

沂沭断裂带晚白垩世—早古新世左行走滑的 低温年代学约束

王先美¹⁾, 钟大赉¹⁾, 张进江²⁾, 季建清²⁾, 王雪松³⁾

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

2) 北京大学地球与空间科学学院, 100871

3) 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 北京, 100083

内容提要:沂沭断裂带晚白垩世地层中保留大量的左行压剪的几何学与运动证据, 左行活动时限为晚白垩世—古近纪。取自 4 条主断层的不同部位断层泥及断层碎裂岩的磷灰石裂变径迹年龄, 远小于周围未发生变形的地层年龄, 构造活动使得断层带物质的磷灰石裂变径迹完全退火。通过相关软件对不同磷灰石裂变径迹数据模拟, 显示在 70~60 Ma 前及约 10 Ma 开始出现快速抬升(冷却)。综合分析认为, 沂沭断裂在 70~60 Ma 经历过较大规模左行挤压活动。约 10 Ma 的快速抬升事件, 具有区域性, 可能与青藏高原约 10 Ma 的快速伸展有关。

关键词:沂沭断裂带; 磷灰石裂变径迹; 左行走滑; 晚白垩世—早古新世; 冷却历史

郯庐断裂在山东省境内的部分又称为沂沭断裂。沂沭断裂是由 4 个主断层组成的一个断裂带, 自东往西分别为: 昌邑-大店断裂(F_1)、安丘-莒县断裂(F_2)、沂水-汤头断裂(F_3)、郯部-葛沟断裂(F_4)。沂沭断裂带总体呈“两堑夹一垒”形态(图 1)。

前人对郯庐断裂的研究多集中在南段(徐嘉炜等, 1995; 王小凤等, 2000; 朱光等, 2004; 王勇生等, 2006)。沂沭断裂带多为白垩纪地层所覆盖, 露头不好, 而且野外露头区保留下来的构造变形主要是脆性变形, 地震研究又偏重于新构造活动。与南段对比, 针对沂沭断裂带的研究工作相对较少。尤其是晚中生代以来, 沂沭断裂带对周边盆地形成、油气聚集等有重要的控制作用, 但缺乏相关的基础地质数据支持。沂沭断裂带北部与渤海湾盆地邻接, 是认识盆地演化历史的一个窗口。前人曾利用不同手段, 对沂沭断裂活动进行时间约束(陈文寄等, 1988; 万京林等, 1997; 王小凤等, 2000), 但由于不同点做出的年龄差别较大, 而无法将断裂活动的时间与活动方式进行配套。

本文应用大量的断层几何学、运动学论证, 结合磷灰石裂变径迹定年, 并利用相关软件反演, 来认识沂沭断裂带内叠加在白垩纪地层上的断层性质及构

造活动的时限, 为揭示断裂活动性质及其对周边盆地的制约机制提供基础资料。

1 几何学与运动学指示

沂沭断裂大多交切白垩纪地层, 少部分切错古生代和元古宙地层。白垩纪地层中保留有指示曾发生过压剪活动的记录, 仅在局部地区可以找到曾经历过伸展的运动学标记。对沂沭断裂的 4 条主断层的不同地域调查时, 大多数挤压构造的几何学与运动学指示为左行走滑。

1.1 郯部-葛沟断裂

郯部-葛沟断裂西侧为鲁西隆起区, 东侧出露主要为白垩纪地层, 部分地段被第三纪玄武岩覆盖, 出露较差。在安丘市大盛镇西, 郯部-葛沟断裂出露相对较好, 测量主断面产状为 38° 走向, 近直立。断层带内发育有主要来自白垩纪火山碎屑岩地层的碎裂岩, 且呈强烈挤压扁豆体状排列, 厚度约几十公分。个别地点碎裂岩粒径较大, 呈锯齿状或书斜状, 显然经历过强烈挤压变形。断裂的西侧为花岗岩碎裂岩, 并被多方位的节理分割, 碎裂花岗岩厚度大于 10 m(图 2 中 B—B' 剖面)。在靠近主断层的白垩纪火山碎屑岩地层中, 发育一组间隔约 20~50 cm 不等的次级断层, 呈平行排列, 测得其断面产状 330°

注: 本文为中国科学院知识创新工程重大项目(编号 KZCX-SW-18-04)资助成果。

收稿日期: 2006-09-18; 改回日期: 2007-01-16; 责任编辑: 周健。

作者简介: 王先美, 男, 1967 年生。在读博士, 构造地质学专业。通讯地址: 100029, 中国科学院地质与地球物理研究所; 电话: 13522657306; Email: wangxianmei@mail.iggcas.ac.cn。

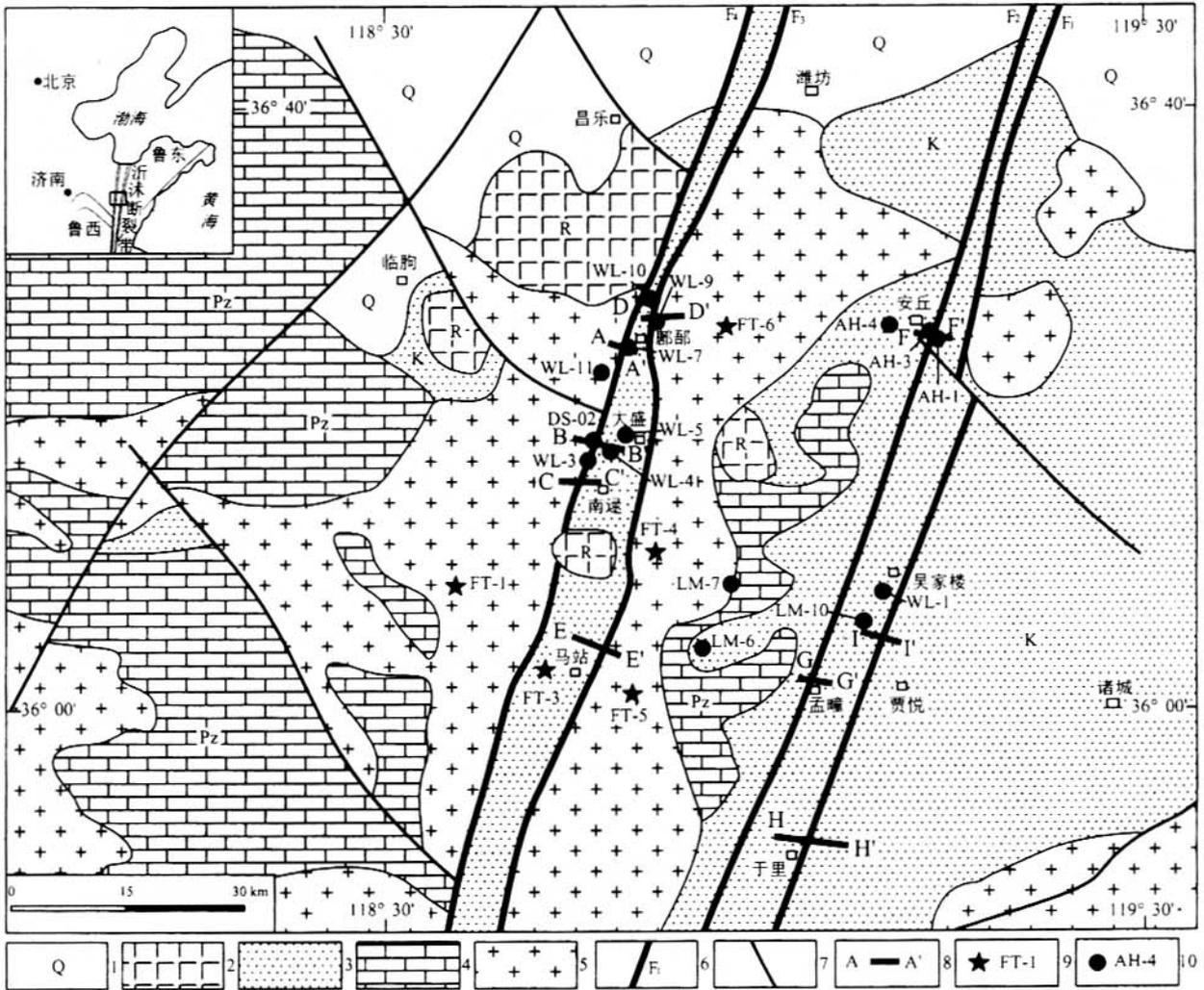


图 1 剖面及裂变径迹采样点位置图

Fig. 1 Location of geological profiles and fission track samples

1—第四纪覆盖区;2—第三纪火山岩;3—白垩纪碎屑岩;4—古生代灰岩;5—元古宙花岗岩;6—主断层;7—其他断层;8—剖面位置及编号;
9—数据已发表的采样点及编号;10—磷灰石采样点及编号

1—Quaternary; 2—Cenozoic lava; 3—Cretaceous; 4—Paleozoic; 5—Proterozoic granite; 6—main fault; 7—other fault

8—geological profile and serial number; 9—published sample location and serial number; 10—location of apatite sample and serial number

∠82°。当沿着郟部-葛沟断裂走向,面向北东方向正面观察这些次级断层时,次级断层剖面上呈近直立展布,并将靠近主断层的火山凝灰岩沿垂直方向错移,剖面上表现出右行,次级断层切错的北侧凝灰岩往上运动(图 2 中标“LOC”位置)。同时,在次级断面上,分布向北东方向侧伏的擦痕,侧伏角 45°。由此,可以推断该组次级断层组为左行走滑性质。由几何学分析,该组次级断层是 38°走向的主断层左行运动的产物。郟部-葛沟断裂在此考察区域,显示出曾经历左行挤压运动。

在潍坊市昌乐县郟部镇的西侧,郟部-葛沟断裂出露也较好,且延伸很远,测得一处主断面产状为

110°∠80°,断层带内发育有断层泥。在靠近主断层的西侧是火山凝灰岩地层,厚度约 20 m;再往西见到古生代灰岩地层,产状为 270°∠71°,在古生代地层与火山凝灰岩地层间充填有近 10 m 厚的碎裂岩。主断层的东侧是一套安山质火山集块岩,再往东为一套向上逐渐变细的火山碎屑岩地层,地层向东倾斜,越往东部产状越缓(图 2 中 A—A'剖面)。在主断面的东侧发育有次一级断层,断面产状 130°∠77°,断层上盘卷入有下盘地层。主断层面上发育有大量指示左行运动的小褶皱,同时显示出上盘是往西逆冲的。因此,推断此处郟部-葛沟断裂经历过左行挤压,而由几何学分析,东侧次级断层正是主断

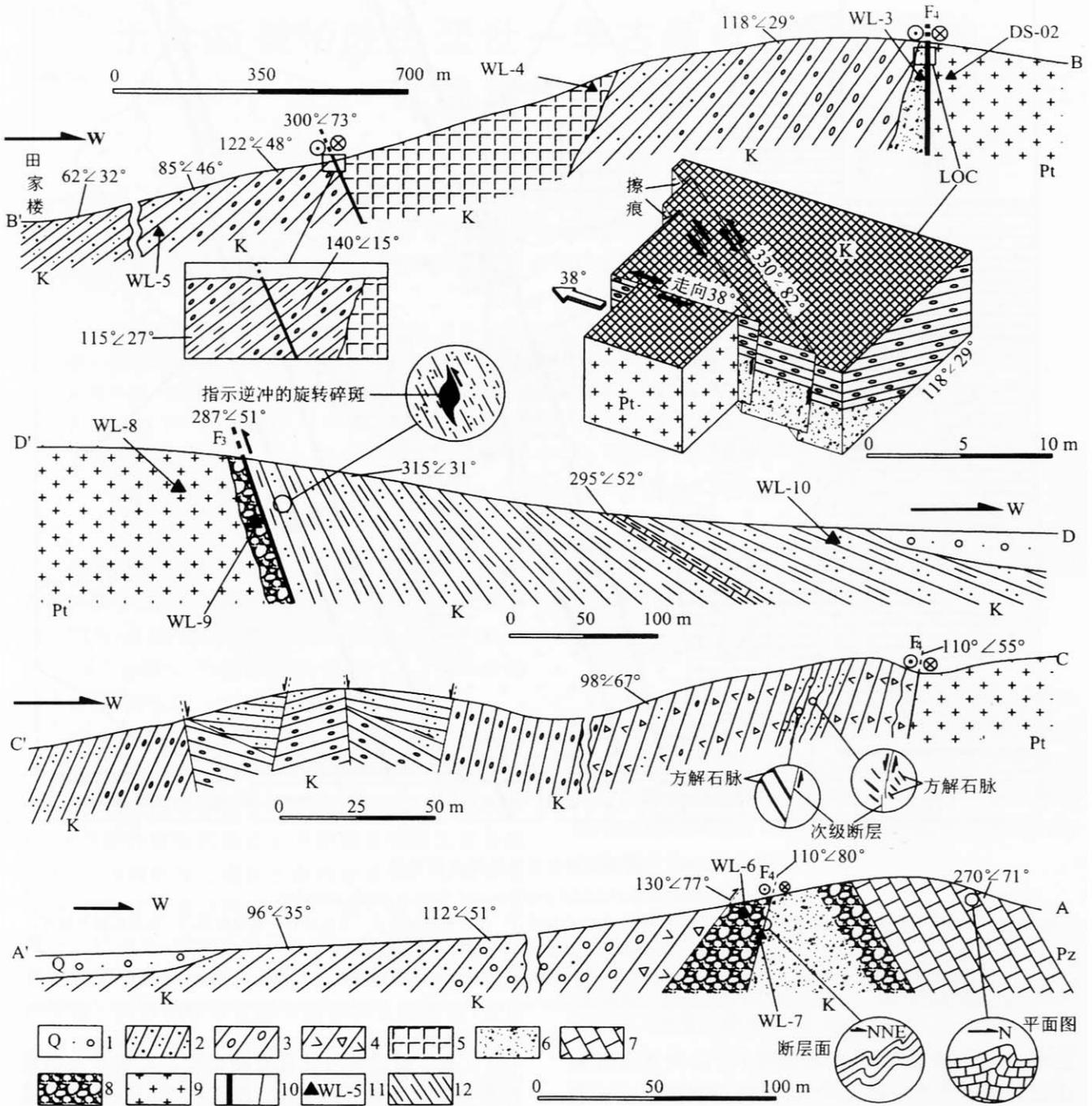


图2 沂沭断裂带分支断裂剖面图之一

Fig.2 Selected embranchment profiles of Yi-Shu fault zone

- 1—第四纪覆盖区; 2—砂岩; 3—砾岩; 4—安山岩; 5—玄武岩; 6—凝灰岩; 7—灰岩; 8—碎裂岩; 9—花岗岩;
 10—断层; 11—裂变径迹采样点及编号; 12—泥岩
 1—Quaternary; 2—sandstone; 3—conglomerate; 4—andesite; 5—basalt; 6—tuff; 7—limestone; 8—clastic rock;
 9—granite; 10—fault; 11—location of fission track sample; 12—mudstone

层左行派生的。

从安丘市邵山镇往西去的公路南侧,可以清晰地看到花岗岩与白垩纪火山岩地层的接触边界——

郟部-葛沟断裂。此处的郟部-葛沟断裂是由多个次级断层组成的一个断裂带,主断面产状 $110^{\circ}\angle 55^{\circ}$ 。发育在白垩纪地层中的不同次级断面上分布有向南

倾斜(倾角约 37°)的左行擦痕,以及向北倾斜(倾角约 60°)指示右行的擦痕,野外判断左行擦痕被右行擦痕覆盖,前者发生要早于后者。其中一处与主断面平行的次级断面东侧地层(火山岩)中发育有一系列走向约 335°(近直立)张节理,并充填有方解石脉;而在另一处与主断面平行的次级断层两侧,分布北西走向(约 335°)一系列张裂隙,并充填有方解石脉(图 2 中 C—C'剖面)。由次级断层派生的张节理、张裂隙推断,郟部—葛沟断裂经历过左行走滑活动。

1.2 沂水-汤头断裂

沂水-汤头断裂东侧为汞丹山凸起区,西侧大多

与白垩纪地层接触。野外考察时发现,沂水-汤头断裂多处被晚期断层错移,因此沿断层走向连续性差。在郟部镇附近的沂水-汤头断裂出露较好,断面多往西高角度倾斜,实测一处主断面产状为 287°∠51°,在主断面附近发育有断层泥。主断层的东侧是元古宙花岗岩,在靠近主断层的花岗岩已经碎裂岩化,碎裂岩的厚度约 5~10 m,个别处碎裂岩带稍微厚些(图 2 中 D—D'剖面)。主断层西侧即断层上盘是白垩纪地层(含泥质粉砂岩),主断层附近的白垩纪地层已分辨不出地层层理与层面,被置换成与主断面同产状的面理。从郟部镇附近沂水-汤头断裂周围岩石的变形分析,断层经历过强烈挤压。另从碎

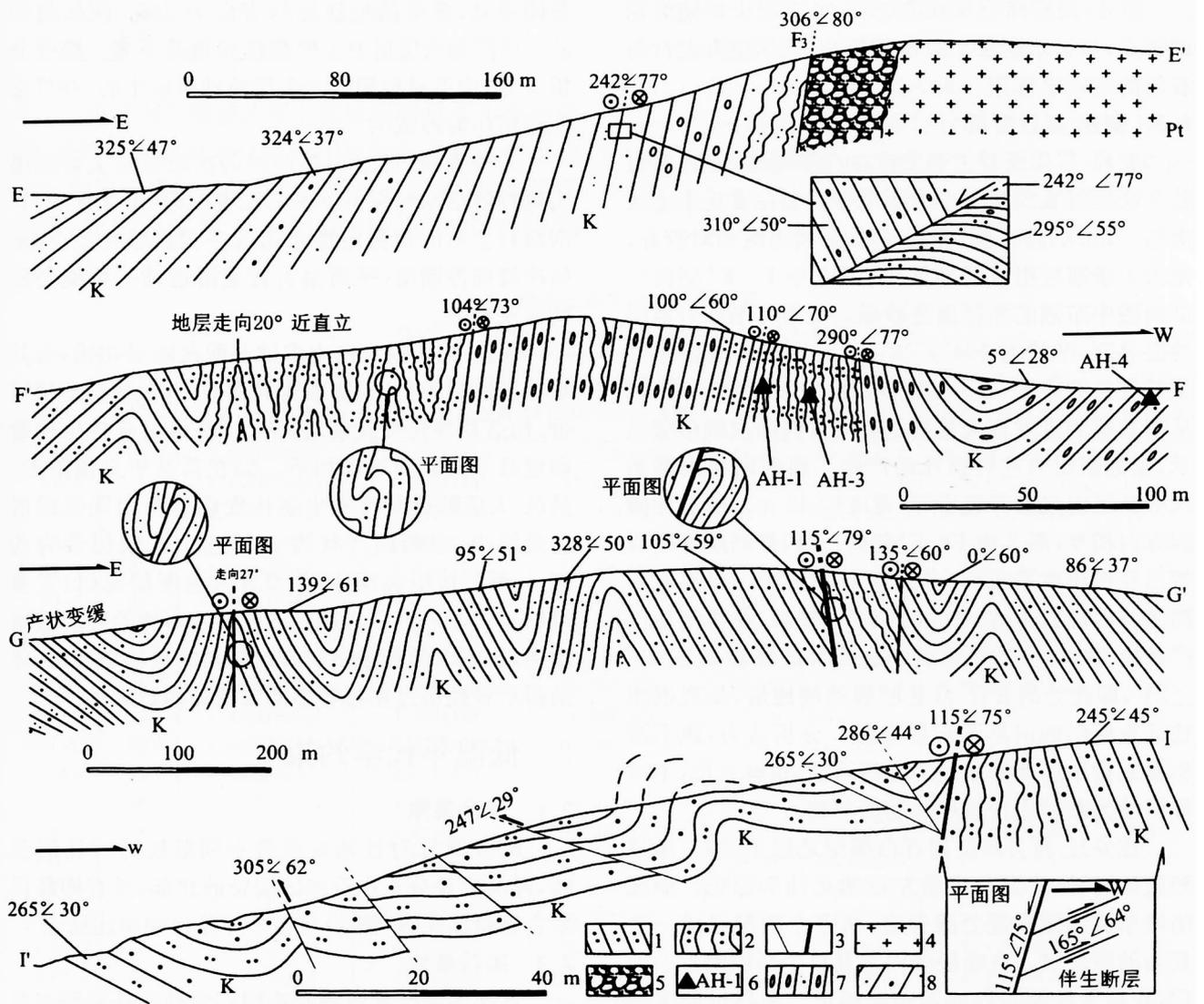


图 3 沂沭断裂带分支断裂剖面图之二

Fig. 3 Selected embranchment profiles of Yi-Shu fault zone

1—砂岩;2—断层带;3—断层;4—花岗岩;5—碎裂岩;6—裂变径迹采样点及编号;7—砾岩;8—砂岩

1—Sandstone; 2—fault zone; 3—fault; 4—granite; 5—clastic rock; 6—location of fission track sample and number; 7—conglomerate; 8—sandstone

裂岩带内碎裂岩呈现的“S—C”组构,以及个别处指示运动方向的旋转碎斑分析,断层上盘即西侧白垩纪地层是往东侧逆冲的。

沂水-汤头断裂在沂水县马站镇附近出露较好,主断面产状略有变化,测得一处产状为 $306^{\circ}/80^{\circ}$ 。主断层东侧为花岗岩,在靠近断层附近的花岗岩已经变成碎裂岩;主断层的西侧是白垩纪地层,地层产状向西逐渐边缓,同时岩性往西由砾岩渐变成细砂岩。此处主断面的西侧也发育有约10 m左右碎裂带,主要来自白垩纪地层,呈挤压扁豆状排列(图3中E—E'剖面)。主断面上多处保留有两期运动学指示的擦痕,分别代表断层曾经历过左行活动及右行活动。

沂水-汤头断裂在其他地段,也表现出多期活动的特点,多显示断层上盘往东逆冲,并保留有左行与右行的运动学标记。

1.3 安丘-莒县断裂

安丘-莒县断裂主要发育在白垩纪地层中,多由数条断裂组成的断层束或断层带。如在安丘市市区南约8 km的路东侧,安丘-莒县断裂出露相对较好,是由多条断层组成的断层带(图3中F—F'剖面)。剖面图中东侧的断层是砂砾岩地层与细砂岩地层的层界面,产状为 $104^{\circ}/73^{\circ}$,断面的东侧地层主要是紫红色细砂岩,已经强烈褶皱,宽度大于100 m。从褶皱揉皱带发育大量指示运动方向的次级褶皱显示,东侧断层为左行挤压的产物。西侧断层由两条次级断层组成的碎裂岩带(宽度约40 m),断层面倾斜方向相反(图3中F—F'剖面)。西侧断层碎裂岩带已经挤压成扁豆体,并发育有断层泥。碎裂岩带西侧与砂砾岩-砾岩地层(白垩系)接触,往西侧地层产状由 $290^{\circ}/77^{\circ}$ 渐变成 $5^{\circ}/28^{\circ}$,最终稳定在 $53^{\circ}/24^{\circ}$,即此处的安丘-莒县断裂西侧地层,呈现枢纽往北东倾斜的向形不对称褶皱。分析认为,该不对称褶皱指示了此处断层为左行运动,也就是说,不对称褶皱为断层左行挤压活动的产物。

在安丘-莒县断裂附近白垩纪地层中,多呈现强烈挤压褶皱,并发育大量左行的运动学标记。如在诸城市孟疃镇附近公路旁边,由多个断层组成一个复杂的断层带。在断层带内部及单个断层附近的地层,发育大量的左行的运动学标记。在靠近断层带东侧的白垩纪地层,同样发育有指示左行运动的牵引不对称褶皱(图3中G—G'剖面)。

1.4 昌邑-大店断裂

昌邑-大店断裂是沂沭断裂带最东边的一条断

层,主要切割的是白垩纪地层。该断裂往北略呈扇状撒开,是由多个断层组成的,往南断层带逐渐收敛。

在诸城市孟疃镇—贾悦镇公路北部,见有该断裂束的一个断层。该断层发育在白垩纪地层中,断面产状为 $115^{\circ}/75^{\circ}$ 。断层东侧地层多发育褶皱变形,并被多组向西倾斜的低角度断层切割(图3中I—I'剖面)。尤其是夹持在相对能干性地层中间的非能干性地层,出现了指示逆冲的不对称褶皱,显示出早期为挤压逆冲性质;断面西侧地层倾角较大(往西倾斜),在一产状为 $284^{\circ}/54^{\circ}$ 的层面上,分布有一组向南倾斜的擦痕(倾角约 30°)。值得一提的是,在断层面的东侧出现一个经强烈挤压变形的不对称紧闭褶皱,该褶皱枢纽倾伏方向为 246° ,倾伏角约 37° ,与西侧地层层面上的擦痕倾角差不多。综合分析认为,该不对称褶皱是断层活动所派生的,并且是左行挤压时形成的。

野外发现,此处向西倾斜的次级断层上盘地层出现伸展活动时保留下来的拖曳标记(图3中I—I'剖面);主断面西侧地层也出现一组产状 $165^{\circ}/64^{\circ}$ 的次级脆性断层(平面呈右行走滑运动),可能与后期伸展有关。

昌邑-大店断裂向南多被北西向断层切错,与其余3条断裂相比,发育较宽的构造带(包括构造揉皱带、构造片理化带及断层泥带),多保留有挤压构造印记及不同方向运动指示。如在莒县于里镇附近,昌邑-大店断裂发育在中生代安山岩与白垩纪碎屑岩地层中,主断面产状为 $109^{\circ}/77^{\circ}$ 。断层带为约30 m厚的挤压扁豆体,并发育大量断层泥(位置参见图1中H—H')。在靠近断裂带西侧的碎屑岩地层中,出现大量记录不同方向活动的运动学标记,分别指示曾经历过左行等不同方向的构造运动。

2 低温年代学约束

2.1 样品采集

野外有针对性地对横跨不同断层进行连续采样,样品主要分布在沂沭断裂带的北部,所有样品都来自新鲜露头区(图1)。各个样品详细描述见表1。

2.2 实验条件

本次实验全部流程在中国石油勘探开发研究院完成,采用外探测器法。流程如下:用事先配置好的环氧树脂涂在载玻片上,将已经筛选好的纯净磷灰石均匀摊开,然后再加热凝固。经粗抛光、细抛光后,在 26°C 室温下放入5 N浓度 HNO_3 溶液中蚀刻

表 1 磷灰石裂变径迹样品描述

Table 1 Description of original apatite fission track samples

样品编号	地理坐标	海拔高度(m)	地层	岩性描述	备注
AH-1	36°21'04,119°12'06	119		断层泥	
AH-3	36°21'04,119°12'06	119		断层碎裂岩	
AH-4	36°21'55,119°10'50	97	白垩系	砂砾岩	围岩
WL-1	36°08'22,119°12'41	121	白垩系	粗砂岩	
WL-3	36°17'49,118°47'02	198		断层碎裂岩	
WL-4	36°18'02,118°47'32	196	白垩系	火山岩	围岩
WL-5	36°18'04,118°48'29	171	白垩系	砂砾岩	围岩
WL-7	36°26'40,118°50'21	150		断层泥	
WL-9	36°25'58,118°51'54	146		花岗碎裂岩	
WL-10	36°27'14,118°52'00	159	白垩系	砂砾岩	围岩
WL-11	36°24'24,118°47'25	178	元古宇	正长岩	围岩
LM-6	36°03'36,118°56'31	186	白垩系	火山岩	围岩
LM-7	36°08'42,118°57'52	193	震旦系	中生代侵入体	围岩
LM-10	36°01'49,119°07'31	151	白垩系	砂砾岩	围岩
DS-02	36°17'49,118°47'02	198		花岗碎裂岩	

23 s。将蚀刻后载玻片盖上低铀白云母作为外探测器,连同标准铀玻璃(CN5)一起封装并送入中子活化反应堆中照射。照射样品放置一段时间后,取下云母,在室温下置入 40% 的 HF 溶液中蚀刻 24

min。将载玻片和对应的揭示出诱发径迹的云母一同粘固在载玻片上,在装配有 AUTOSCAN 系统的显微镜下分别统计自发径迹、诱发径迹个数,并测量封闭径迹长度、Dpar 值等。

2.3 实验结果与初步分析

本次实验样品定年采用 Zeta (ζ) 常数校准法 (Hurford, 1990): 利用多个年龄标准样品 (Durango 和 Fish Canyon) 进行校准。最终得到 Zeta 常数为 452.1 ± 6.8 。样品实验结果见表 2, 封闭径迹长度直方图见图 4。由表 2 可见, 15 个磷灰石裂变径迹年龄分布在 63.3~137 Ma。其中来自断层带的磷灰石裂变径迹年龄明显偏年轻, 平均为 67.3 Ma; 来自周围未变形地层的磷灰石裂变径迹年龄要老些, 平均为 101 Ma (包括已发表的 5 个数据)。图 4 显示出所选样品多属于混合型 and 单峰型 (Gleadow et al., 1986), 平均封闭径迹长度分布在 11.98~13.82 μm 。来自断层带样品平均封闭径迹长度约 12.69 μm , 而围岩磷灰石封闭径迹平均长度为 12.90 μm (包括已发表的磷灰石封闭径迹数据; 若不包括已发

表 2 磷灰石裂变径迹测试结果

Table 2 Testing results of apatite fission track

样品编号	统计颗数 n	标准径迹密度 ($\times 10^6/\text{cm}^2$) (条数)	自发径迹密度 ($\times 10^5/\text{cm}^2$) (条数)	诱发径迹密度 ($\times 10^5/\text{cm}^2$) (条数)	检验概率 (%)	中值年龄 ($\pm 1\sigma$) (Ma)	平均径迹长度 ($\mu\text{m} \pm 1\sigma$) (条数)	铀含量 ($\times 10^{-6}$)
AH-1	26	1.4808(7033)	2.665(141)	12.722(673)	32.90	69.8 \pm 6.6	12.24 \pm 2.10(14)	11.79
AH-3	20	1.4694(7033)	3.728(173)	19.483(904)	99.87	63.3 \pm 5.4	12.15 \pm 1.96(114)	18.62
AH-4	20	1.4580(7033)	3.641(280)	9.818(755)	99.63	121.0 \pm 9.0	12.61 \pm 2.40(120)	7.58
WL-1	20	1.2628(6792)	2.649(289)	11.228(1225)	99.98	67.0 \pm 4.6	12.94 \pm 1.66(104)	11.63
WL-3	20	1.2756(6792)	2.870(283)	13.022(1284)	100	63.3 \pm 4.3	12.37 \pm 1.88(108)	15.63
WL-4	25	1.2901(6792)	4.355(162)	13.172(490)	99.95	95.7 \pm 8.9	12.24 \pm 1.72(118)	10.48
WL-5	20	1.3038(6792)	3.007(203)	12.504(844)	100	70.5 \pm 5.7	13.31 \pm 1.68(130)	11.28
WL-7	25	1.3311(6792)	2.766(151)	11.429(624)	100	72.4 \pm 6.7	12.95 \pm 1.77(112)	11.39
WL-9	20	1.3584(6792)	6.761(382)	29.487(1666)	98.63	70.0 \pm 4.2	13.82 \pm 1.25(115)	33.08
WL-10	21	1.3721(6792)	1.504(139)	4.340(401)	99.98	107.0 \pm 11.0	12.57 \pm 2.04(104)	3.78
WL-11	20	1.3857(6792)	6.372(288)	16.991(768)	100	116.0 \pm 8.0	12.39 \pm 1.44(37)	16.92
LM-6	20	1.6028(7372)	4.032(125)	10.516(326)	100	137.0 \pm 15.0	12.51 \pm 1.95(103)	8.65
LM-7	20	1.5845(7372)	4.732(150)	18.517(587)	100	90.9 \pm 8.5	12.78 \pm 1.66(65)	11.17
LM-10	21	1.0919(5562)	4.833(347)	11.379(817)	9.17	104.0 \pm 7.0	11.98 \pm 2.07(108)	10.82
DS-02	20	1.4403(6792)	5.769(480)	28.642(2383)	99.99	65.2 \pm 3.5	12.38 \pm 1.86(121)	25.22
* FT-1	20	1.874(9380)	12.386(2393)	54.229(10477)	17	96 \pm 3	13.46 \pm 1.58(124)	33.48
* FT-3	23	1.875(9380)	3.475(573)	14.384(2372)	85	102 \pm 5	13.97 \pm 2.07(113)	9.3
* FT-4	20	1.876(9380)	6.961(955)	34.016(4667)	27	86 \pm 3	12.95 \pm 2.20(112)	20.2
* FT-5	23	1.877(9380)	8.9(979)	37.155(4087)	65	101 \pm 4	13.48 \pm 1.85(139)	24.34
* FT-6	21	1.877(9380)	15.273(2514)	75.322(12398)	0	86 \pm 3	13.48 \pm 1.85(151)	47.14

注: 编号前标有“*”的样品数据已另文发表。

表的数据, 平均径迹长度为 12.55 μm)。尽管断层带与围岩样品的磷灰石裂变径迹年龄有较大出入,

但它们的封闭径迹长度差别不大, 这可能预示断层带样品与围岩样品后期有着相似的演化历程。下面

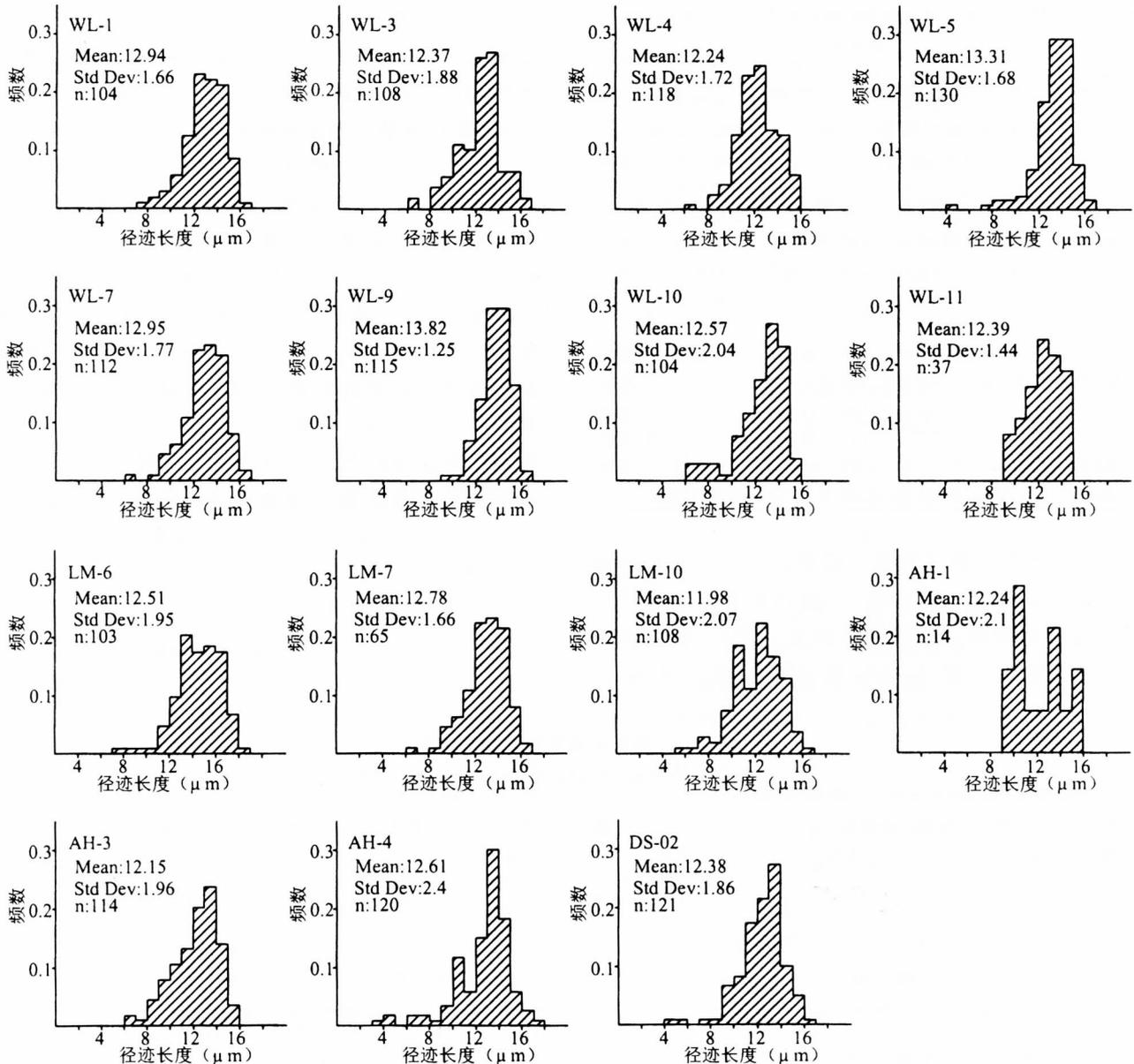


图4 封闭径迹长度分布直方图

Fig. 4 Histograms of confined fission track length

Mean—平均封闭径迹长度; Std Dev—标准偏差; n—封闭径迹个数

Mean—Mean length of confined track; Std Dev—standard deviation; n—number of confined track

按照前面描述的地质剖面,对各个断层带内采集的磷灰石裂变径迹年龄结果进行逐一描述。

WL-7 位于郟部-葛沟断裂的 A—A' 剖面(图1),是主断面附近发育的紫红色断层泥,磷灰石裂变径迹年龄为 72.4 ± 6.7 Ma。从平均封闭径迹长度 $12.95 \pm 1.77 \mu\text{m}$ 分析,该断层泥已接近未受干扰的基岩型(Gleadow et al., 1986)。因此 72.4 ± 6.7 Ma 基本代表了快速通过部分退火带的年龄,而没有经历后期热时间的扰动。也就是说,此处的郟部-

葛沟断裂在 72.4 ± 6.7 Ma 之后,没有再活动或活动量不大。

WL-9 采集于郟部镇东侧的沂水-汤头断裂(图1)内的花岗岩碎裂岩,磷灰石裂变径迹年龄结果为 70.0 ± 4.2 Ma。比较特殊的是,该样品封闭径迹达到 $13.82 \pm 1.25 \mu\text{m}$,接近未受干扰的火山岩型(Gleadow et al., 1986),显示出该样品极快的抬升速度, 70.0 ± 4.2 Ma 代表了快速通过部分退火带的冷却年龄。

DS-02 与 WL-3 采集于大盛镇西郟部-葛沟断裂(图 1),WL-3 是来自白垩纪地层的碎裂岩,DS-02 采自此处断层西侧的花岗岩碎裂带内。裂变径迹年龄显示出 DS-02 为 65.2 ± 3.5 Ma, WL-3 为 63.3 ± 4.3 Ma。但这两个样品的平均封闭径迹长度略小些(DS-02 为 $12.38 \pm 1.86 \mu\text{m}$ 、WL-3 为 $12.37 \pm 1.88 \mu\text{m}$),都属于混合型(Gleadow et al., 1986)。因此,这两个样品可能经历了后期的热扰动,其年龄可能包含的意义更为复杂些。

AH-1 和 AH-3 分别采集于安丘-莒县断裂带(图 1)内的断层泥及断层碎裂岩。AH-1 和 AH-3 磷灰石裂变径迹年龄分别为 69.8 ± 6.6 Ma、 63.3 ± 5.4 Ma,平均封闭径迹长度分别为 $12.24 \pm 2.10 \mu\text{m}$ 、 $12.15 \pm 1.96 \mu\text{m}$,二者均属于混合型(Gleadow et al., 1986)。因此,这两个样品可能经历了后期的热扰动,它们的年龄含义,有待于进一步明确。

WL-1 样品来自安丘-莒县断裂与昌邑-大店断裂之间的白垩纪地层,采样点附近的白垩系中发育大量北西走向的重晶石脉,而 WL-1 正是被重晶石浸染过的砂岩。WL-1 裂变径迹年龄 67.0 ± 4.6 Ma,平均封闭径迹长度 $12.94 \pm 1.66 \mu\text{m}$ 。已经接近未受扰动型基岩型(Gleadow et al., 1986),基本可以代表较快速通过部分退火带后冷却的年龄。

2.4 冷却史反演

为了更深入地了解样品冷却史演化历程,兹应用 HeFTy 软件(Ketcham, 2005),对前述部分磷灰石裂变径迹数据分别进行冷却史反演。这里,用于模拟封闭径迹长度变化与温度、时间演化关系的模式采用 Ketcham 等(1999)的“多动力学模式”(multi-kinetic model);动力学参数(kinetic parameter)选用 Dpar 值;原始平均封闭径迹长度由所测的动力学参数 Dpar 值来确定。反演需要输入的数据包括:磷灰石单颗粒自发和诱发径迹、封闭径迹长度、Dpar 值、封闭径迹与磷灰石晶体 c-轴夹角等。冷却史模拟结果见图 5。

由图 5 可见,采自断裂带周围的未变形样品 WL-4、WL-10、LM-7, AH-4 分别在约 110 Ma 和 90~80 Ma 之前,存在较快速的抬升事件;WL-5 及 LM-10 样品在 70~60 Ma 前,存在一次快速抬升。多次模拟发现, WL-4、WL-10、LM-7 样品在 70~60 Ma 前,也存在快速的抬升现象,只是与早期抬升相比,幅度显得小了些。

断层泥 WL-7 与断层碎裂岩 WL-3、DS-02、WL-9、AH-3,以及被重晶石浸染过的 WL-1 模拟结

果显示,在 70~60 Ma 前都出现快速冷却的记录。不同的是, WL-9、WL-1 与其他断层带样品相比,存在更大的冷却速率。显示出样品所在地质体存在着差异性冷却历史。

3 分析与讨论

在没有断层分割、岩浆侵位以及其他包括地下热液等热源因素干扰的情况下,当对一个地质体进行连续的磷灰石采样时,其裂变径迹年龄应该是连续的或渐变的。断层活动且存在垂直方向运动分量时,两盘岩石的裂变径迹年龄会出现差异,垂直方向运动分量越大,这种差异性就越明显。前人(da Nóbrega et al., 2005)也曾利用断层两盘的磷灰石裂变径迹数据,成功地确定了断层的活动历史。但直接对断层带物质进行地温定年以确定其活动时间,在国内外报道较少。原因是磷灰石容易退火,受到未知干扰因素很多,再加上构造活动的多期性,所得出的数据缺乏准确的地质意义。

如果横跨断层在两盘及断层带分别采样,对比它们的年龄等相关数据,还是能够说明些问题的。可能出现结果之一:两盘及断层带物质的年龄数据接近。原因是由于断层长期不活动或活动时间在磷灰石完全退火带以前,此时它们有着相似的冷却历史;或者处于部分退火带(或以上),但由于断层活动幅度小,产生的温度还不足以使磷灰石部分退火,此时它们的冷却史会略有差异。可能出现结果之二:两盘及断层带物质的热年代学出现差异性。对后一种情况可能包括:一是两盘年龄数据及冷却史接近,两盘以剪切走滑为主,而与断层带物质有差别(一般年龄小些);二是两盘及断层带物质的年龄有明显差别,两盘有明显的垂直方向运动分量,而断层带物质的年龄要明显小些。这两种情况都表示断层带物质经历了构造热运动,已经将磷灰石部分乃至完全退火。如果所采集的样品处于断层活动的较浅部位时,其裂变径迹年龄可能与周围岩石差别不明显。

基于上述考虑,针对沂沭断裂带 4 个主干断层的断层带及其两侧未变形地层进行采样,磷灰石裂变径迹测试结果显示,断层带物质(碎裂岩及断层泥)的年龄普遍年轻于周围地层(包括已经发表的部分磷灰石裂变径迹年龄数据,见表 2)。这说明断层曾经历过构造活动,所产生的热已经使磷灰石发生退火,有别于区域性的构造抬升与沉降。所有野外采集断层带内的样品,均显示断层切割了白垩纪地层。

比较特殊的是,位于图 1B—B'剖面附近 WL-5

样品与断层带磷灰石裂变径迹年龄接近。WL-5 样品位置与郟部-葛沟断裂之间,发育有多条次级断层(图 2),断层面上发育有垂直及其他方向多组擦痕。在对该样品进行冷却史模拟时发现,WL-5 在 70~60 Ma 之前,快速抬升到 60°C 古地温面附近。显然,WL-5 在 70~60 Ma 前的快速冷却,与区域性构造活动密切相关。

WL-1 样品年龄也明显小于采自附近白垩纪地层 LM-10 的年龄,WL-1 附近沿着北西向断层侵位的重晶石脉,是区域构造活动的结果,这说明重晶石形成时的温度足以使磷灰石完全退火。由 WL-1 样品平均封闭径迹长度及冷却模拟结果分析,67.0±4.6 Ma 基本代表了通过部分退火带冷却的时间。WL-9 样品与采自附近白垩纪地层的 WL-10 样品,以及汞丹山凸起的 FT-6 年龄对比,明显偏小。对二者的模拟结果显示出(图 5),在 70~60 Ma 前存在快速抬升,而 WL-9 的冷却速率明显大于 WL-1 样品。

WL-7(断层泥)样品的平均封闭径迹长度近 13.0 μm,与其他采自断层带的样品比较,年龄稍偏大些。该样品共统计了 25 颗单颗粒年龄,其中有 3 颗年龄超过 100 Ma,明显高于其他颗粒,分析在断层泥采样过程中混入了围岩。删除 3 个年龄大的颗粒后,该样品年龄为 69.9±6.7 Ma,冷却史模拟显示了在 70~60 Ma 前有过快速抬升。

其他断层带样品(WL-3、DS-02、AH-1、AH-3)的裂变径迹年龄也都明显小于周围地层的样品,所不同的是它们的平均封闭径迹长度集中在 12.15~2.38 μm,从封闭径迹长度分布的直方图(图 4)可见,属于混合型(Gleadow et al., 1986),还不敢肯定是否经历过后期断层活动而部分退火。对它们进行冷却史模拟时,也显示了在 70~60 Ma 前有过较快速抬升。断层带物质很容易受到断层活动的影响,其冷却史的演化路径是构造抬升(冷却)和热扰动双重因素作用下的结果。从冷却史模拟(图 5)显示的结果可以看出,在 70~10 Ma 期间,断层带与周围地层磷灰石的冷却历史是很相近的;长时间滞留在 60~70°C 的古地温面上,说明没有较大规模的区域构造活动,同时也说明断层带样品自 70~60 Ma 始,没有经历或经历的热扰动小到还不足以记录下来。野外在采集这些断层带样品时,多注意断层活动的多期性因素,即只在保留单一几何学、运动学标志的断层带有针对性地采样。结合模拟结果推断,这 4 个平均封闭径迹偏小的样品年龄,基本可以代

表了最后一次热事件的时间。

由模拟图 5 还可以发现,所有样品在约 10 Ma 出现快速抬升记录。笔者在模拟大量采自鲁西地区磷灰石数据时,也出现类似的规律。Hu 等(2006a)在大别山造山带获得的磷灰石数据,以及吴中海等(2003)在燕山及邻区的磷灰石数据,也显示出类似的快速抬升冷却历史。因此,10 Ma 以来的快速冷却是区域性的构造演化事件。促使快速抬升(或剥蚀)的动力学背景,可能来自青藏高原在 10 Ma 左右的快速伸展,也就是说,中国的东部与青藏高原在中新世以来的演化存在时间上的耦合关系(钟大赉等,2001)。也说明山东省现今呈现的地貌,是约 10 Ma 以来形成的。

鲁西及鲁东地区晚白垩世以来的地层分布截然不同:鲁东隆起地区普遍发育晚白垩世地层,基本缺失古近系,只是在汞丹山凸起北部局部地区有分布;而鲁西隆起区以沂沭断裂带为界,在北西向断洼内普遍充填有古近系(据 1:20 万地质图总结)。鲁东隆起区缺失古近系可能有两个方面原因:一是没有接受沉积,即鲁东当时已隆升;二是发育有古近系,后来构造抬升剥蚀掉了。笔者倾向于前者,虽然在局部可能发育有古近系,但当时的鲁东以整体隆升为主。在汞丹山凸起安丘市附近古近系(朱壁店组)中,发现许多震积岩地层(田洪水等,2005,2006),说明当时沂沭断裂带断层活动很频繁。

晚白垩世—古新世时期以郟庐断裂带为中心,周边地体均表现出快速冷却记录,是一次区域性构造活动的结果。野外所见到的沂沭断裂带已发生变形的最新地层是上白垩统王氏群(左行记录),推断断层活动发生在晚白垩世之后。以沂沭断裂带为界,东西两侧古近纪地层分布明显不同;野外看到大量中新统火山岩(1:20 万地质图上标注最老 K-Ar 年龄为 31.3 Ma,并划归为中新统牛山群)覆盖在郟部-葛沟断裂及沂水-汤头断裂上,且未发生变形,推断构造活动发生在中新世之前。

采自鲁西地区大量未发表的磷灰石数据,其模拟结果多显示在 70~60 Ma 前存在一次快速冷却记录。前人获得的磷灰石数据也显示,中央造山带以及大别山附近在晚白垩世—古新世是一个区域性抬升冷却阶段(Hu et al., 2006b; Grimmer et al., 2002);燕山造山带也有这一时期的构造活动(吴中海等,2003)。

值得关注的是,前人(韩文功等,2005)通过对郟庐断裂带在渤海南部莱州湾附近地段获得的地球物

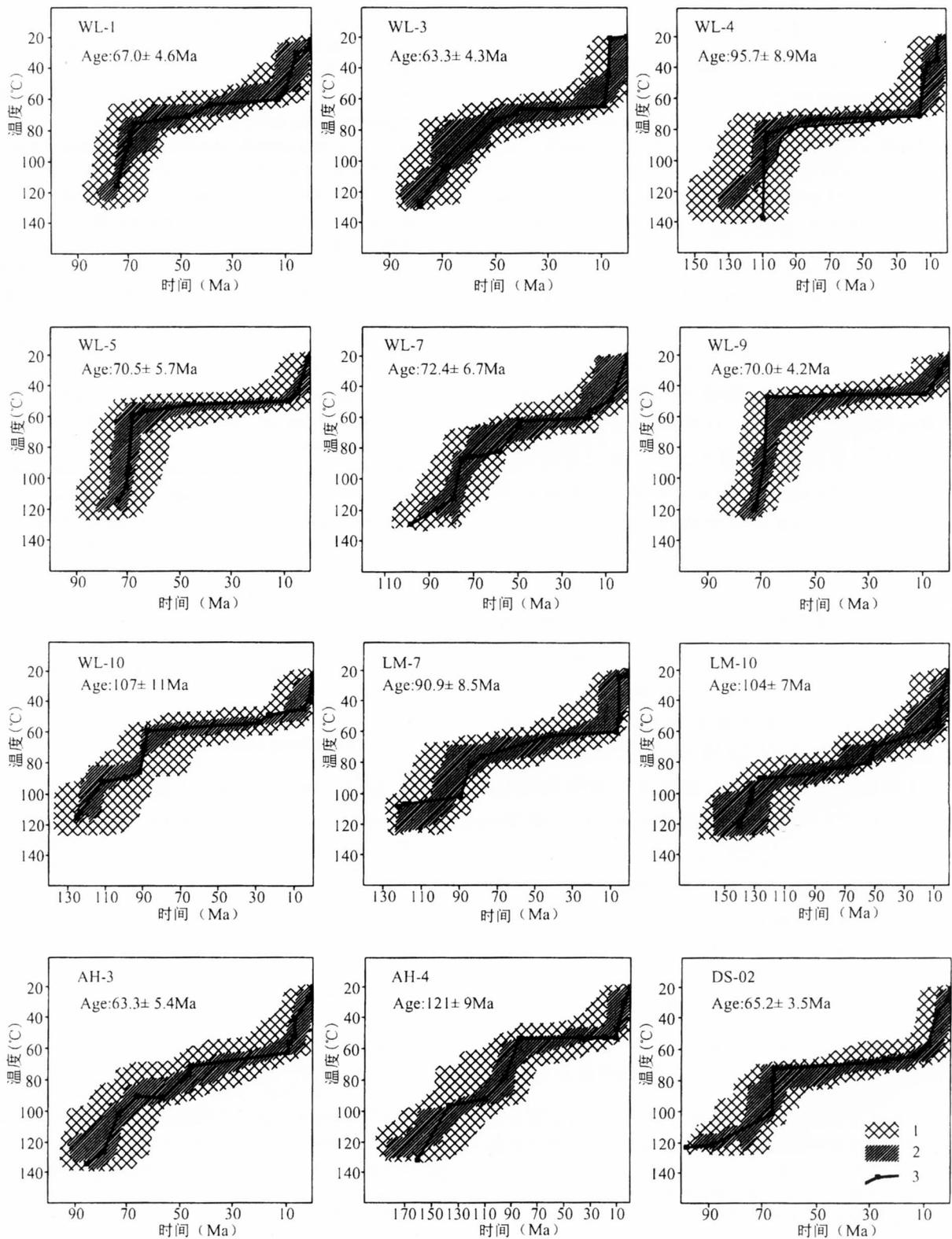


图 5 磷灰石裂变径迹冷却史模拟图

Fig. 5 Reverse modeling of fission track data for cooling history

1—可接受路径; 2—较好路径; 3—最优拟合路径

1—Acceptable paths; 2—good paths; 3—best-fitting path

理剖面解释认为, 在古新世—早始新世时期发生过左行活动; 宗国洪等(1999)也持有相同的观点。万

京林等(1997)利用断层带物质进行磷灰石裂变径迹定年,以确定断层活动时间,认为沂水-汤头断裂最后一次活动时间为76~56 Ma;郟郟-葛沟断裂在62 Ma有过一次强烈活动。

4 结论

正如前人(Lu et al., 1983; Lin et al., 1998)推断的沂沭断裂在白垩纪—第三纪经历左行走滑,笔者依据野外大量几何学、运动学证据以及地层的分布特点的观察与总结,认为沂沭断裂在晚白垩世—古近纪经历过较大规模的左行挤压活动。

通过野外有针对性地在沂沭断裂带中保留有左行标记的不同断层采集,获得的磷灰石裂变径迹年龄数据与未变形围岩对比,认为构造活动产生的热量可以使断层带物质的磷灰石退火。通过对断层带物质磷灰石裂变径迹年代分析,并结合不同样品的冷却史演化模拟,推断沂沭断裂在70~60 Ma经历过一次左行挤压活动,主应力应该是北西—南东方向。

特别地,沂沭断裂带及未发表的鲁西大部分地区的磷灰石裂变径迹数据模拟发现(王先美, 2006),在约10 Ma,存在一次快速剥蚀记录。这可能与中新世(10 Ma左右)以来青藏高原快速伸展相关,而鲁西及沂沭断裂带现今呈现的地貌,可能是在10 Ma以来形成的。换言之,中国的东部与青藏高原的演化,在约10 Ma以来是准同时的(钟大赉等, 2001)。

致谢:中国科学院地质与地球物理研究所胡圣标研究员、中国地震局地质研究所万景林研究员提供许多可行性建议,在此深表谢意!

参 考 文 献

- 陈文寄, 计凤桔, 李齐, 李大明, 王庆隆, 王昕. 1988. 沂沭断裂带断层泥中K-Ar、FT和TL体系年代学含义的初步研究. *地震地质*, 10(4):191~198.
- 韩文功, 季建清, 王金铎, 于建国, 张新钰, 余绍立. 2005. 郟郟断裂带古新世—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):1383~1388.
- 山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京:地质出版社.
- 田洪水, 王金光, 吕明英, 王立法. 2005. 山东安丘古近纪冲积层中的地震记录. *沉积学报*, 23(3):447~453.
- 田洪水, 张增奇. 2006. 山东安丘地区郟郟断裂带古近纪冲积物震积岩序列. *地质科学*, 41(2):208~216.
- 万京林, 王庆隆. 1997. 郟郟断裂活动年龄及热历史的裂变径迹研究. *地球学报*, 18:74~76.
- 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 陈宣华, 董树文, 张青, 等. 2000. 郟郟断裂带. 北京:地质出版社.
- 王先美. 2006. 鲁西北西向断裂系晚中生代以来演化及其与沂沭断裂带关系. 中国科学院地质与地球物理研究所博士论文.
- 王勇生, 朱光, 宋传中, 刘国生, 向必伟, 李长城, 谢成龙. 2006. 大别山东端郟郟断裂带由走滑向伸展运动转换的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学记录. *地质科学*, 41(2):242~255.
- 吴中海, 吴珍汉. 2003. 燕山及邻区晚白垩世以来山脉隆升历史的低温热年代学证据. *地质学报*, 77(3):399~406.
- 徐嘉炜, 朱光, 吕培基, 郑学信, 孙世群. 1995. 郟郟断裂带平移年代学研究的进展. *安徽地质*, 5(1):1~12.
- 钟大赉, 丁林, 季建清, 张进江, 刘福田, 刘建华, 闫晓蔚. 2001. 中国西部新生代岩石圈汇聚和东部岩石圈离散的耦合关系与古环境格局演变的探讨. *第四纪研究*, 21(4):303~312.
- 朱光, 刘国生, Dunlap W J, Teysier C, 王勇生, 牛漫兰. 2004. 郟郟断裂带同造山走滑运动的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学证据. *科学通报*, 49(2):190~198.
- 宗国洪, 肖焕钦, 李常保等. 1999. 济阳拗陷构造演化及其大地构造意义. *高校地质学报*, 5(3):275~282.
- Bureau Geology and Mineral Resources of Shandong Province. 1991. *Regional Geology of Shandong Province*. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Wenji, Ji Fengju, Li Qi, Li Daming, Wang Qinglong, Wang Xin. 1988. Geochronological implication of K-Ar, FT and TL systems of fault gouge from Yi-Shu Fault Zone. *Seismology and Geology*, 10(4):191~198 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, Ratschbacher L, Hacker B R, Blythe A E, Wagner G A, Wu Q, Liu S, Dong S. 2002. Cretaceous-Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China). *Tectonophysics*, 359:225~253.
- Han Wengong, Ji Jianqing, Wang Jinduo, Yu Jianguo, Zhang Xinyu, Yu Shaoli. 2005. Seismic reflection evidence for sinistral strike-slip movement of Tan-Lu Fault Zone from the Paleocene to the early Eocene. *Progress in Natural Science*, 15(11):1383~1388 (in Chinese).
- Hurford A J. 1990. Standardization of fission-track dating calibration: recommendation by the Fission Track Working Group of the IUGS Subcommittee on Geochronology. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 80(2): 171~178.
- Hu Shengbiao, Kohn Barry P, Raza Asaf, Wang Jiyang, Gleadow Andrew J W. 2006a. Cretaceous and Cenozoic cooling history across the ultrahigh pressure Tongbai Dabie belt, central China, from apatite fission-track thermochronology. *Tectonophysics*, 420:409~429.
- Hu Shengbiao, Raza Asaf, Min Kyoungwon, Kohn Barry P, Reiners Peter W, Ketcham Richard A, Wang Jiyang, Gleadow Andrew J W. 2006b. 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*(article in press).
- Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics III: Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 84:1235~1255.
- Ketcham R A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy*

- and Geochemistry, 58:275~314.
- Lin Aiming, Miyata Takao, Wan Tianfeng. 1998. Tectonic characteristics of the central segment of the Tancheng-Lujiang fault zone, Shandong Peninsula, eastern China. *Tectonophysics*, 293:85~104.
- Lu Huaifu, Yu Hongnian, Ding Youwen, Zhang Qinglong. 1983. Changing stress field in the middle segment of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *Tectonophysics*, 98:253~270.
- da Nóbrega M A, Sá J M, Bezerra F H R, Hadler Neto J C, Iunesb P J, Guedes S, Tello Saenz C A, Hackspacher P C, Lima-Filho F P. 2005. The use of apatite fission track thermochronology to constrain fault movements and sedimentary basin evolution in northeastern Brazil. *Radiation Measurements*, 39: 627~633.
- Tian Hongshui, Wang Jinguang, Lü Mingying, Wang Lifa. 2005. Seismic records in Paleocene alluvial layers in Anqiu, Shandong. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3):447~453 (in Chinese with English abstract).
- Tian Hongshui, Zhang Zengqi. 2006. Seismite succession of the Paleocene alluvium along the Tancheng-Lujiang Fault Zone in Anqiu area, Shandong. *Chinese Journal of Geology*, 41(2):208~216 (in Chinese with English abstract).
- Wan Jinglin, Wang Qinglong. 1997. Fission track analysis on the active ages and thermal histories of Tancheng-Lujiang Fault. *Acta Geoscientia Sinica*, 18:74~76 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng, Li Zhongjian, Chen Bailin, Chen Xuanhua, Dong Shuwen, Zhang Qing, et al. 2000. On Tan-Lu Fault Zone. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Wang Yongsheng, Zhu Guang, Song Chuanzhong, Liu Guosheng, Xiang Biwei, Li Changcheng, Xie Chenglong. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology records of transition from strike-slip to extension in the Tan-Lu Fault Zone on eastern thermal of the Dabie Mountains. *Chinese Journal of Geology*, 41(2):242~255 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Wu Zhenhan. 2003. Low-temperature thermochronological analysis of the uplift history of the Yanshan Mountain and its neighboring area. *Acta Geologica Sinica*, 77(3):399~406 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiawei, Zhu Guang, Lü Peiji, Zheng Xuexin, Sun Shiqun. 1995. Progress in studies on strike-slip chronology of the Tan-Lu Fault Zone. *Geology of Anhui*, 5(1):1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai, Ding Lin, Ji Jianqing, Zhang Jinjiang, Liu Futian, Liu Jianhua, Yan Xiaowei. 2001. Coupling of the Lithospheric convergence of west China and dispersion of east China in Cenozoic: link with paleoenvironmental changes. *Quaternary Sciences*, 21(4):303~312 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Liu Guosheng, Dunlap W J, Teyssier C, Wang Yongsheng, Niu Manlan. 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar geochronological constraints on syn-orogenic strike-slip movement of the Tan-Lu Fault Zone. *Chinese Sci. Bull.*, 49(2):190~198 (in Chinese).
- Zong Guohong, Xiao Huanqin, Li Changbao, Shi Yangshen, Wang Liangshu. 1999. Evolution of Jiyang depression and its tectonic implications. *Geological Journal of China Universities*, 5(3): 275~282 (in Chinese with English abstract).

Low-Temperature Thermochronological Constraints on Sinistral Strike-Slip Movement of the Yi-Shu Fault Zone between the Late Cretaceous and Early Paleogene

WANG Xianmei¹⁾, ZHONG Dalai¹⁾, ZHANG Jinjiang²⁾, JI Jianqing²⁾, WANG Xuesong³⁾

1) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*

2) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871*

3) *Central Laboratory of Geological Sciences, Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, Beijing, 100083*

Abstract

Many geometric and kinematic evidences show that the Yi-Shu Fault Zone had experienced compressive sinistral strike-slipping movement between the late Cretaceous and early Tertiary. Fission track ages of samples, including fault gouge and cataclastic rock, collected from 4 faults of the Yi-Shu Fault Zone are much younger than un-deformed rocks collected around the faults, because fission track had experienced total annealing during the movement of the faults. Reverse modeling of fission track data with correlative software show that all samples had experienced fast cooling episodes before 70~60 Ma and since about 10 Ma. Analyzing all information, a conclusion can be drawn that the time of large-scale sinistral strike-slip movement was in 70~60 Ma. The regional fast uplift episode of about 10 Ma maybe relate to fast extension of the Tibetan Plateau at the same time.

Key words: Yi-Shu Fault Zone; apatite fission track; sinistral strike-slip; late Cretaceous-early Paleogene; cooling history