

李建星, 刘池洋, 岳乐平, 等. 吕梁山新生代隆升的裂变径迹证据及其隆升机制探讨[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 960–972.

Li Jianxing, Liu Chixang, Yue Leping, et al. Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift of the Lüliang Mountains and a discussion on the uplift mechanism[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 960–972(in Chinese with English abstract).

## 吕梁山新生代隆升的裂变径迹证据 及其隆升机制探讨

李建星<sup>1,2</sup> 刘池洋<sup>1</sup> 岳乐平<sup>1</sup> 王建强<sup>3</sup>

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

3. 浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

**摘要:** 从中生代大沉积盆地的一部分到现今南北向巨型山系且不同时代地质体平面上共存是吕梁山差异隆升、剥蚀的结果。为研究吕梁山隆升过程, 在山体北、中、南地貌及地层突变部位进行了详细野外调查和基于磷灰石裂变径迹的热年代学研究。区域剥蚀厚度差异及“径迹年龄–高程”关系都表明地壳均衡隆升并非吕梁山隆升主导机制, 受控于逆冲断裂的东–西向差异剥蚀及裂变径迹退火的空间变化规律共同证实南北向断裂的双向逆冲才是吕梁山差异隆升的动因。依据山体不同部位的裂变径迹年龄, 可将吕梁山新生代隆升过程细分为(58±3)Ma、(40±3)Ma、(30±3)Ma、(23±3)Ma和(10±3)Ma五个阶段; 吕梁山新生代隆升起始于(58±3)Ma; 此后, 宁武断裂于(40±3)Ma启动, 开启了差异隆升的序幕并奠定了吕梁山北段东部之主体格局; 西部晋西挠褶带与吕梁断隆的差异剥蚀形成时间各不相同, 北部不晚于(30±3)Ma, 中段主要为(23±3)Ma, 南段于(10±3)Ma得到进一步加强并形成明显的地势差。

**关键词:** 吕梁山; 新生代; 隆升; 隆升机制; 裂变径迹

中图分类号: P542<sup>+.1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2015)04–0960–13

## Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift of the Lüliang Mountains and a discussion on the uplift mechanism

LI Jian-xing<sup>1,2</sup>, LIU Chi-xang<sup>1</sup>, YUE Le-ping<sup>1</sup>, WANG Jian-qiang<sup>3</sup>

(1. Department of Geological Sciences, Northwestern University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources; Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Engineering Investigation Institute of Zhejiang, Ningbo 315012, Zhejiang, China)

**Abstract:** From part of huge sedimentary basin in Mesozoic to the present NS-trending gigantic mountains composed of geological bodies of various geological ages, there exists the product of uplift of Lüliang Mountains of different stages. Detailed field investigation and thermal chronologic study were carried out at the mutation positions of geomorphology and strata in north, middle

收稿日期: 2015-01-28; 改回日期: 2015-04-07

基金项目: 中国地质调查局“青年地质英才”及国土资源部公益性行业科研专项经费(201311126)、国家自然科学基金(41002052、41072136、90814005)联合资助。

作者简介: 李建星, 男, 1977年生, 博士, 高级工程师, 主要从区域地质及新构造运动研究; E-mail: ljianxing2005@163.com。

and south sections of the mountains. The relationship of “age–depth” in apatite fission track and different erosion thicknesses in different parts of the mountains suggests that isostatic uplift was not responsible for the uplift of the Lüliang Mountains. EW-trending uneven erosion controlled by the thrust fault and distribution of annealing zone witnessed the fact that bilateral thrusts of NS-trending fault constituted the main uplift mechanism. According to the apatite fission track age from different parts of the Lüliang Mountains, the uplift can be subdivided into five stages, i.e., (58±3) Ma, (40±3) Ma, (30±3) Ma, (23±3) Ma and (10±3) Ma. The initial uplift originated from (58±3) Ma, then Ningwu fault began to form and resulted in the differential uplift pattern in the eastern part of North Lüliang Mountains. The differential erosion between Jinxi fault–fold belt and Lüliang Mountains block formed in different stages, the north was formed not later than (30±3) Ma, the middle was formed at (23±3) Ma, and the south was strengthened at (10±3) Ma.

**Key words:** Lüliang Mountains; Cenozoic; uplift mechanism; fission track

**About the first Author:** LI Jian-xing, male, born in 1977, engineer, engages mainly in the study of Quaternary geology; E-mail: ljianxing2005@163.com.

## 1 引言

吕梁山位于华北克拉通中部,东临山西新生代地堑系,西接鄂尔多斯中生界残留盆地。故对吕梁山隆升时限及其演化过程的研究意义重大。以往研究表明吕梁山隆升较晚,在中生代早—中期仍是大鄂尔多斯沉积盆地的一部分<sup>[1]</sup>,后经中生代晚期—新生代多期次阶段性隆升才成为山<sup>[1-3]</sup>。以中生代沉积盆地为参照系,现今南—北走向断裂控制下的西、中、东地层明显反差(组成及形成时代)表明其隆升剥蚀具有明显的空间差异性,且断裂活动是差异隆升的内在动因,但以往工作对其区域差异性研究不足<sup>[2,3]</sup>;山体热年代学研究虽然将隆升过程分解为缓慢隆升(100~(21±2)Ma)、加速隆升((21±2)Ma~8 Ma)和强烈隆升(8 Ma以来)三个阶段,但有限的的数据不足以进行空间差异性研究,更无从探讨其隆升机制。山前沉积盆地砾石层分布、组成、属性及时代研究约束了吕梁山与周缘地区地势差的形成时限<sup>[3]</sup>,但其不能用于重建更早期的地壳热演化史。此外,注意到离石断裂两侧物质组成、构造变形以及地球物理特征的明显差异,多数学者将其作为鄂尔多斯盆地与吕梁断隆的分界(二者均为吕梁山组成部分)并探讨了其性质及早期演化历史<sup>[4-9]</sup>,鲜有人提及其新生代演化历史及其在吕梁山差异隆升剥蚀的作用。

特有的物理、化学性质及在岩石中的普遍存在等特征决定了磷灰石是裂变径迹研究的首选矿物<sup>[10]</sup>,尤其是在研究浅部地壳隆升时间、速率等研究方面。对于地壳均衡隆升而言,磷灰石裂变径迹年

龄与山体海拔为正相关关系<sup>[11,12]</sup>。然而,与断裂相关或断裂活动主导的山体隆升往往会打破这种规律,并形成新的“深度—年龄”关系<sup>[13-16]</sup>。因此,裂变径迹定年也常用于研究与断裂相关的山体隆升事件<sup>[13-15,17-19]</sup>,并在昆仑<sup>[20,21]</sup>、阿尔金<sup>[22]</sup>、祁连<sup>[16]</sup>、六盘山<sup>[14]</sup>、贺兰山<sup>[15]</sup>等取得重要进展。但断裂活动引起退火范围往往有限,叠加而非彻底改变早期区域地热演化史,这既增加了热历史研究的难度<sup>[13,14,23]</sup>,也使客观、全面恢复区域隆升剥蚀史成为可能。因此,野外调查和区域裂变径迹退火特征变化分析相结合是科学有效的山体隆升研究方法之一<sup>[13-15]</sup>。为揭示吕梁山隆升过程的时空差异性,本研究选择吕梁山北、中、南三个东西向剖面,在剥蚀厚度突变部位开展详细野外调查基础上,结合磷灰石裂变径迹研究试图恢复其新生代隆升过程,并探讨其隆升机制。

## 2 地质背景

吕梁山为一近南北向巨型山系,北起管岑山,南至龙门山,绵延逾400 km。根据物质组成及变质、变形差异,可细分为晋西挠褶带、吕梁断隆和宁武向斜及交城单斜等次级构造单元(图1~2)。地貌上的吕梁山与吕梁断隆构造单元基本吻合,即吕梁断隆多为山脊之所在,而晋西挠褶带、宁武向斜之西翼及交城单斜主要分布在山腰处(图1~2)。

### 2.1 各构造单元组成及特征

吕梁断隆物质组成空间变化较大。北段(静乐—兴县之北)以五寨断裂为界分为东、西两部分:东部主要出露前寒武纪基底,西部则由早古生代盖层组成。中段介于静乐—兴县与交城—中阳之间,

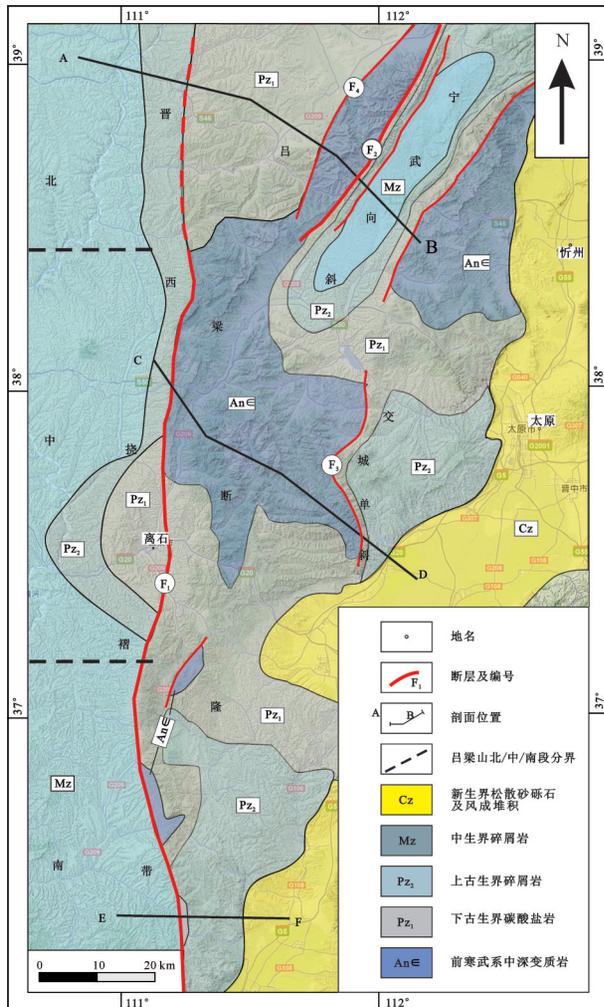


图1 吕梁山及邻区地质地貌图

Fig.1 Geological and geomorphologic map of the Lüliang Mountains and adjacent areas

主要由前寒武纪基底组成,局部可见寒武—奥陶系。与北、中段不同,南段(交城—中阳之南)主要出露上古生界,仅靠近晋西挠褶带处因断层错断而小面积出露下古生界及前寒武系(图1~2)。

晋西挠褶带主要由古—中生界组成的西倾单斜,自东向西地层时代依次变新,倾角逐渐变缓(从 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 到 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ),但靠近东部边界离石断裂处倾角可达 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,直立甚至倒转。

宁武向斜(主要指其西翼,下同)及交城单斜主要由东倾的古—中生代单斜层组成,自断裂向东地层倾角快速变小直至水平。

## 2.2 分界断裂

吕梁山各二级构造单元之间为断裂接触,其分界断裂包括离石断裂( $F_1$ )、宁武断裂( $F_2$ )和交城断裂( $F_3$ )。五寨断裂( $F_4$ )是吕梁山断隆北部的重要分界断裂。

离石断裂( $F_1$ )是晋西挠褶带与吕梁山断隆的分界,以往文献中所指的离石断裂多指兴县以南部分<sup>[5, 7, 8]</sup>,考虑到断裂对两侧地层及构造变形的分割作用,本文认为其向北可延伸到保德一带(图1)。与东部吕梁山断隆相对应,可分为北、中、南三段。北段因新生界覆盖,断裂本身地表表现不明显,但两侧物质组成、构造变形及地势存在明显差异:断裂以西主要为近南北向古生界—中生界的舒缓单斜,局部发育同方向波状褶皱;而东部构造较复杂且构造线为北东向。此外,断裂通过处也是重要的地势分界线(图1,图2中AB剖面)。深部地震资料显示断裂该段具有自东向西逆冲的特征(图3-a)。中段为系列北北东—南南西走向、右行雁列、高角度逆冲断裂组成。断裂线性特征清晰,地表破碎带发育,断距较小<sup>[5, 7, 8]</sup>;断面西倾,倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,为吕梁山断隆向西逆冲之反冲断层<sup>[8]</sup>。断裂南段两侧地质地貌景观存在明显差异:以东为上古生界组成的巍峨挺拔的吕梁山脉,以西为上覆梁崮重叠黄土高原的古—中生界。断裂总体东倾,产状各地不一,卷入其中的地层略有差异:隰县梁家河、蒲县城东峡村可见奥陶系灰岩向西逆冲于石炭—二叠系之上,断裂发育于石炭系内但波及到奥陶系(图3-b);下庄一带,前寒武系由东向西逆冲于奥陶系灰岩之上。依据断裂上盘岩层牵引褶皱倒向及下盘地层倾角短距离内向西迅速变缓特征判断其为东倾逆断层。

宁武断裂( $F_2$ )为吕梁山断隆(北段)与宁武向斜的分界,断裂上盘为前寒武系深变质岩,下盘由奥陶系—白垩系组成,受主断裂影响下盘地层产状变化大,新堡以北总体陡立,局部倒转,向东逐渐转为正常且倾角变小(图3-c)。除主断裂外,常可见与之平行产出的分支断裂,如榆湾北分支断裂将前寒武系逆冲推覆于奥陶系灰岩之上,而灰岩又逆冲于石炭—二叠系之上并使其全部倒转<sup>①</sup>。断面总体倾向北西,倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,为自北西向南东逆冲的逆断层。

①山西地调院. 1:25万崞崮幅区域地质调查报告, 2004.

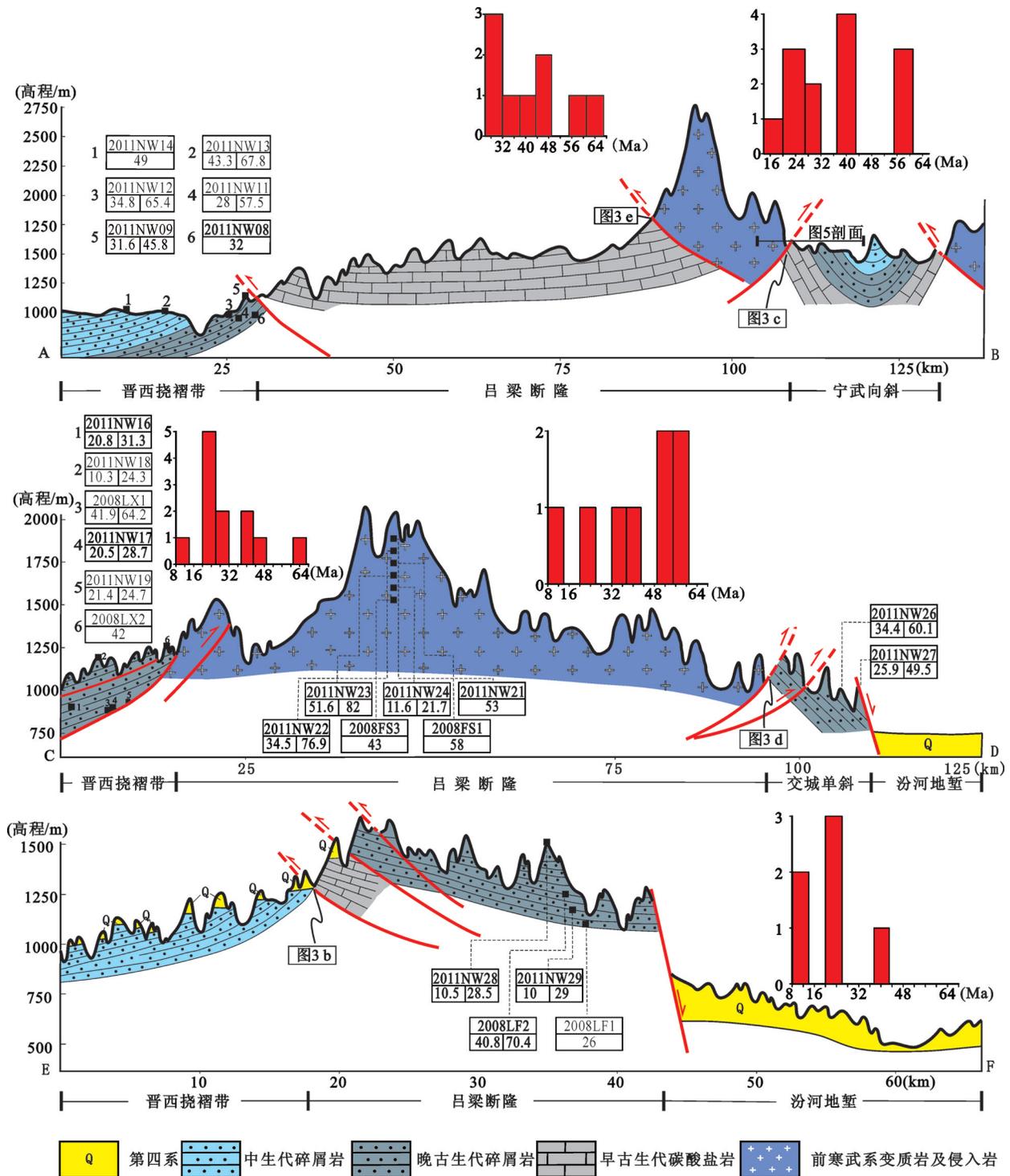


图2 吕梁山不同地段图切剖面  
 (示构造单元划分、采样位置及测试结果, 方框内包含样品编号及分解年龄, 直方图为年龄-频数图)  
 Fig. 2 Profiles of different parts of the Lüliang Mountains (showing structure unit, geomorphology, sampling location and measurement results; serial number of sample and decomposition age are shown in square frames, the histograms show age verse frequencies)

交城断裂( $F_3$ )为吕梁断隆(中部)与交城单斜的分界,整体呈向东突出的弧形,也是明显的地貌分界线。断层面向西缓倾,约 $20^\circ\sim 30^\circ$ 。上盘岩层逆冲迫使下盘的二叠系煤层翘倾到直立甚至倒转(图3-d)。

五寨断裂( $F_4$ )为吕梁断隆(北部)内部断裂,断裂通过处多为线状或弧形的沟谷区。断层上盘为前寒武纪结晶-变质基底及侵入其中的花岗岩,下盘为寒武-奥陶纪碳酸盐岩,断面东倾,产状为 $110^\circ\angle 40^\circ$ 。靠近断裂处,上盘岩石较为破碎且发育与断裂产状一致的稀疏劈理;下盘倾角变化大,从局部倒转到直立进而向西快速变缓。主断裂伴生有系列次级断裂,每个次级断层分割区域都具有产状自陡变缓的特征(图3-e)。

### 3 采样层位、测试方法及结果解释

#### 3.1 采样层位及部署

考虑到区域差异性,本研究选择北、中、南3条东西向剖面(图2)分别采样研究,采样层位涵盖了吕梁山所有次级构造单元。地层分布区尽可能逐层采样,花岗岩分布区则在不同高度分别采样(表1)。采样对象是易于挑选磷灰石的砂岩及花岗岩,

共采集38个样品,其中33个样品中获得磷灰石。

#### 3.2 测试方法

裂变径迹测试由中国科学院高能物理研究所完成。样品经粉碎、分选、自然晾干后,经重选和磁选获得磷灰石并利用环氧树脂和聚四氟乙丙烯固定,经研磨和抛光使内表面露出,从而获得用于测试的光薄片。用7%  $HNO_3$  蚀刻光薄片30 s揭示磷灰石自发径迹后,将低铀白云母外探测器与磷灰石一并置于反应堆辐照,在 $25^\circ C$ 下用40%  $HF$  蚀刻20 s揭示诱发径迹,中子注量利用CN 5铀玻璃标定。在高精度光学显微镜下利用高倍镜选择平行c轴的柱面采用Green<sup>[24,25]</sup>建议的程序测定自发径迹和诱发径迹密度、平封径迹长度<sup>[26]</sup>。最后,根据IUGS推荐的常数法和标准裂变径迹年龄方程<sup>[27]</sup>计算年龄值。

#### 3.3 测试结果及解释

本研究共获得33组裂变径迹数据(表1),具有如下特点:(1)所有样品都发生热重置而使裂变径迹表观年龄远小于其沉积年龄<sup>[28,29]</sup>,可用于研究沉积期后的热历史;但长期的热演化过程中多次热事件的干扰,致使多数样品 $P(\chi^2) < 5$ ; (2)将所有 $P(\chi^2) < 5$ 样品利用Binomfit软件<sup>[30]</sup>解叠后,其年龄多与 $P(\chi^2) > 5$ 样品径迹年龄耦合,集中分布(包括解叠与非解叠

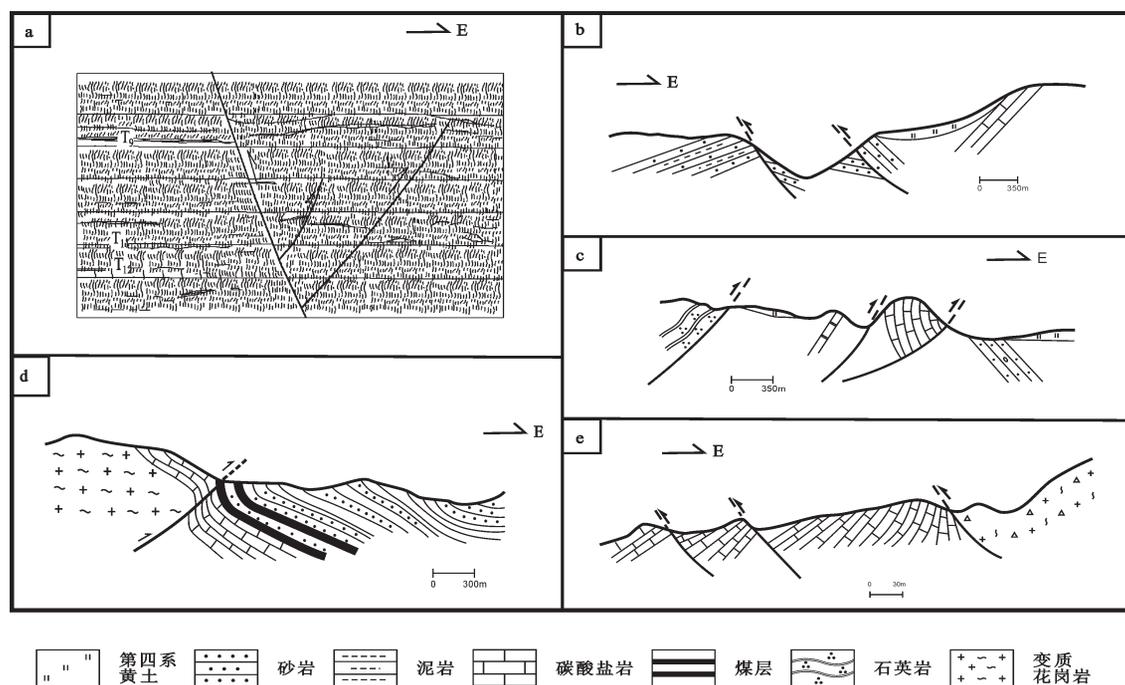


图3 主要断裂特征及地球物理证据

Fig.3 Characteristics of main faults and geophysical evidence)

表1 吕梁山地区裂变径迹测试结果  
Table 1 Fission track age of apatite from the Lüliang Mountains

样品号	高程 / m	时代	颗粒数/n	$\rho_s(10^5/cm^2)$ (Ns)	$\rho_i(10^5/cm^2)$ (Ni)	$\rho_d(10^5/cm^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ / %	Central age /Ma ( $\pm 1\sigma$ )	Pooled age/Ma ( $\pm 1\sigma$ )	L/ $\mu m$ (N)	(分组) 年龄/ Ma	备注
2011NW01	1519	J	28	1.064(446)	13.538(5676)	16.484(9117)	23.4	23 $\pm$ 2	23 $\pm$ 2	12.8 $\pm$ 1.9(104)	23 $\pm$ 2	
2011NW02	1551	J	28	1.292(468)	13.141(4760)	16.128(9117)	0.9	29 $\pm$ 2	28 $\pm$ 2	12.8 $\pm$ 1.8(102)	25.9 $\pm$ 3.5	56.7 $\pm$ 9.3
2008NW5	1566	J	28	2.956(771)	9.889(2579)	9.180(5688)	0	53 $\pm$ 4	53 $\pm$ 4	13.0 $\pm$ 2.3(99)	40.8 $\pm$ 3.5	69.4
2011NW03	1590	J	28	0.902(315)	8.117(2835)	15.772(9117)	1.3	30 $\pm$ 3	31 $\pm$ 2	12.8 $\pm$ 2.2(101)	27.3 $\pm$ 4.3	57.8 $\pm$ 8.2
2011NW04	1594	T	28	0.896(381)	8.936(3801)	15.416(9117)	0.0	31 $\pm$ 3	27 $\pm$ 2	12.4 $\pm$ 1.9(104)	20 $\pm$ 3.6	40.6 $\pm$ 7.9
2008NW1	1570	T	25	2.362(586)	9.407(2334)	10.343(5688)	1.5	52 $\pm$ 4	50 $\pm$ 4	12.5 $\pm$ 2.4(103)	40.2 $\pm$ 4.8	60.2 $\pm$ 5.8
2011NW05	1572	P	30	0.933(440)	14.04(6619)	15.594(9117)	36.9	18 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1	12.9 $\pm$ 1.9(101)	18 $\pm$ 3	
2008NW4	1570	P	21	1.590(476)	7.590(2272)	9.097(5688)	5.9	38 $\pm$ 3	37 $\pm$ 3	13.3 $\pm$ 1.8(107)	38 $\pm$ 3	
2011NW07	1566	P	27	1.37(385)	14.069(3954)	16.128(9117)	14.4	28 $\pm$ 2	28 $\pm$ 2	13.0 $\pm$ 2.1(100)	28 $\pm$ 2	
2011NW08	943	P	28	0.879(271)	7.975(2460)	16.484(9117)	68.3	32 $\pm$ 3	32 $\pm$ 3	12.3 $\pm$ 2.0(62)	32 $\pm$ 3	
2011NW09	1160	P	28	1.815(918)	13.967(7064)	16.839(9117)	0.0	40 $\pm$ 3	39 $\pm$ 2	12.7 $\pm$ 2.1(107)	31.6 $\pm$ 2.6	45.8 $\pm$ 4.3
2011NW11	874	P	28	2.015(1026)	10.422(5306)	17.177(9117)	0.0	61 $\pm$ 5	58 $\pm$ 4	11.6 $\pm$ 2.1(101)	28 $\pm$ 4.8	57.5 $\pm$ 4.1
2011NW12	967	P	28	2.484(948)	12.049(4598)	17.557(9117)	0.0	65 $\pm$ 6	64 $\pm$ 4	11.5 $\pm$ 2.3(113)	34.8 $\pm$ 4.9	65.4 $\pm$ 6.1
2011NW13	1038	T	26	1.089(597)	7.445(4082)	17.907(9117)	1.7	48 $\pm$ 4	46 $\pm$ 3	12.2 $\pm$ 2.1(106)	43.3 $\pm$ 3.6	67.8 $\pm$
2011NW14	1029	J	30	1.787(361)	11.98(2420)	18.262(9117)	5.5	49 $\pm$ 4	48 $\pm$ 4	12.3 $\pm$ 1.7(103)	49 $\pm$ 4	
2011NW16	902	P	27	1.368(947)	21.633(14971)	18.618(9117)	0.0	21 $\pm$ 2	21 $\pm$ 1	13.8 $\pm$ 1.7(102)	20.8 $\pm$ 3	31.3 $\pm$ 3
2011NW17	1188	P	30	0.881(436)	13.962(6913)	18.44(9117)	0.0	20 $\pm$ 2	21 $\pm$ 2	13.9 $\pm$ 1.8(103)	20.5 $\pm$ 5.2	28.9 $\pm$ 3
2011NW18	787	P	30	0.997(518)	17.66(9178)	18.173(9117)	0.0	17 $\pm$ 2	18 $\pm$ 1	12.3 $\pm$ 2.2(108)	10.3 $\pm$ 2.5	24.3 $\pm$ 3.5
2011NW19	791	P	30	1.668(529)	21.367(6778)	17.995(9117)	4.7	24 $\pm$ 2	25 $\pm$ 2	13.7 $\pm$ 1.8(103)	21.4 $\pm$ 3	24.7 $\pm$ 3
2008LX2	925	P	28	2.361(453)	11.789(2262)	10.675(5688)	66.9	42 $\pm$ 3	42 $\pm$ 3	12.0 $\pm$ 2.5(102)	42 $\pm$ 3	
2008LX1	1268	C	22	1.643(560)	5.719(1949)	9.595(5688)	1.3	52 $\pm$ 4	54 $\pm$ 4	12.1 $\pm$ 2.8(118)	41.9 $\pm$ 5.4	64.2 $\pm$ 6.9
2011NW21	1935	Pt	26	2.002(804)	11.622(4668)	17.373(9117)	7.9	53 $\pm$ 4	53 $\pm$ 3	12.7 $\pm$ 2.0(101)	53 $\pm$ 3	
2011NW22	1837	Pt	26	2.602(1211)	11.172(5200)	16.839(9117)	0	67 $\pm$ 6	69 $\pm$ 4	12.2 $\pm$ 1.9(104)	34.5 $\pm$ 4	76.9
2008FS1	1789	Pt	28	3.503(1821)	10.906(5670)	9.263(5688)	6.4	58 $\pm$ 3	58 $\pm$ 3	12.3 $\pm$ 2.2(101)	58 $\pm$ 3	
2011NW23	1726	Pt	28	2.911(1234)	12.326(5226)	16.484(9117)	0	69 $\pm$ 5	68 $\pm$ 4	12.3 $\pm$ 2.0(106)	51.6 $\pm$ 6.5	82
2011NW24	1636	Pt	29	0.533(155)	13.028(3792)	16.128(9117)	0	15 $\pm$ 2	12 $\pm$ 1	$\pm$ ( )	11.6 $\pm$ 2.3	21.7 $\pm$ 3
2008FS3	1544	Pt	25	1.726(520)	7.292(2197)	10.390(5688)	74.9	43 $\pm$ 3	43 $\pm$ 3	12.5 $\pm$ 2.5(114)	43 $\pm$ 3	56.7 $\pm$ 9.3
2011NW26	927	P	30	3.34(723)	22.896(4956)	15.772(9117)	0	41 $\pm$ 4	41 $\pm$ 3	13.4 $\pm$ 1.9(76)	34.4 $\pm$ 4.8	60.1 $\pm$ 6.3
2011NW27	856	T	30	3.18(443)	21.789(3035)	15.416(9117)	0	37 $\pm$ 4	40 $\pm$ 3	13.0 $\pm$ 2.0(85)	25.9 $\pm$ 3.4	49.5 $\pm$ 4.3
2011NW28	1544	P	29	0.667(469)	12.642(8883)	15.416(9117)	0	15 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	13.5 $\pm$ 2.0(54)	11.5 $\pm$ 2.3	20.5 $\pm$ 5.2
2008LF1	1244	P	20	4.613(965)	18.873(3948)	9.512(5688)	0	49 $\pm$ 4	45 $\pm$ 3	13.1 $\pm$ 2.4(101)	40.8 $\pm$ 2.7	70.4
2011NW29	1175	P	30	0.81(437)	14.752(7954)	15.683(9117)	0	15 $\pm$ 2	15 $\pm$ 1	13.5 $\pm$ 1.5(96)	10 $\pm$ 3	24 $\pm$ 3.8
2008LF2	1080	C	28	1.567(498)	12.162(3865)	10.426(5688)	80.9	26 $\pm$ 2	26 $\pm$ 2	13.2 $\pm$ 2.8(109)	26 $\pm$ 2	

注: n为样品颗粒数;  $\rho_s$ 、 $\rho_i$ 、 $\rho_d$ 为样品的自发、诱发和标准铀玻璃产生在白云母外探测器上的诱发裂变径迹密度; Ns、Ni、和Nd分别为与  $\rho_s$ 、 $\rho_i$ 、 $\rho_d$  相对应的径迹数目。  $P(\chi^2)$  为  $\chi^2$  统计值; Central age 为中值年龄, Pooled Age 为合并年龄, N 为测量封闭径迹长度的径迹条数。

数据)在 $(58\pm 3)$ Ma、 $(40\pm 3)$ Ma、 $(30\pm 3)$ Ma、 $(23\pm 3)$ Ma和 $(10\pm 3)$ Ma五个峰值区间(图4-a);(3)径迹年龄(多数小于65 Ma)与样品高程无明显相关性,暗示了新生代吕梁山并非整体性隆升(图4-b)。(4)裂变径迹年龄具有明显的空间差异性,总体上北、中段老于南段。

对于较大区域相对整体均一隆升而言,裂变径迹年龄与隆升山体海拔为正相关<sup>[11, 12]</sup>。若山体由沉积地层组成(如吕梁山两翼),该规律则可进一步引申为“裂变径迹年龄与地层时代为反相关”。实验所获的 $P(\chi^2)$ 是样品中是否存在不谐和年龄检验标尺<sup>[31, 32]</sup>: $P(\chi^2) > 5$ 为谐和样品,其年龄具有确切的地质意义; $P(\chi^2) < 5$ 为不谐和样品,其年轻组分为晚期冷却事件所致,而较老端元则可记录更早期的缓慢抬升冷却事件<sup>[28, 29]</sup>。综合利用 $P(\chi^2) > 5$ 及 $P(\chi^2) < 5$ 之样品记录的热事件及其空间变化规律可为早期热历史恢复提供详尽信息。

吕梁山北段宁武剖面(图2中AB剖面,图5)9个样品中记录的裂变径迹年龄集中分布在 $(58\pm 3)$ Ma、 $(40\pm 3)$ Ma和 $(23\pm 3)$ Ma三个峰值区间。位于底部2011 NW05、2008 NW4、2011 NW07和顶部的2011 NW01样品 $P(\chi^2) > 5$ ,记录了单一热事件;对其

余5个样品采用二项式峰值拟合法解叠后其中3个(2011 NW02、2011 NW03、2008 NW1)较老年龄组分形成 $(58\pm 3)$ Ma年龄峰,记录了地壳早期的缓慢隆升过程<sup>[28]</sup>;2011 NW04样品解叠后的较老端元年龄与 $P(\chi^2) > 5$ (2008 NW4)及 $P(\chi^2) < 5$ 样品(2008 NW5、2008 NW1)之年轻端元一致并形成 $(40\pm 3)$ Ma年龄峰,且后二者均代表有确定意义的抬升冷却事件<sup>[28]</sup>,故认为该样品也记录了该期快速隆升冷却事件,但遭受晚期 $(23\pm 3)$ Ma热事件不彻底改造。宁武剖面最小年龄峰为 $(23\pm 3)$ Ma,仅在 $P(\chi^2) > 5$ (2011 NW01)及 $P(\chi^2) < 5$ 样品(2011 NW02、2011 NW04)

之年轻端元中存在。纵观整个剖面,样品裂变径迹年龄(包括解叠后的年轻组分,下同)不遵循“年龄与地层时代反相关”规律,这种现象在以往研究中也发现<sup>[2]</sup>,暗示了地壳均衡抬升并非其主导抬升机制。断裂活动也是山体隆升的方式之一,并可形成与之相关的新退火区间<sup>[13-16]</sup>,宁武剖面裂变径迹年龄的空间变化也可用断裂活动合理解释。经历 $(58\pm 3)$ Ma的隆升后,吕梁山断隆于 $(40\pm 3)$ Ma向东逆冲并将下盘地层沿断层滑动方向掀斜隆起而形成新的退火区间(图5):底部2008 NW4样品 $P(\chi^2) > 5$ ,记录了单一热

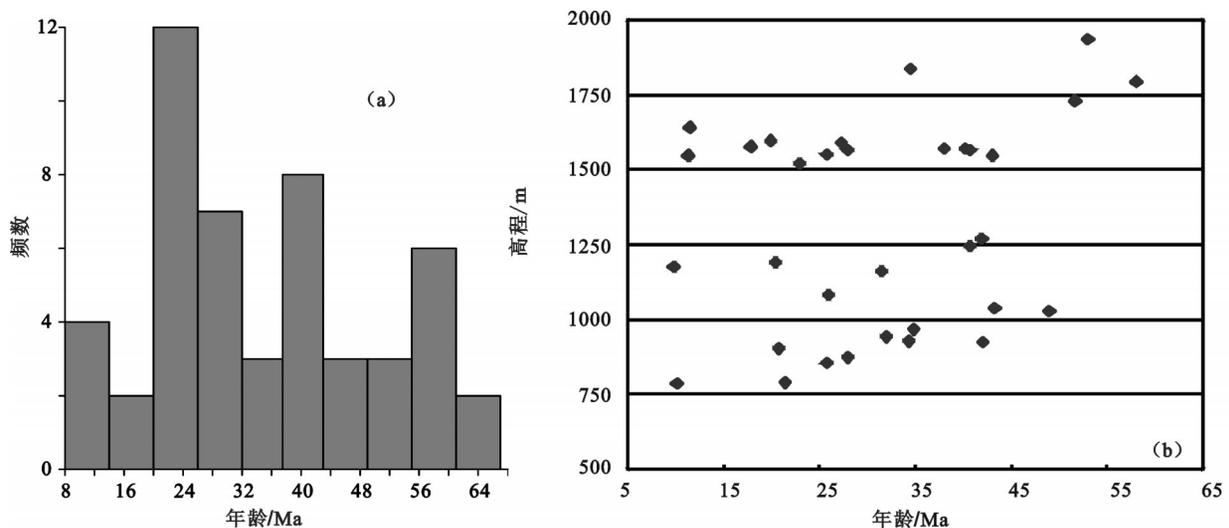


图4 吕梁山不同部位裂变径迹年龄分布(a)及年龄-高程关系图(b)

a—所有新生代裂变径迹年龄;b—仅包括 $P(\chi^2) > 5$ 及 $P(\chi^2) < 5$ 之年轻端元

Fig. 4 The frequency of fission track age (a) and fission track age versus attitude (b)  
(all the data are plotted in (a), and older components of the decomposition are excluded in (b))

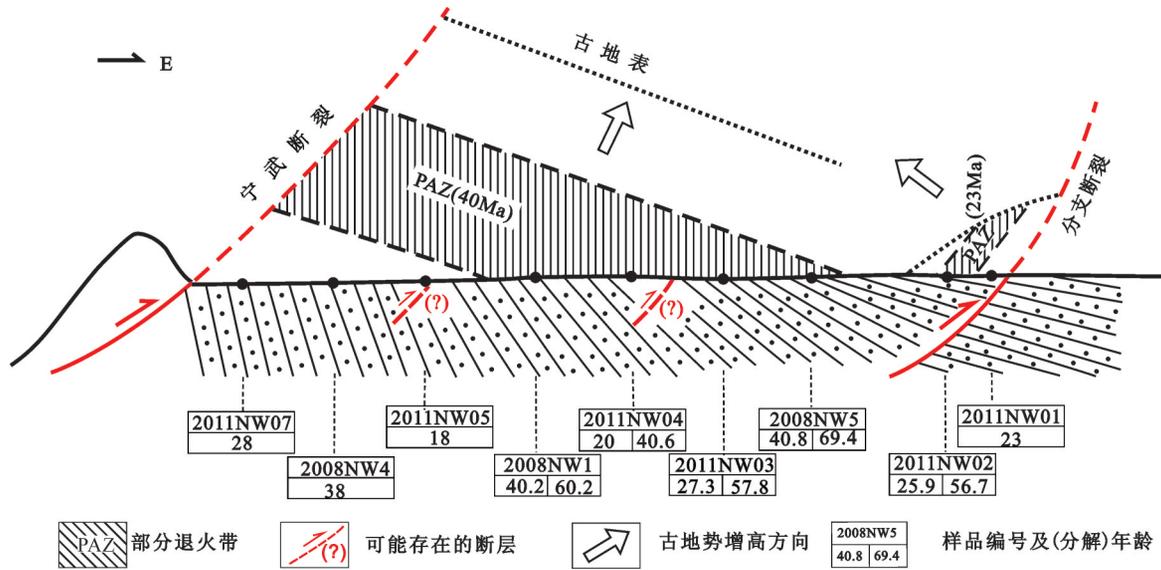


图5 宁武剖面隆升不同时期隆升模式图

Fig.5 Uplift model of Ningwu profile at 40 Ma and 23 Ma

事件,具完全退火带特征。向上(东)2008 NW1( $P(\chi^2) < 5$ )样品较年轻组分记录了该期热事件,限定了部分退火带的下线;虽然后期热事件干扰而难以约束部分退火带的确切上限,但其至少延伸到2008 NW5所在层位。位于二者之间的(2011 NW04)样品虽然受到晚期热扰动,但仍残留了该期热事件记录。此后,宁武断裂次级断裂于(23±3)Ma活动,但是其影响范围有限不足以改变已有格局,仅将上盘岩层垂直断层向上小幅度抬升而使地层局部退火,2011 NW01和2011 NW02所在层位分别为其完全退火带及部分退火带所在(图5)。2011 NW07及2011 NW05虽然具有确切地质意义( $P(\chi^2) > 5$ ),但是考虑其规模有限未形成峰值年龄本文暂不讨论。从冷却事件所能影响范围以及其对现今地层产状的贡献推断,(40±3)Ma是该区最重要的抬升剥蚀期。

北段西部晋西挠褶带(图1, AB剖面西部)6个样品中获得9个新生代年龄,除(30±3)Ma形成明显峰值年龄外,其他数据较为分散。剖面中段 $P(\chi^2) < 5$ 样品(2011 NW09、2011 NW11、2011 NW12)解叠后的年轻端元与底部 $P(\chi^2) > 5$ 样品(2011 NW08)一致,二者共同记录了(31±3)Ma这次抬升冷却事件并且围限了其可能的完全、部分退火带及未退火带。此外,剖面上部层位样品(2011 NW13)的年轻端元为(43.3±3.6)Ma,与吕梁山北段东部掀斜抬升

时间(40±3)Ma一致,故推断晋西挠褶带在该时期也曾发生抬升,但被(30±3)Ma热事件强烈改造。

中段:西部晋西挠褶带6个样品共获得12个裂变径迹数据(含解叠后数据,下同),其中5个集中分布在(23±3)Ma,且均位于剖面上段(图2中CD剖面);剖面下段2008 LX1样品( $P(\chi^2) < 5$ )及2008 LX2样品( $P(\chi^2) < 5$ )之年轻端元共同记录了(40±3)Ma的热事件,二者径迹年龄与地层时代为正相关关系,与地壳均衡体制下翘倾式隆升裂变径迹退火模式相反。中部6个样品来自于不同高程的花岗岩山体,共获得8个新生代年龄,具有确切地质意义的 $P(\chi^2) > 5$ 及 $P(\chi^2) < 5$ 样品之年轻端元<sup>[28, 29]</sup>均未形成年龄峰值,也不遵循“年龄-高度”规律。山体底部样品(2008FS3) $P(\chi^2) > 5$ 说明至少在42 Ma现今北武当山已经快速脱离磷灰石部分退火带,故山体中部 $P(\chi^2) < 5$ 样品(2011 NW24、2011 NW23、2011 NW22)系晚期局部热扰动所致,而其年龄分解所得的较小年龄值(10±3)Ma、(23±3)Ma正是其热扰动之冷却时间;顶部未经历热扰动区域记录更早期的隆升事件。中段东部交城单斜获得数据较少且年龄分散,暂不讨论其地质意义。

南段:虽然仅获得6个新生代裂变径迹年龄,集中分布在(23±3)Ma和(10±3)Ma两个区间;其中(10±3)Ma为 $P(\chi^2) < 5$ 样品(2011 NW28、2011

NW29)分解所得的年轻端元,而其较老端元年龄与2008 LF2( $P(\chi^2)>5$ 样品年龄在误差范围内一致( $23\pm 3$ )Ma,应为同一事件记录,但前者遭受了( $10\pm 3$ )Ma事件干扰,3个样品共同记录了( $23\pm 3$ )Ma的隆升事件。此外,也有更早期( $40\pm 3$ )Ma的热事件记录。值得一提的是,具有确切地质意义的 $P(\chi^2)>5$ 及 $P(\chi^2)<5$ 样品之年轻端元<sup>[28, 29]</sup>年龄与赋存地层时代也非相关关系。

## 4 讨 论

### 4.1 吕梁山差异隆升机制探讨

差异隆升引起差异剥蚀,差异剥蚀反映差异隆升,二者相依相存。早、中三叠世时吕梁山仍是大型鄂尔多斯沉积盆地的一部分<sup>[1]</sup>,若以其为参照系,现今吕梁山西-中-东大致对称的带状差异即为差异剥蚀的产物,进而反映了差异隆升过程。裂变径迹年龄的区域差异性及其与高程无正相关关系从定量角度证实吕梁山新生代隆升过程具有区域差异性(图4-a)。

吕梁山北、中段吕梁山断隆(对应于主脊)普遍缺失中生界及上古生界,多数地段仅出露前寒武系及深成侵入岩,以区域平均地层厚度估算,晚三叠世以来平均剥蚀厚度至少达5000 m(古生界及中生界厚度总和)。而与其毗邻的晋西挠褶带及宁武向斜、交城单斜古-中生界保存完好,仅发生不同程度掀斜,最大剥蚀厚度小于2200 m(中生界及上古生界厚度),且自吕梁山断隆向外逐渐降低。有两种机制可以解释这种东西向大致对称的区域差异剥蚀及其空间变化规律。其一为地壳均衡背景下吕梁山断隆相对于两侧大幅度隆起剥蚀而出露前寒武系,而晋西挠褶带、宁武向斜、交城单斜等所在区仅随之掀斜式隆升,剥蚀厚度远小于中部(图6-a)。其二为挤压体制下,逆断层及其反冲断裂将处于上盘的吕梁山断隆迅速抬升并接受剥蚀,与此同时下盘岩层受挤压而发生不同程度的掀斜(图6-b)。二者的差别在于吕梁山断隆与其他二级构造单元的接触边界性质及其外围构造单元地层产状变化:断裂逆冲式隆升以发育明显的逆断层和外围岩层产状明显变化为特征,其部分退回带在空间上不在连续(图6-b);而地壳均衡式抬升的接触边界多为沿薄弱层发育的顺层剪切面,且外围岩层产状相对稳

定,中部及外围部分退火带基本连续发育。前已述及,吕梁山断隆与外围不同构造单元均以逆断层(包括离石断裂、宁武断裂及交城断裂)接触。此外,断层下降盘中常可见的自断层向外地层倾角自陡立迅速变缓也非地壳均衡抬升之特征。因此,断裂逆冲是吕梁山差异隆升的主导机制。吕梁山北段东-西部剖面、中段西部剖面、中段中部花岗岩剖面磷灰石裂变径迹年龄不遵循“年龄-深度(地层时代)”关系也从另一个角度证实了这一点,但这并不排除更早期(如中生代晚期)该区曾发生地壳均衡体制下的整体性隆升。

在东西向带状差异剥蚀的总体格局下(图6-b),吕梁山主脊(吕梁山断隆)北、中差异剥蚀主要受控于断裂不同层次、不同方向及期次的逆冲。相对于北部西段而言,吕梁山断隆中段(出露前寒武系及深成侵入岩)的剥蚀程度明显偏高,这是由于该段吕梁山断隆向西逆冲波及到中下地壳,并形成由断坪-断坡及自东向西滑动的逆冲拆离系以及与之相关的反冲断层<sup>[8]</sup>,这得到了裂变径迹热年代学的支持。虽然已有数据不能定量将总剥蚀量分解到各个阶段,但是不同阶段裂变径迹的退火区间叠加改造关系可为不同阶段断裂活动所能影响到的范围作出定性约束。如:北段东部宁武断裂向东逆冲( $40\pm 3$ )Ma铸就了宁武向斜之格局,随后的分支断裂的后展式逆冲( $23\pm 3$ )Ma奠定了现今退火带的空间变化特征;北段西部离石断裂于( $30\pm 3$ )Ma的向西逆冲铸就了现今之晋西挠褶带(北段)。

吕梁山南段主脊出露时代最新地层为二叠系,而其西邻的晋西挠褶带主要出露中生界,但从隆升、剥蚀角度看,其差异较北、中段明显偏小。但是,该段离石断裂地表特征最为清晰的部分,其不但控制着两侧地层组成与产状,而且是现今地貌形成的主要动因,断裂两侧数百米地势差正是断裂控制山体隆升的真实写照。现有数据尚不足以证明( $23\pm 3$ )Ma的抬升是否受控于断裂活动,但是最底部样品 $P(\chi^2)>5$ ,而其上部样品分解出( $10\pm 3$ )Ma的年轻端元表明其为断裂活动时间。

### 4.2 吕梁山新生代隆升过程

从中生代早、中期沉积盆地的一部分<sup>[1]</sup>到现今南北向巨型山系且不同时代地层平面上共存是不同期次断裂逆冲主导下差异隆升剥蚀的综合结

果。裂变径迹研究显示其最早隆升过程可以追溯到中生代晚期<sup>[2]</sup>,但主体发生在新生代,包括(58±3)Ma、(40±3)Ma、(30±3)Ma、(23±3)Ma和(10±3)Ma五个阶段。

吕梁山北段、中段保留了(58±3)Ma的隆升记录,且多为不谐和年龄中分解出的较老组分,现有数据尚不能确定其隆升机制,但区域上东邻五台山<sup>[11]</sup>和西邻鄂尔多斯<sup>[1]</sup>都在地壳均衡体制下隆升,河套盆地开始沉降<sup>[33]</sup>。吕梁山隆升应为该区域事件的响应。

(40±3)Ma的裂变径迹年龄在吕梁山北、中段普遍发育,北段东部宁武向斜形成及其与吕梁断隆巨量差异剥蚀主要受控于该时期宁武断裂的向东逆冲。虽然北段西部及中段并未保留与宁武剖面相似的完整退火区间,但是西部鄂尔多斯<sup>[34, 35]</sup>、东部沁水盆地<sup>[36]</sup>、南部秦岭<sup>[19]</sup>都缺少此时期的热事件记录,结合渭盆地该时期的连续沉积<sup>[37]</sup>推断吕梁山(40±3)Ma的冷却事件为逆冲断裂作用下独立于周缘地区隆起所致。

不同时代地层及紫金山碱性岩的低温热年代学都表明鄂尔多斯东北部于(30±3)Ma发生强烈抬升剥蚀事件,甚至影响到该区油气藏保存<sup>[34, 35]</sup>。吕梁山北段西部明显的年龄峰值(30±3)Ma以及发育自东向西完整的退火区间,应为总体抬升背景下,离石断裂向西逆冲掀斜下盘岩层(北部晋西挠褶带形成)并使接受差异剥蚀的产物。北段东部虽然也

有该期热事件记录,但从其对早期热事件(尤其是(40±3)Ma)的改造程度来推断其影响范围有限。太平洋板块的向西俯冲及青藏高原的远程效应可能是(30±3)Ma区域热事件的动力来源<sup>[34, 35]</sup>。

分解所得的5个年龄组中(23±3)Ma所占最高比例,且在北、中、南部都有分布,是吕梁山快速抬升的表现。以下现象表明,宁武、离石断裂活动是该期次差异剥蚀的动力源:北段东部宁武断裂分支断裂上盘完整的退火区间、中段中部已经脱离部分退火带的样品再次遭受该期热扰动、中段西部上部层位裂变径迹年龄小于下部。

区域剥蚀厚度约束了区域总剥蚀厚度,裂变径迹年龄可将其隆升剥蚀过程分解为4个不同的阶段(40±3)Ma、(30±3)Ma、(23±3)Ma和(10±3)Ma),但尚不足以将总剥蚀厚度定量分解到各个阶段,甚至难以约束哪个阶段是差异剥蚀的主期。与吕梁山同纬度的鄂尔多斯盆地于23 Ma发生巨量剥蚀,且剥蚀量自西向东逐渐增大,该趋势至少延伸到晋西挠褶带<sup>[38]</sup>,系自东向西翘倾式抬升的结果。廖昌珍等<sup>[8, 9]</sup>通过区域构造分析认为晋西挠褶带、离石断裂及吕梁断隆系同一动力学体制下不同构造层次的产物,即吕梁断隆向西逆冲是晋西挠褶带形成及鄂尔多斯的翘倾式抬升并导致其剥蚀量自东向西逐渐减少的动力来源(图6-b)。离石断裂在此时间段内强烈活动并形成裂变径迹年龄峰值从热力学

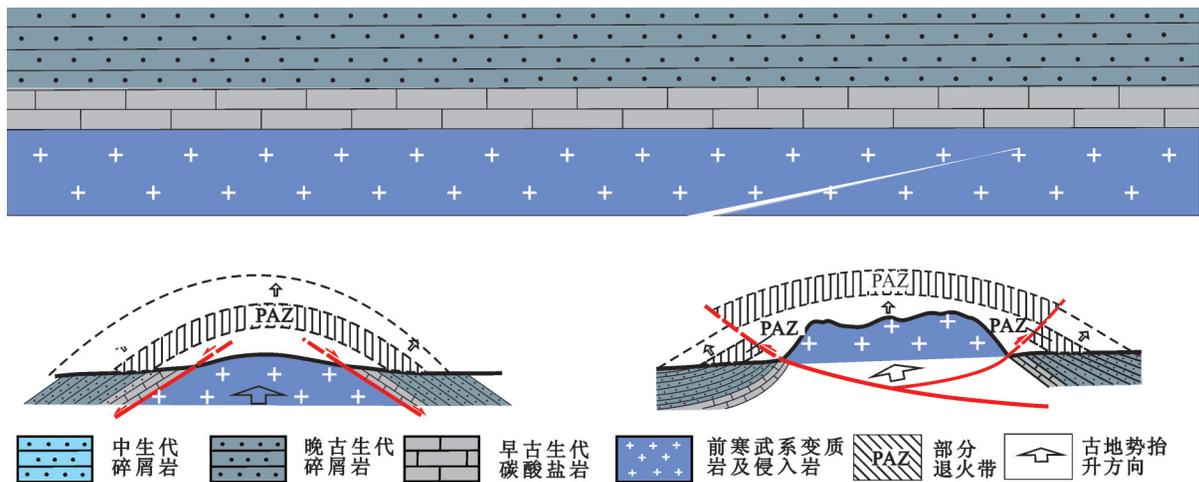


图6 不同隆升机制的构造配置及退火区间分布

a—地壳均衡式抬升;b—断裂逆冲式隆升

Fig.6 Structural setting and distribution of anneal zones of different uplift mechanisms

a-Uplift resulting from isostasy;b-Uplift resulting from thrust

角度支持了这一推论,同时也约束了晋西挠褶带(中段)形成及区域差异剥蚀形成的时间。

除鄂尔多斯<sup>[38,39]</sup>和吕梁山外,东部沁水盆地在(23±3)Ma也发生抬升事件,该次抬升波及到南部的渭河盆地<sup>[37]</sup>及秦岭地区<sup>[19]</sup>,即为区域性构造抬升事件。虽然青藏高原在此时间点前后地球动力学环境发生了重大改变<sup>[40,41]</sup>,但东-东南亚滨太平洋构造特征也很清晰,因此,该期差异抬升动力来源并不限于高原所在地区,可能具有更为广阔的区域地球动力学背景<sup>[39,42]</sup>。与周缘地区不同的是,吕梁山与鄂尔多斯盆地在整体抬升的背景下,由于离石断裂活动形成二者之间的剥蚀程度突变及鄂尔多斯盆地自东向西剥蚀厚度的逐渐变小。

(10±3)Ma是区域上最小径迹年龄,仅在中、南段可见。虽然仅有4个数据,但是均为不谐和年龄中的年轻组分,是快速冷却事件的良好记录<sup>[28,29]</sup>,样品退火特征的空间变化特征表明该热事件为断裂活动所致。前已述及,离石断裂向西逆冲是吕梁山南部东西地势差形成的主控因素,而断裂活动时间与山前砾石层年龄<sup>[3]</sup>的耦合性证实了断裂活动是区域地势差形成的内在动力。与此同时,秦岭山前大断裂活动加速并铸就了现今秦岭与渭河盆地明显地貌反差,其更深层次的动力可能与青藏高原该时期的向外扩展相关<sup>[19,43]</sup>。

## 5 结 论

(1) 新生代吕梁山隆升过程及幅度具明显时空差异性。地层剥蚀厚度显示吕梁山剥蚀程度呈东-西向带状分布,中部吕梁山断隆剥蚀程度远大于西部晋西挠褶带和东部宁武向斜及交城单斜。定量热年代学研究可将其新生代隆升过程分解为(58±3)Ma、(40±3)Ma、(30±3)Ma、(23±3)Ma和(10±3)Ma五个阶段。

(2) 吕梁山不同部位裂变径迹年龄不遵循地壳均衡抬体制下“年龄-深度”规律,暗示了其非吕梁山隆升的主要机制。进一步野外调查、剥蚀厚度分析表明,吕梁山西、中、东带状差异剥蚀明显受控于同方向逆冲断裂,即断裂逆冲是吕梁山新生代差异隆升的主导机制,这得到了裂变径迹年代学证据的支持。

(3) 裂变径迹年龄空间变化与断裂的相关性研究表明,吕梁山不同部位至少记录了(40±3)Ma、

(30±3)Ma、(23±3)Ma和(10±3)Ma四期差异隆升剥蚀事件。其中,吕梁山北段东部宁武向斜形成及其与吕梁山断隆差异剥蚀主要形成于(40±3)Ma;晋西挠褶带不同部位的形成时间及其与吕梁山断隆的巨量差异剥蚀各不相同,北段不晚于(30±3)Ma,中段主要为(23±3)Ma,南段于(10±3)Ma得到进一步加强并形成明显的地势差。

**致谢:**审稿专家和责任编辑李亚萍提出了宝贵修改意见,在此表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 刘池洋,赵红格,桂小军,等.鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J].地质学报,2006,80(5):617-638.  
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638(in Chinese with English abstract).
- [2] 赵俊峰,刘池洋,王晓梅,等.吕梁山地区中-新生代隆升演化探讨[J].地质论评,2009,55(5):663-672.  
Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Wang Xiaomei, et al. Uplifting and evolution characteristics in the Lüliang Mountain and its adjacent area during the Meso-Cenozoic[J]. Geology Review, 2009, 55(5): 663-672(in Chinese with English abstract).
- [3] 李建星,岳乐平,徐永,等.山前砾石看黄河形成与吕梁山隆升[J].地理科学,2009,29(04):582-586.  
Li Jianxing, Yue Leping, Xu Yong, et al. Uplift of Lüliang mountains and evolution of Huanghe River—Evidence from gravel beds in piedmont[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(04): 582-586(in Chinese with English abstract).
- [4] 张抗.鄂尔多斯断块构造和资源[M].西安:陕西省科学技术出版社,1989:1-394.  
Zhang Kang. Ordos Fault-Block Structure and its Resource[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1989: 1-394(in Chinese).
- [5] 白玉宝,孙冬胜.离石断裂带构造特征及演化[J].石油与天然气地质,1996,17(1):77-80.  
Bai Yubao, Sun Dongsheng. Structural feature and evolution of Li Shi fractural zone[J]. Oil and Gas Geology, 1996, 17(1): 77-80(in Chinese with English abstract).
- [6] 赵重远,刘池洋.华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M].西安:西北大学出版社,1990:1-189.  
Zhao Zhongyuan, Liu Chiyang. The Formation and Evolution of the Dedimentary Basins and Their Hydrocarbon Occurrence in the North China Carton[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990: 1-189(in Chinese).
- [7] 王锡勇,张庆龙,王良书,等.鄂尔多斯盆地东缘中-新生代构造特征及构造应力场分析[J].地质通报,2010,29(8):1168-

1176.  
Wang Xiyong, Zhang Qinglong, Wang Liangshu, et al. Structural features and tectonic stress fields of the Mesozoic and Cenozoic in the eastern margin of the Ordos basin, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(008): 1168–1176(in Chinese with English abstract).
- [8] 廖昌珍, 张岳桥, 温长顺. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 466–474.  
Liao Changzheng, Zhang Yueqiao, Wen Changshun. Structural styles of the eastern boundary zone of the Ordos Basin and its regional tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(4): 466–474(in Chinese with English abstract).
- [9] 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 等. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景[J]. 高校地质学报, 2006, 12(3): 285–297.  
Zhang Yueqiao, Liao Changzheng, Shi Wei, et al. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos Basin and geodynamic setting[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(3): 285–297(in Chinese with English abstract).
- [10] Donelick R A, O Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite Fission-Track Analysis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 49–94.
- [11] 庆建春, 季建清, 王金铎, 等. 五台山新生代隆升剥露的磷灰石裂变径迹研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 384–392.  
Qing Jianchun, Ji Jianqing, Wang Jinze, et al. Apatite fission track study of Cenozoic uplifting and exhumation of Wutai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 384–392(in Chinese with English abstract).
- [12] 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2405–2414.  
Liu Jianhui, Zhang Peizheng, Zheng Dewen et al. The Taibai mountain Qinling, apatite fission track analysis, thermal history, extensional exhumation and uplift[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10): 2405–2414(in Chinese with English abstract).
- [13] Seward D, Mancktelow N S. Neogene kinematics of the central and western Alps: Evidence from fission-track dating[J]. Geology, 1994, 22(9): 803–806.
- [14] Zheng D, Zhang P, Wan J, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248(1): 198–208.
- [15] 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式[J]. 中国科学(D辑), 2010, 40(1): 50–60.  
Liu Jianhui, Zhang Peizheng, Zheng Dewen et al. Pattern and timing of Late Cenozoic rapid exhumation and uplift of the Helan Mountain, China [J]. Science in China(Series D), 2010, 53(03): 345–355.
- [16] Guo Z, Lu J, Zhang Z. Cenozoic exhumation and thrusting in the northern Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau: Constraints from sedimentological and apatite fission-track data[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(3): 562–579.
- [17] Cao K, Guocan W, Peter V D B, et al. Cenozoic thermo-tectonic evolution of the northeastern Pamir revealed by zircon and apatite fission-track thermochronology[J]. Tectonophysics, 2013(589): 17–32.
- [18] 袁万明, 杨志强, 张招崇, 等. 安徽省黄山山体的隆升与剥露[J]. 中国科学: 地球科学(D辑), 41(10): 1435–1443.  
Yuan Wanming, Yang Zhiqiang, Zhang Zhaochong et al. The uplifting and denudation of main Huangshan Mountains, Anhui Province, China[J]. Science in China(Series D), 2011, 54(8): 1168–1176.
- [19] Liu J, Zhang P, Lease R O, et al. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. Tectonophysics, 2013, 584(0): 281–296.
- [20] 黎敦朋, 赵越, 胡健民, 等. 青藏高原西北缘高原面与陡坡地貌形成过程的裂变径迹热年代学约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 900–910.  
Li Dunpeng, Zhao Yue, Hu Jianmin et al. Fission track thermochronologic constraints on plateau surface and geomorphic relief formation in the northwestern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(5): 900–910(in Chinese with English abstract).
- [21] Clark M K, Farley K A, Zheng D, et al. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 296(1): 78–88.
- [22] 王瑜, 万景林, 李齐, 等. 阿尔金山北段阿克塞——当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 191–198.  
Wang Yu, Wan Jinglin, Li Qi, et al. Fission-track evidence for the Cenozoic uplift and erosion of the northern segment of the Altyn Tagh Fault zone at the Aksay– Dangjin Pass[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 191–198(in Chinese with English abstract).
- [23] 李玮, 胡健民, 渠洪杰. 准噶尔盆地周缘造山带裂变径迹研究及其地质意义[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 171–182.  
Li Wei, Hu Jianming, Qu Hongjie. Fission track analysis of Junggar Basin Peripheral Orogen and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 171–182(in Chinese with English abstract).
- [24] Green P F. On the thermo-tectonic evolution of Northern England: evidence from fission track analysis[J]. Geological Magazine, 1986, 123(05): 493–506.
- [25] Gleadow A, Duddy I R, Green P F, et al. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis[J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 94(4): 405–415.
- [26] Hurford A J, Green P F. A users' guide to fission track dating calibration[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(2): 343–354.
- [27] Brandon M T, Roden–Tice M K, Garver J I. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, northwest Washington State[J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(8): 985–1009.
- [28] Barnes J B, Ehlers T A, McQuarrie N, et al. Eocene to recent variations in erosion across the central Andean fold–thrust belt, northern Bolivia: Implications for plateau evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248(1): 118–133.
- [29] Ehlers T A, Chaudhri T, Kumar S, et al. Computational Tools for Low–Temperature Thermochronometer Interpretation[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 589–622.
- [30] Green P F. A new look at statistics in fission–track dating[J]. Nuclear tracks, 1981, 5(1): 77–86.
- [31] Gleadow A. Fission–track dating methods: what are the real alternatives[J]. Nuclear Tracks, 1981, 5(1): 3–14.
- [32] 傅智雁, 袁效奇. 河套盆地第三系及其生物群[J]. 地层学杂志, 1994, 18(1): 24–29.  
Fu Zhiyan, Yuan Xiaoqi. The tertiary of the hetao basin and its biotas[J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(1): 24–29(in Chinese with English abstract).
- [33] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3731–3741.  
Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3731–3741(in Chinese with English abstract).
- [34] 丁超, 陈刚, 李振华, 等. 鄂尔多斯盆地东北部构造热演化史的磷灰石裂变径迹分析[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 581–588.  
Ding Chao, Chen Gang, Li Zhenghua et al. Apatite fission track analysis of tectono–thermal history in the Northeast of Ordos Basin[J]. Geoscience, 2011, 25(3): 581–588(in Chinese with English abstract).
- [35] 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地构造–热演化史的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 2005, 50(10): 87–92.  
Ren Zhanli, Xiao Hui, Liu Li, et al. Fission track evidence of Qinshui basin structure and heating evolution[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(10): 87–92(in Chinese).
- [36] 王斌, 郑洪波, 王平, 等. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1126–1135.  
Wang Bin, Zheng Hongbo, Wang Ping et al. The Cenozoic strata and depositional evolution of Weihe Basin: progresses and problems[J]. Advance In Earth Sciences, 2013, 28(10): 1126–1135(in Chinese with English abstract).
- [37] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339–349.  
Ren Zhanli. Thermal history of Ordos basin assessed by apatite fission track analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(3): 339–349(in Chinese with English abstract).
- [38] 刘池洋, 赵红格, 张参, 等. 青藏–喜马拉雅构造域演化的转折时期[J]. 地学前缘, 2009, 16(004): 1–12.  
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Zhang Can et al. The important turning period of evolution in the Tibet–Himalayan tectonic domain[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(004): 1–12(in Chinese with English abstract).
- [39] 陈刚, 王志维, 白国娟, 等. 鄂尔多斯盆地中新世峰值年龄事件及其沉积–构造响应[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 375–383.  
Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Guojuan, et al. Meso–Cenozoic peak–age events and their tectono–sedimentary response in the Ordos basin[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 375–383(in Chinese with English abstract).
- [40] Lu Hai, Wang Erqi, Shi Xuhua, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Elashan range and its surroundings, northern Tibetan Plateau as constrained by paleomagnetism and apatite fission track analyses[J]. Tectonophysics, 2012, 580(0): 150–161.
- [41] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 30–36.  
Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinghai Tibet plateau[J]. Geology in China, 2002, 29(1): 30–36(in Chinese with English abstract).
- [42] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 中国东部中–新生代大陆构造的形成与演化[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 19–38.  
Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic–Cenozoic continental tectonics in eastern China[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 19–38(in Chinese with English abstract).
- [43] Li Jijun, Fang Xiaomin, Song Chunhui, et al. Late Miocene–Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes[J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 400–423.