

鲁西地块 NW 走向断层的活动特征及裂变径迹证据

李理^{1,2)}, 钟大赉³⁾, 陈霞飞^{1,2)}, 陈衍^{1,2)}

1) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580;

2) 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛, 266071;

3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

内容提要:不同于华北克拉通东部普遍存在的 NE 走向断层, 鲁西地块广泛发育一组特征明显的 NW 走向断层, 包括非控盆断层和控盆断层两类。前者位于鲁西地块最南部, 倾角相对较陡, 错开了古生界及以下地层, 下盘太古宇中发育韧性剪切带, 断层碎裂岩指示断层存在多期活动; 后者位于非控盆断层以北, 除蒙山断层外韧性剪切带不发育, 倾角相对较缓, 控制了中生代以来的沉积。磷灰石/锆石裂变径迹证据分析得出 NW 走向断层的活动存在差异。断层上、下盘样品磷灰石裂变径迹表观年龄在在 $67 \pm 5 \sim 35 \pm 2$ Ma 之间, 径迹直方图表明样品在冷却过程中没有受到热扰动。通过平均径迹长度-年龄(或香蕉图)图、单颗粒峰值年龄、径迹年龄谱模式以及热史反演模拟综合分析来约束断层的活动时间, 结果表明非控盆断层可能在早侏罗世约 184 Ma 开始活动, 之后在晚白垩世 80~75 Ma 以及新生代~61 Ma 和 51~43 Ma 活动, 43 Ma 之后不再活动。控盆断层活动时间稍晚, 于早白垩世约 141 Ma、晚白垩世 80~75 Ma 活动, 新生代活动时间为约 61 Ma、49~42 Ma 以及 36~32 Ma。总体上, NW 走向断层由早到晚由南向北发育, 非控盆断层活动时间早、结束早; 控盆断层活动晚、结束晚, 并控制了凹陷的向北发育。中生代以来区域构造应力场的变化和郯庐断裂带的走滑作用是导致两类 NW 走向断层差异演化的根本原因, 在深部则受控于晚三叠世以来华北、扬子板块陆陆碰撞和古太平洋板块俯冲方向和速度的改变。印支期后挤压到伸展的转变, 加上郯庐断裂带的左行走滑, 使靠近华北克拉通南缘的前端 NW 走向断层首先发育, 因倾角较大故不控制盆地发育; 向北的后端相对伸展, 成为控盆断层, 后经早白垩世约 141 Ma 期间的伸展、晚白垩世末 80~75 Ma 和新生代的发育断层最终成型。NW 走向断层的这种大致向北迁移的规律, 暗示华北克拉通破坏可能始于早侏罗世或晚侏罗世, 且由南向北逐渐拆沉。

关键词: NW 走向断层; 裂变径迹; 演化; 中、新生代; 鲁西地块

克拉通是大陆地壳上长期稳定的构造单元, 华北克拉通是目前世界上唯一得到确证的原有巨厚太古宙岩石圈地幔遭受强烈破坏的地区 (Carlson et al., 2005; Zhu Rixiang et al., 2012; Wu Fuyuan et al., 2014)。特别是在华北克拉通东部, 不但岩石圈地幔整体遭受破坏, 大陆岩石圈地幔被改造成具有大洋地球化学性质的岩石圈地幔, 下地壳也产生了强烈的改造和减薄, 中下地壳岩石拆离折返至地表、其组成随之发生相应改变, 早白垩世还出现大量伸展构造(包括变质核杂岩、拆离断层和断陷盆地)以及与之相伴的岩浆活动 (Zhu Rixiang et al., 2012; Zhou Xinhua, 2009; Li Sanzhong et al., 2012; Lin Wei et al., 2013; Li Li et al., 2012; Li Li et al.,

2015; Zhao Li et al., 2017)。这些进展大多集中在变质核杂岩或盆地方面, 鲁西地块可以说是此项研究主题的空白区域, 仅有岩石学和沉积学证据 (Lan Tingguang et al., 2012; Xu Wenliang et al., 2006; Zhu Guang et al., 2008; Zhang Yongqing et al., 2017)。作为华北克拉通内部一个独立的构造单元, 鲁西地块上的相关地质信息记录了克拉通的破坏, 然而在研究中还存在问题, 如, 在克拉通破坏的机制方面, 主流研究认为太平洋板块俯冲引起的板缘作用造成的非稳态地幔流动是克拉通破坏的深部过程, 引起的 NW-SE 向弧后拉张形成的 NE 走向伸展构造则是其浅部响应 (Zhu Rixiang et al., 2012)。在克拉通内部的鲁西地块却是个例外, 这里没有变

注: 本文为国家自然科学基金(41672193)资助的成果。

收稿日期: 2017-10-19; 改回日期: 2018-01-26; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 李理, 女, 1967年生。博士, 教授。构造地质学专业。通讯地址: 266580, 山东省青岛市黄岛区长江西路中国石油大学(华东); Email: lilywmwys@upc.edu.cn。

质核杂岩发育,伸展构造多为NW走向,也不发育大规模中生代断陷盆地,南部甚至没有中生代断陷盆地发育,这种深部过程和浅部响应不关联隐含的克拉通破坏机制需要深入研究。已有的研究认为鲁西地块中生代的构造变形分为印支期、燕山中期和燕山晚期三期三个阶段,根据火成活动时间判断NW走向断层的强烈拉张最早发生在早侏罗世和早白垩世(Li Sanzhong et al., 2005; Lin Jingqian et al., 1996),晚中生代以来NW向断层存在约160 Ma、130~110 Ma和90~80 Ma三期活动(Wang Xianmei et al., 2008a),控盆断层于176~103 Ma、67~49 Ma和42~25 Ma活动(Li Li et al., 2012)。上述年代学研究仅揭示了NW走向断层晚中生代的活动时限,以及控盆断层的活动时限。本研究在鲁西地块南部非控盆断层和NW向控盆拆离断层几何学研究的基础上,利用裂变径迹测年的方法,系统揭示NW走向断层的活动时间,分析其成因。由于NW走向断层在深部拆离滑脱成为拆离断层(Li Li et al., 2012),作为连接深部和浅部的重要纽带,拆离断层伸展的时间可能回答克拉通开始破坏的时间(Wang Tao et al., 2007),其发育序列影响克拉通破坏的极性(De Paolo et al., 2000),伸展的强弱关联着浅部断陷盆地的发育。因此,系统的NW走向断层的活动时间和演化研究,能够对华北克拉通破坏的时间和深部过程有所启示。

1 地质背景

鲁西地块位于华北克拉通的东部,兰考—聊城断裂带以东,郟庐断裂带以西,齐河—广饶断层以南,丰县—沛县断层以北,因发育古生代金伯利岩和新生代玄武岩,一直是中国东部岩石圈演化研究的重点区域(图1)。

鲁西地块分基底和盖层两个构造层。基底由太古宇泰山岩群、TTG岩系和古元古代造山花岗岩岩体组成,其中泰山岩群和TTG岩系一起遭受了中—深程度的变质作用和强烈的花岗岩化作用;古元古代造山花岗岩岩体主要有傲徕山超单元、四海超单元、红门超单元和摩天岭超单元(Song Mingchun et al., 2001)。盖层沉积包括上元古界和古生界、中生界和新生界。上元古界为海相碎屑岩,包括青白口系黑山官组($Q_b h$)、二青山组($Q_b e$)、南华系佟家庄组($N_h t$)、浮来山组($N_h f$)和震旦系石旺庄组(Z_s),仅在鲁西隆起南部和郟庐断裂带附近分布。古生界为寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩沉积夹碎屑

岩和石炭系—二叠系海陆交互相含煤碎屑岩建造,沉积厚度稳定。中生界为中、下侏罗统一上白垩统火山碎屑岩和碎屑岩,发育坊子组($J_{1-2} f$)、三台组($J_{2-3} s$)和莱阳群($K_1 L$)、青山群($K_1 Q$)及王氏组($K_2 w$)/固城组($K_2 g$)、卞桥组($K_2 b$)(Zhang Zengqi et al., 2011)。新生界以湖相碎屑岩为主,发育古新统卞桥组($E_1 b$)、常路组($E_1 c$)和始新统朱家沟组($E_2 z$)及大汶口组($E_2 d$)。鲁西地块地质演化主要经历了前震旦纪陆块形成阶段、青白口纪—二叠纪陆块发展阶段,以及中、新生代褶皱、断层作用为主的阶段(Song Mingchun et al., 2001)。鲁西地块发育的NW走向断层多为凸凹边界控凹断层,凹陷多呈半地堑,表现为北断南超,由南向北似等距离分布。南部则发育非控盆的NW走向断层(图1)。与NW走向断层相关的先期构造有两期:一是新太古代末期鲁西地区发生的以花岗岩形成、侵位和随后发生的NW走向韧性右行剪切事件为代表的陆壳克拉通化作用,形成了南部NW走向右行韧性剪切带(Wang Xinshe et al., 1999, 2005);二是中生代早期受印支运动影响产生的NW走向逆断层(Li Sanzhong et al., 2005)。

2 NW走向断层几何学特征

鲁西地块典型的NW走向断层共六条,除最南部尼山、甘霖两条为非控盆断层外,其余四条(汶泗断层、蒙山断层、新泰—垛庄断层和泰山—铜冶店断层)均为中生代控盆断层,控制了北断南超的半地堑沉积,自南而北分别为平邑凹陷、泗水凹陷、大汶口—新泰凹陷和泰安—莱芜凹陷(图1)。六条NW走向断层规模、形态各异,大致平行排列。野外地质调查和室内研究得到其几何学特征如下。

2.1 尼山断层(F_1)

尼山断层长约34 km,走向为 $NW300^\circ \sim 320^\circ$,倾向 $210^\circ \sim 240^\circ$,倾角 $50^\circ \sim 80^\circ$ 。断层上盘发育太古宇、古生界,仅在断层中段和狭长断层带内发育第四系,下盘为太古宇,断裂带中见碎裂岩和断层泥(图2a)。

在田黄镇十八堂村,断层出露清晰,断层产状 $245^\circ \angle 48^\circ$,上、下盘均为太古宇,断层带宽约1.5 m,碎裂岩和摩擦镜面发育(图2b)。田黄镇等驾庄村($35^\circ 27.61'N, 117^\circ 16.86'E$),断层上盘太古宇中节理发育,主要有两组,走向分别为 300° 和 310° ,倾角 75° 。断层下盘太古宇中发育韧性剪切带($35^\circ 27'51''N, 117^\circ 17'00''E$),初糜棱岩中的不对称长石旋转碎

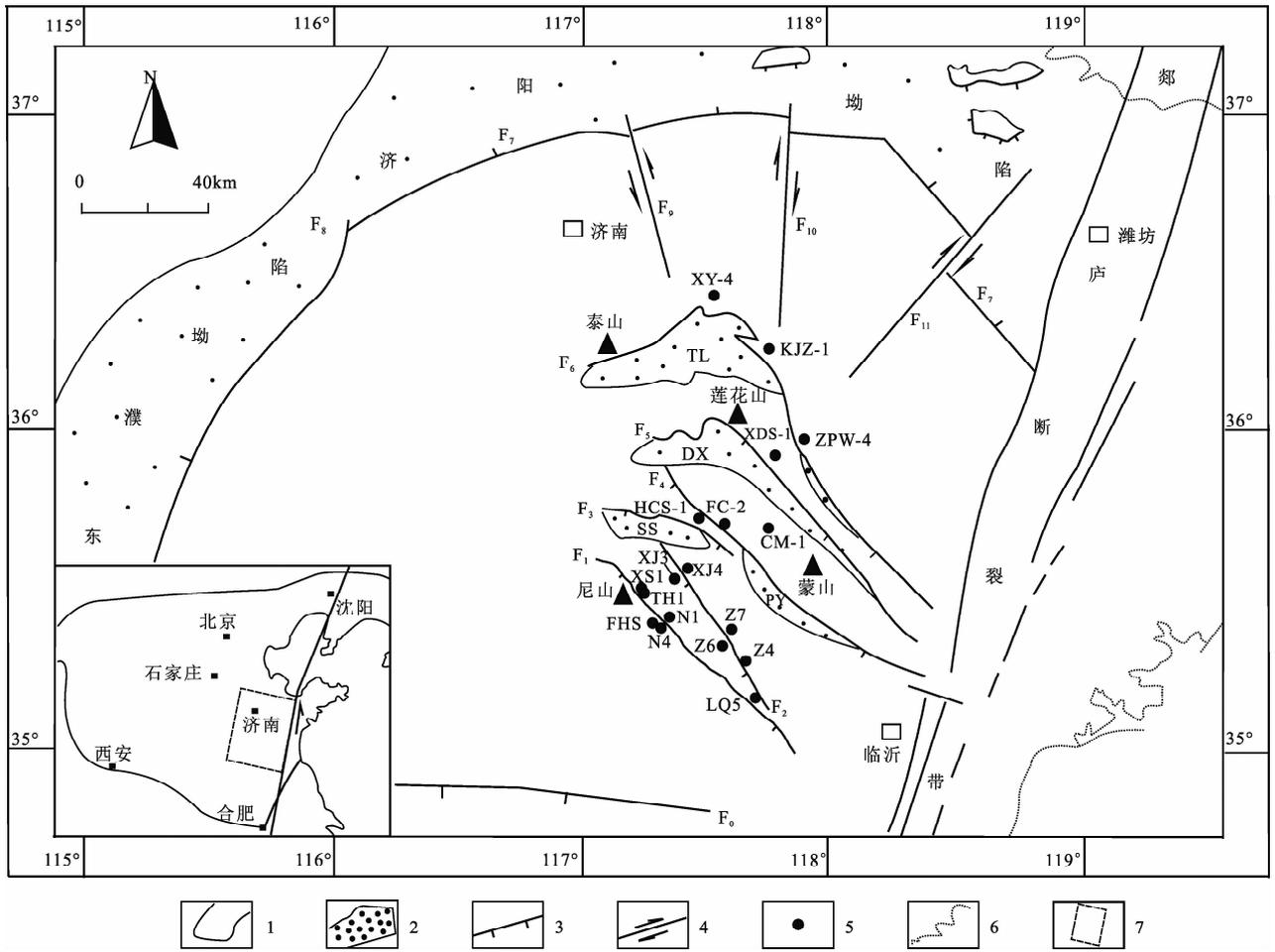


图 1 鲁西地块地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Luxi Block

1—剥蚀区;2—断陷区;3—正断层;4—走滑断层;5—海岸线;6—样品;7—研究区

1—Erosion area;2—rift area;3—normal fault;4—strike slip fault;5—coast line;6—sample;7—study area

F₀—丰县—沛县断层;F₁—尼山断层;F₂—甘霖断层;F₃—汶泗断层;F₄—蒙山断层;F₅—新泰—垛庄断层;

F₆—泰山—铜冶店断层;F₇—齐河—广饶断层;F₈—兰考—聊城断层;F₉—文祖断层;F₁₀—磁村断层;

F₁₁—上五井断层;SS—泗水凹陷;PY—平邑凹陷;DX—大汶口—新泰凹陷;TL—泰安—莱芜凹陷

F₀—Fengxian-Peixian fault;F₁—Nishan fault;F₂—Ganlin fault;F₃—Wensi fault;F₄—Mengshan fault;F₅—Xintai-Duo Zhuang fault;

F₆—Taishan-Tongyedian fault;F₇—Qihé-Guangrao fault;F₈—Lankao-Liaocheng fault;F₉—Wenzu fault;F₁₀—Cicun fault;

F₁₁—Shangwujing fault;SS—Sishui sag;PY—Pingyi sag;DX—Dawenkou-xintai sag;TL—Taian-Laiwu sag

斑指示一期 NW 走向右旋剪切;面理产状 20°/80°,其上拉伸线理走向 290°,不对称褶皱发育,轴面倒向 300°,指示一期 NW 走向左旋剪切。剪切带还可见不对称褶皱被错断现象,指示 270°左旋剪切。

尼山断层平面上错断了古生界及以下地层,不控制沉积。一系列 NNE 走向次级断层终止于其上呈锐角相交。在车辆镇木家村(34°58.405'N,117°52.597'E)附近,NE 走向次级断层产状 290°/80~85°,断层带发育碎裂灰岩,上盘为奥陶系,下盘为寒武系,为陡倾斜的正断层。因此,判断尼山断层为右

行走滑。

2.2 甘霖断层(F₂)

甘霖断层长 90km,走向 320°~330°,倾向 SW,倾角 70°~80°,断层下盘为新太古宙—元古宙中酸性岩浆岩和寒武系,上盘为新太古宙—元古宙中酸性岩浆岩及寒武系、奥陶系(图 2c)。

断层北段出露于平邑县西北约 20km 处的凤凰山(35°33'11"N,117°25'9"E),断层带为宽约 15m 的破碎带,带内发育断层泥、碎裂灰岩(图 2d),其中碎裂灰岩角砾中含有小的角砾,表明断层经历了多期构造活动。断层上盘为寒武系灰岩,下盘太古宙中

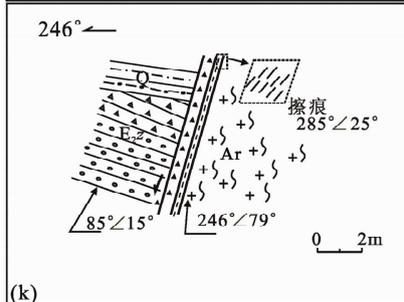
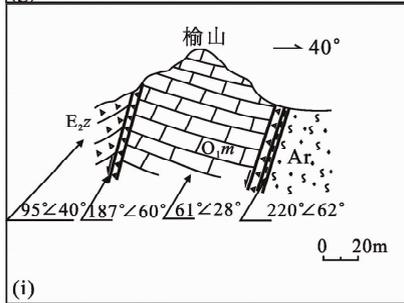
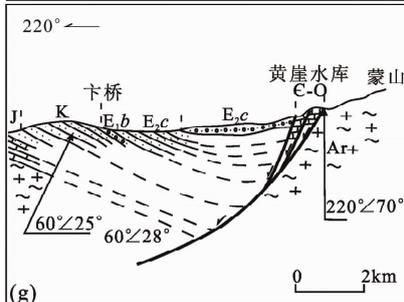
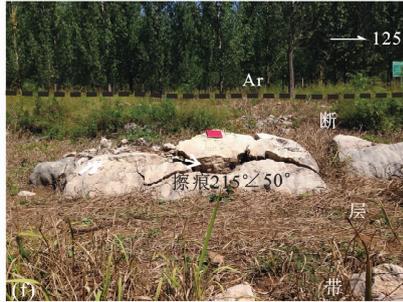
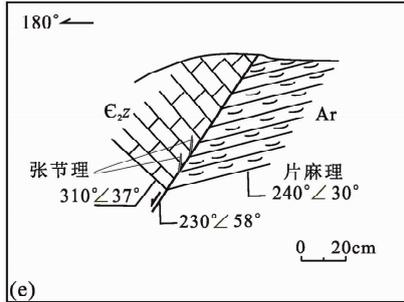
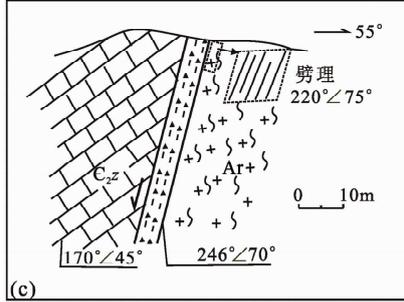
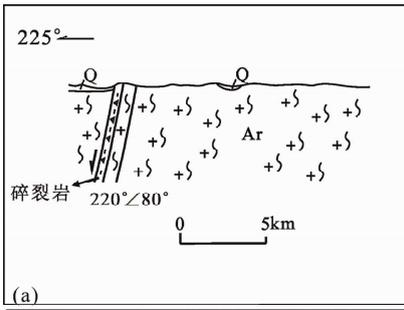


图 2 鲁西地块 NW 走向断层露头特征

Fig. 2 Outcrop characteristics of the NW trending fault of Luxi Block

(a)一尼山断层剖面图;(b)一尼山断层,田黄;(c)一甘霖断层剖面图;(d)一甘霖断层,凤凰山;(e)一汶泗断层剖面图;(f)一汶泗断层,泉林;(g)一蒙山断层剖面图;(h)一蒙山断层,上冶;(i)一新泰-垛庄断层榆山段剖面图;(j)一新泰-垛庄断层,西黄土山;(k)一铜冶店断层鹏山段剖面图;(l)一铜冶店断层,鹏山

(a)—Profile of Nishan Fault;(b)—Nishan Fault, Tianhuang country;(c)—Profile of Ganlin Fault;(d)—Ganlin fault, Fenghuang shan;(e)—Profile of Wensi Fault;(f)—Wensi Fault, Quanlin country;(g)—Profile of Mengshan Fault;(h)—Mengshan Fault, Shangye country;(i)—Profile of Xintai-Duozhuang Fault in Yushan;(j)—Xintai-Duozhuang Fault, west huangtushan;(k)—Profile of Tongyedian Fault in Pengshan;(l)—Tongyedian Fault, Pengshan

可观察到破劈理,产状 $220^{\circ}/75^{\circ}$,与断层产状 $246^{\circ}/80^{\circ}$ 呈小角度相交,指示一次下盘下降的逆断层活动。甘霖断层下盘亦出露韧性剪切带,发育拉伸线理、旋转碎斑系和两翼不等长褶皱。面理产状 $223^{\circ}/85^{\circ}$,其上拉伸线理走向 313° ;另有一组面理产状 $55^{\circ}/80^{\circ}$,其上拉伸线理走向 $335^{\circ}\sim 350^{\circ}$,变形带中发育 σ 型长石旋转变斑晶指示左旋 320° ,结合两翼不对称褶皱等判断其至少经历了两期变形作用,早期形成的构造层次相对较深些,为右旋剪切;晚期形成的构造层次浅些,为左旋剪切。

断层南段兰陵县车辋镇靳沙沟 ($35^{\circ}00.804\text{N}$, $117^{\circ}52.477\text{E}$)附近,上盘奥陶系与下盘太古宇相接,断层产状 $247^{\circ}/79^{\circ}$ 。断层上盘出露下奥陶统灰岩和粉砂岩,产状为 $253^{\circ}/22^{\circ}$,断层下盘为太古宇花岗岩,发育初糜棱岩。断层带宽约 $20\sim 25\text{m}$,断裂带内发育碎裂灰岩、碎裂花岗岩和断层泥,以及擦痕、构造透镜体和拉伸线理。断层面上擦痕光滑方向指向 138° ,指示对盘即上盘向 SE 方向运动,反映断层的一期左旋走滑活动;南西盘上亦发育擦痕,呈弧形,倾伏产状分别为 $138^{\circ}/10^{\circ}$ 和 $318^{\circ}/10^{\circ}$,反映了两期走滑活动。构造透镜体的长轴方向为 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}$,与断层锐角指示一期右行走滑活动。靠近下盘的碎裂花岗岩上,拉伸线理发育,侧伏产状为 $153^{\circ}/40^{\circ}$,倾伏产状为 $165^{\circ}/45^{\circ}$,指示一期左旋走滑。

2.3 汶泗断层 (F_3)

汶泗断层沿 NW 310° 方向延伸,倾向 230° ,倾角为 $58^{\circ}\sim 60^{\circ}$,为泗水凹陷的边界断层。断层上盘地层由老到新依次为太古宇、古生界寒武系、奥陶系、石炭一二叠系,中生界和新生界;下盘为太古宇花岗质片麻岩。

在贺庄水库 ($35^{\circ}38.27\text{N}$, $117^{\circ}32.78\text{E}$),断裂带内发育碎裂灰岩,上盘出露朱家沟组 (E_2z) 紫红色含砾砂岩,被后期发育剪节理切割,走向分别为 35° 和 72° 。在泗水县东北华村水库 ($35^{\circ}41'43''\text{N}$, $117^{\circ}29'7''\text{E}$),测得汶泗断层产状为 $230^{\circ}/58^{\circ}$,上盘寒武

系产状为 $310^{\circ}/37^{\circ}$,靠近断裂带张夏组灰岩中发育张节理;下盘为太古宇花岗质片麻岩,片麻理产状为 $240^{\circ}/30^{\circ}$,与断层的产状基本一致(图 2e);断裂带中发育明显的碎裂灰岩(图 2f)。

2.4 蒙山断层 (F_4)

蒙山断层走向 $300^{\circ}\sim 320^{\circ}$,倾向 $210^{\circ}\sim 230^{\circ}$,倾角为 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该断层主要控制平邑凹陷中、新生代沉积。断层上盘为古生界寒武系、奥陶系、石炭一二叠系,中生界、新生界古近系和第四系,下盘是太古宇。靠近断层处的太古宇发育一条 NW 走向的糜棱岩带,XZ 面上线理产状为 $220^{\circ}/65^{\circ}$,远离断层处的太古宇中片麻理发育,产状为 $220^{\circ}/70^{\circ}$ 。片麻理产状与断层的产状基本一致,反映二者经过了相同的构造变形。

在平邑县卞桥镇东北的黄崖水库附近,断层产状为 $220^{\circ}/70^{\circ}$,靠近断层下盘发育两条次级断层(图 2g),与主断层锐角相交。在蒙阴县放城东北 ($35^{\circ}41'13''\text{N}$, $117^{\circ}36'29''\text{E}$),测得断层产状为 $210^{\circ}/60^{\circ}$,断裂带中碎裂灰岩、断层泥发育。上盘古近系产状为 $330^{\circ}/17^{\circ}$,下盘出露的太古宇中发育走向 320° 的片麻理,产状 $210^{\circ}/70^{\circ}$,与断层产状基本一致。在费县城北 15km 处上冶镇 ($35^{\circ}25.955\text{N}$, $117^{\circ}57.891\text{E}$),测得断层产状 $245^{\circ}/64^{\circ}$,断层带见碎裂灰岩、断层泥、擦痕等现象(图 2h)。

2.5 新泰—垛庄断层 (F_5)

新泰—垛庄断层控制了汶新凹陷中、新生代沉积。断层沿 NW $300^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 延伸,产状 $210^{\circ}\sim 230^{\circ}/50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。断层上盘发育古生界、中生界和新生界,下盘为太古宇(图 2i)。

在新泰市东南凤凰山 ($35^{\circ}48'26''\text{N}$, $117^{\circ}53'31''\text{E}$)断裂带中可见紫红色断层泥,断层上盘出露张夏组灰岩,产状 $310^{\circ}/17^{\circ}$,其上发育擦痕,产状为 $42^{\circ}/45^{\circ}$ 。新泰西北约 6km 的西西周水库,断层产状 $220^{\circ}/62^{\circ}$,断裂带中发育紫红色断层泥和碎裂灰岩,碎裂灰岩最大砾石直径达 30cm ,上盘为 O_1m ,见大型擦痕,下盘太古宇花岗片麻岩,整体破碎。此

外,断裂带中还可可见寒武—奥陶系岩片,硅化、高岭土化蚀变现象。同时,主断层附近发育次级断层,产状为 $187^{\circ}\angle 60^{\circ}$,与主断层近平行,呈阶梯状(图2i)。在西黄土山水库($35^{\circ}45'21''N$, $117^{\circ}56'37''E$)南侧断层出露明显,产状 $230^{\circ}\angle 70^{\circ}$,上盘为 E_2 浅灰—褐灰色含粗砾石灰质复砾岩、角砾岩,下盘为 O_1m 含云母砂质页岩、钙质长石砂岩。断层带宽约2~3m,碎裂岩发育(图2j)。

2.6 泰山—铜冶店断层(F_6)

泰山—铜冶店断层分两段,主要研究断层NW走向的东段。其走向NW 330° 方向延伸,倾向 240° ,倾角 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$,控制了泰安—莱芜凹陷中、新生代沉积。

在莱芜市东北约10km处的鹏山($36^{\circ}17'33''N$, $117^{\circ}43'7''E$),泰山—铜冶店断层产状 $246^{\circ}\angle 79^{\circ}$ (图2k,l),断层带宽约9m,碎裂岩、断层泥及硅化的花岗片麻岩发育,其中断层泥宽约10~50cm。上盘为古生界寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系、中生界、新生界古近系和第四系,其中寒武系灰岩产状为 $88^{\circ}\angle 20^{\circ}$,灰岩多硅化,古近系为常路组棕红色砾岩,产状为 $85^{\circ}\angle 15^{\circ}$ 。下盘为太古宇花岗质片麻岩,多为浅黄色或者白色。至泰山—铜冶店的东南段新泰市上温村($35^{\circ}52'15''N$, $117^{\circ}58'29''E$)处,断层上、下盘均为太古宇,断裂带中发育碎裂岩、断层泥,发育擦痕,产状为 $285^{\circ}\angle 25^{\circ}$,有铁矿、铜矿化点分布。

3 样品采集及测试方法

裂变径迹测年技术用于研究山体隆升已经较为成熟,取得了一系列的研究成果(Foster, 1991; Zhou Zuyi et al., 2003; Zhang Wengao et al., 2017)。断层在形成过程中,随着上、下盘的抬升/下降,两盘会出现高程差。由于两盘经历的抬升史不同,两盘岩石中的磷灰石必然经历不同的热史,导致裂变径迹长度、年龄出现差异。因此,利用磷灰石裂变径迹低温测年技术,对径迹的长度分布模式、平均径迹长度—年龄模式、径迹年龄谱模式的综合运用,辅助以样品磷灰石裂变径迹冷却史模拟分析,可以直接对地质体不同性质断裂活动的时间进行约束(Wang Xianmei et al., 2008b, Lei Yongliang et al., 2008)。在裂变径迹中,鉴于磷灰石裂变径迹对低温特殊的敏感性与反映温度区间的局限性,利用该方法约束断层时限时,需注意包括野外采样等多个环节,尽量避开构造复杂带,构造带两侧连续采样等(Wang Xianmei et al., 2008b)。

选取NW走向断层的两盘分别沿断层走向进行连续采样,共采集11个重约为1~2kg的样品,并且使用GPS仪器进行位置及高程定位,采样点见图1。样品岩性为太古宇花岗闪长岩、混合花岗岩、英云闪长岩、变闪长岩等。样品避开了构造复杂区域和岩浆活动区域,所测结果能够反映断层的活动。采用磁悬浮和重液等常规方法分离出磷灰石和锆石单矿物。磷灰石在恒温 $25^{\circ}C$ 的7% HNO_3 溶液中蚀刻30s;锆石颗粒经抛光后贴在载玻片上,加热并盖上PFA,之后磨平、抛光,在 $210^{\circ}C$ 的 $NaOH/KOH$ 溶液中蚀刻25h。采用外探测器法定年(Gleadow et al., 1981),将低铀白云母贴在光薄片上,与SRM962标准铀玻璃一起构成定年组件。样品均置于北京492清水反应堆内辐照,照射的中子注量为 $1.015\times 10^{16}n\cdot cm^{-2}$ 。裂变径迹测试实验按照Green(1986)和Green et al. (1986)的步骤,云母外探测器置于 $25^{\circ}C$ 的HF中蚀刻35s,利用CN5/CN2中子剂量计确定中子量。采用澳大利亚的AUTOSCAN自动测量装置,选择平行c轴的柱面测出自发径迹密度和诱发径迹密度,水平封闭径迹长度按照Green(1986)建议的程序测定。根据IUGS推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程计算年龄值(Hurford et al., 1983; Hurford, 1990)。通过标准磷灰石、锆石的重复测试取得Zeta值,获得二者分别为 389.4 ± 19.2 和 85.4 ± 4 。

4 裂变径迹测试结果

本次研究获得11个磷灰石和3个锆石样品测试数据,测试结果见表1,2。

4.1 单颗粒年龄、长度分析

NW走向断层上、下盘磷灰石裂变径迹年龄分布范围在 $35\pm 2\sim 67\pm 5Ma$ 之间(除特别说明外,其标准偏差均为 1σ)(表1,图3)。年龄大致分为67Ma, 56~43Ma, 39~35Ma三组。所有的视年龄都远远小于原岩—摩天岭中粗粒二长花岗岩生成年龄(约2219Ma)(Wang Shijin et al., 1990),说明单颗粒年龄是岩石结晶后热退火造成的。样品平均围限裂变径迹长度为 $12.5\sim 13.8\mu m$,标准偏差为 $1.6\sim 2.5\mu m$ 。除样品HCS-1统计的磷灰石单颗粒数量较少(9颗)封闭径迹不足100条外,其余均不少于20颗,其余样品封闭径迹都在50条以上、且大都超过了100条,满足磷灰石测试的基本条件与要求,测试结果是可信的,可以用来做进一步分析(Green et al., 1986)。

表 1 鲁西隆起 NW 走向断层磷灰石裂变径迹测试数据

Table 1 Apatite fission track data of the NW trending faults in the Luxi Block

断层名称	样品号 / 岩性	经纬度	高程 (m)	颗粒数 (n)	$\rho_s (10^5/cm^2)$ (条数)	$\rho_l (10^5/cm^2)$ (条数)	$\rho_d (10^5/cm^2)$ (条数)	$P(\chi^2)$ (%)	年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	$L(\mu m)$ ($\pm 1\sigma$) (条数)
尼山断层	上盘	N4/gD 35°27.61N 117°16.86S	166	30	1.281 (396)	4.375 (1359)	9.912 (6817)	1.8	56±5	13.0±2.5 (103)
		FHS/mG 35°23.40N 117°20.31S	234	27	2.076 (497)	7.808 (1869)	10.080 (6817)	36.7	52±4	12.9±2.3 (73)
	下盘	TH1/T 35°27.61N 117°16.87S	166	30	1.634 (487)	5.925 (1766)	10.247 (6817)	7.7	55±4	13.0±2.0 (101)
		XS1/eD 35°27.85N 117°17.00S	163	30	1.393 (423)	5.297 (1609)	10.413 (6817)	15.7	53±4	12.5±2.2 (102)
		N1/gL 35°23.24N 117°22.53S	205	30	2.569 (443)	10.080 (1738)	10.582 (6817)	8.7	52±4	13.9±2.2 (106)
	甘霖断层	上盘	LQ5/hL 35°09.43N 117°44.56S	236	30	7.158 (2398)	28.468 (9537)	10.749 (6817)	3.7	53±3
Z6/gM 35°18.84N 117°35.58S			207	30	2.652 (645)	11.402 (2773)	10.916 (6817)	12.5	49±3	12.8±2.3 (106)
XJ3/G 35°31.24N 117°25.08S			300	32	2.039 (433)	9.782 (2077)	11.168 (6817)	71.6	45±3	12.9±2.0 (101)
下盘		Z4/M 35°16.15N 117°39.95S	229	32	2.036 (646)	9.795 (3107)	11.481 (6817)	10.1	46±3	13.2±1.6 (100)
		Z7/iM 35°21.42N 117°37.03S	257	30	3.618 (1353)	16.324 (6104)	11.585 (6817)	0.1	49±3	13.0±1.7 (105)
		XJ4/uM 35°32.18N 117°25.08S	233	30	5.897 (837)	26.898 (3818)	11.753 (6817)	0	51±4	13.7±1.6 (101)
汶泗断层下盘	HCS-1*/G 35°42.20N 117°29.42S	184	9	5.784 (315)	20.217 (1101)	12.004 (6817)	63.7	67±5	13.8±1.9 (78)	
蒙山断层	下盘	FC-2*/iM 35°41.21N 117°36.48S	192	31	3.990 (1302)	21.158 (6905)	12.255 (6817)	0	45±4	13.3±1.8 (101)
		CM-1*/oG 35°40.30N 117°46.74S	—	32	1.038 (296)	4.382 (1250)	12.422 (6817)	23.5	57±5	13.6±2.3 (102)
新泰一垛庄断层	XDS-1*/G 35°56.85N 117°42.50S	210	30	1.963 (933)	10.320 (4906)	12.924 (6817)	0	46±4	13.5±1.8 (101)	
泰山一铜冶店断层	下盘	XY-4*/bgG 35°23.96N 117°34.44S	235	30	4.752 (1285)	34.331 (9284)	12.589 (6817)	0	35±2	13.2±1.9 (112)
		KJZ-1*/T 35°13.90N 117°46.80S	209	30	8.666 (2692)	53.730 (16690)	12.589 (6817)	0	39±2	13.8±1.7 (103)
		ZPW-4*/A 35°59.90N 117°54.24S	294	28	2.827 (813)	16.626 (4782)	12.757 (6817)	0.2	43±3	13.2±1.9 (96)

注: gD—花岗闪长岩, mG—混合花岗岩, T—英云闪长岩, eD—变闪长岩, gG—片麻花岗岩, hL—一角闪变粒岩, gM—花岗糜棱岩, G—辉长岩, M—糜棱岩, iM—初糜棱岩, uM—超糜棱岩, oG—橄榄辉长岩, 片麻岩—G, bgG—黑云母辉长花岗岩, A—二长花岗岩。检验概率 $P(\chi^2) > 5\%$ 时, 年龄值采用池年龄; $P(\chi^2) < 5\%$ 时, 采用中值年龄。带* 样品据(Li Li et al., 2012)。

表 2 鲁西隆起 NW 走向断层锆石裂变径迹测试数据

Table 2 Zircon fission track data of the NW trending faults in the Luxi Block

断层名称	样品号 / 岩性	经纬度	高程 (m)	颗粒数 (n)	$\rho_s (10^5/cm^2)$ (条数)	$\rho_l (10^5/cm^2)$ (条数)	$\rho_d (10^5/cm^2)$ (条数)	$P(\chi^2)$ (%)	年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)
甘霖断层	Z7/iM	35°21.42N 117°37.03S	257	22	190.420 (6046)	50.109 (1591)	6.853 (5492)	0	114±9
汶泗断层	HCS-1/G	35°42.20N 117°29.42S	184	28	129.099 (5165)	46.641 (1866)	7.109 (5492)	0	82±6
蒙山断层	CM-1/oG	35°40.30N 117°46.74S	—	10	214.959 (2916)	16.513 (224)	7.350 (5492)	12.9	396±34

注: iM—初糜棱岩, G—辉长岩, oG—橄榄辉长岩。检验概率 $P(\chi^2) > 5\%$ 时, 年龄值采用池年龄; $P(\chi^2) < 5\%$ 时, 采用中值年龄。

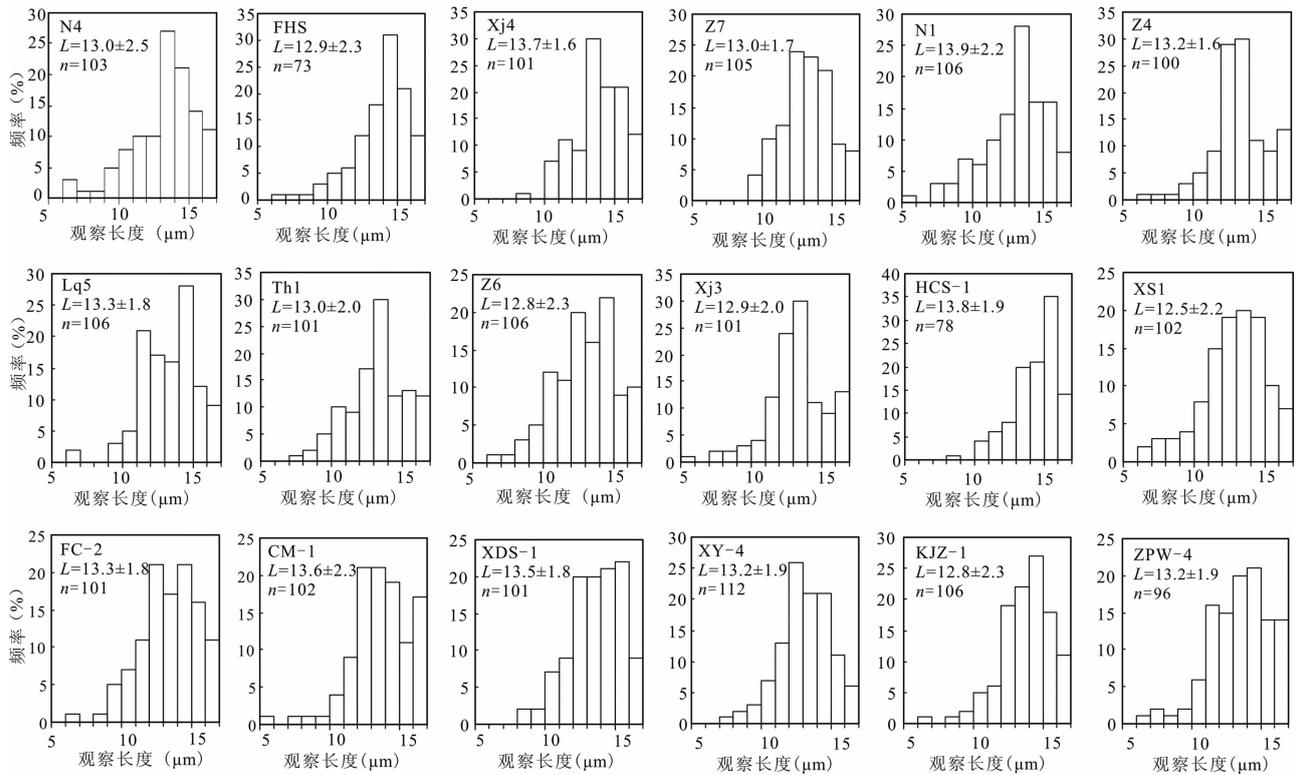


图3 鲁西地块NW走向断层磷灰石封闭径迹长度直方图

Fig. 3 Histograms of confined fission track length of NW trending faults in Luxi Block

4.1.1 径迹长度及其分布特征

裂变径迹长度都小于原始径迹长度 ($16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$), 表明经历过较强的退火。样品 HCS-1 封闭径迹接近 $14.0 \mu\text{m}$, 径迹长度分布呈单峰型, 接近未受热干扰的火山型, 因此其年龄 $67 \pm 5 \text{Ma}$ 基本代表了地质事件年龄; 样品 XJ-4、N1、HCS-1 封闭径迹大于 $13.6 \mu\text{m}$, 径迹长度分布大致呈单峰型, 属于未受热干扰的基岩型, 代表样品通过部分退火带 (PAZ) 的差异冷却年龄 (Gleadow et al., 1986); 其余样品封闭径迹长度除 XS1 ($12.5 \mu\text{m}$) 较短外, 均接近 $13.0 \mu\text{m}$ 或大于 $13.0 \mu\text{m}$, 接近未受热扰动的基岩型 (图 3), 表明样品并没有经历复杂的热历史, 可能一直处于单调冷却的过程中 (Gleadow et al., 1986)。

4.1.2 裂变径迹单颗粒年龄分析

裂变径迹分析中单颗粒年龄的 χ^2 检验值 $P(\chi^2)$ 大于 5%, 表明样品单颗粒径迹年龄的差别属于统计误差, 具有单一的年龄平均值, 样品颗粒径迹年龄可以视为同组年龄, 即裂变径迹计年体系启动是单一成因的, 表示样品经过了单一的冷却过程; $P(\chi^2)$ 小于 5%, 表明所测单颗粒年龄属于不同年龄组 (Galbraith, 1981)。18 个磷灰石/3 个锆石样品

中分别有 9 个/2 个样品其 $P(\chi^2)$ 均小于 5%, 表明这些单颗粒其裂变径迹年龄来自于不同热事件。这些样品都具有足够的颗粒数, 参照单颗粒年龄雷达图, 运用二项式峰值拟合法进行峰值解叠, 可以得到其峰值年龄 (图 4、5), 代表冷却事件。

非控盆的尼山、甘霖断层 (图 4) 4 个磷灰石样品 (N4、LQ5、Z7 和 XJ4) 中 3 个具有两个主峰值, 1 个具有 3 个峰值。大多数单颗粒年龄集中于 $51 \sim 43 \text{Ma}$, 少数为 $89 \sim 74 \text{Ma}$ 和 $66 \sim 61 \text{Ma}$ 以及 25Ma 。甘霖断层锆石样品 Z7 拟合年龄为 99Ma 和 184Ma (图 4)。因此, 非控盆断层上升盘的冷却抬升分 5 个时期, 即中生代 184Ma 和 $99 \sim 74 \text{Ma}$, 以及新生代 $66 \sim 61 \text{Ma}$, $51 \sim 43 \text{Ma}$ 和 25Ma , 其中 $51 \sim 43 \text{Ma}$ 为明显的冷却抬升时期。

控盆断层中汶泗断层锆石样品 HCS-1 的拟合峰值年龄 56Ma 、 80Ma (较多颗粒) 和 126Ma (图 5)。蒙山断层磷灰石样品 FC-2 有 42Ma (大多数单颗粒) 和 141Ma 两个峰值; 新泰一垛庄断层样品 XDS-1 出现三个峰值, 分别是 42Ma (较多单颗粒)、 61Ma (较多单颗粒) 和 25Ma , 泰山一铜冶店断层样品 (XY-4、KJZ-1 和 ZPW-4) 出现两个峰值, 集中在 $36 \sim 32 \text{Ma}$, 较老的峰值年龄为 49 (较多单颗粒) 和

56Ma。即控盆断层上升盘冷却抬升有如下 5 个时期: 141~126Ma(汶泗、蒙山断层)、80Ma(汶泗断层)、61Ma(新泰—垛庄断层)、49~42Ma(新泰—垛庄断层和泰山—铜冶店断层)和约 32Ma(泰山—铜冶店断层)。可以得出控制中、新生代沉积的断层由早到晚、由南向北活动。

在所有峰值年龄综合图上(图 6),明显可以看出非控盆断层(图 6a)的冷却抬升时间早,控盆断层抬升晚,与非控盆断层存在一个时间滞后,但二者在新生代约 42Ma 都存在明显冷却抬升事件。总体上,断层新生代活动开始增强,且由早到晚断层活动向北迁移。

4.2 裂变径迹年龄和平均径迹长度关系

4.2.1 平均径迹长度—年龄模式

磷灰石的裂变径迹年龄和平均径迹长度关系可以提供判断样品是否经历了不同程度的冷却历史(Green, 1986; O'Sullivan et al., 1996)。反映差异冷却史的模式通常会表现出平均径迹长度随年龄的减小起初先下降,中间年龄的平均径迹长度最小,长度标准偏差较大,随后在更年轻端元的年龄部分出现平均径迹长度逐渐递增,长度标准偏差变小的特征。这样的凹型模式被称为“香蕉图”(Gallagher et al., 1997)或“飞镖图(boomerang plot)”(Green, 1986),它实际上是剥露的部分退火带的另一种表现形式,通常可以用来估计最后一次冷却幕的时间。非控盆断层不控制中生代以来的沉积,上、下盘不存在差异升降,且样品高程相差不大(表 1),即岩体不受断层的控制和影响,具有较为一致的冷却抬升史,可以作为一个整体来进行研究。从“香蕉图”(图 7)中可以看出,早期阶段的年龄集中在 53Ma 左右,随年龄的减小,径迹长度在约 45Ma 出现增大。因此,判断断层最后一次快速抬升活动约在 45Ma,即断层在 45Ma 之后可能不再活动。较早一期样品最老年龄为 56Ma,由于裂变径迹长度相对较短,长度标准偏差相对较长,说明样品经历了部分退火。其校正年龄为 62Ma,反映断层新生代初期的快速抬升冷却事件。

4.2.2 径迹长度年龄谱模式

磷灰石中的径迹分布通常表现出不同的长、短径迹组合。较长的径迹对应较年轻的年龄组分,较短的径迹则可能与较早期的冷却事件相关联(Gleadow et al., 1986)。假定磷灰石中²³⁸U 的裂变是一个连续的过程,如果将样品开始记录径迹以来的时段按长度分布的间隔数来划分,那么每一单

位长度区间可以被指配到同比间隔的对应年龄段,利用这种关系可以构建长度年龄谱。它保留了所有来自长度直方图的原始热史信息,且经过长度校正后通过拐点来反映冷却变动的事件。能够推断表观年龄范围以外的时间记录。利用 TASC 程序(Belton, 2005)计算得到长度年龄谱图(图 8~10、表 3)。可以看出:①尼山断层(F1)早期冷却启动的年龄约在 73~67Ma。之后,在 67~66 Ma、54~52Ma 期间以及 45 Ma 部分样品记录了冷却史的转变。同时,揭示的最近一期冷却变动记录约发生在 13Ma。②甘霖断层(F2)早期冷却启动的年龄稍晚,约在 67~66 Ma。之后,在 64 Ma、54~53 Ma、49~45 Ma、29~22 Ma 期间部分样品记录了冷却史的转变。同时,最近一期冷却变动记录约发生在 7~5Ma。冷却由抬升造成,即非控盆断层晚白垩世开始活动,且南早北晚。

表 3 还可以看出,汶泗断层(F3)冷却启动年龄为 81Ma,同时在 80Ma 和 40Ma 有两期冷却变动。④蒙山断层(F4)冷却启动的年龄为 75Ma,略晚于汶泗断层。之后,在 70 Ma、60Ma、27Ma 部分样品记录了冷却史的转变,最近一期冷却变动发生在约 13Ma。⑤新泰—垛庄断层(F5)冷却启动年龄为 59Ma,晚于蒙山断层。之后在 57 Ma、19Ma 存在两次冷却史的转变。⑥泰山—铜冶店断层(F6)冷却启动年龄为 56Ma,晚于 F5 断层,之后样品在 52~45 Ma、34~26Ma 及 18Ma 期间记录了冷却史的转变。因此,控盆断层样品指示的抬升事件年龄由南向北变新。

5 裂变径迹 $t-T$ 模拟结果

除年龄谱模式外,热史模拟在推断表观年龄范围以外的时间记录方面更具优势,而随机模拟方法可以限定裂变径迹的热史特征。选取垂直 NW 走向断层的 7 个样品进行模拟,模拟方法选用 Ketchman et al (1999)的裂变径迹封闭扇形模型(Ketchman et al., 2003)。在一定的时间和温度范围内,采用随机的方法预测热史过程中裂变径迹的年龄和长度分布。长度分布拟合采用的是 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验(Willett, 1997),表示径迹长度模拟值与实测值的吻合程度;年龄拟合度(Age GOF)采用 95%±限制。模拟过程重复 10000 次,用以寻找与所测裂变径迹参数拟合得较好的热史。选取年龄和长度的统计最小值来评价模拟的结果(Ketchman et al., 2005),当最小值大于 0.05

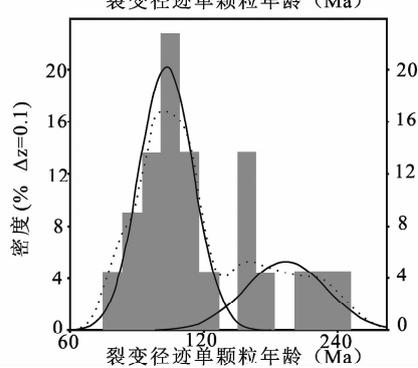
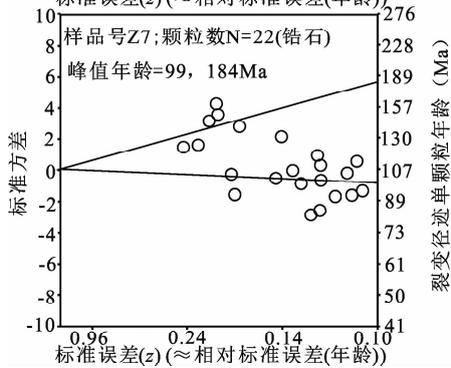
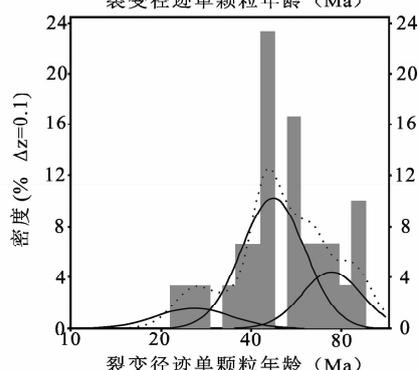
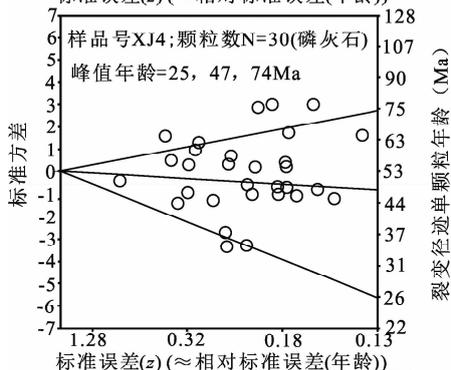
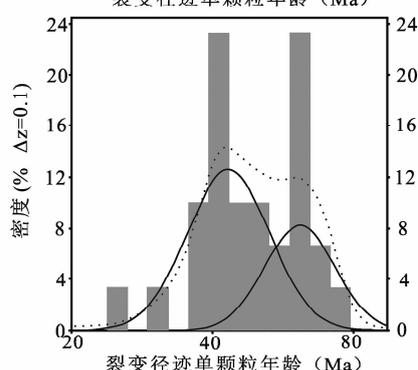
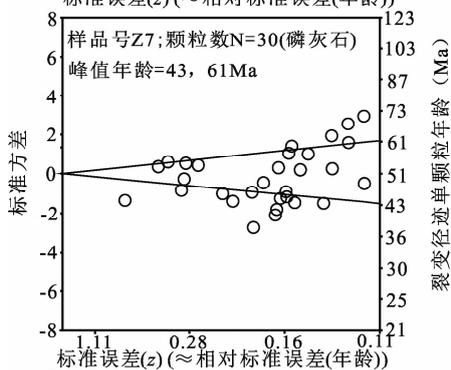
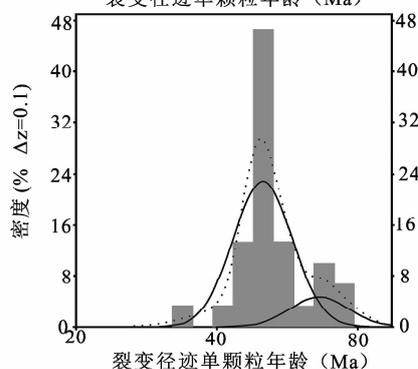
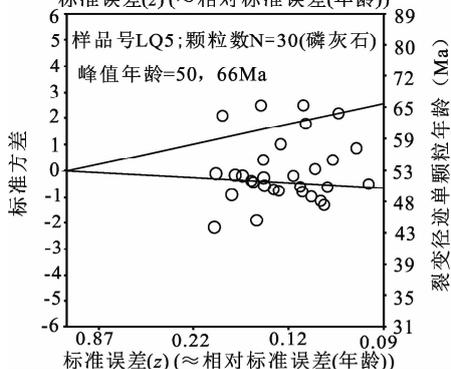
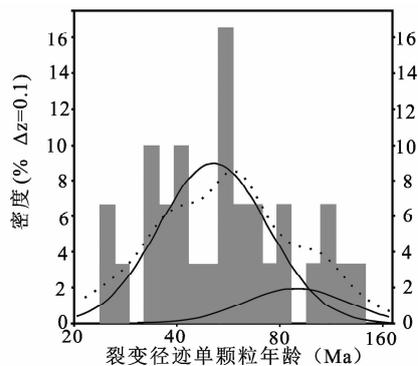
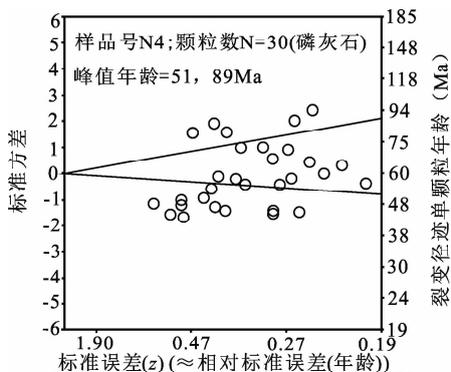


图 4 NW 走向非控盆断层样品磷灰石/锆石裂变径迹的雷达图和二项式峰值拟合结果

Fig. 4 Apatite /Zircon fission track radial plot and best-fit peak ages of the NW trending faults which did not control the basin
应用 Brandon(1996)对不同样品不同年龄组分解结果:左图为单颗粒年龄雷达图,直线代表峰值年龄;
右图为单颗粒年龄分布直方图,虚线代表单颗粒年龄直方图拟合曲线,实线代表每个峰值年龄拟合曲线。

Decomposed fission track age of different age groups after method of Brandon(1996), the left is the single grain age radial plot, the straight line represents the peak age; the right figure shows the single grain age distribution histogram, the dotted line represents the single-grain age histogram fit curve, and the solid line represents the fitting curve for each peak age

时,且所有的拟合检测统计超过 95%,模拟被称为可接受(acceptable fit),当在统计范围内最小值大于 0.5 时,该模拟被称为高质量的(good fit)。

NW 走向断层裂变径迹的封闭年龄小于 67Ma (表 1),结合样品最大冷却启动年龄(表 3)和区域演化史,选定热史开始参数高于 110°C 以模拟早期热史,部分退火带始于(110±20°C, 70±20 Ma),随后又对三个时间(65±5Ma, 40±5Ma 和 20±5Ma)和温度(60±20°)范围进行了约束,用其中随机选取的点来重建热史。热史模拟结果见图 11,其中 4 个样品的 K-S 检验和 Age GOF 大于 0.5,表明模拟结果是可靠和可信的;3 个样品的大于 0.05,为可接受的。热史模拟得出:①NW 走向断层样品进入退火带时间从南向北由约 75Ma 到 50Ma 出现冷却转折点,逐渐变新。②非控盆断层样品(N4、N1 和 Z7)约 43Ma 有一次冷却抬升事件,并离开退火带。③控盆断层样品约 43Ma 和 24Ma 分别有两次快速抬升,约 24Ma 离开退火带。从模拟分析可以看出,非控盆断层活动时间早,晚白垩世末期有一次活动;控盆断层稍晚,新生代开始活动。总体上,断层活动向北变新。

6 鲁西地块 NW 走向断层活动的时间和深部背景

裂变径迹测年数据分析和 $T-t$ 模拟得出:①鲁西地块非控盆断层样品中生代 184Ma、99~74Ma 存在冷却抬升事件;新生代冷却抬升有三期:66~61Ma、51~43Ma 和约 25Ma,其中 51~43Ma 为明显抬升时期。②控盆断层在早白垩世 141~126Ma 有一次冷却抬升,另外一次在 80 Ma 左右;新生代在 61Ma、49~42Ma、36~32Ma 和 25Ma 存在冷却抬升。冷却抬升事件是由断层上升盘上升或区域抬升造成的,结合区域构造发展史能够揭示西地块 NW 走向断层的活动时间。

6.1 晚三叠世—早侏罗世

晚三叠世—早侏罗世由于华北、扬子板块碰撞形成了左行郟庐断裂带(Zhu et al., 2005),鲁西地

块 NW 走向大型逆断层同时形成(Li Sanzhong et al., 2005),但没有相应的岩浆活动。早侏罗世末,岩浆活动主要出现在鲁西南部,高钾钙碱性—高钾碱性的岩石组合其锆石 U-Pb 年龄为 180.1~184.7Ma(Lan et al., 2012),它们沿尼山、甘霖断层分布。侵入到 NW 走向甘霖断层中的石英闪长玢岩 K-Ar 全岩测试得出了(183.26±2.82)Ma 的结果(Li Li et al., 2012),与上述年龄一致。样品 Z7 单颗粒锆石 184Ma 的峰值年龄记录了尼山断层上升盘的这次抬升活动(图 4)。

6.2 中—晚侏罗世

在中侏罗世末—晚侏罗世 162~149.8Ma, IZANAqi 板块以 NWW 向低角度、300mm/a 高速俯冲于欧亚板块之下(Maruyama et al., 1997),郟庐断裂带开始第二期强烈左行走滑活动(Wang Yu, 2006, Zhu Guang et al., 2008),导致旁侧鲁西 NW 走向断层活动,对应 R' 破裂或 T 破裂。在时间上,甘霖断层派生的张性断层脉体内角闪石 K-Ar 年龄为 160.2±8.2Ma(Wang Xianmei et al., 2010),泰山—铜冶店断层带中断层泥自生伊利石 K-Ar 测年结果为 163.95±2.77Ma(Li Li et al., 2012),表明二者同期活动。此时南部没有出现盆地,推断尼山、甘霖断层对应 R' 破裂,而蒙山及其以北 NW 走向断层则对应 T 破裂,开始控制盆地沉积。在平邑、大汶口—新泰和泰安—莱芜凹陷中,中—晚侏罗世近源快速堆积的河湖相冲积扇紫红色砾岩和砂砾岩夹砂质泥岩、即三台组(J_{2-3s}),在三个凹陷的厚度分别为 57.5m, 235m 和 429m(The forth institute of the geological and mineral exploration of Shandong Province, 2003),反映断层在走滑背景下的伸展活动向北增强。

6.3 白垩纪

早白垩世 140~120Ma, IZANAqi 板块以 NNW 向 207 mm/a 的速度向欧亚大陆俯冲(Maruyama et al., 1997),整个中国东部太行山—武陵山重力梯度带以东主体进入 NE-SW 向伸展阶段(Lin Wei et al., 2013)。鲁西地块除尼山、甘霖断层外,汶泗、蒙

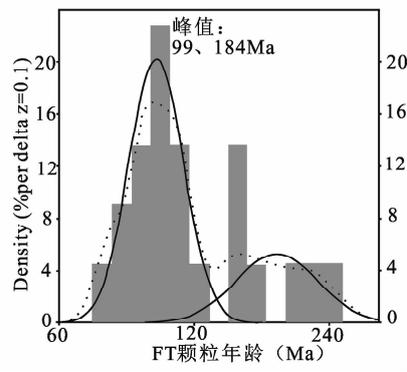
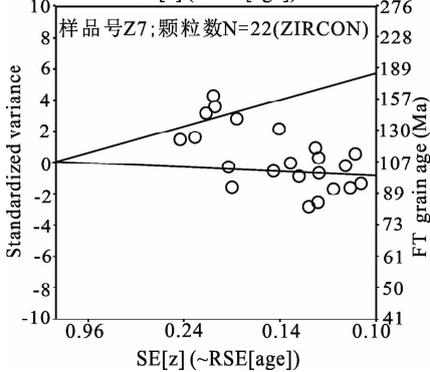
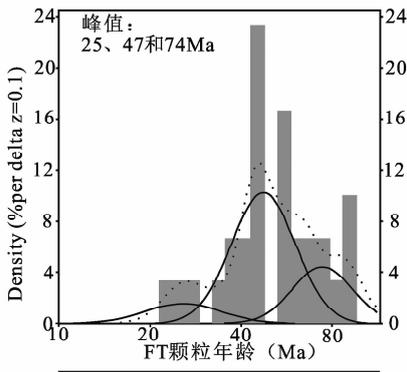
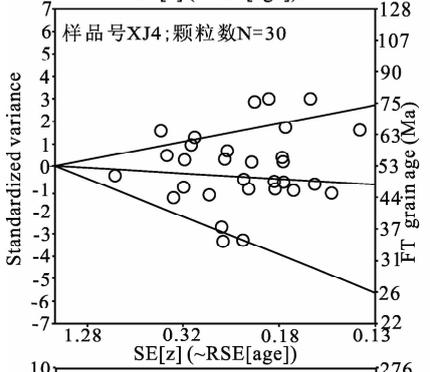
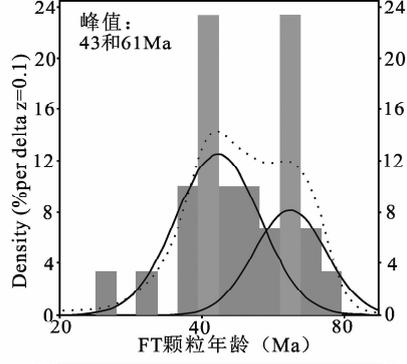
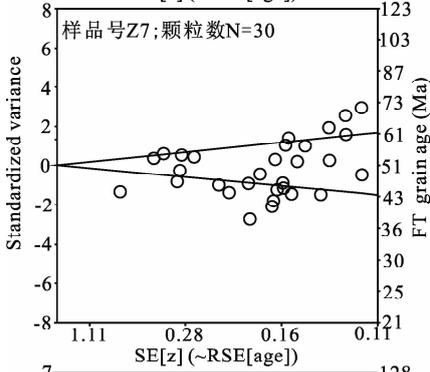
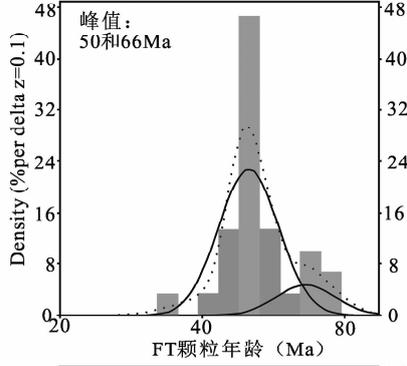
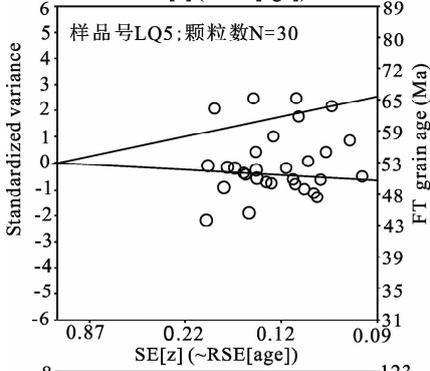
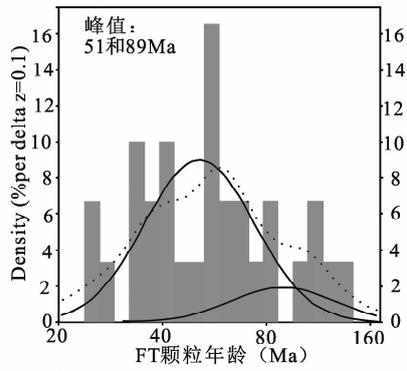
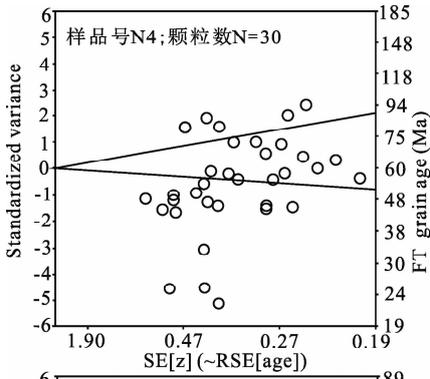


图 5 NW 走向控盆断层样品磷灰石/锆石的雷达图和二项式峰值拟合结果

Fig. 5 Apatite/Zircon fission track radial plot and best-fit peaks age of the NW trending basin-controlled faults
应用 Brandon(1996)对不同样品不同年龄组分解结果:左图为单颗粒年龄雷达图,直线代表峰值年龄;
右图为单颗粒年龄分布直方图,虚线代表单颗粒年龄直方图拟合曲线,实线代表每个峰值年龄拟合曲线

Decomposed fission track age of different age groups after method of Brandon(1996), the left is the single grain age radial plot, the straight line represents the peak age; the right figure shows the single grain age distribution histogram, the dotted line represents the single-grain age histogram fit curve, and the solid line represents the fitting curve for each peak age

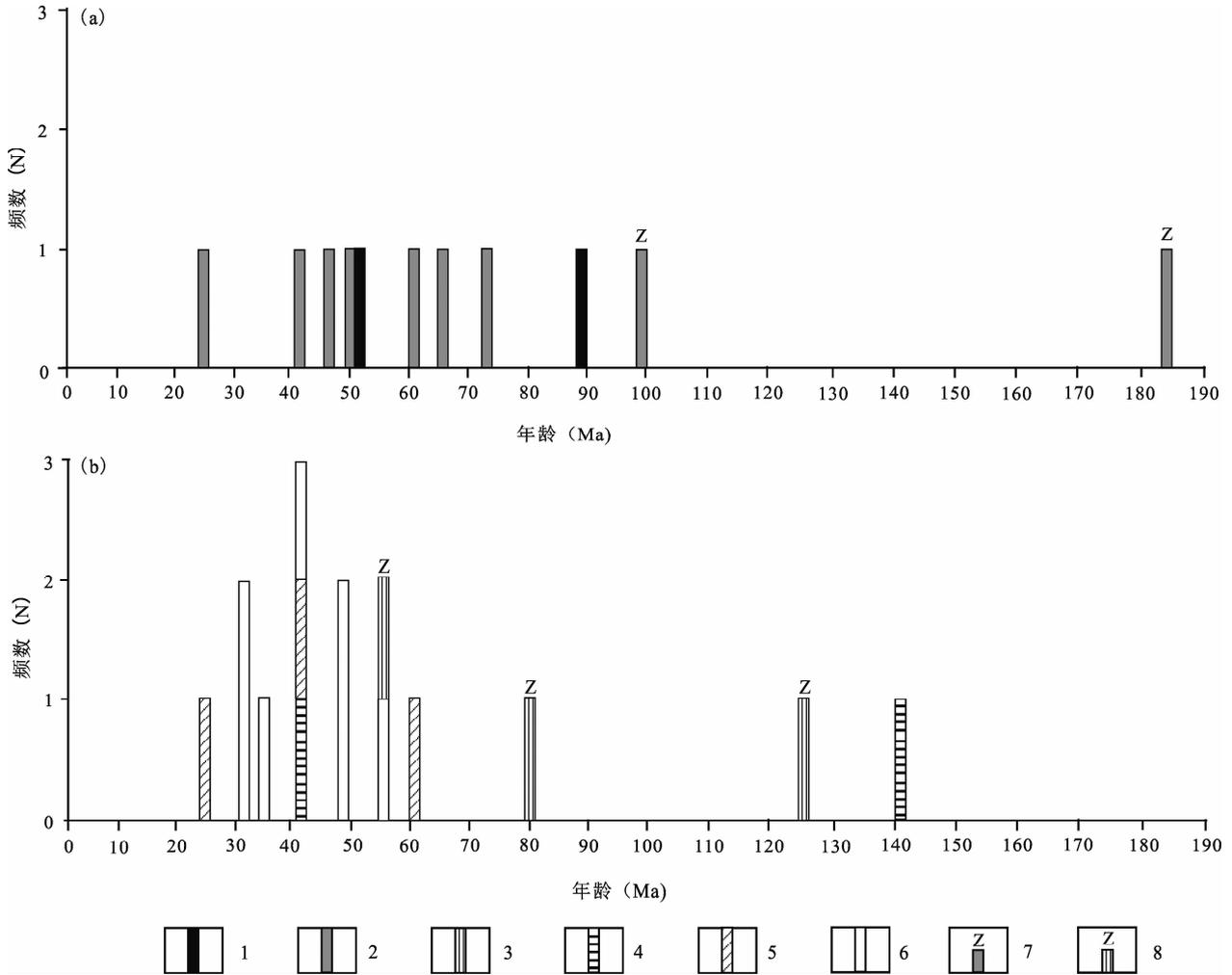


图 6 非控盆断层裂变径迹拟合峰值年龄综合图(a)和控盆断层裂变径迹拟合峰值年龄综合图(b)(断层名同图 1)

Fig. 6 Fission track best-fit peaks age of non-controlled basin faults (a) and fission track best-fit peaks age of basin-controlled faults (b)(The fault name is the same as the Fig. 1)

磷灰石样品: 1—F₁; 2—F₂; 3—F₃; 4—F₄; 5—F₅; 6—F₆; 锆石: 7—F₁; 8—F₃

1—apatite F₁; 2—apatite F₂; 3—apatite F₃; 4—apatite F₄; 5—apatite F₅; 6—apatite F₆; 7—zircon F₁; 8—zircon F₃

山、新泰—垛庄等断层都因强烈的伸展作用发育成为控盆正断层,磷灰石 FC-2 得出的 141Ma 拟合峰值年龄(图 4)记录了这次活动。断层活动控制了相关半地槽盆地早白垩世的沉积,安山集块岩、凝灰岩、凝灰质砂砾岩及泥岩交替沉积反映伸展作用增强,切割更深。在早白垩世 129.4~131.7Ma 达到了伸展高峰期(Lan et al., 2011)。平邑凹陷、大汶口—新泰凹陷下白垩统厚度由 1859m 增至 2165m,尽

管泰安—莱芜凹陷厚度为 502m(The forth institute of the geological and mineral exploration of Shandong Province, 2003),但仍然反映了伸展向北迁移的总体趋势。

晚白垩世 90Ma,因太平洋板块俯冲速率降低至 131mm/a(Maruyama et al., 1997),研究区整体受到挤压,90~80Ma 郯庐断裂带存在一次左行压剪(Wang Xianmei et al., 2008a)。它可能引起了

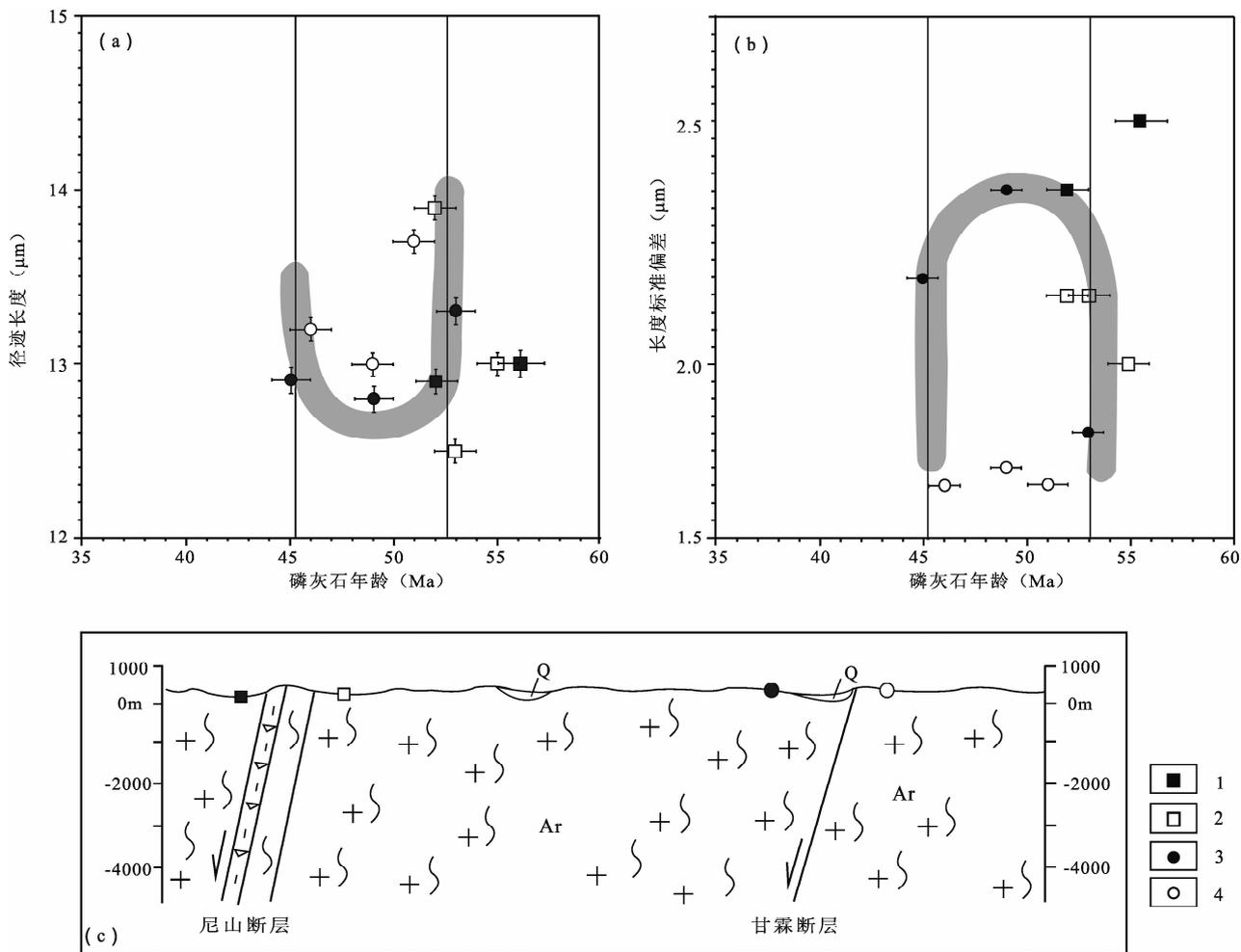


图7 鲁西地块 NW 走向非控盆断层磷灰石裂变径迹长度(±1σ)-年龄(±1σ)图(a)、标准偏差-年龄(±1σ)图(b)和样品剖面位置(c)

Fig. 7 Apatite fission track length(±1σ)-age(±1σ) (a), standard deviation-age(±1σ) (b) and sample location(c) of the NW trending non-controlled basin faults in Luxi Block

1—尼山断层上盘样品;2—尼山断层下盘样品;3—甘霖断层上盘样品;4—甘霖断层下盘样品

1—sample in hangingwall of Nishan fault;2—sample in footwall of Nishan fault;3—sample in hangingwall of Ganlin fault;4—sample in footwall of Ganlin fault

NW 走向断层的活动,前述裂变径迹分析得出的 80 ~75Ma 揭示了该次活动,其中蒙山断层控制的平邑凹陷中沉积了固城组(K₂g)和卞桥组(K₂b)下段,化石分别归属为晚白垩世早期和晚白垩世晚期(Yang Jinglin et al., 2013)。之后,鲁西地块整体抬升遭受风化剥蚀。在华北北缘,晚白垩世八音宝日格隆起卫境岩体也出现一次抬升事件,分析是一次区域性事件,导致众多早白垩世盆地发生反转(Nie Fengjun et al., 2017)。

6.4 古近纪

古新世—早始新世(65~53 Ma),太平洋板块以 78 mm/a 的速度向欧亚大陆俯冲(Northrup, et al., 1995),速度明显降低,俯冲方向依然是 NNW

走向,研究表明整个东亚地区在该时期统一进入挤压应力体制(Maruyama et al., 1997)。然而,渤海湾盆地却发育了代表裂陷作用的古新统孔店组/房身泡组巨厚玄武岩、砂岩、砂泥岩建造(Feng Youliang et al., 2010)。鲁西地块因郯庐断裂带左行(Han Wengong et al., 2005; Li Li et al., 2009)和兰考—聊城断裂带右行活动,发生 SW 向的构造逃逸,引起 NW 走向断层开始了新生代正断层活动。磷灰石裂变径迹分析记录了相关活动,且南早北晚(表 3、图 11)。尼山、甘霖断层因为倾角较大,仍然不控制盆地。平邑凹陷中发育古新统下段卞桥组上段(E₁b),大汶口—新泰凹陷和莱芜凹陷则发育古新统中、上段常路组(E₁c),从沉积上也反映了断层这

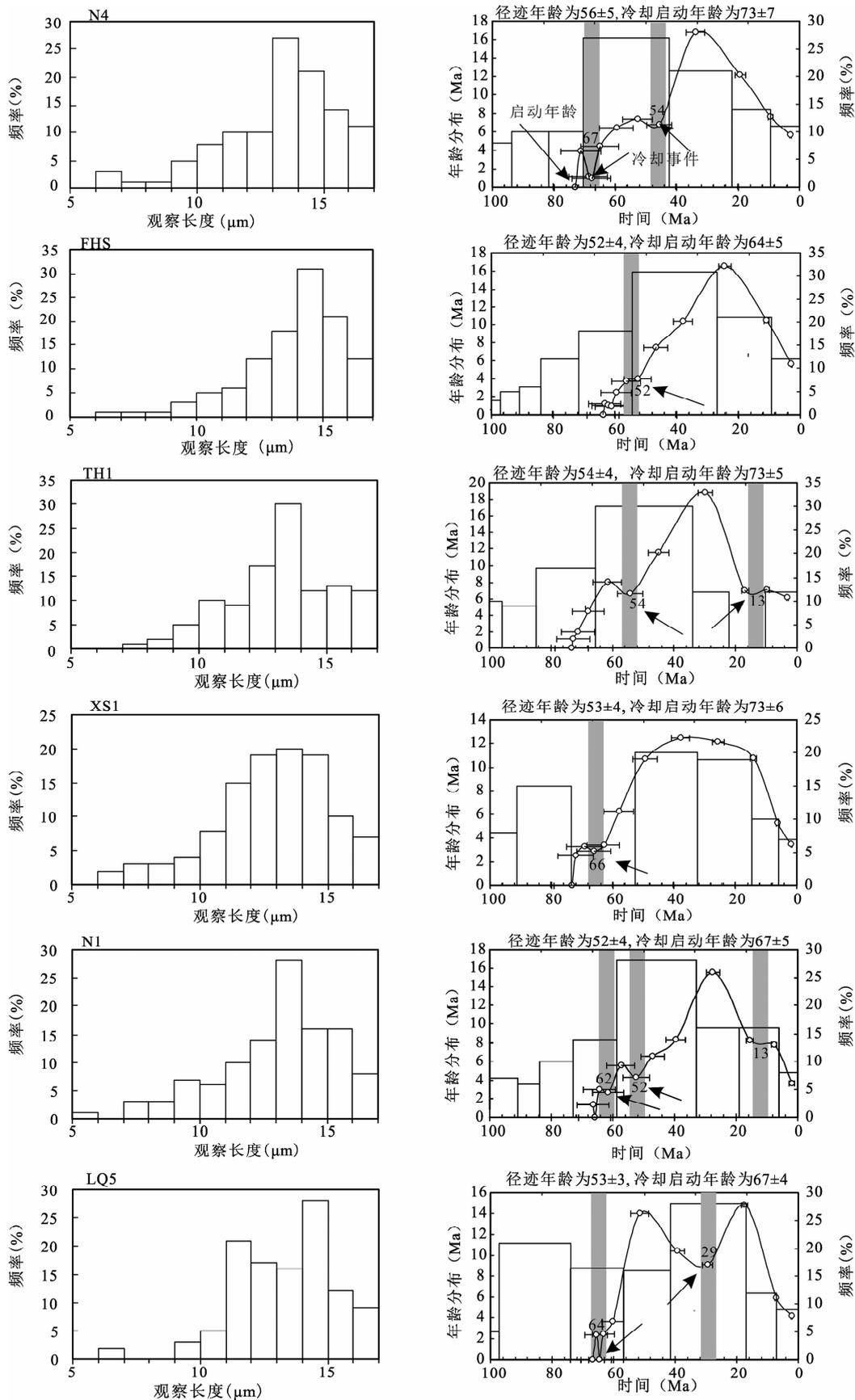


图 8 鲁西地块 NW 走向断层磷灰石裂变径迹长度年龄谱图

Fig. 8 Apatite fission track length age spectra of the NW trending faults in Luxi Block

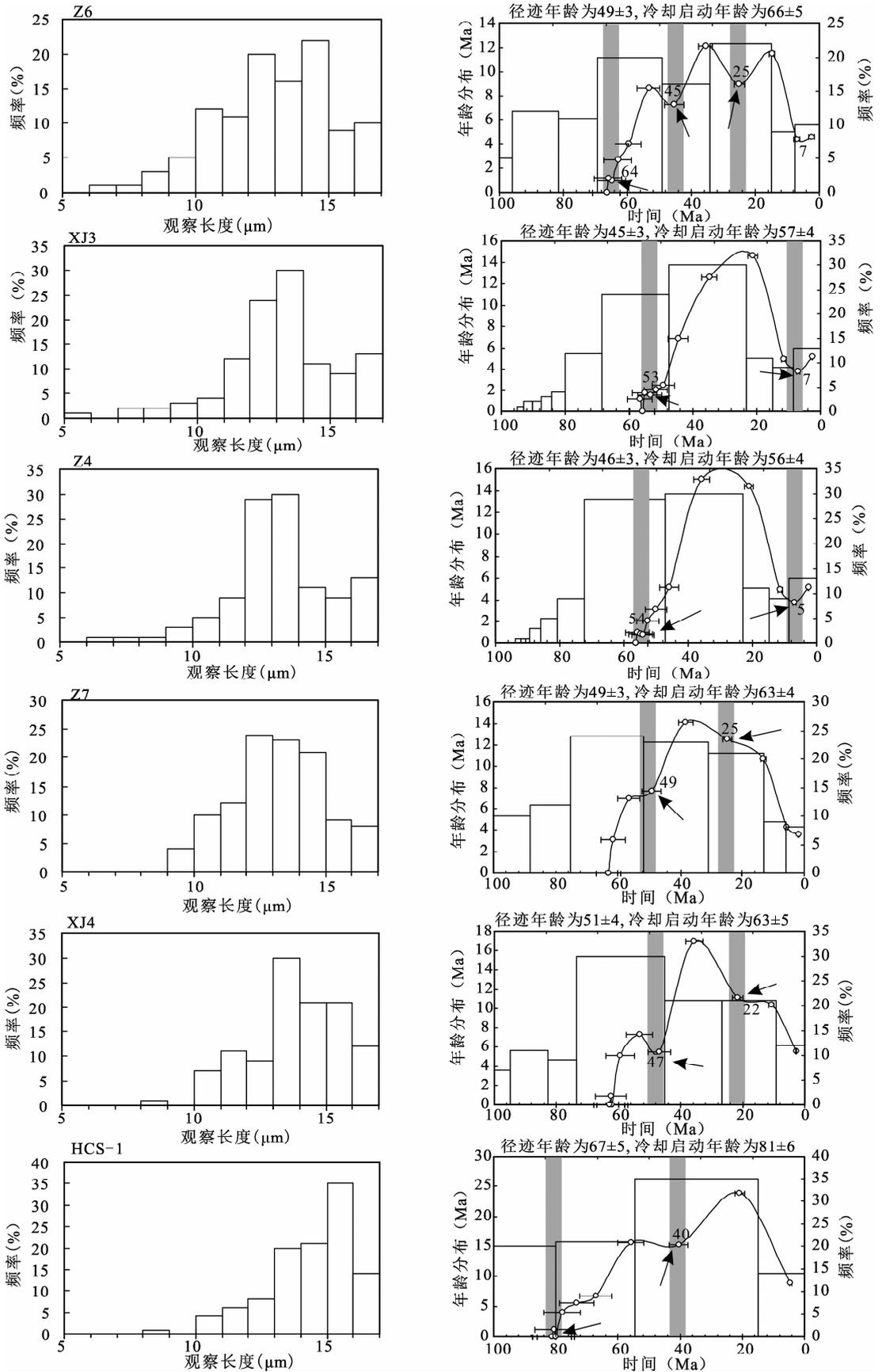


图9 鲁西地块 NW 走向断层磷灰石裂变径迹长度年龄谱图

Fig. 9 Apatite fission track length age spectra of the NW trending faults in Luxi Block

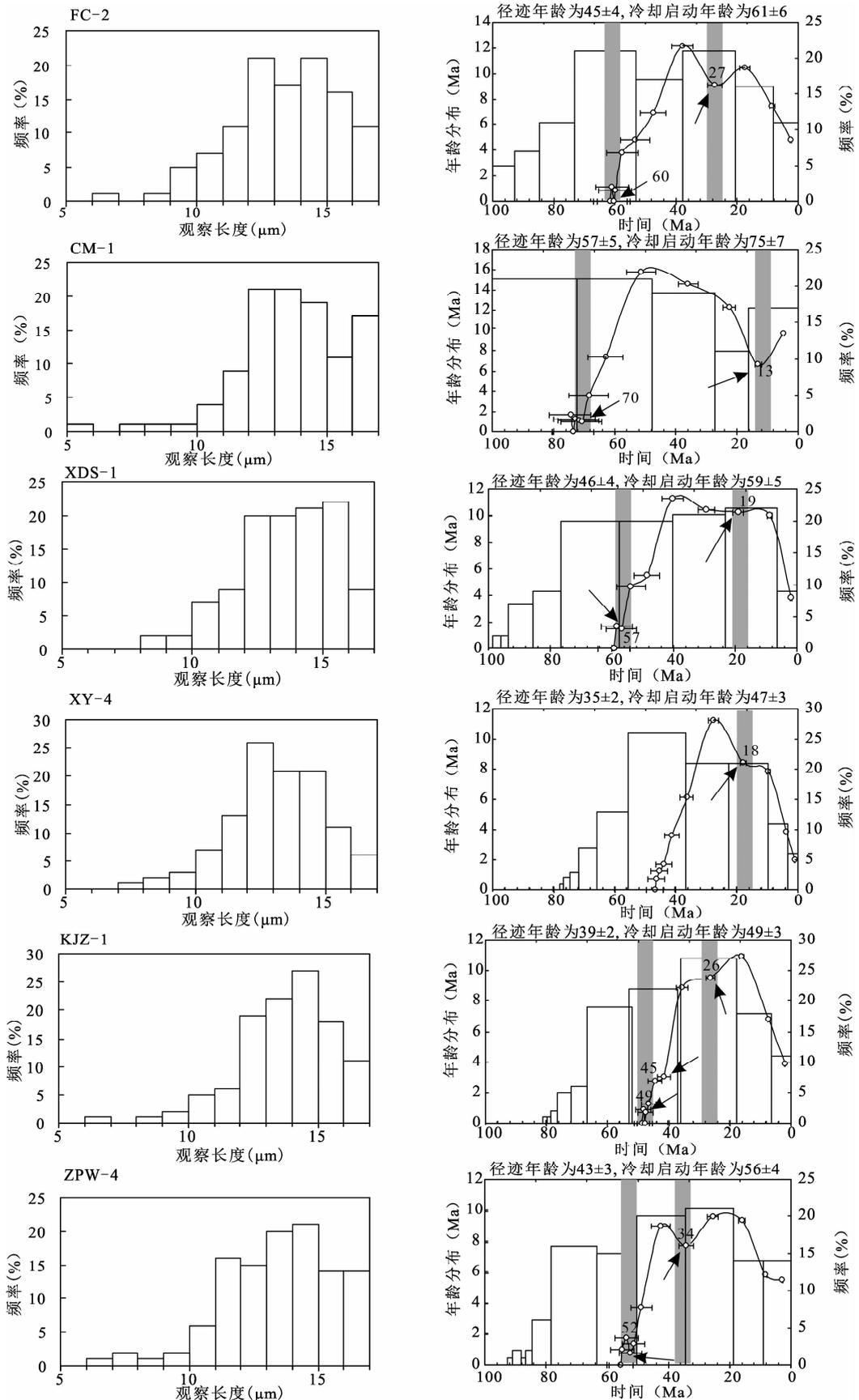


图 10 鲁西地块 NW 走向断层磷灰石裂变径迹长度年龄谱图

Fig. 10 Apatite fission track length age spectra of the NW trending faults in Luxi Block

表 3 磷灰石长度年龄谱图揭示的冷却事件(断层名称见图 1)

Table 3 Cooling events related to the apatite fission track length age spectra (fault name see Fig. 1)

断层类型及名称	样品	冷却启动年龄(Ma)	冷却事件 1 (Ma)	冷却事件 2 (Ma)	冷却事件 3 (Ma)	冷却事件 4 (Ma)	冷却事件 5 (Ma)	冷却事件 6 (Ma)	
非控盆断层	F1	N4	73±7	67	54				
		FHS	64±5		52				
		TH1	73±5		50			13	
		XS1	73±6	66					
		N1	67±5	62	52			13	
	F2	LQ5	67±4	64			29		
		Z6	66±5	64		45	25		7
		XJ3	57±4		53				7
		Z4	56±4		54				5
		Z7	63±4			49	25		
XJ4	63±5			47	22				
控盆断层	F3	HCS-1	81±6			40			
	F4	FC-2	61±6	60			27		
		CM-1	75±7	70				13	
	F5	XDS-1	59±5	57			19		
	F6	ZPW-4	56±4		52		34		
		KJZ-1	49±3			45	26		
		XY-4	47±3			18			

种向北迁移规律。正断层活动一直持续到始新世约 43Ma 左右,控制了朱家沟组(E_2z)和大汶口(E_2d)组下段沉积。

约 40Ma 时太平洋板块俯冲方向由 NNW 转向 NWW,俯冲速度降至 55mm/a,整个亚洲为伸展构造域(Maruyama et al., 1997),郯庐断裂带转为右行走滑活动(Han Wengong et al., 2005; Li Li et al., 2009)。受 NW-SE 向伸展,鲁西地块 NW 走向断层基本不再活动,裂变径迹年龄也证实了这一点。受 NE 走向断层发育影响,泰山—铜冶店断层样品裂变径迹指示 36~34Ma 期间存在冷却抬升,控制了大汶口组中、上段沉积。

6.5 新近纪

约 23Ma 之后,鲁西地块整体快速抬升(Li Li et al., 2006, 2007; Li Li et al., 2013),断层随之抬升,裂变径迹年龄和热史模拟揭示的 23Ma 反映了这次区域抬升事件。此外,尼山、甘霖断层还揭示出 13Ma 和 7~5Ma(表 3)两次冷却抬升事件。

7 讨论

前已述及,NW 走向韧性剪切带只在鲁西地块南部发育(Wang Xinshe et al., 2005),而北部不存在。韧性剪切带是一个薄弱带,后期断层往往受其影响并叠加于其上,这就是早侏罗世约 184Ma 时 NW 走向断层活动始于尼山断层和甘霖断层,相应的岩浆活动也出现在南部的原因。值得注意的是,

通常碱性岩浆的活动代表陆内伸展环境(Yan Guohan et al., 1989),若以此为克拉通岩石圈伸展减薄的开始,那么华北克拉通破坏可能开始于早侏罗世,Lan et al. (2012)也支持这一观点。横切渤海湾盆地和郯庐断裂带的横剖面上,烟台—五莲断层之下对应高速体,向 NWW 方向斜插于华北板块之下,其上、下为低速体,这样的高速体被解释为俯冲板片残留体,即扬子板块呈北西西向俯冲、下插于华北板块之下(Li Li et al., 2009)。上述两大板块发生在中生代早期的陆内俯冲、碰撞,很可能动摇了华北克拉通的“根基”,成为克拉通破坏的发端。来自地球化学的研究支持这一推论。研究认为,220~130 Ma 扬子板块的陆壳俯冲将华北板块岩石圈地幔改造形成富集地幔,又经 130~110 Ma 期间古太平洋板块的俯冲造成岩石圈减薄和地幔物质上涌的再次改造,最终形成早白垩世鲁西地区岩石圈地幔为 EM2 型(Lan et al., 2011)。上述碱性岩浆活动主要出现在南部,还说明岩石圈伸展减薄首先从华北克拉通南缘开始。

还有一个值得关注的问题就是关于三台组的归属。尽管最新的研究将其划归中—上侏罗统(Zhang Zengqi et al., 2011),但根据叶肢介资料,三台组下部属于早侏罗世末,上部属于中侏罗世,而孢粉化石资料指示晚侏罗世已开始出现 *Cicatricosisporites* 及 *Schizaeoisporites* 亦未在三台组中出现(The forthinstitute of the geological

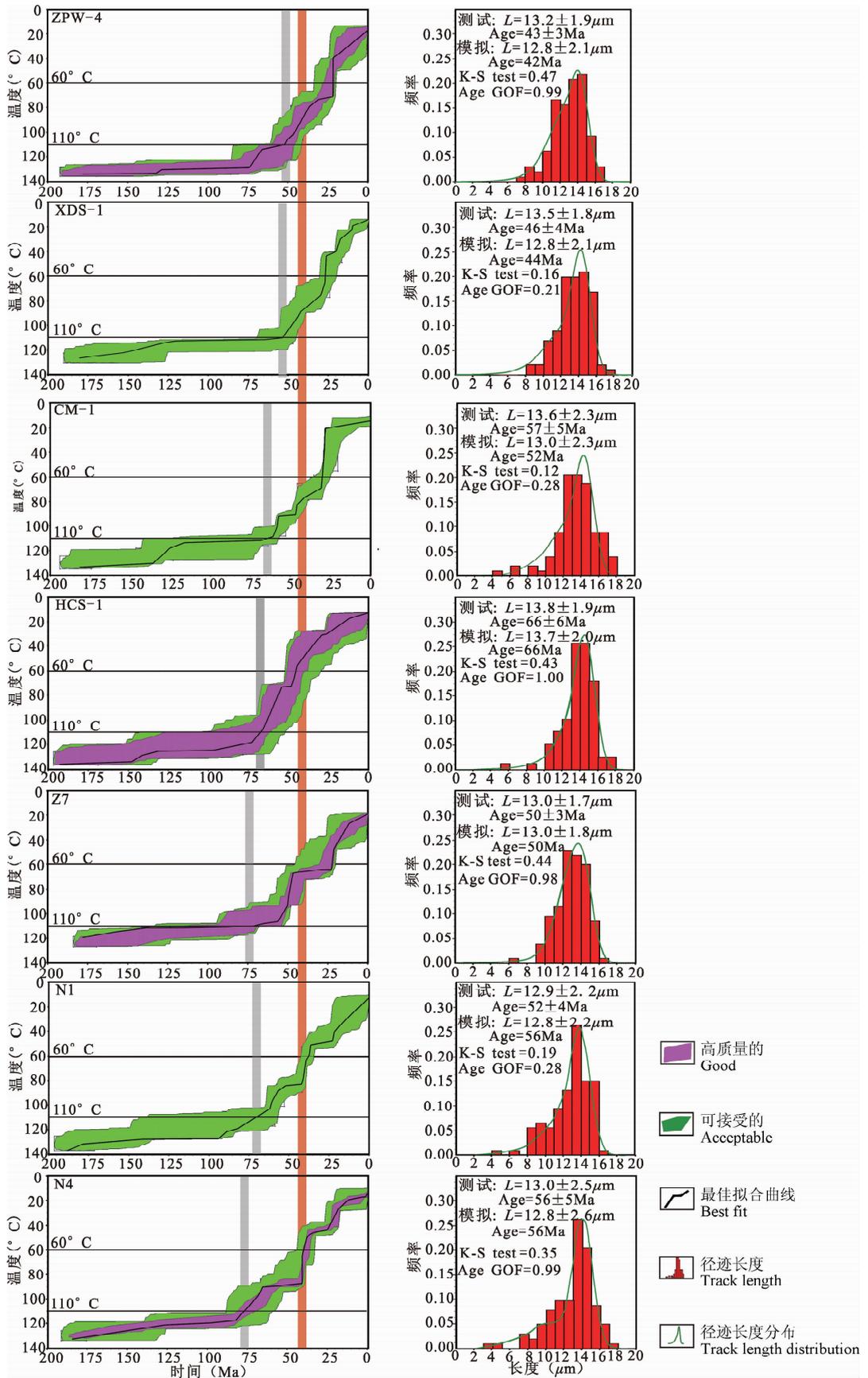


图 11 鲁西地块 NW 走向断层典型磷灰石样品 T-t 模拟

Fig. 11 T-t history modeling based on typical samples of the NW trending fault in Luxi Block

and mineral exploration of Shandong Province, 2003)。因此,三台组应划归下一中侏罗统。其实,王先起等(Wang Xianqi et al., 1985)的研究就是这种观点。由于三台组之上为莱阳群(K_1L),因此鲁西地块不存在上侏罗统。这种现象普遍出现在华北克拉通东部晚中生代盆地,属于区域隆起阶段(Zhu Guang et al., 2008),符合岩石圈拆沉之初(Morency, et al., 2002)。岩石圈拆沉作用伴随的隆起会导致不同区域同时发生伸展和逆冲变形(Chalot-Prata et al., 2000)。鲁西 NW 走向断层可能因拆沉之初的隆升作用成为正断层,这种伴有大规模隆升的拆沉其速度较快,但地壳伸展总量有限(Kay et al., 1993),从而造成上侏罗统缺失。而在华北克拉通东部南、北缘,作为先前的薄弱带,晚侏罗世已开始了伸展(Charles et al., 2011; Zhang Bilong et al., 2011)。因此,晚侏罗世可能是华北克拉通破坏的开始(Zhu Guang et al., 2008),并且可能由南、北缘分别向中心拆沉(Li Li et al., 2015),鲁西地块 NW 走向断层由南向北活动也证明了这一点。在持续伸展的情况下,浅部脆性变形和断陷盆地的发育取决于伸展应变速率及地壳的组成和热流等(Buck, 1991)。鲁西地块没有大范围中生代盆地,应该与上述三种因素的综合作用有关。

上述讨论基于岩浆活动和盆地沉积间接推断得出,详细的关于克拉通破坏的起始时间及其深部过程和浅部响应,仍需要系统的代表伸展作用开始的构造年代学证据、物理模拟以及更全面的多学科综合研究。

8 结论

(1) 裂变径迹数据揭示 NW 走向非控盆断层可能在早中生代约 184Ma 开始活动,之后活动时间在 80~75Ma 以及新生代~61Ma 和 51~43Ma。

(2) 裂变径迹数据揭示鲁西地块 NW 走向控盆断层在晚中生代约 141Ma 和 80~75Ma 活动,以及新生代约 61Ma、49~42Ma、36~32Ma 活动,控制了盆地早白垩纪以来的沉积。

(3) 非控盆断层活动时间早、结束早,控盆断层活动晚、结束晚,总体上 NW 走向断层由早到晚断层活动由南向北迁移。

致谢: 研究得到国家自然科学基金项目资助,裂变径迹测试由中国地质大学(北京)袁万明教授完成,在此一并表示感谢。

References

- Belton D X. 2005. TASC: Theory and application of the track age spectra calculation. Melbourne: The University of Melbourne. 1~32.
- Brandon M T. 1996. Probability density plot for fission-track grain age samples. *Radiation Measurements*, 26(5): 663~676.
- Buck W R. 1991. Modes of continental lithospheric extension[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 96(B12): 20161~20178.
- Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Reviews of Geophysics*, 43: 2004RG000156.
- Chalot-Prata F, Gırbacea R. 2000. Partial delamination of continental mantle lithosphere, uplift-related crust-mantle decoupling, volcanism and basin formation: A new model for the Pliocene-Quaternary evolution of the southern East-Carpathians, Romania. *Tectonophysics*, 327: 83~107.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Zhu R X and Lin W. 2011. Metamorphic Core Complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). *Journal of Asian Earth Science*, 40: 261~278.
- De Paolo D J, Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology*, 169(1): 157~185.
- Foster D A, Gleadow A J W. 1992. The morphotectonic evolution of rift-margin mountains in central Kenya: Constraints from apatite fission track analysis. *Earth and Planetary Science Letter*, 113: 157~171.
- Feng Youliang, Zhou Haimin, Ren Jianye, Zheng Herong, Miao Deshun. 2010. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement (in Chinese with English abstract). *Sci Sin Terrae*, 40: 1356~1376.
- Green P F. 1986. On the thermo-tectonic evolution of Northern England: evidence from fission track analysis. *Geological Magazine*, 123: 493~506.
- Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W, Tingate P R. 1986. Thermal annealing of fission tracks in apatite; 1. A qualitative description. *Chemical Geology*, 59: 236~253.
- Gallagher K, Brown R P. 1997. The onshore record of passive margin evolution. *Journal of the Geological Society*, 154(3): 451~457.
- Gleadow A J W. 1981. Fission track dating methods: What are the real alternatives? *Nuclear Tracks*, 5: 3~14.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, Lovering J F. 1986. Confined fission track lengths in apatite; a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 94: 405~415.
- Han Wengong, Ji Jianqing, Wang Jinduo, Yu Jianguo, Zhang Xinyu, Yu Shaoli. 2005. Reflection seismic evidences of sinistral

- strike slip action of Tanlu fault zone in Paleocene-Early Eocene. *Progress in Natural Sciences*, 15 (11): 1383 ~ 1387 (in Chinese with English abstract).
- Hurfurd A J. 1990. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the IUUS Subcommittee on geochronology. *Chemical Geology (Isotope Geoscience)*, 80: 171 ~ 178.
- Hurfurd, A J, Green P F. 1990. The zeta age calibration of fission-track dating. *Chemical Geology (Isotope Geoscience)*, 41: 285 ~ 317.
- Kay R W, Kay S W. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177 ~ 189.
- Ketcham R A, Donelick R A, Charlson W D. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics III; Extrapolation to the geological time scales. *American Mineralogist*, 84: 1235 ~ 1255.
- Ketcham R A., Donelick, R. A., Donelick, M. B., 2003. AFTSolve: A Program for Multi-Kinetic Modeling of Apatite Fission-Track Data. *American Mineralogist*, 88(5~6): 929.
- Ketcham R A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58: 275 ~ 314.
- Lan T G, Fan H R, Hu F F, Tomkins, AG, Yang, K F, and Liu Y S. 2011. Multiple crust-mantle interactions for the destruction of the North China Craton; Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence from the Longbaoshan alkaline complex. *Lithos*, 122: 87 ~ 106.
- Lan T G, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Yang Y H, Liu Y S 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: implication for crust-mantle interaction and post-collisional magmatism. *Lithos*, 140: 183 ~ 199.
- Lei Yongliang, Gong Daohao, Wang Xianmei, Zhong Dalai, Wang Xuesong, Zhang Jin. 2008. Discussion about using different modes of apatite fission track thermochronology to constrain cooling histories of rocks: an example from the batholith in Dulong River region, West Yunnan. *Progress in Geophysics*, 23 (2): 422 ~ 432 (in Chinese with English abstract).
- Li Li and Zhong Dalai. 2006. Fission evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 457 ~ 464 (in Chinese with English abstract).
- Li Li, Zhong Dalai, Shi Xiupeng. 2007. Cenozoic uplifting/subsidence coupling between the West Shandong Rise and the Jiyang Depression, Northern China. *Acta Geologica Sinica*, 81 (9): 1215 ~ 1218 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Zhong D L, Shi X P, Gong H B, Hu Q Y and Tang Z B. 2009. Late Mesozoic-Cenozoic décollement structure and its deep geological background in western Shandong, China. *Progress in Natural Science*, 19(5): 603 ~ 613.
- Li Li, Tan Mingyou, Zhang Mingzhen, Xu Yi, Li Zhiwei, Shi Xiupen, Gong Hongbo, Tang Zhibo, Hu Qiuyuan. 2009. The Cenozoic strike-slip characteristics along the TanLu Fault Zone of the Weibei-Laizhouwan area. *Chinese Journal of Geology*, 44(3): 855 ~ 864 (in Chinese with English abstract).
- Li Li, Zhong Dalai, Yang Changchun, Shi Xiupeng, Hu Qiuyuan, Zhao Li, Sun Yuhao, Liu Hui. 2012. Extension order and its deep geological background; Evidence from Western Shandong Rise and Jiyang Depression in the Late Mesozoic-Cenozoic. *Earth Science Frontiers*, 19 (5): 255 ~ 273 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Zhong D L, Yang C C, Zhao L, Dong D W. 2013. The coupling relationship between the west Shandong rise and the Jiyang depression, China. *Journal of Earth Sciences*, 24 (4): 626 ~ 644.
- Li Li, Zhao Li, Liu Haijian, Fang Xianyun. 2015. Late Mesozoic to Cenozoic extension and strike slip structures and deep background of Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology*, 50 (2): 446 ~ 472 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Wang Jinduo, Liu Jianzhong, Yu Jianguo, Lu Haiqing, Hou Fanghui. 2005. Mesozoic Structure and Its Tectonic Setting in the Western Shandong Block. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 487 ~ 497 (in Chinese with English abstract).
- Li S Z, Zhao G C, Dai L M, Liu X, Zhou L H, Santosh M, Suo Y H. 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 64 ~ 79.
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Jin Ye. 1996.⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of Mesozoic igneous activities in western Shandong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 213 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wei, Wang Jun, Liu Fei, Ji Wenbin and Wang Qingchen. 2013. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1791 ~ 1810 (in Chinese with English abstract).
- Lin W, Faure M, Chen Y, Ji WB, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J and Wang QC. 2013. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulushan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt. Part I: Structural analyses and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 23(1): 54 ~ 77.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6: 121 ~ 142.
- Morency C, Doin M P, Dumoulin C. 2002. Convective destabilization of a thickened continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 202: 303 ~ 320.
- Nie Fengjun, Zhang Jin, Yan Zhaobin, Wang Yannan, Li Mangen, Xia Fei, Zhu Chenghua, Wang Sili, Hu Jian. 2018. Apatite Fission Track Chronology of the Weijing Granite and Denudation Event in the Northern Margin of North China During the Late Cretaceous and Implications to Their Uranium Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 92 (2): 313 ~ 329 (in Chinese with English abstract).
- Northrup C J, Royden H, Burchfiel B C. 1995. Motion of the

- Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extrusion along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23:719~722.
- O'Sullivan P B, Foster D A, Kohn B P, Gleadow A J. 1996. Multiple post orogenic denudation events: An example from the eastern Lachlan fold belt, Australia. *Geology*, 24 (6): 563 ~ 566.
- Song Mingchun, Li Hongkui. 2001. Study on Regional Geological Structural Evolution in Shandong Province. *Geology of Shandong*. 17(6):12~21(in Chinese with English abstract).
- The forthinstitute of the geological and mineral exploration of Shandong Province. 2003. Regional geology of Shandong Province. Map press of the Shandong Province, Jinan: 1~970 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, Wang Xinshe, Zeng Lingshen, Tong Ying. 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1154~1166(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianmei, Zhong Dalai, Wang Yi. 2008a. Geometry, Kinematics and Thermochronology Study of the Late Mesozoic Movement of NW-Trending Faults, Western Shandong. *Acta Geologica Sinica*, 82(9):1258~1274(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianmei, Zhong Dalai, Wang Yi. 2008b. A case of application using apatite fission track to restrict the time of brittle fault movement. *Progress in Geophysics*, 23(5): 1444~1455 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xianmei, Zhong Dalai, Li Li, Jing Zengyong, Li Song, Zhang Rongqiang. 2010. Relationship between NW faults of West Shandong and Yi Shu fault zone in Late Mesozoic and their geotectonic setting operations. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 166~190(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianqi. 1985. The Geological time of Mesozoic strata in the Mengyin Basin, Shandong. *Geological Review*, 81(6): 9~15(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinshe, Zhuang Yuxun, Xu Huifen, Xu Honglin, Ren Zhikang, Zhang Fuzhong. 1999. The implication of terminal Archean ductile shearing in continental crustal evolution of the Taishan Mountain region. *Regional Geology of China*, 18(2): 168~174(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinshe, Zhang Shangkun, Zhang Fuzhong, Yang Chonghui. 2005. Kinematic vorticities and shear types of the Qingyi ductile shear zone in Western Shandong. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(5): 423~428(in Chinese with English abstract).
- Wang Y. 2006. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: constraints from zircon (SHRIMP) and⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Terra Nova*, 18(6): 423~431.
- Willett S D. 1997. Inversion modeling of fission tracks in apatite 1: A controlled search method. *American Journal of Sciences*, 297: 939~969.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Zhu Rixiang, Zhang Guowei. 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective. *Science China: Earth Sciences*, doi: 10. 1007/s11430-014-4995-0.
- Xu Wenliang, Yang Chenghai, Yang Debin, Pei Fuping, Wang Qinghai, Ji Weiqiang. 2006. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton: constraints on the mechanism of lithospheric thinning. *Earth Science Frontiers*, 13(2):120~129 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mu Baolei, Zeng Yishan. 1989. Age and distribution of Alkaline and sub-alkaline intrusive rocks in northern China. *Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 19:93~100(in Chinese with English abstract).
- Yang Jinglin, Xu Jian, Liu Fengchen, Wang Rui and Shen Yixin. 2013. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 30(2): 145~165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bilong, Zhu Guang, Jiang Dazhi, Chen Yin, Hu Shaoqi. 2011. Evolution of the Yiwulüshan Metamorphic Core Complex and Late Jurassic extensional event in the Western Liaoning Province. *Geological Review*, 57(6): 779~798(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wengao, Chen Zhengle, Cai Linbo, Han Fengbin, Sun Yue, Wu Yu, Meng Lingtong, He Jiangtao, Ma Ji, Yang Bin. 2017. Cretaceous Uplifting-Exhumation Process of West Tianshan: Evidence from Apatite Fission Track. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 510~522(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqing, Ling Wenli, Zhang Junbo, Duan Ruichun, Ren Bangfang, Yang Hongmei. 2017. Geochemistry and Petrogenesis of the Mesozoic Volcanic Rocks from the Qingshan Group in Western Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 91(12):2697~2709(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengqi, Jiao Xiumei, Liu Shucui, Wang Shijin, Du Shengxian, Yang Enxiu, Shan Wei, Cheng Guangsuo, Zhang Shangkun, Song Zhiyong, Wang Lifa, Xu Kemin, Zhang Yijiang, Zhang Chengji, Song Mingchun. 2011. Determination Opinions on Stratigraphic Division and Correlation in Shandong Province. *Land and resources of Shandong Province*, 27(9): 1~9(in Chinese with English abstract).
- Zhao Li, Li Li. 2017. The Relationships between Normal Fault and Strike-slip Fault in Jiyang Depression. *Geological Review*, 63(1):50~60(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua. 2009. Major Transformation of Subcontinental Lithosphere beneath North China in Cenozoic-Mesozoic: Revisited. *Geological Journal of China Universities*, 15(1):1~18(in Chinese with English abstract). Zhou Zuyi, Xu Changhai, Reiners P. W., Yang Fengli, Donelick R A. 2003. Late Cretaceous-Cenozoic exhumation history of Tiantangzhai region of Dabieshan Orogen: Constraints from (U-Th)/He and fission track analysis. *Science Bulletin*, 48(6): 598~602 (in Chinese with English abstract).
- Zhu G, Wang Y S, Liu G S, Niu M L, Xie C L, Li C C. 2005.

⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27(8):1379~1398.

Zhu Guang, Hu Zhaoqi, Chen Yin, Niu Manlan, Xie Chenglong. 2008. Evolution of Early Cretaceous extensional basins in the eastern North China craton and its implication for the craton destruction. *Geological Bulletin of China*, 27(10):1594~1604 (in Chinese with English abstract).

Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Science*, doi: 10.1007/s11430-012-4516-y.

参 考 文 献

- 冯有良,周海民,任建业,郑和荣,苗顺德. 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应. *中国科学:地球科学*, 40(10):1356~1376.
- 韩文功,季建清,王金铎,于建国,张新钰,余绍立. 2005. 郑庐断裂带古新世一早始新世左旋走滑活动的反射地震证据. *自然科学进展*, 15(11):1383~1387.
- 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.
- 李理,钟大赉. 2006. 泰山新生代抬升的裂变径迹证据. *岩石学报*, 22(2):457~464.
- 李理,钟大赉,时秀朋. 2007. 鲁西隆起和济阳拗陷新生代隆坳耦合关系. *地质学报*, 81(9):1215~1218.
- 李理,谭明友,张明振,胥颐,李志伟,时秀朋,宫红波,唐智博,胡秋媛. 2009. 淮北—莱州湾凹陷郑庐断裂带新生代走滑特征. *地质科学*, 44(3): 855~864.
- 李理,钟大赉,杨长春,时秀朋,胡秋媛,赵利,孙钰皓,刘卉. 2012. 伸展作用序列及其深部背景:以晚中生代以来鲁西隆起和济阳拗陷为例. *地学前缘*, 19(5): 255~273.
- 李理,赵利,刘海剑,房贤云. 2015. 渤海湾盆地晚中生代—新生代伸展和走滑构造及深部背景. *地质科学*, 50(2):446~472.
- 李三忠,王金铎,刘建忠,于建国,吕海青,侯方辉. 2005. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景. *地质学报*, 79(4):487~497.
- 林景仟,谭东娟,金焯. 1996. 鲁西地区中生代火成活动的³⁹Ar/⁴⁰Ar年龄. *岩石矿物学杂志*, 15(3):213~220.
- 林伟,王军,刘飞,冀文斌,王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. *岩石学报*, 29(5):1791~1810.
- 聂逢君,张进,严兆彬,王艳楠,李满根,夏菲,朱成华,王思力,胡鉴. 2018. 卫境岩体磷灰石裂变径迹年代学与华北北缘晚白垩世剥露事件及铀成矿. *地质学报*, 92(2): 313~329.
- 山东省第四地质矿产勘查院. 2003. 山东省区域地质. 济南山东省地图出版社: 1~970.
- 宋明春,李洪奎. 2001. 山东省区域地质构造演化探讨. *山东地质*, 17(6):12~21,38.
- 王涛,郑亚东,张进江,王新社,曾令森,童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. *地质通报*, 26(9): 1154~1166.
- 王先起. 1985. 山东蒙阴盆地中生界各组的时代. *地质论评*, 81(6): 9~15.
- 王先美,钟大赉,王毅. 2008a. 鲁西北西向断裂系晚中生代活动的几何学、运动学及年代学研究. *地质学报*, 82(9):1258~1274.
- 王先美,钟大赉,王毅. 2008b. 利用磷灰石裂变径迹约束晚中生代伸展活动的时限. *地球物理学进展*, 23(5):1444~1455.
- 王先美,钟大赉,李理,丁增勇,李松,张荣强. 2010. 鲁西北西向断裂系与沂沭断裂带晚中生代演化关系及其动力学背景探讨. *地学前缘*, 17(3):166~190.
- 王新社,庄育勋,徐惠芬,徐洪林,任志康,张富中. 1999. 泰山地区太古宙末韧性剪切作用在陆壳演化中的意义. *中国区域地质*, 18(2):168~174.
- 王新社,张尚坤,张富中,杨崇辉. 2005. 鲁西青邑韧性剪切带运动学调度及剪切作用类型. *地球学报*, 26(5):423~428.
- 吴福元,徐义刚,朱日祥,张国伟. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. *中国科学:地球科学*, 44(11):2358~2372.
- 许文良,杨承海,杨德彬,裴福萍,王清海,纪伟强. 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩~对岩石圈减薄机制的制约. *地学前缘*, 13(2): 120~129.
- 阎国翰,牟保磊,曾贻善. 1989. 中国北方碱性和偏碱性侵入岩的时空分布及大地构造意义. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 19:93~100.
- 杨景林,徐健,刘凤臣,王睿,沈一新. 2013. 山东平邑盆地固城组和卞桥组的介形类动物群. *微体古生物学报*, 30(2): 145~165.
- 张必龙,朱光,姜大志,陈印,胡召齐. 2011. 辽西医巫闾山变质核杂岩的形成过程与晚侏罗世伸展事件. *地质论评*, 57(6): 779~798.
- 张文高,陈正乐,蔡琳博,韩凤彬,孙岳,吴玉,孟令通,何江涛,马骥,杨斌. 2017. 西天山白垩纪隆升—剥露的裂变径迹证据. *地质学报*, 91(3): 510~522.
- 张永清,凌文黎,张军波,段瑞春,任邦方,杨红梅. 2017. 山东西部中生代青山群火山岩的地球化学特征及其岩石成因. *地质学报*, 91(12):2697~2709.
- 张增奇,焦秀美,刘书才,王世进,杜圣贤,杨恩秀,单伟,程光锁,张尚坤,宋志勇,王立法,许克民,张义江,张成基,宋明春. 2011. 山东省地层划分对比厘定意见. *山东国土资源*, 27(9): 1~9.
- 周新华. 2009. 华北中~新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向—兼评“岩石圈减薄”和“克拉通破坏”. *高校地质学报*, 15(1):1~18.
- 周祖翼,许长海,Reiners, P. W, 杨凤丽, Donelick R A. 2003. 大别山天堂寨地区晚白垩世以来剥露历史的(U-Th)/He和裂变径迹分析证据. *科学通报*, 48(6): 598~602.
- 赵利,李理. 2017. 济阳拗陷内正断层与平移断层关系. *地质论评*, 63(1):50~60. 朱光,胡召齐,陈印,牛漫兰,谢成龙. 2008. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地的发育过程及其对克拉通破坏的指示. *地质通报*, 27(10):1594~1604.
- 朱日祥,徐义刚,朱光,张宏福,夏群科,郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学:地球科学*, 42(8):1135~1159.

Characteristics of NW-Trending Faults and Evidence of Fission Track in the Luxi Block

LI Li^{1, 2)}, ZHONG Dailai³⁾, CHEN Xiafei^{1, 2)}, CHEN Yan^{1, 2)}

1) School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, 266580;

2) Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, 266071;

3) Institute of the Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029

Abstract

Unlike the North China Craton, the eastern part of which commonly contains NE-trending faults, the Luxi Block hosts one group of well-developed NW-trending faults with obvious geological features, including non-basin-controlled faults and basin-controlled faults. The former is located in the south end of the Luxi Block, with relatively large dipping, and cuts through the Paleozoic and underlying strata. Ductile shear zone occurs in the lower Archaean footwall, with faulting fragments indicating multiple activities. The latter located in the north of the non-basin-controlled faults, except the Mengshan fault, has underdeveloped ductile shearing zone and relatively flat dip, which controls the sedimentation since the Mesozoic. Apatite/zircon fission track analysis show that there existed some differences in activity of the NW-trending faults. The apparent ages of apatite fission track for the samples from hanging wall and footwall are 67 ± 5 Ma and 35 ± 2 Ma, respectively, and the track histogram shows that the samples were not subject to thermal disturbances during the cooling process. The activity time of the faults is restrained using the average track length-age (or banana diagram), single grain peak age, track age spectrum pattern and thermal history inversion simulation. The results show that the non-basin-controlled faults might start activity in the Early Jurassic of about 184Ma, and continued to be active in the Late Cretaceous 80~75Ma and the Cenozoic ca. 61Ma and 51~43Ma, and might cease after 43Ma. The basin-controlled faults started active relatively late, probably in Early Cretaceous ca. 141Ma, Late Cretaceous 80~75Ma, and was active in about 61Ma, 49~42Ma and 36~32Ma during the Cenozoic period. In general, the NW-trending faults developed chronologically from south to north. The non-basin-controlled faults were active early but ceased early; while the basin-controlled faults were active late but ceased later and controlled northward development of the depression. Changing of regional tectonic stress field and strike-slipping of the Tan-Lu fault zone since the Mesozoic was the fundamental causes for the evolution divergence of two types of NW faults. Deep part of the faults was controlled by continent-content collision of North China and Yangtze plates in the Late Triassic, as well as direction and speed change of paleo-Pacific plate subduction. The Indosinian transition from compression to extension, coupled with the sinistral strike-slipping of the Tanlu fault zone, gave the top priority to the development of NW-trending faults near the southern margin of the North China Craton. Because the large dip angle failed to control the development of the basin, the faults extended relatively toward north end, forming basin-controlled faults. After extension in the Early Cretaceous (ca. 141Ma), the faults finally gradually took a shape at end of Late Cretaceous (ca. 80~75Ma) and in the Cenozoic. The generally northward migration of the NW-trending faults suggests that destruction of the North China Craton may initiate in the Early Jurassic or Late Jurassic and delaminated gradually from south to north.

Key words: NW-trending faults; evolution; fission track; Meso-Cenozoic; Luxi Block