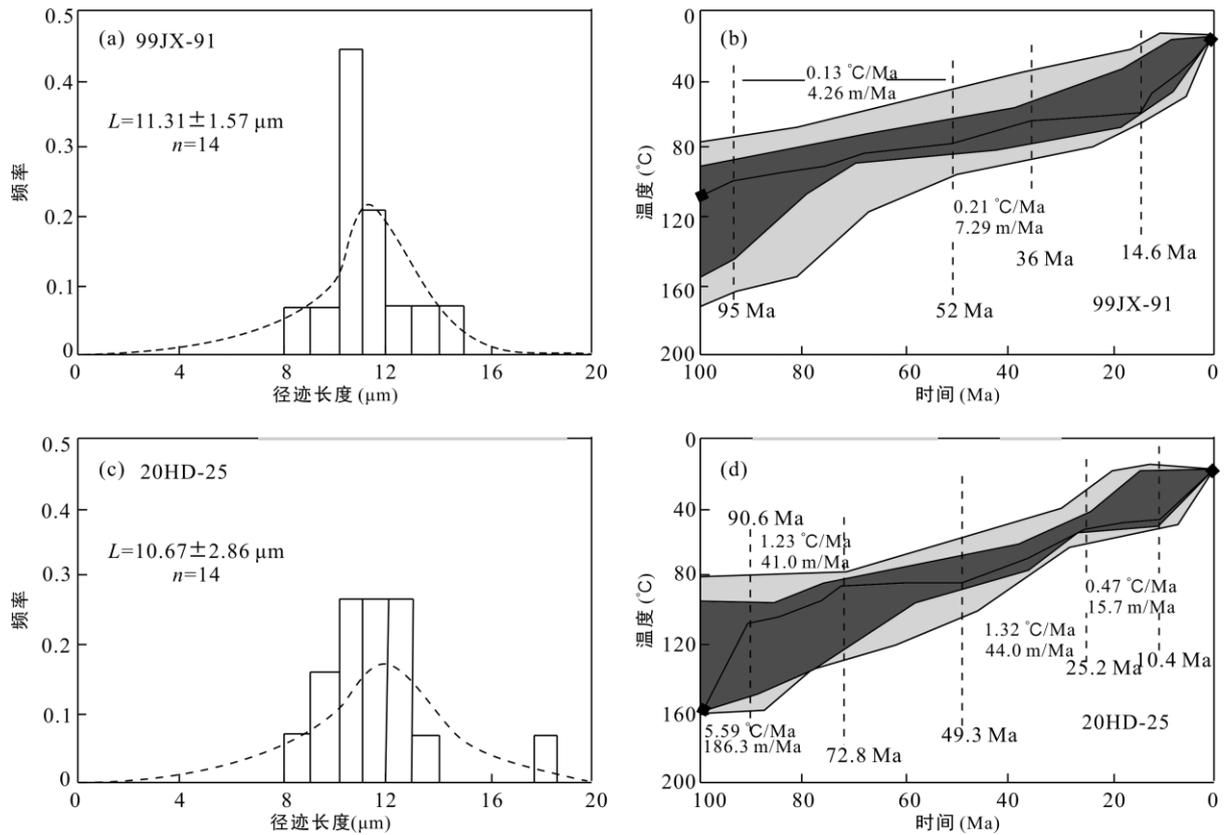


图 2 南太行山地区不同样品自发裂变径迹长度(柱状图)与模拟径迹长度(虚线)分布图

Fig.2 Histograms for the measured and inversed fission track length of the samples from the South Taihang Mountains



(a)、(b) 99JX-91 (赞皇干根村西片麻状花岗岩); (c)、(d) 20HD-25 (涉县符山闪长岩体) (温度-时间曲线中,“黑线”代表最佳拟合路径,“深灰色”代表校核的拟合路径,“浅灰色”代表可接受的拟合路径)。

图 3 南太行山地区磷灰石裂变径迹抬升冷却历史模拟(*t-T* 曲线)

Fig.3 Inversed results of thermal history by apatite fission track from the South Taihang Mountains

一类分布于南太行山北部, 主要由古元古代片麻岩、片麻状花岗岩组成, 以赞皇县干根村西片麻状花岗岩为代表, 抬升冷却年龄主要在 70~30 Ma, 抬升冷却较早, 100 Ma(大约晚白垩世)达到磷灰石裂变径迹记录年龄, 在约 95~15 Ma 抬升冷却缓慢, 15 Ma 以来隆升剥蚀加快。同时, 区域上表现为北早南晚的趋势。

以符山、东冶及洪山岩体等代表的中生代中基性侵入岩的抬升冷却历史模拟, 总体表现为晚白垩世达到磷灰石裂变径迹所记录的最大古地温, 至 73 Ma 快速冷却, 在 75~54 Ma 隆升降温较为缓慢, 53 Ma 以来抬升冷却速率加快, 特别是 11 Ma 以来隆升速率更快。根据前人(Guan, 1998; Guan et al., 2002; Wang et al., 2003; 彭头平等, 2004)对符山岩体、东冶岩体锆石 U-Pb 年代学等研究, 该区中生代中基性侵入岩年龄均在 125 Ma 左右 (图 1), 故磷灰石裂变径迹时间-温度模拟曲线中, 73 Ma 前的快速抬升冷却可能代表的是该中基性岩体侵入岩体的热持续效应, 并非记录全区构造活动, 73 Ma 之后的时间-温度

模拟代表了区域隆升剥蚀过程, 其隆升历史与古元古代变质岩所记录的区域去顶剥露历史相近。

5 构造意义

由上所述, 100 Ma 以来, 南太行山地区表现为动静结合的脉动式抬升。磷灰石裂变径迹冷却模拟显示, 中生代中基性侵入岩于 125 Ma 左右侵位后至 100 Ma 达到磷灰石裂变径迹退火带时, 古元古代变质岩磷灰石裂变径迹的时间-温度曲线缓慢抬升且表现为北早南晚的趋势, 说明中生代中基性岩的上升侵位并未波及整个南太行山地区, 太行山地区表现为向南减小的倾伏抬升趋势, 显示出差异抬升特征, 该规律与渭北隆起区不同区块的差异隆升特点相吻合(任战利等, 2014)。

南太行山地区 100~54 Ma 为构造稳定夷平时期, 区域上无明显冷却与抬升事件, 这与前人太行山地区北台期夷平面的产生在误差范围内一致(吴忱和吴金祥, 1996a, 1996b)。54 Ma 之后, 太行山南段开

始活化, 区域冷却和隆升速率加快, 之前夷平状态遭到破坏, 北台期夷平面解体。全区脉动式抬升, 抬升层次由北向南逐次传递, 具有北部早, 南部略晚, 后期整体隆升的特点。南太行山地区表现出明显的幕式隆升: 北部隆升期次主要集中在 52~36 Ma 和 15 Ma 以后, 而南部则在 50~25 Ma 和 10 Ma 以后进入主要的隆升期, 该抬升时间均晚于喜山期幕次运动, 这可能是不同期次喜山运动在南太行山滞后叠加的结果。

根据前人研究, 印支运动以后, 东亚地块的大陆壳与太平洋的大洋壳之间失去平衡, 华北板块重新活动, 至始新世-渐新世, 受印度板块向北碰撞的远程效应影响, 华北板块向东仰冲拉张, 与莫霍面的垂向隆张密切配合, 地壳上隆引张断裂, 并出现断块下陷, 断块盆地进入主要成盆期(朱夏, 1983)。南太行山主要隆升期(50~25 Ma)与华北板块的地壳隆升及断块成盆具有同时性, 与华北运动耦合关系明显。

作为渤海湾盆地的西部控盆边界, 太行山的快速隆升与盆地的大幅沉降有重要的相关性: 磷灰石裂变径迹表明, 太行山隆升在 100 Ma 之前和 50~25 Ma 期间进入快速隆升阶段。其山前渤海湾盆地始新世开始(56~42 Ma)发生裂陷, 中始新世(42 Ma)拉分成盆, 至 25 Ma 强烈走滑拉分(侯贵廷等, 2001)。华北运动(25 Ma)之后构造活动减弱, 盆地整体热沉降, 太行山隆升速率降低。整个新生代渤海湾盆地沉积高达 11 km 左右。渤海湾盆地始新世 56 Ma 以来的快速沉降与太行山隆升密切相关。

由此可见, 晚白垩世以来南太行山地区隆升幅度至少在 3 km (120 °C 地温均被剥蚀去顶)以上, 新生代山体隆升有相当规模: 100 Ma 以来, 南太行山地区持续隆升, 区域上表现为北早南晚的倾伏式差异隆升格局, 其新生代隆升格局与华北东部断陷盆地的发育、同期的快速沉降相耦合, 与中生代华北陆块岩石圈伸展减薄、软流圈上隆紧密相关, 具有同时性。以上资料有利于更好地认知华北陆块的中新生代冷却史及岩石圈减薄地表响应。

6 结 论

南太行山古元古代片麻岩和白垩纪中基性侵入岩磷灰石裂变径迹年龄集中在 74.9~32.2 Ma 之间, 尽管两者表观径迹年龄与温度-时间演化表现略有不同, 但均记录区域中-新生代以来的构造抬升, 晚

白垩世以来的剥蚀去顶量在 3 km 以上。

南太行山地区初始隆升始于 100 Ma 以前, 但 50 Ma 之前的构造抬升相对平静。50~30 Ma、尤其 10 Ma 左右以来隆升速度加快, 是太行山地区的主要隆升期, 区域上表现为北早南晚的倾伏式抬升特征。

南太行山的中新生代隆升格局与渭北隆起等地隆升具有同时性, 与华北东部新生代以来的快速沉降相耦合, 是华北板块的地壳隆升及断块成盆的同期产物, 整体上与喜山期幕次运动的时序相关。

致谢: 谨以此文纪念陈国达院士诞辰 102 周年。感谢刘汇川、周永智和何慧莹在野外考察和论文撰写中给予的帮助, 感谢匿名审稿人提出的宝贵建议, 感谢专刊组稿人陈国能教授的指导。

参考文献(References):

- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. 岩石学报, 20(1): 13-24.
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 中国科学(D辑), 32(11): 896-907.
- 陈国达. 1956. 中国地台活化实例并着重讨论华夏大陆问题. 地质学报, 36(3): 239-272.
- 陈国达. 1959. 地壳的第三基本构造单元——地洼区. 科学通报, 4(3): 94-95.
- 陈国达. 1960. 地台活化说及其找矿意义. 北京: 地质出版社: 1-408.
- 陈国达. 1997. 东亚陆缘扩张带——一条离散式大陆边缘成因的探讨. 大地构造与成矿学, 21(4): 285-293.
- 陈智超, 陈斌, 田伟. 2007. 太行山北段中生代岩基及其包体锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. 岩石学报, 23(2): 295-306.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 1994. 中国东部岩石圈根、去根作用与大陆活化——东亚型大陆动力学模式研究计划. 现代地质, 8(3): 394-356.
- 丁林. 1997. 裂变径迹定年方法的进展与应用. 第四纪研究, 17(3): 272-280.
- 龚明权. 2010. 新生代太行山南段隆升过程研究. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1-4.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. 北京大学学报: 自然科学版, 37(6): 845-851.
- 黄福生, 薛绥洲. 1990. 邯邢侵入岩中幔源超镁铁质包体的

- 发现及其矿物地球化学特征. 岩石学报, 6(4): 40-45.
- 雷永良, 龚道好, 王先美, 钟大赉, 王雪松, 张进. 2008. 应用裂变径迹不同模式约束岩体冷却史的初步探讨——以滇西独龙江岩体为例. 地球物理学进展, 23(2): 422-432.
- 李小明, 王岳军, 谭凯旋, 彭头平. 2005. 云开地块中生代隆升剥露作用的裂变径迹研究. 科学通报, 50(6): 577-583.
- 林舸. 2005. 活化构造的动力学机制研究. 大地构造与成矿学, 29(1): 56-62.
- 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002. 华北克拉通北缘中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257-274.
- 刘顺生, 张峰, 胡瑞英, 刘京发. 1984. 裂变径迹年龄测试——方法、技术和应用. 北京: 地质出版社: 32-81.
- 罗照华, 邓晋福, 赵国春, 曹永清. 1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演. 地球科学——中国地质大学学报, 22(3): 279-284.
- 马杏垣. 1989. 江苏响水至内蒙满都拉地质断面南北段的地质观察. 地球科学——中国地质大学学报, 14(1): 1-6.
- 牛利锋, 张宏福. 2005. 南太行山地区中基性侵入岩中角闪石的矿物学及其成因. 大地构造与成矿学, 29(2): 269-277.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 彭冰霞. 2004. 南太行山闪长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄及岩石成因研究. 岩石学报, 20(5): 1253-1262.
- 任战利. 1995. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地热演化史. 地球物理学报, 38(3): 339-349.
- 任战利. 1999. 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: 1-64.
- 任战利, 崔军平, 李进步, 王继平, 郭科, 王维, 田涛, 李浩, 曹展鹏, 杨鹏. 2014. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复. 地质学报, 88(11): 2044-2056.
- 谭东娟, 林景任. 1994. 华北地台中生代钾质岩浆区. 北京: 地震出版社: 1-184.
- 王霞. 2012. 太行山北段中生代岩浆作用与成矿. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1-2.
- 王瑜. 2004. 构造热年代学——发展与思考. 地学前缘, 11(4): 435-442.
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 彭头平, 李超文. 2003. 赞皇变质穹窿黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其对构造热事件的约束. 岩石学报, 19(1): 131-140.
- 吴忱, 吴金祥. 1996a. 华北山地甸子梁期夷平面的发展及早第三纪地文期. 地理学与国土研究, 12(增刊): 3-10.
- 吴忱, 吴金祥. 1996b. 华北山地地形面、地文期与地貌发展史. 地理学与国土研究, 12(增刊): 11-18.
- 许文良. 1992. 华北地台中部中生代的上地幔特征——富闪侵入岩中超镁铁质岩包体的证据. 长春地质学院学报, 20(7): 18-26.
- 许文良, 林景任. 1990. 邯邢地区燕山期角闪闪长岩岩系的岩浆演化. 长春地质学院学报, 20(3): 259-264.
- 许文良, 王冬梅, 王清海, 裴福萍, 林景任. 2004. 华北地台中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年: 对岩石圈减薄时间的制约. 地球化学, 33(3): 221-231.
- 徐义刚. 2006. 太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 14-31.
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊): 129-137.
- 张岳桥, 杨农, 马寅生. 2003a. 太行山隆起南段新构造变形过程研究. 地质力学学报, 9(4): 313-329.
- 张岳桥, 马寅生, 杨农. 2003b. 太行山南缘断裂带新构造活动及其区域动力学意义. 地震地质, 25(2): 169-182.
- 郑勇, 余心起, 王德恩, 汪诚. 2009. 安徽绩溪伏岭岩体隆升时代的磷灰石裂变径迹证据. 地质论评, 55(3): 385-394.
- 周雁, 李天义, 何生, 何治亮, 樊德华, 杨兴业. 2013. 低温热年代学方法及其在叠合盆地构造-热演化研究中的应用. 成都理工大学学报: 自然科学版, 40(4): 399-408.
- 朱夏. 1983. 中国中生代盆地构造和演化. 北京: 科学出版社: 33-89.
- Fitzgerald P G and Stump E. 1997. Cretaceous and Cenozoic episodic denudation of the Transantarctic Mountains, Antarctica: New constraints from apatite fission track thermochronology in the Scott Glacier region. *Journal of Geophysical Research*, 102: 7747-7765.
- Gleadow A J W, Kohn B P, Brown R W, Sullivan P B O and Raza A. 2002. Fission track thermotectonic imaging of the Australian continent. *Tectonophysics*, 349: 5-21.
- Gleadow A J W, Duddy I R and Lovering J F. 1983. Fission track analysis: A new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 23: 93-102.
- Guan H. 1998. Fuping Complex and its significance in Earth Precambrian crustal evolution of Sino-Korea Craton.

- Hongkong: The University of Hongkong Ph D Thesis: 32–86.
- Guan H, Sun M, Wilde S A, Zhou X H and Zhai M G. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 112: 1–18.
- Laslett G M, Green P F, Duddy I R and Gleadow A J W. 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology*, 65: 1–13.
- Liu T K, Hsieh S, Chen Y G and Chen W S. 2001. Thermo-kinematic evolution of the Taiwan oblique-collision mountain belt as revealed by zircon fission track dating. *Earth and Planetary Science Letters*, 186: 45–56.
- Naeser N D, Naeser C W and McCullon T H. 1989. The application of fission track Dating to the depositional and thermal history of rock in sedimentary basins // Naeser N D and McCullon T H. *Thermal Histories of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories*. Berlin: Springer-Verlag: 157–180.
- Wang Y J, Fan G M, Zhang Y H and Guo F. 2003. Structural evolution and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Zhanhuang metamorphic domain in the North China Craton: Constraints on Paleoproterozoic tectonothermal overprinting. *Precambrian Research*, 122: 159–182.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang H F and Peng T P. 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: Implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton. *Lithos*, 86(3–4): 281–302.
- Willett S, Fisher D, Fuller C, Yeh E C and Lu C Y. 2003. Erosion rates and orogenic-wedge kinematics in Taiwan inferred from fission-track thermochronometry. *Geology*, 31: 945–948.
- Zhang H F, Sun M, Zhou M F, Fan W M, Zhou X H and Zhai M G. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geology Magazine*, 141: 55–62.
- Zhang J, Zhao G C, Li S Z, Sun M, Wilde S A, Liu S W and Yin C Q. 2009. Polyphase deformation of the Fuping Complex, Trans-North China Orogen: Structures, SHRIMP U-Pb zircon ages and tectonic implications. *Journal of Structural Geology*, 37: 177–193.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Sun M and Lu L. 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55–88.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45–73.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Lu L. 1990. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310: 223–240.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F, Zhang M and Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57: 43–66.

Meso-Cenozoic Uplifting of South Taihang Mountains: Constraints from Apatite Fission Track Data

LI Shubo^{1,2}, WANG Yuejun^{1,2}, ZHANG Yuzhi^{1,3}, ZHANG Limin^{1,2}, LIANG Hao^{1,2} and QIU Wei^{1,2}

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The South Taihang Mountains, tectonically located in the center of the North China Craton, was a stable tectonic zone during Paleoproterozoic and Early Mesozoic, but significantly reactivated since Late Triassic. It is an ideal area for better understanding of the mountain uplifting and unroofing during the Mesozoic lithospheric thinning of the North China Craton. This paper presents the results of our field investigations, apatite fission track dating, track length analysis and tectonothermal modeling of the Paleoproterozoic gneisses and Cretaceous diorite samples. The apatite fission track apparent ages of our samples range from 32 Ma to 75 Ma, significant younger than their corresponding ages of formation. The lengths of the fission tracks for each sample show a broad and unimodal pattern with the peak value of 11 μm . In combination with thermal simulation results and other geological observations, it is inferred that at least 3 km thick superficial materials of the South Taihang Mountains have been unroofed since the Late Cretaceous. The uplift of the mountains initiated before 100 Ma. Similar to the Weibei uplift of the Ordos basin, two episodic uplifts of the Taihang Mountains occurred at about 50–40 Ma and 10 Ma to present. The apatite fission track data also indicate that the uplift-cooling event of the South Taihang Mountains took place earlier in the north than in the south. Such an unroofing and uplift-cooling pattern temporally couples with the form of the Beitai planation surface and the rapid depression in the eastern North China (e.g. Bohaiwan basin). Our data provide important constraints on the shallow-level processes in response to the lithospheric thinning of the North China Craton.

Keywords: apatite fission track; Meso-Cenozoic uplifting; tectonothermal evolution; South Taihang Mountains

《大地构造与成矿学》从 2015 年第 3 期开始使用 DOI

经“国际 DOI 中国注册与服务中心”批准,《大地构造与成矿学》从 2015 年第 3 期开始使用 DOI,并将逐步回溯过刊。

DOI, 系 Digital Object Identifier 的缩写,意为“数字对象标识符”。它具有唯一性、永久性的特点,目前已在国际出版界得到广泛推广和应用。

本刊的 DOI 标注在每篇文章首页的左上角,其中本刊专有信息为“ddgzyckx”。目前的解析地址为中国知网(<http://www.cnki.net/>)。

DOI 的作用主要有: (1)为数字化信息提供永久和唯一标识,有利于数字资源的长久保存和唯一识别; (2)通过 DOI 之间的互相操作,实现动态的、开放式的知识链接,整体提升数字化资源的使用率,也即提升数字化资源的访问量和下载量; (3)为中文数字化资源提供符合国际标准和规范的唯一标识,有利于促进中外文信息融合,逐步实现中外文数字资源的链接,为建立统一的中外文知识链接系统提供技术标准和平台; (4)使全球性知识互联系统的建立成为可能; (5)延伸了行业中每个个体的链接空间和合作空间。

有关 DOI 的详细信息,请访问: <http://www.doi.org/>