

文章编号: 1000-0550(2006)06-0783-07

# 青藏高原东北缘西秦岭新生代抬升<sup>①</sup> ——天水盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录

王修喜<sup>1</sup> 李吉均<sup>1,2</sup> 宋春晖<sup>1</sup> 张军<sup>1</sup> 赵志军<sup>2</sup> 高军平<sup>1</sup> 潘美慧<sup>1</sup>

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室 资源环境学院 兰州 730000 2. 南京师范大学地理科学学院 南京 210097)

**摘要** 天水盆地位于青藏高原东北缘六盘山与西秦岭二重要构造带交汇处, 该盆地充填较完整晚新生代沉积序列记录着该区构造变形历史, 因此对该盆地沉积记录的研究对探讨青藏高原东北缘晚新生代构造活动事件具有重要的意义。通过对天水盆地晚新生代砂岩和含砾砂岩地层中碎屑颗粒磷灰石裂变径迹热年代学研究, 推断 23.7 Ma 左右天水盆地北部沉积物源区西秦岭发生了一次与青藏高原隆升有关的构造—热事件, 该事件可能导致天水盆地的形成, 并开始接受新近系冲积相沉积。约 14.1 Ma 左右天水盆地物源区再次发生构造活动, 使西秦岭剥露速率加快和盆地进一步拗陷广泛接受河湖相沉积。通过对剥蚀速率的估算, 得出天水盆地沉积记录的 23.7 Ma 和 14.1 Ma 西秦岭北部快速抬升事件的平均剥蚀速率分别达 0.34 mm/a 和 1.05 mm/a。

**关键词** 青藏高原东北缘 天水盆地 碎屑颗粒磷灰石裂变径迹 构造—热事件

**第一作者简介** 王修喜 男 1980 年出生 博士研究生 自然地理学

**通信作者** 宋春晖 E-mail: songchh@lzu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 P542.1 文献标识码 A

## 1 前言

在造山作用过程中, 山体的抬升和盆地的沉积密不可分。盆地沉积物中包含了丰富的源区基岩抬升剥蚀的信息, 山体抬升、冷却研究与盆地沉积研究的结合, 将为研究区域地质作用过程提供丰富的信息, 使人们对造山作用过程有一个更全面的理解。碎屑颗粒热年代学方法正是连接山体抬升、剥蚀与盆地沉积研究的有效手段<sup>[1,2]</sup>, 近 20 年来, 该方法在国际上被广泛用于地质学研究, 并取得了丰富的成果<sup>[1,3]</sup>。在国内, 近几年也有这方面研究的报道<sup>[2,4]</sup>。传统热年代学主要集中于基岩样品的研究, 对于裂变径迹法来说, 测量的裂变径迹是放射性衰变过程的直接表现, 放射性衰变过程服从泊松分布, 所测得的径迹数是衰变过程的最直接显示。据此, Gairath<sup>[5]</sup> 和 Green<sup>[6]</sup> 把  $X^2$  检验用于评价所测量的裂变径迹年龄结果, 目前  $X^2$  检验已经成为裂变径迹测年中常用的方法。  $X^2$  检验是对比一个年龄组中观测值的方差与由单一的放射性衰变模型预测的方差, 检验的结果是得到  $P(X^2)$ , 它代表观测值方差与预测方差之间的差别是由随机过程引起的概率。对于来自单一年龄

源区的样品, 根据不同的  $P(X^2)$  值, 采用不同形式的年龄, 如平均年龄 (mean age)、中心年龄 (central age) 和池年龄 (pooled age)。但是盆地中的沉积物碎屑为多源区混合物, 碎屑颗粒年龄也为混合年龄, 所以上述任何一种年龄都不适合于代表混合的裂变径迹颗粒年龄。碎屑颗粒热年代学方法可以有效地解决这一问题, 它是以前沉积地层中未退火 (unreset) 的碎屑颗粒为研究对象, 并且通过一定的数理统计方法 (二项峰拟合法、高斯峰拟合法和  $P(X^2)$  年龄法均可), 分解出所测样品的最年轻组分年龄。通过对盆地中浅埋藏样品最年轻组分年龄变化的研究, 揭示盆地中记录的源区山体隆升、剥露信息, 进而推断源区所发生的构造活动。

关于高原变形隆起过程目前国际上流行的观点之一是侧向挤出分步隆升模式, 该观点认为印度—亚洲碰撞和印度板块不断的向北挤入, 在青藏高原形成大规模的走滑断裂, 使得青藏高原向东挤出, 并且碰撞逐步向北传递, 激活以前的缝合带和大断裂, 使高原南部、中部和东北部分别在始新世、渐新世—中新世和上新世—第四纪逐步隆起<sup>[7]</sup>, 而高原东北部内部各部分的形成也是一个逐步向东北增生的过程, 即

① 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (批准号: 2005CB422001) 和国家自然科学基金 (批准号: 90211013 40421101) 资助。  
收稿日期: 2006-02-22 收修改稿日期: 2006-05-08

阿尔金山断裂向东北方向的持续运动逐步使柴达木盆地内褶皱和南(党河南山)、中、北祁连山及其东北缘榆木山、海源—六盘山断裂形成,其形成时代分别推测为 11 Ma、6 Ma、5 Ma 和 1 Ma<sup>[7,8]</sup>。然而近年来对青藏高原东北缘构造活动研究成果与该观点明显不同,例如李吉均、方小敏等根据临夏盆地一带地层、地貌与构造关系认为青藏高原东北缘自上新世以来大规模强烈隆升,并提出 3.6~1.7 Ma“青藏运动”<sup>[9,10]</sup>;又如郑德文等人应用碎屑颗粒热年代学方法分析临夏盆地新生代的沉积物,揭示出约 14 Ma 和 5.4~8.0 Ma 青藏高原构造隆升事件<sup>[4]</sup>;再如 Turner 喻学惠等人对藏北地区和西秦岭—宕昌地区的新生代火山岩研究,认为约 13~15 Ma、22~23 Ma 等时间段青藏高原发生过构造活动<sup>[11~14]</sup>。天水盆地位于青藏高原东北缘六盘山与西秦岭二重要构造带交汇处,该盆地充填较完整晚新生代沉积序列记录着该区构造变形历史,因此对该盆地沉积记录的研究就成为检验上述观点的关键。所以,本文试图通过对天水盆地晚新生代砂岩和含砾砂岩地层中碎屑颗粒磷灰石

裂变径迹热年代学研究,获取西秦岭、六盘山一带隆升或构造活动信息,为合理认识和研究青藏高原东北缘构造隆升历史提供证据。

## 2 构造地质背景与剖面特征

青藏高原东北边缘由祁连山、西秦岭、六盘山、香山等一系列山岭和西宁、兰州、临夏、陇西、天水、西礼等新生代沉积盆地所组成。而六盘山、西秦岭北缘、祁连山以及由它们围限的陇中盆地所构成的广阔区域处于华北板块、扬子板块和羌塘地块三大块体的交汇部位,其东为鄂尔多斯地块和北部是阿拉善地块(这两个块体是华北板块的一部分)以及东南部属扬子板块和西南部为羌塘地块。天水盆地位于陇中盆地的东南隅,东接六盘山,南邻西秦岭造山带,西秦岭北缘断裂贯穿其中,是西秦岭的山前凹陷盆地(见图 1)。

盆地的基底为祁连山加里东褶皱带,盆内发育新生代地层,其中古近系沉积物呈零星分布,而新近系河湖相沉积物广泛连续分布,并与下伏古近系地层呈

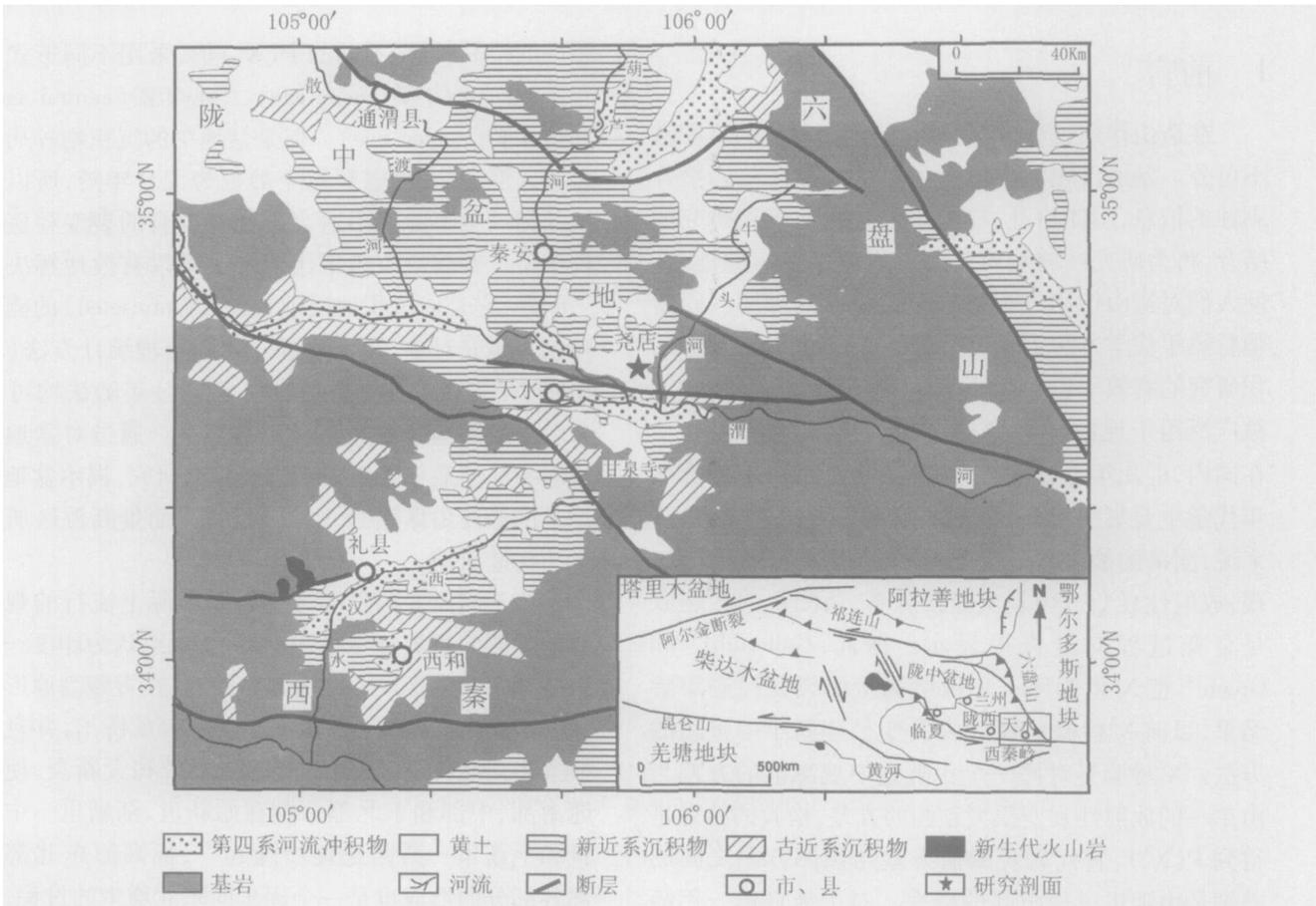


图 1 天水盆地和研究区剖面位置

Fig 1 Simplified geologic map of the Tianshui Basin and the location of the study section

不整合接触。研究的尧店剖面 (105°55'E, 34°38'N) 位于天水市东北渭河北岸、牛头河西岸的尧店村边 (见图 1)。该剖面新生代地层顶部被第四纪黄土披覆, 底部与基底泥盆系地层呈不整合接触 (图 2)。根据岩性、哺乳动物化石、地层接触关系和区域地层对比, 剖面由新生代地层组成, 其中新近系不整合的超覆于古近系之上。古近系由大套巨厚浅砖红色砂质角砾岩夹砂质条带组成, 厚约 90 m, 其砾石成分复杂, 主要为花岗片麻岩、花岗岩、石英岩和黑云母片岩, 砾石呈棱角一次棱角状、大小混杂 (最大粒径 30 cm, 一般 0.5~6 cm)、分选极差、砂泥质支撑, 具粗糙粒序韵律 (韵律厚 1~2m), 属洪积产物。新近系地层厚度大于 180 m, 根据岩性特征其沉积序列自下而上划分四段 (图 2), 依次为: 第一段 (厚 34.8 m) 为棕

红色泥岩与钙质泥岩互层, 底部夹砂岩, 属河道较远或冲积扇远端低能的洪泛平原沉积产物; 第二段 (厚 70.2 m) 为棕红色泥岩和粉砂岩互层夹具大型斜层理的砂岩和含砾砂岩透镜体, 是河道与洪泛平原沉积产物<sup>①</sup>; 第三段 (厚 72.5 m) 灰绿色泥灰岩和棕红色泥岩互层, 具湖相沉积特征<sup>①</sup>; 第四段 (厚 > 40 m) 为棕红色泥岩与钙质泥岩互层。其中第二段砂岩中发现渭河三趾马 (*Hipparion wehoense*)、新罗斯祖鹿 (*Cervavitus novorossiae*) 和鼬鬃狗 (*Ictitherium* sp.) 等化石, 这些动物组合有鲜明的晚中新世的特点。在发现这些层位准确的哺乳动物化石基础上, 对尧店剖面进行了高分辨率古地磁年代测定<sup>①</sup>, 获得尧店剖面新近系第一段至第四段地层年代分别为 12.4~11.53 Ma、11.53~9.23 Ma、9.23~7.43 Ma 和 < 7.43 Ma。

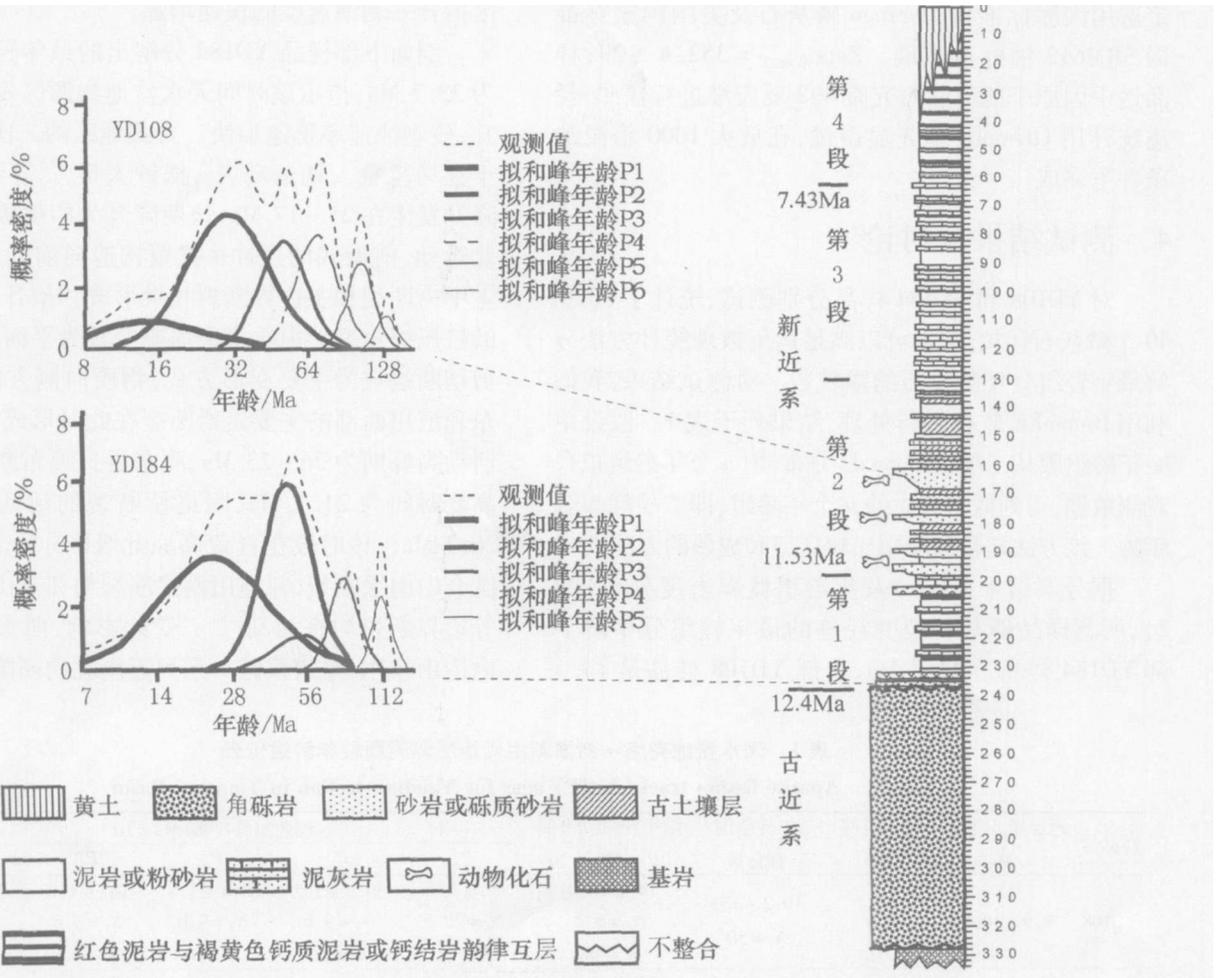


图 2 天水盆地尧店剖面新生代地层与裂变径迹年龄组概率密度分布图

Fig 2 Stratigraphy of Yaodian section in Tianshui Basin and the apatite fission track grain ages distribution

① 李吉均, 张军, 宋春晖, 等. 陇中盆地灞河期地层的发现及意义. 中国科学 (D 辑), 2006 待刊

### 3 实验条件

按裂变径迹样品采样规范,在尧店剖面第一段底部和第二段中部出露的砂岩和含砾砂岩中采集了 FT 样品,编号为 YD108(162 m)和 YD184(236 m)(见图 2),样品地层的磁性年代分别 12.4 Ma 和 9.9~10.9 Ma。对采集的样品用常规选矿流程和重液分离技术进行了单矿物分选,并在体视显微镜下人工手选,获得的磷灰石矿物纯度大于 90%。裂变径迹测试采用外探测器法,由中国地震局地质所地震动力学国家重点实验室万景林先生<sup>[15]</sup>完成。测试条件如下:磷灰石裂变径迹蚀刻条件为体积分数 7%的 HNO<sub>3</sub>溶液,室温为 40;外探测器采用低铀含量白云母,蚀刻条件为体积分数 40%的 HF 溶液,室温,20 min;Zeta 标定选用国际标准样 Durango 磷灰石及美国国家标准局 SRM 612 铀标准玻璃。Zeta<sub>SRM612</sub> = 352.4 ± 2.9,样品送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照;径迹统计用 Olympus 偏光显微镜,在放大 1000 倍浸油条件下完成。

### 4 测试结果及讨论

对 YD108 和 YD184 样品分别测试,统计了 50 和 40 个磷灰石颗粒,基本可以满足运用数理统计方法分解最年轻组分年龄所需的颗粒数。对测试结果,我们利用 BinomFit 软件进行处理,结果列于表 1。假设单一年龄组服从二项(binomial)分布,用  $n$  个年龄组拟合观测数据,得到概率最大的  $n$  个年龄组,即二项峰拟合年龄。该方法是目前应用比较广泛和成熟的方法<sup>[3,4]</sup>。

据分解结果(表 1)及年龄组概率密度分布(图 2),所测样品磷灰石裂变径迹的最年轻组分年龄下部 YD184 样品为 23.7 Ma 上部 YD108 样品是 14.1

Ma。由于一个样品的最年轻组分年龄代表它从开始抬升通过封闭深度(封闭温度所对应的埋藏深度)至今的年龄,所以它大于对应的沉积地层的沉积年龄,它们之间有一时间差,称为滞后时间(lag time)。滞后时间为样品从开始抬升到封闭深度之上直至它被剥蚀搬运到盆地中的时间,其中它从地表被剥蚀搬运到盆地中的时间一般认为很短而被忽略<sup>[2]</sup>。用封闭深度除以滞后时间,可以求出平均剥蚀速率(exhumation rate)。样品 YD184 和 YD108 相应的滞后时间分别为 11.3 Ma 和 3.6 Ma(表 1)。在沉积地层剖面上,每出现一次新的最年轻组分年龄,代表源区一次快速的冷却事件或火山活动<sup>[2]</sup>。由此可见,上述两个最年轻组分年龄代表了天水盆地物源区可能经历了 23.7 Ma 和 14.1 Ma 两次构造—热事件,同时伴随源区抬升—剥蚀速度的快速增加。

剖面下部样品 YD184 分解出的最年轻组分年龄为 23.7 Ma 指示该时间天水盆地物源区发生构造抬升,使剥蚀速率迅速加快。青藏地区的二次隆升相当于喜马拉雅二期运动<sup>[16]</sup>,据钟大赉<sup>[17]</sup>等研究,这起隆升发生在 25~17 Ma 该期隆升为印度板块持续向北运动,前展式的逆冲—推覆构造向前陆方向迁移,主中央断裂和主边界断裂相继形成和抬升,处在后陆的挤压缩短变形由垂直平面应变转为平面应变,水平剪切断裂成为主要变形方式,物质向侧方向逸出,藏东和滇川西部的主要走滑断裂在此时形成;红河断裂活动高峰期为 26~23 Ma 藏东贡日嘎布断裂的活动高峰时间为 24.7 Ma 阿尼桥断裂的活动高峰期为 26.7 Ma 该时段在青藏高原北缘阿尔金走滑断裂、昆仑山南缘断裂、祁连山南缘断裂与祁连山北缘断裂等边界断裂均有活动<sup>[18]</sup>。受此影响,西秦岭发生陆内造山作用,导致该区一系列近南北向断陷盆地的形

表 1 天水盆地尧店一剖面新生代地层碎屑颗粒年龄组份表

Table 1 Apatite fission track (AFT) ages for Yaodian section in Tianshui Basin

样品号	地层单元年龄 Ma	滞后时间 Ma	年龄范围 颗粒数	最年轻组分年龄 ( $P_1$ ) Ma ± 1σ	较老组分年龄 Ma ± 1σ				
					$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
YD108	9.9~10.9	3.6	10.2~133 $N_i=50$	14.1 ± 1.1 $N_f=51$ $W=49$	30 ± 3.3 $N_f=20.5$ $W=38$	50.5 ± 5.2 $N_f=9.6$ $W=22$	69.4 ± 5.8 $N_f=9.0$ $W=20$	102 ± 4.8 $N_f=4.6$ $W=13$	131 ± 3.2 $N_f=12$ $W=9$
				8~117.2 $N_i=40$	23.7 ± 2.8 $N_f=18$ $W=50$	47.7 ± 16 $N_f=13.9$ $W=23$	53.6 ± 13 $N_f=2.3$ $W=21$	81.5 ± 4.1 $N_f=3.8$ $W=13$	115.7 ± 4 $N_f=2.1$ $W=9$
YD184	~12.4	11.3							

注:滞后时间为最年轻组分年龄与地层年龄的差值; $P_1$ ~ $P_6$ 为拟合峰年龄; $N_i$ 为样品测试颗粒总数; $N_f$ 为年龄组中包含的颗粒数; $W$ 为年龄峰的相对标准偏差,用绝对标准偏差/峰年龄比值的百分数表示。BinomFit 软件由耶鲁大学免费提供,可通过 [www. geo. bgy. yale. edu / ~brandon](http://www.geo.bgy.yale.edu/~brandon) 下载。

成<sup>[19]</sup>, 据此推断, 尧店剖面新近系下部沉积物中未重置磷灰石颗粒分解出的最年轻组分年龄 23.7 Ma 可能反映天水盆地物源区发生了一次强烈的构造活动事件, 该事件可能导致了天水盆地断陷成盆, 使盆地开始接受新近纪冲积相沉积, 如盆地南部甘泉寺一带沉积了厚层砂砾岩、粉砂岩与泥岩。

在水盆地南部, 喻学惠<sup>[12, 13]</sup>等在西秦岭礼县一宕昌境内发现的钾质超基性火山岩钾霞橄黄长岩, 并且在同一个火山岩筒中获得两个金云母的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>A 年龄分别为 22 Ma 和 23 Ma 是在西秦岭地区整体处于陆内汇聚、挤压造山条件下, 岩石圈局部发生热上隆和部分熔融的产物, 说明青藏高原东北缘此时处于构造活动阶段。这进一步佐证了本文推断的合理性。

剖面中部样品 YD108 中的最年轻组分年龄表明其源区在 14.1 Ma 天水盆地物源区的剥蚀速率迅速加快。根据 YD108 层上下透镜状河道砂岩中斜层理统计, 恢复其古流向为 330°~350°、300°~320°和 300°~340°, 表明古水系源于秦岭, 说明 14.1 Ma 左右西秦岭物源区由于快速构造隆升使含有磷灰石颗粒的岩石被抬升、快速达到冷却温度, 并被剥蚀搬运到天水盆地中堆积。同时这次构造活动使盆地进一步拗陷, 造成广泛的河湖相沉积。郑德文<sup>[4]</sup>通过临夏盆地的沉积物中磷灰石裂变径迹记录揭示约 14 Ma 青藏高原有一次构造活动事件, Yan 等根据古地磁研究认为 11~17 Ma 贵德盆地顺时针构造旋转 25°<sup>[20]</sup>。另外, 藏北地区和西秦岭礼县一宕昌一西和一带约 13~15 Ma 发生岩石圈减薄<sup>[12]</sup>, 昆仑山一西秦岭一线在这段时间可能由于岩石圈减薄作用而导致地壳增厚、高原隆升。可见天水盆地沉积物中磷灰石裂变径迹记录揭示约 14.1 Ma 左右的西秦岭构造隆升与青藏高原东北缘许多地方记录的同期构造事件一致。

一般认为, 颗粒年龄封闭深度与滞后时间之比为平均剥蚀速率, 封闭深度的计算公式为:

$$T(z) = T(s) + g_0 Z^{(3 \sim 21)} \quad (1)$$

$T(z)$  为磷灰石裂变径迹封闭温度,  $T(s)$  为地表温度,  $g_0$  为平均地热梯度,  $Z$  为颗粒年龄封闭深度。本文选定  $T(z) = 110^\circ\text{C}$ <sup>[17, 22, 23]</sup>,  $T(s) = 5^\circ\text{C}$ <sup>[21]</sup>。由于晚新生代中国西部盆地古地温梯度在 25~30°C/km 之间<sup>[21, 24]</sup>, 故本文取其平均值即  $g_0 = 27.5^\circ\text{C}/\text{km}$ 。由 (1) 式求出该区磷灰石的封闭深度为 3.8 km。基于该颗粒年龄封闭深度和滞后时间 (见表 1), 估算出

23.7 Ma 和 14.1 Ma 时天水盆地物源区的平均剥蚀速率分别为 0.34 mm/a 和 1.05 mm/a

## 5 结论

(1) 青藏高原东北缘天水盆地沉积物源区在 23.7 Ma 左右发生了一次与青藏高原隆升有关的构造—热事件。该事件可能导致天水盆地断陷, 并开始接受新近系冲积相沉积。

(2) 天水盆地沉积物源区在 14.1 Ma 左右经历了一次构造活动, 使源区剥蚀速率加快和盆地进一步拗陷广泛接受河湖相沉积, 表明青藏高原东北缘 14.1 Ma 左右存在构造—热事件。

(3) 天水盆地沉积物磷灰石裂变径迹记录的 23.7 Ma 和 14.1 Ma 物源区快速抬升事件导致剥蚀速率加快, 粗略估计其平均剥蚀速率分别达 0.34 mm/a 和 1.05 mm/a

致谢 感谢中国地震局地质所地震动力学国家重点实验室万景林先生给与指导和有益的建议, 兰州大学地理系张勇博士, 董丽丽、易为华硕士对样品的前期处理工作的帮助。

## 参考文献 (References)

- Brandon M T, Vance J A. Tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex, Washington state as deduced from fission track ages for detrital zircons. *American Journal of Science*, 1992 (292): 565~636
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 碎屑颗粒热年代学——一种揭示盆地耦合过程的年代学方法. *地震地质*, 2000 22(增刊): 25~36 [Zhen Dewen, Zhang Penzheng, Wan Jinglin, et al. Detrital grain thermochronology: a potential method for research on coupling process between basin and mountain. *Seismology and Geology*, 2000 22(Suppl): 25~36]
- Brandon M T, Roden-Tice M K, Garver J I. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, north-west Washington State. *The Geological Society of America*, 1998 110(8): 985~1009
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. *中国科学 (D 辑)*, 2003 33(增刊): 190~197 [Zhen Dewen, Zhang Penzheng, Wan Jinglin, et al. The late cenozoic tectonic distortion of northwest margin of Tibetan Plateau: the record of detrital apatite fission track dating in Linxia basin. *Science in China (Series D)*, 2003 33(Suppl): 190~197]
- Galbraith R F. On statistical models for fission track counts. *Journal of Mathematical Geology*, 1984, 13: 471~478
- Green P F. A new look at statistics in fission track dating. *Nuclear Tracks Radiation Measurement*, 1984, 5: 77~86

- 7 Tapponnier B, Xu Z, Roger F, *et al*. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 2001, 294: 1671~1677
- 8 Meyer B, Tapponnier B, Bourjot L, *et al*. Crustal thickening in Gansu-Qinghai lithospheric mantle subduction and oblique strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophysical Journal of International*, 1998, 135(1): 1~47
- 9 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 316~322 [Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, *et al*. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of Huanghe River during the Late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 316~322]
- 10 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. *科学通报*, 1997, 42(14): 1457~1471 [Fang Xiaomin, Li Jijun, Zhu Junjie, *et al*. The absolute dating and demarcation of the Cenozoic stratigraphy in the Linxia basin, China. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(14): 1457~1471]
- 11 Tumer S, Hawkesworth C, Liu J, *et al*. Timing of Tibet uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 1993, 364: 50~54
- 12 喻学惠. 甘肃礼县-宕昌地区新生代钾质碱性超基性火山岩的特征及成因. *特提斯地质*, 1994, (18): 114~127 [Yu Xuehui. Cenozoic potassic alkaline ultrabasic volcanic rocks and its genesis in Lixian Dangchang area, Gansu Province. *Tethyan Geology*, 1994, (18): 114~127]
- 13 喻学惠, 莫宣学, Lower M, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造含义. *岩石学报*, 2001, 17(3): 366~377 [Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Lower M, *et al*. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu province. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 366~377]
- 14 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸岩的微量、稀土和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据. *岩石学报*, 2004, 20(3): 483~494 [Yu Xuehui, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, *et al*. Trace elements, REE and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Cenozoic kamafugite and carbonatite from west Qinling, Gansu province: Implication of plume lithosphere interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 483~494]
- 15 万景林, 李齐, 王瑜. 华山岩体中, 新生代抬升的裂变径迹证据. *地震地质*, 2000, 22(1): 58~53 [Wan Jinling, Li Qi, Wang Yu. The fission track evidence of Huashan batholith uplifting in Mesozoic-Cenozoic. *Seismology and Geology*, 2000, 22(1): 58~53]
- 16 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(3): 263~271 [Shi Yaofeng, Tang Maocang, Ma Yuzhen. The two period uplift of Tibetan Plateau with Asian monsoon formation. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 263~271]
- 17 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 289~295 [Zhong Dalai, Ding Lin. The uplift progress and mechanism of Tibetan plateau. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 289~295]
- 18 吴珍汉, 吴中海, 江万, 等. 中国大陆及邻区新生代构造-地貌演化过程与机理. 北京: 地质出版社, 2001. 37~47 [Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Jiang Wan, *et al*. The Cenozoic Tectonic-relief Evolution Process and Mechanism of Chinese Mainland and Adjacent Region. Beijing: Geological Publishing House, 2001. 37~47]
- 19 杜子图, 吴淦国, 吕古贤, 等. 西秦岭及周边地区构造体系划分与构造演化. *地质力学学报*, 1998, 4(2): 41~49 [Du Zitū, Wu Ganguo, Lu Guxian, *et al*. Structural systems in the west Qinling and adjacent region and their evolution. *Journal of Geomechanics*, 1998, 4(2): 41~49]
- 20 Yan M, Vander R V, Fang X, *et al*. Paleomagnetic evidence for a mid-Miocene clockwise rotation of about 258° of the Guide Basin area in NE Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241: 234~247
- 21 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 2004. 92~132 [Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. The Theory and Application in Studying the Thermal System in Sediment Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. 92~132]
- 22 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 西秦岭北缘中生代构造活动的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar FT热年代学证据. *岩石学报*, 2004, 20(3): 697~706 [Zhen Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, *et al*. The <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Fission track evidence of Mesozoic tectonic in northern margin of west Qinling mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 697~706]
- 23 朱文斌, 万景林, 舒良树, 等. 吐鲁番哈密盆地中生代热历史: 磷灰石裂变径迹证据. *自然科学进展*, 2004, 14(10): 1194~1198 [Zhu Wenbin, Wan Jinglin, Shu Liangshu, *et al*. Apatite fission track evidence of Mesozoic Cenozoic thermal history in Hami basin of Tuluhan. *Progress of Natural Science*, 2004, 14(10): 1194~1198]
- 24 邹华耀, 吴智勇. 镜质体反射率在重建盆地古地温中的应用—中国东部、西部中、新生代沉积盆地古地温特征. *沉积学报*, 1998, 16(1): 112~119 [Zhou Huayong, Wu Zhiyong. Application of vitrinite reflectance in reconstruction of paleotemperature. Evolution of paleotemperature in the eastern and western Mesozoic-Cenozoic sedimentary basins, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 112~119]

# Cenozoic Uplift of West Qinling, Northeast Margin of Tibetan Plateau

## The record of detrital apatite fission track data in Tianshui Basin

WANG Xiuxi<sup>1</sup> LI Jijun<sup>1,2</sup> SONG Chunhui<sup>1</sup> ZHANG Jun<sup>1</sup>  
ZHAO Zhijun<sup>2</sup> GAO Junping<sup>1</sup> PAN Meihui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Western Chinese Environmental Systems Ministry of Education & College of Earth and Environment Sciences  
Lanzhou University Lanzhou 730000

2. College of Geography Nanjing Normal University Nanjing 210097)

**Abstract** An important key site in Tianshui Basin which locates between Liupan mountain and west Qinling northeast margin of Tibetan Plateau exposed a conformable Cenozoic sedimentary sequence that recorded the exhumation history of this area. So studying these sediments is very important to reveal the tectonic heating history of this area. Detrital apatite grain thermochronology was used to examine samples of sandstone and conglomerate sampled from Yaodian section Tianshui Basin. With other evidences we inferred two tectonic heating events occurred at the source regions of the Tianshui Basin. One event the tectonic uplift of west Qinling occurred at about 23.7 Ma and had the relationship with the Tibetan plateau uplift which resulted in the formation of Tianshui Basin and to start alluvial deposits in Tianshui Basin. Another tectonic event occurred at about 14.1 Ma which made Tianshui Basin was depressed again and came into being broad fluvio lacustrine deposits. The source region uplifted and were eroded rapidly because of the events. The rough mean exhumation rates were 0.34 mm/a and 1.05 mm/a, respectively.

**Key words** northeast of Tibetan Plateau Tianshui Basin detrital apatite grain thermochronology tectonic heating event