

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.085

文章编号: 1006-6616 (2021) 06-1051-14

青藏高原东北缘隆德观音店剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义

寇琳琳^{1,2}, 李振宏^{1,3}, 董晓朋^{1,3}, 崔加伟^{1,3}, 李海龙²

KOU Linlin^{1,2}, LI Zhenhong^{1,3}, DONG Xiaopeng^{1,3}, CUI Jiawei^{1,3}, LI Hailong²

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院, 北京 100037;

3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

KOU L L, LI Z H, DONG X P, et al., 2021. The age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section in Longde, the northeastern margin of the Tibetan Plateau, and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 1051 - 1064. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.085

Abstract: The precise age of the strata at the northeastern margin of the Tibetan Plateau in the Paleogene-Neogene, and the initial time when the uplift of the Plateau affected its northeastern margin, have always been two main bone contentions among geologists. The Guanyindian section at the northeastern margin of the Tibetan Plateau is our research subject. We gain new insights to the two mentioned issues by using detrital zircon U-Pb dating in combination with the previous results concerning regional paleontological fossil identification and paleomagnetic dating. The dating results show, among the samples from the upper Paleogene Qingshuiying formation at the northeastern margin of the Tibetan Plateau, the youngest peak is 17.8 Ma. Two conclusions are drawn from the research results. Firstly, the deposition age of the Qingshui formation is from the late Oligocene to early Miocene, showing the characteristic of diachronism. Secondly, the northeastward extension and pushing of the uplift of the Tibetan Plateau has begun affecting the west of the Haiyuan-Liupanshan fault zone since the early Miocene with a coupling relationship among tectonics, sedimentation and climate in the area. The research findings provide a new time scale for determining the initial time when the northeastward pushing of the Tibetan Plateau began to affect its northeastern margin.

Key words: Paleogene; Qingshuiying formation; detrital zircon age sequence; Guanyindian section in Longde; northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau

摘 要: 青藏高原东北缘古近纪—新近纪地层的精确时代和高原隆升扩展何时影响到东北缘地区一直是地质学家争论的焦点。此次以青藏高原东北缘隆德观音店剖面为研究对象, 采用碎屑锆石 U-Pb 测年方法, 结合区域古生物化石鉴定、古地磁测年结果, 针对上述两个问题提出了新的认识。测试分析发现, 青藏高原东北缘古近系清水营组上部碎屑锆石年龄序列中最年轻的峰值为 17.8 Ma, 研究得出如下两个认

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41972119); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190018)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41972119) and the Geological Survey Project of China Geological Survey (Grant No. DD20190018)

第一作者简介: 寇琳琳 (1998—), 女, 在读硕士, 主要从事构造地质方面的研究工作。E-mail: 1976734800@qq.com

通讯作者: 李振宏 (1973—), 男, 副研究员, 主要从事沉积地质与大地构造、石油地质综合研究、区域地质调查等方面的研究工作。

E-mail: Lizhenhong@126.com

收稿日期: 2021-04-25; **修回日期:** 2021-08-11; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 寇琳琳, 李振宏, 董晓朋, 等. 2021. 青藏高原东北缘隆德观音店剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 1051-1064. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.085

识：清水营组的沉积时代应归属于晚渐新世—早中新世，区域上具有穿时性；青藏高原隆升向东北方向的扩展推挤作用在早中新世时期就开始影响到了海原—六盘山断裂带以西地区，区域上构造—沉积—气候之间具有协同演化的耦合关系。这一研究成果为青藏高原隆升向东推挤扩展影响到东北缘地区的起始时限提供了新的时间标尺。

关键词：古近系；清水营组；碎屑锆石年龄序列；隆德观音店剖面；青藏高原东北缘

中图分类号：P534.61 **文献标识码：**A

青藏高原东北缘弧形构造带位于北祁连地块造山带、阿拉善地块与华北克拉通的交界部位，记录了晚新生代青藏高原隆升向东北方向推挤扩展的远程效应，该构造带形成时限是一个重要的科学问题，目前仍存在古近纪和新近纪两种争议 (Molnar and Tapponnier, 1975; Deng et al., 1984; England and Houseman, 1985; Burchfiel et al., 1991; 安芷生等, 2000; 田勤俭等, 2000; An et al., 2001; Tapponnier et al., 2001; Yin et al., 2002; Fang et al., 2003; 郑德文等, 2005; 张进等, 2005, 2006; Enkelmann et al., 2006; 张培震等, 2006; Jiang et al., 2007; Lin et al., 2010, 2015; Clark et al., 2010; Duvall et al., 2013; Huang et al., 2016; Liu et al., 2019)。六盘山南缘西秦岭地区磷灰石 (U-Th) /He 年龄、断裂带内断层泥的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年以及六盘山北缘寺口子剖面碎屑锆石测年结果共同表明，在始新世到渐新世时期，青藏高原隆升向东北方向的推挤作用就已经影响到了东北缘地区 (Clark et al., 2010; Duvall et al., 2013)。有学者根据对宁夏中南部地区地貌格局和构造变形分析研究认为，青藏高原东北缘东段弧形构造带形成的启动时间在古近纪始新世 (周特先等, 1985)。目前，大多数观点认为青藏高原东北缘的地壳缩短过程直到新近纪中新世才开始 (Meyer et al., 1998; Tapponnier et al., 2001)。青藏高原东北缘新生代红黏土的发育可以指示区域抬升事件 (施炜等, 2006)，基于古地磁数据 (Sun et al., 1998; Ding et al., 1999; Qiang et al., 2001; Xu et al., 2012; Li et al., 2013) 和古生物组合研究 (邱占祥等, 1988; 邱占祥和邱铸鼎, 1990)，其底界年龄可以精确的限定在 11~8 Ma。新的低温热年代学 (磷灰石、锆石 (U-Th) /He 以及裂变径迹年代) 研究显示青藏高原东北缘不同区域形成时间并不一致，在海原断裂带西部最早的抬升时间为 15 Ma，而在海原断裂带东部抬升时间为 10~8 Ma (Duvall et al., 2013)。

更多的裂变径迹资料以及古地磁研究证据表明，10~8 Ma 这期构造抬升在青藏高原东北缘弧形构造带更为普遍，在弧形构造带前缘的烟筒山构造带以及大罗山—牛首山构造带都有具体形式的表现 (申旭辉等, 2001; 郑德文等, 2005; 张培震等, 2006; Liu et al., 2019)。区域构造变形研究结果表明，青藏高原东北缘晚新生代发生了多期次的构造变形，主要包括早—晚中新世和上新世—更上新世剧烈的构造变形 (Zhang et al., 2010; 施炜等, 2013; Shi et al., 2015)。同时，在青藏高原东北缘弧形构造带六盘山造山带前缘的晚新生代寺口子组剖面，相关学者利用古地磁研究发现六盘山冲积扇体砾岩的底部年龄为 5.4 Ma，该套砾岩可能代表了六盘山造山带晚新生代快速隆升的起始时限 (王伟涛等, 2013)。最新的研究成果将青藏高原东北缘的形成时限提前到了古近纪末至新近纪初，基于青藏高原东北缘古近系内正断层的研究，推断该地区在古近纪始新世—渐新世受太平洋板块向西俯冲的远程效应影响，持续北西—南东向伸展，直到古近纪渐新世末在高原北东向扩展挤出的影响下才发生地壳抬升和缩短 (Fan et al., 2019)，但是 Zhang et al. (2016) 认为这些伸展属于块体旋转导致的局部现象，主要动力还是来自印度板块与欧亚板块的碰撞。此次研究基于青藏高原东北缘隆德观音店剖面，在沉积特征分析的基础上，采用碎屑锆石 U-Pb 测年方法，结合以往区域上古生物化石鉴定和古地磁综合研究成果，重新厘定了古近系清水营组的沉积时代，探讨了青藏高原向东推挤扩展的起始时限，这一研究成果为青藏高原隆升向东推挤扩展的起始时限提供了新的约束。

1 区域地质背景

青藏高原东北缘弧形构造带位于活动强烈的青藏高原与相对稳定的鄂尔多斯地块之间，主要由海原—六盘山断裂、香山—天景山断裂、烟筒山

断裂、罗山-牛首山断裂 4 条弧形断裂带及其夹持于其间的新生代山间盆地组成（图 1）。海原-六盘山断裂带总体上为北西到近南北向走向，地球物理资料显示该断裂带对应一条明显的重力梯度带，是一条横贯六盘山北缘的新生代活动断裂（陈虹等，2013）。香山-天景山断裂带主体发育于香山和天景山北麓，断裂带的运动特征总体上为左旋走滑兼具逆冲活动，但其东段和西段运动特征有较大差别，西段断层运动以左旋走滑为主兼有逆冲分量，东段断层运动以逆冲为主（宋方敏等，1982）。烟筒山活动断裂带主体分布在烟筒山东

麓，向西北进入腾格里沙漠的情况不清（Deng et al.，1984；Li et al.，2009）。牛首山-罗山断裂带是青藏高原东北缘最外侧一条边界断裂，也是青藏高原与鄂尔多斯地块和阿拉善地块的分界断裂（Zhang et al.，1991；陈虹等，2013；Chen et al.，2015；崔加伟等，2018；黄婷等，2018），断裂带两侧的地质历史、现今地貌和地球物理特征都存在着明显差异，西南侧是祁连山加里东期造山带，地貌特征表现为一系列不对称的弧形山地和盆地，东北侧为鄂尔多斯地块和阿拉善地块（国家地震局，1988；马寅生，2003）。

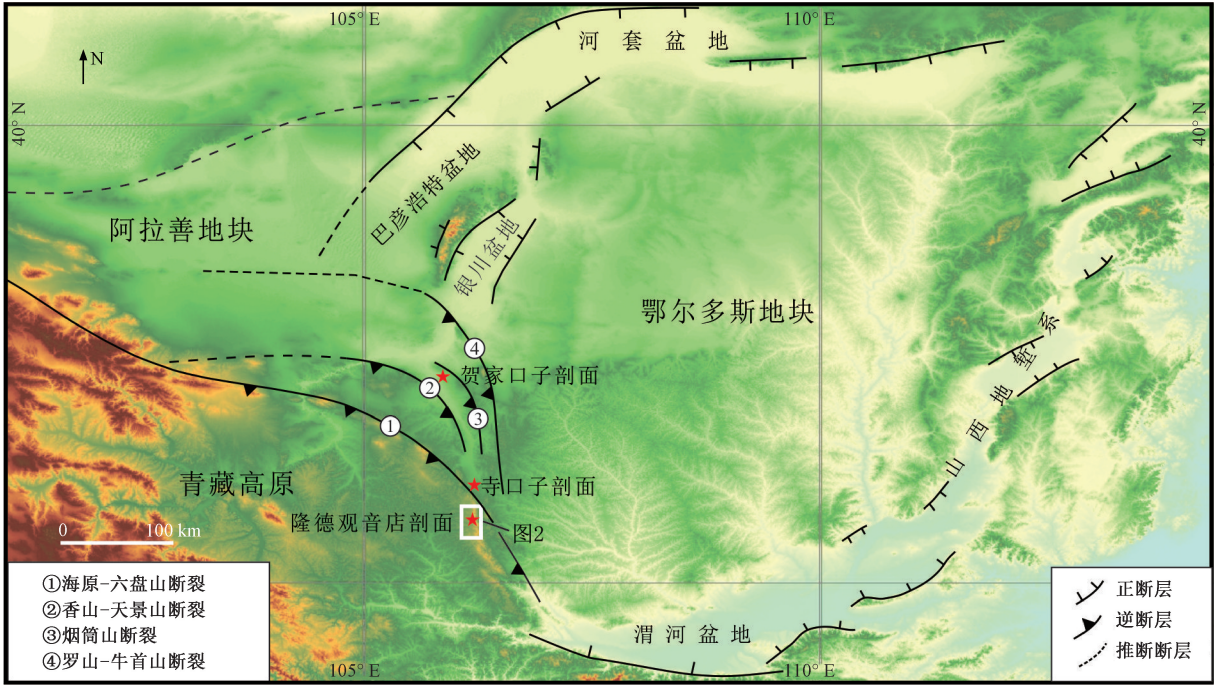
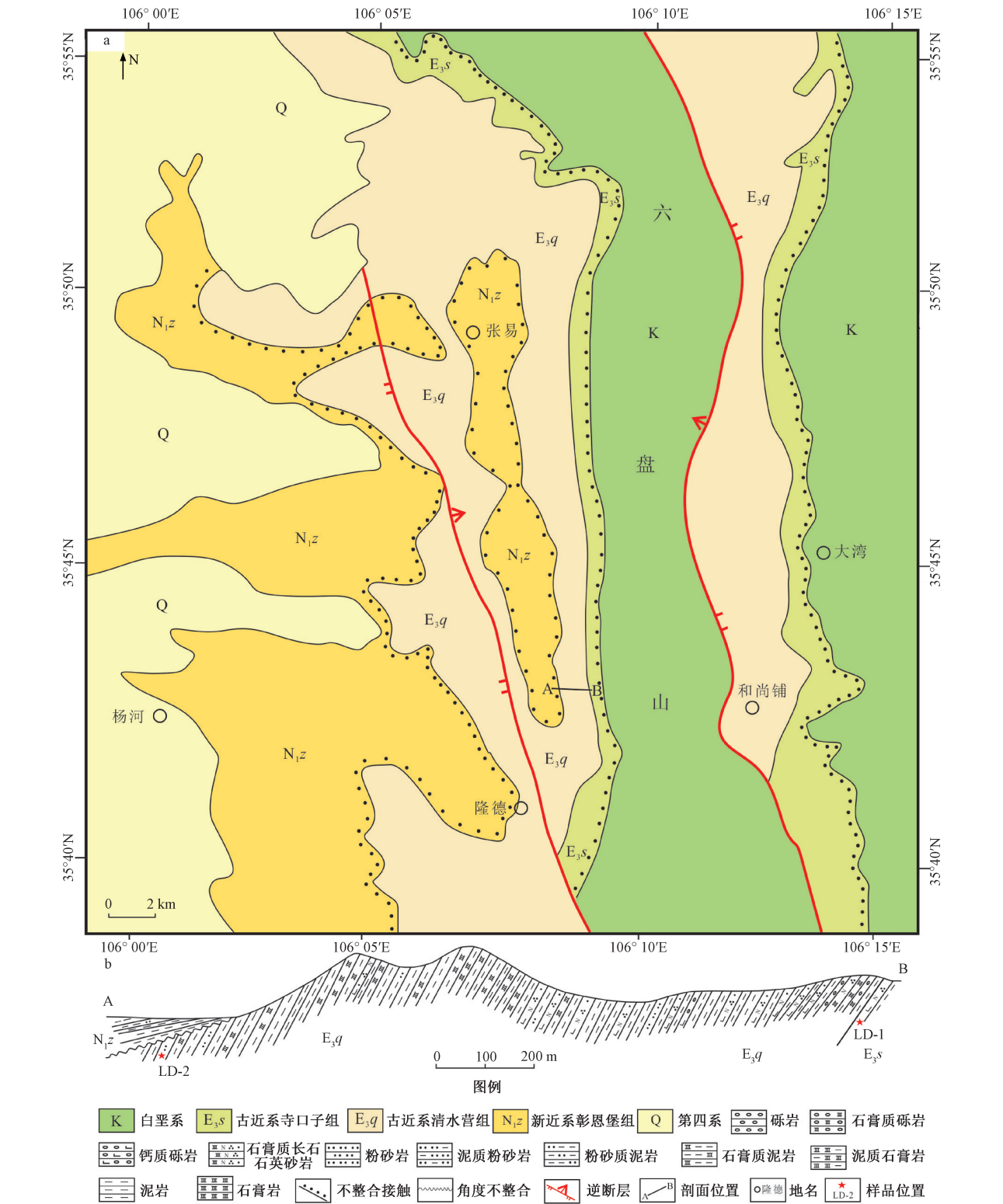


图 1 研究区区域大地构造位置图
Fig. 1 Regional tectonic map of the study area

隆德观音店剖面位于青藏高原东北缘海原-六盘山断裂以西（图 2；宁夏回族自治区地质调查院，2017）。剖面自下而上主要包括古近系寺口子组、清水营组和新近系彰恩堡组，古近系寺口子组与下覆下白垩统马东山组之间角度不整合接触，古近系清水营组与新近系彰恩堡组之间角度不整合接触（图 3；宁夏回族自治区地质调查院，2017）。寺口子组为一套灰红、浅红灰色中厚层钙质含砾不等粒长石石英砂岩夹浅灰色中粗砾岩、砂砾岩透镜体及少许紫红色泥岩条带。该套地层在纵向序列上整体上分为上下两套，下部以灰红

色厚层砾岩为主，上部以紫红色长石石英砂岩为主，局部夹砾岩透镜体。清水营组在青藏高原东北缘主体上为一套干旱气候条件下的河流相-湖泊相紫红色碎屑岩-膏岩沉积，主要由紫红色泥岩、砂岩和石膏岩组成，各地岩性基本上一致，但厚度上差别较大。隆德观音店剖面岩性为紫红色、桔红色间夹蓝灰、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹少量桔红色、砖红色中-薄层细粒长石石英砂岩、粉砂岩及浅灰色中厚层泥质石膏岩。新近系彰恩堡组为一套厚层橘红色、灰褐色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层橘红、褐红色泥质粉砂岩。



a—研究区区域地质图；b—隆德观音店剖面

图 2 研究区区域地质图 (据宁夏回族自治区地质调查院, 2017 修改)

Fig.2 Regional geological map of the study area (modified after Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, 2017)

(a) Regional geological map of the study area; (b) Guanyindian section



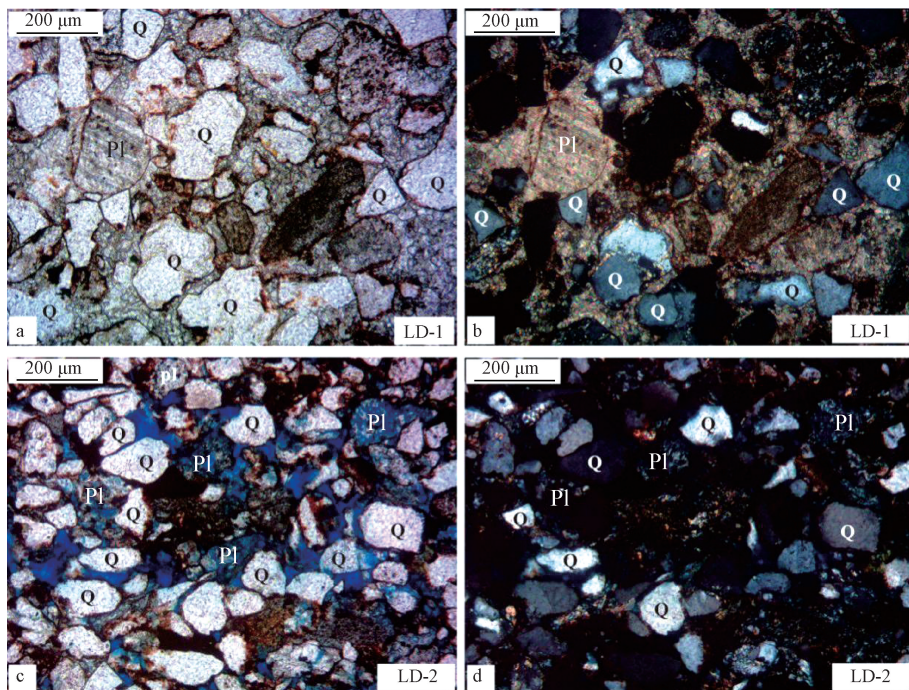
图 3 隆德观音店剖面综合地层柱状图 (据宁夏回族自治区地质调查院, 2017 修改)

Fig. 3 Comprehensive stratigraphic histogram of the Guanyindian section (modified after Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, 2017)

2 样品采集及测试

此次测试的碎屑锆石测年样品采集于隆德观音店剖面古近系寺口子组（样品编号 LD-1；106°09′51.13″E；35°41′36.76″N）和清水营组（样品编号 LD-2；106°09′51.13″E；35°41′36.76″N）。寺口子组（样品编号 LD-1）样品呈现砖红色，碎屑

成分组成为长石（40%~50%）、石英（50%），岩屑含量较少，长石以斜长石为主，石英呈粒状与长石之间颗粒支撑，镜下定名为不等粒岩屑长石石英砂岩（图 4a、4b）。清水营组（样品编号 LD-2）样品为灰白色，碎屑成分以石英（60%~70%）和斜长石（30%）为主，岩屑含量小于 10%，石英颗粒呈次圆状，镜下定名为不等粒岩屑长石石英砂岩（图 4c、4d）。



a、c—单偏光；b、d—正交偏光

Q—石英；Pl—斜长石

图 4 隆德观音店剖面样品显微照片

Fig. 4 Micrographs of samples from the Guanyindian section

(a and c) Under single polarizing glass; (b and d) Under crossed polarizing glass

Q—quartz; Pl—plagioclase

碎屑锆石 U-Pb 同位素测年样品碎样及锆石挑选、制靶、阴极发光以及透射、反射照相工作均在河北省区域地质调查研究院测试分析实验室完成。LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测定在自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室分析完成。测试仪器由美国相干（Coherent）公司 GeoLasHD 193 nm 激光器和安捷伦科技公司 Agilent 7900 四极杆等离子质谱仪构成。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度，二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流（Ar+He）中加入了少量氮气，以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度（Hu et

al., 2008）。另外，激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置，即使激光脉冲频率低达 1 Hz，采用该装置后也能获得光滑的分析信号（Hu et al., 2012）。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理（包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算）采用软件 ICPMS Data Cal（Liu et al., 2008, 2010a）完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同参考文献（Liu et al., 2008, 2010a, 2010b）。锆石 U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正，每分析 6 个样

品点, 分析 2 次 91500 和 1 次 Ple。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正, 数据处理方法同参考文献 (Liu et al., 2008)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据参考文献 (Wiedenbeck et al., 1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 完成 (Ludwig, 2003)。

3 测试结果

碎屑锆石 U-Pb 同位素测年有效点的分析主要选

取谐和率>90%的样品点进行分析 (原始数据见 OSID 码)。样品 LD-1 锆石阴极发光图像显示, 锆石形态大部分呈浑圆状、椭圆状 (70%), 部分呈长轴状, 自形较好 (30%)。大部分锆石颜色较深, 呈深灰色, 少部分锆石颜色较浅, 呈灰白色 (图 5)。锆石的颗粒一般大小为 90~150 μm , 约占锆石总量的 90% 以上, 仅有少部分锆石的颗粒大小大于 110 μm , 或者小于 70 μm , 分别占锆石总量的 5% 左右。锆石的整体年龄序列存在 15 个比较明显的峰值, 分别为 228 Ma、266 Ma、371 Ma、436 Ma、492 Ma、565 Ma、789 Ma、955 Ma、1078 Ma、1151 Ma、1595 Ma、1750 Ma、2039 Ma、2464 Ma 和 3317 Ma (图 6, 图 7)。

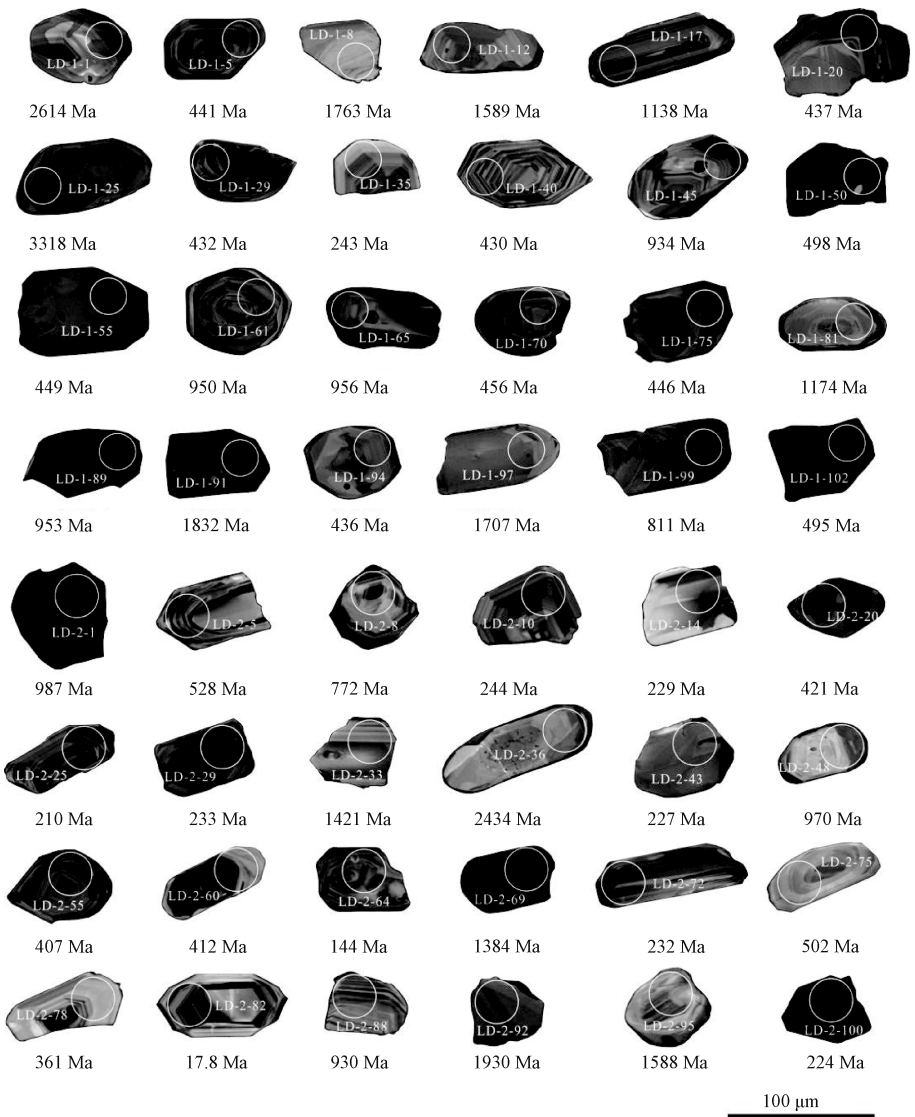


图 5 古近系碎屑锆石典型阴极发光照片
Fig. 5 Typical cathodoluminescence photos of the Paleogene detrital zircons

样品 LD-2 锆石阴极发光图像显示, 锆石形态大部分呈浑圆状、椭圆状 (60%), 部分呈长轴

状, 自形较好 (40%)。大部分锆石颜色较浅, 呈灰白色, 少量锆石颜色较深, 呈深灰色 (图 5)。

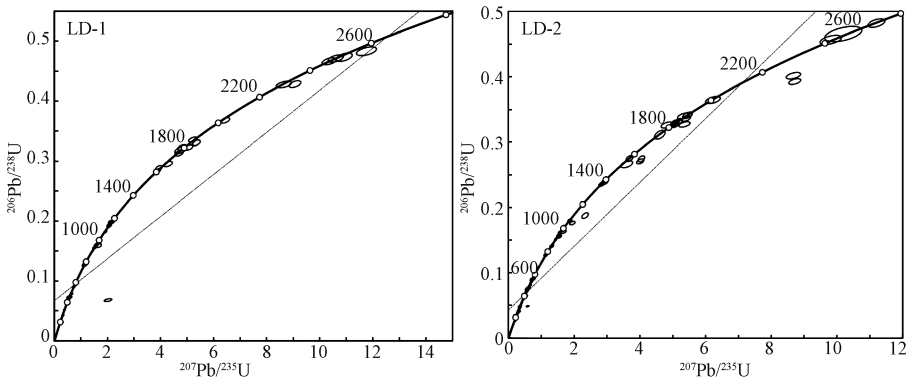


图 6 隆德观音店剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 6 U-Pb age concordia plots of the detrital zircons from the Guanyindian section

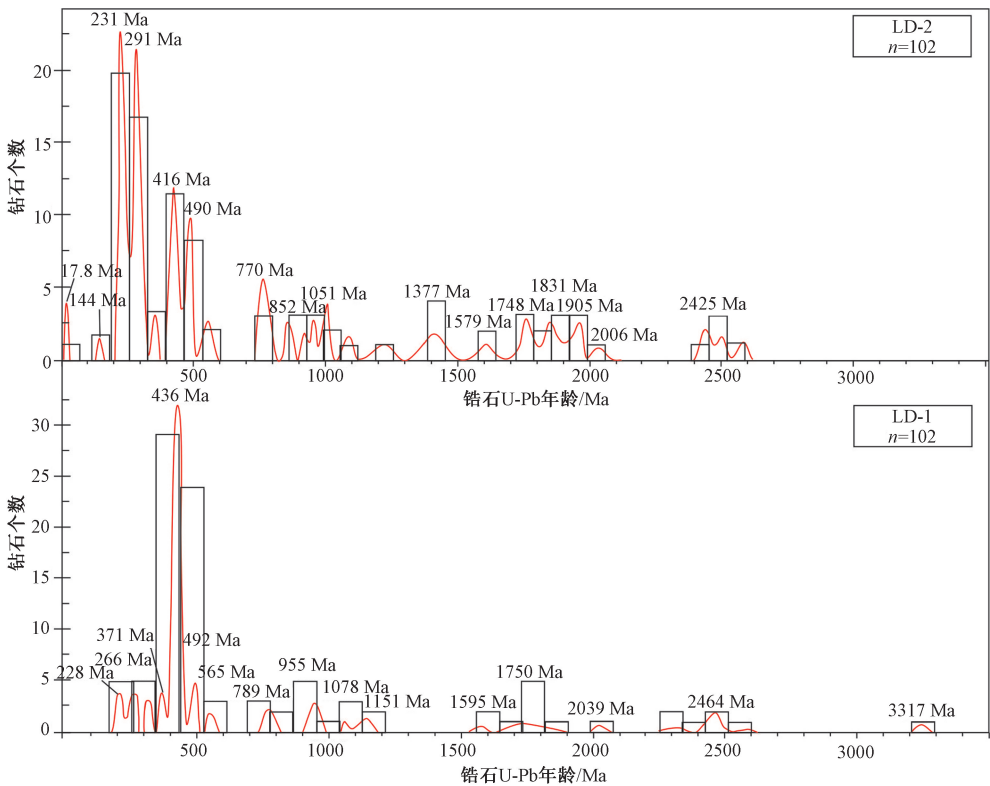


图 7 隆德观音店剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄序列
Fig. 7 U-Pb age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section

锆石的颗粒一般大小为 60~100 μm ，约占锆石总量的 80% 以上，仅有少部分锆石的颗粒大小大于 100 μm ，或者小于 60 μm ，分别占锆石总量的 10% 左右。锆石的整体年龄序列存在 16 个比较明显的峰值，分别为 17.8 Ma、144 Ma、231 Ma、291 Ma、416 Ma、490 Ma、770 Ma、852 Ma、1051 Ma、1377 Ma、1579 Ma、1748 Ma、1831 Ma、1905 Ma、2006 Ma 和 2425 Ma（图 6，图 7）。其中，有 4 个锆石样品的年龄集中在 17.8 Ma 的年龄峰值左右。

4 讨论

4.1 地层时代

关于青藏高原东北缘古近纪—新近纪地层的沉积时代，相关学者从古地磁以及古生物化石角度做过了大量的研究工作，但由于地层中未发现火山凝灰质夹层，因此缺乏精确的同位素年龄用以佐证磁性地层学以及古生物化石的研究结果，至今仍存在诸多争议（申旭辉等，2001；Jiang et

al., 2007)。在宁夏同心地区贺家口子剖面,清水营组为一套含石膏质泥岩、泥质石膏岩、砂质石膏岩以及条带状石膏岩的沉积地层,含有丰富的孢粉化石,自下而上可以划分3个组合。下部组合以含麻黄粉属 *Ephedripites* 和楝粉属 *Meliacoidites* 为特征,榆粉属 *Ulmipollenites* 含量较高,主要赋存于石膏层以下的纯泥岩段;中部组合以含麻黄粉属 *Ephedripites* 和楝粉属 *Meliacoidites* 为主,主要赋存于清水营组的石膏质泥岩段;上部组合以含楝粉属 *Meliacoidites*、麻黄粉属 *Ephedripites*、松粉属 *Pinuspollenites* 为主,主要赋存于含石膏层上部的纯泥岩段。综合孢粉序列鉴定结果表明该剖面清水营组沉积时代隶属于渐新世(宁夏回族自治区地质矿产局, 1990; 图8)。而与贺家口子剖面相邻的丁家二沟剖面,孢粉鉴定结果表明自下而上也存在3个明显的组合。下部组合可以与新疆库车盆地苏维依组—吉迪克组,青海民和、西宁盆地的马哈拉沟组、谢家组孢粉组合对比,其时代为中—晚渐新世;中部组合所反映的气候比下部组合明显变凉,与国内外渐新世晚期气候大致相同,其时代应为晚渐新世;上部组合中一些热带、亚热带分子又重新出现,明显指示了此时气候比中部组合有明显变暖的趋势,时代为中新世早期(宁夏回族自治区地质调查院, 2017)。综合孢粉序列鉴定结果表明丁家二沟剖面清水营组的时代应该为渐新世至中新世早期。固原寺口子组剖面的孢粉化石主要产于清水营组下部,鉴定结果表明其时代属于渐新世,但上部的年龄由于缺乏孢粉组合,无法从古生物角度加以限定(宁夏回族自治区地质矿产局, 1990)。最新的古地磁测年结果对寺口子剖面清水营组的沉积时代进行了重新的限定,测试结果认为清水营组的顶部年龄为16.8 Ma,其顶部年龄明显属于中新世早期(图8; 王伟涛, 2012; 王伟涛等, 2014)。隆德观音店剖面清水营组中上部也产丰富的孢粉化石,该孢粉组合可以与丁家二沟剖面上部的孢粉组合序列相对比,时代上可能隶属于渐新世晚期至中新世早期(宁夏回族自治区地质矿产局, 1990)。此次在清水营组上部碎屑锆石序列中获得了17.8 Ma的年龄峰值,表明该套地层顶部年龄应该晚于17.8 Ma,结合区域上孢粉组合的鉴定结果,以及固原寺口子剖面古地磁的测年结果,综合分析认为青藏高原东北缘古近系清水营组的沉积时代应该具

有穿时性,具体时限属于晚渐新世—早中新世。

4.2 构造意义

青藏高原东北缘弧形构造带位于活动的青藏高原块体与稳定的鄂尔多斯地块之间,是青藏高原最年轻的组成部分之一。关于青藏高原主体的隆升过程,具体可以划分为55~30 Ma、25~10 Ma和8 Ma以来三个主要的阶段(Fang et al., 2003; 郑文俊等, 2019; 卞爽等, 2021),但青藏高原隆升向东北方向的推挤扩展作用何时影响到东北缘地区,目前仍存在诸多争议(Molnar and Tapponnier, 1975; Deng et al., 1984; England and Houseman, 1985; Burchfiel et al., 1991; 安芷生等, 2000; 田勤俭等, 2000; An et al., 2001; Tapponnier et al., 2001; Fang et al., 2003; Enkelmann et al., 2006; Jiang et al., 2007; Lin et al., 2010, 2015; Zhang et al., 2010, 2016; Huang et al., 2016; Liu et al., 2019)。

根据碎屑锆石 U-Pb 测年结果,在六盘山以西的隆德观音店剖面,古近系清水营组上部的碎屑锆石年龄序列中出现了17.8 Ma的峰值年龄,除为区域地层格架的重新厘定提供了时间依据外,还为恢复周缘构造带的隆升剥蚀过程奠定了基础。根据隆德观音店剖面寺口子组砾岩的最大扁平面产状,结合清水营组砂层斜层理的产状,可综合恢复古近系的古水流方向。实测数据表明,在隆德观音店剖面自古近系寺口子组至清水营组,古水流的方向总体上没有发生太大的变化,自研究区南西流向北东向,显示物源区相对比较稳定(图8)。

进一步通过区域地层对比发现,在研究区南西方向的西秦岭礼县一带发育大量的新生代火山岩,主体为一套基性火山岩,但也不排除有目前尚未发现的小型中酸性岩脉的存在。相关学者通过 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年发现该套火山岩具有多期喷发的特征,其中就具有17.82 Ma的年龄峰值(Yu et al., 2011),这一年龄峰值与此次测定的碎屑锆石中的17.8 Ma年龄一致。同时,通过隆德观音店剖面中年龄为17.8 Ma的碎屑锆石的阴极发光特征观察可以发现(图5),这一峰值的锆石总体上形态较好,环带清楚,棱角分明,显然具有近源供给的特征。隆德观音店剖面清水营组顶部碎屑锆石年龄序列中不仅拥有同期火山喷发17.8 Ma年龄峰值的锆石,并且年龄介于490~200 Ma峰值的锆石相对于

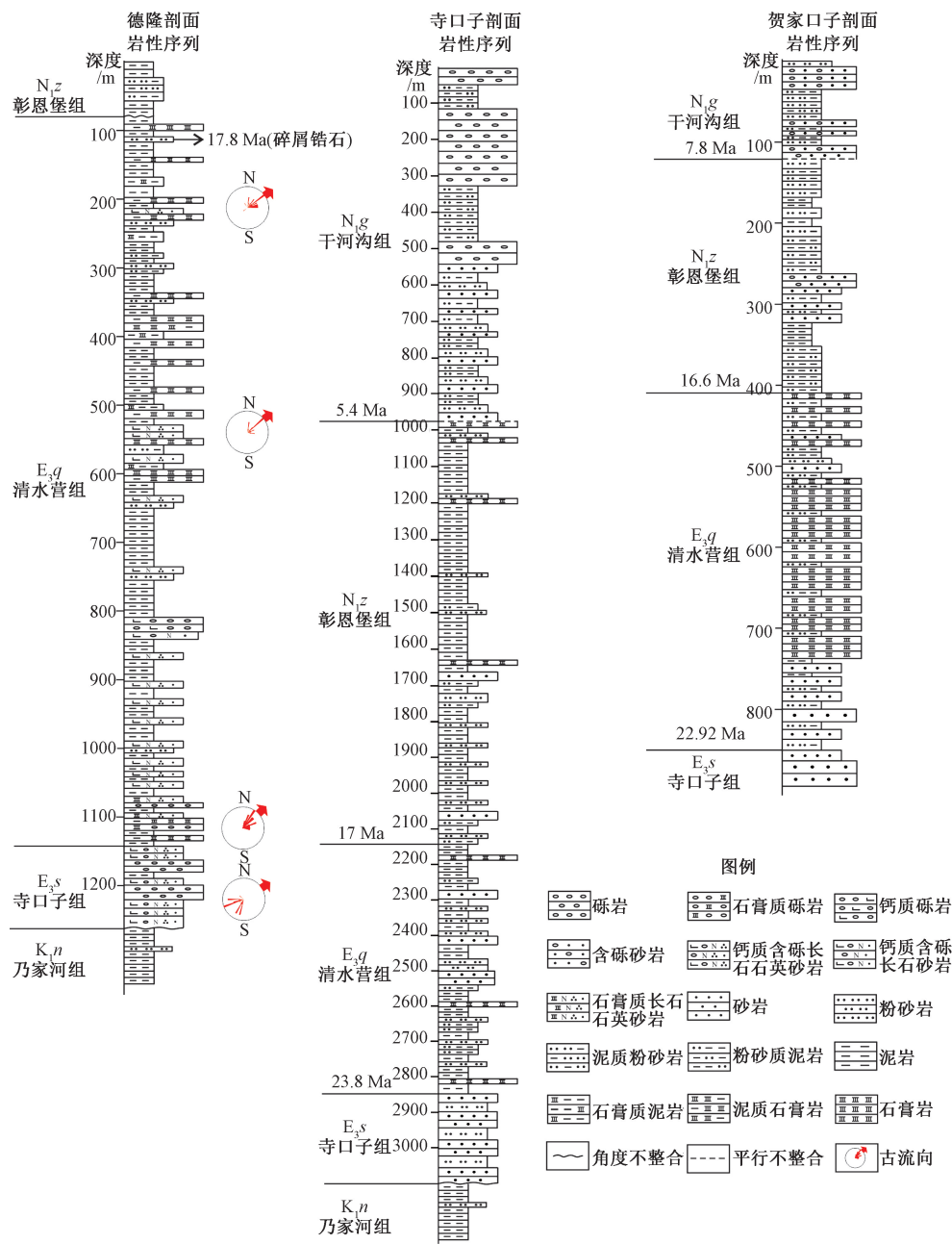


图 8 青藏高原东北缘古近系—新近系典型对比剖面 (据王伟涛, 2012 修改)

Fig. 8 Comparison diagram of three typical Paleogene-Neogene sections in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau (modified after Wang et al. , 2012)

寺口子组明显增加，综合物源分析和锆石阴极发光特征，认为其来源于西秦岭构造带的礼县一带，预示着该时期西秦岭构造带已进入了快速隆升剥蚀阶段，海原-六盘山断裂带以西地区在该时期开始大量接受来自于六盘山南部古生代—中生代岩浆岩的碎屑（裴先治等，2007；陈隽璐等，2007；魏方辉等，2012）。同时，在隆德观音店剖面古近系清水营组与新近系彰恩堡组之间存在一期明显的角度不整合，不整合面之下的古近系清水营组

地层产状较陡，而不整合面之上的彰恩堡组产状较缓，预示着二者之间存在一期强烈的构造运动（图 2）。这期不整合面代表了青藏高原东北缘新生代较早的构造变形，并且仅仅发生在海原断裂带以西地区，而在包括海原断裂带在内的以东地区并没有受到影响，进而说明了该期构造变形主要受控于青藏高原向东的推挤作用，该时期的影响范围仅仅局限于六盘山以西地区。青藏高原东北缘弧形构造带地区古近系清水营组地层中普遍发

育不同规模的正断层 (Fan et al., 2019; Liu et al., 2019), 这些正断层仅仅发育在古近系地层内部, 在清水营组顶部逐渐消失, 明显控制着古近系寺口子组与清水营组的沉积, 但没有影响到上覆的新近系彰恩堡组。区域构造应力场反演结果表明, 古近系寺口子组和清水营组主要处于北西—南东向的伸展构造应力场, 进而说明古近纪时期, 青藏高原东北缘弧形构造带与整个华北克拉通整体上处于统一的构造动力学背景, 主体上受控于滨太平洋板块向西高角度俯冲和向东回撤作用, 青藏高原向东北方向的推挤作用还没有影响到弧形构造带地区 (Fan et al., 2019; Liu et al., 2019)。而新近系彰恩堡组构造应力场则转变为北东—南西向, 青藏高原隆升向东的推挤扩张作用开始影响到了弧形构造带地区 (施炜等, 2013; Shi et al., 2015)。由于青藏高原东北缘弧形构造带的区域隆升, 区域气候环境在该时期也发生了明显的变化, 寺口子剖面色度、磁化率、孢粉和总无机碳测试数据研究结果显示, 气候演化主要经历了 29~24.8 Ma 最湿热阶段、23.8~18 Ma 湿热阶段、18~5 Ma 逐步变冷阶段和 5~0.5 Ma 快速变冷阶段, 剖面记录了 18 Ma 和 5 Ma 两次显著的气候变冷事件, 18 Ma 气候变冷事件可能与青藏高原东北缘弧形构造带的形成引起的气候变化之间存在密切的联系 (Jiang et al., 2008; Jiang and Ding, 2008)。综合以上分析, 青藏高原主体隆升向东的推挤扩展作用大约在中新世早期 (约 17.8 Ma) 开始影响到六盘山以西构造带, 区域上构造—沉积—气候之间具有协同演化的耦合关系。

5 结论

(1) 依据碎屑锆石 U-Pb 测年结果, 结合区域古生物鉴定、古地磁测年结果综合分析, 认为青藏高原东北缘古近系清水营组沉积时代应该归属于晚渐新世—早中新世, 区域上具有穿时性。

(2) 青藏高原向东北方向的推挤作用在早中新世时期已经开始影响到了海原—六盘山断裂带以西地区, 时限大约为 17.8 Ma, 区域上构造—沉积—气候之间具有协同演化的耦合关系。

References

- AN Z S, SUN D H, CHEN M Y, et al., 2000. Red clay sequences in Chinese loess plateau and recorded paleoclimate events of the late tertiary [J]. *Quaternary Sciences*, 20 (5): 435-446. (in Chinese with English abstract)
- AN Z S, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al., 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times [J]. *Nature*, 411 (6833): 62-66.
- BIAN S, YU Z Q, GONG J F, et al., 2021. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (2): 178-194. (in Chinese with English abstract)
- BURCHFIEL B C, ZHANG P Z, WANG Y P, et al., 1991. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia Hui Autonomous Region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 10 (6): 1091-1110.
- CHEN H, HU J M, GONG W B, et al., 2013. Cenozoic deformation and evolution of the Niushou Shan Luo Shan fault zone in the northeast margin of the Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (4): 18-35. (in Chinese with English abstract)
- CHEN H, HU J M, GONG W B, et al., 2015. Characteristics and transition mechanism of late Cenozoic structural deformation within the Niushoushan-Luoshan fault zone at the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 73-88.
- CHEN J L, LI H B, WANG H L, et al., 2007. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the Junction area between the Qinling and Qilian Orogenic belts and its tectonic significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37 (3): 423-431. (in Chinese with English abstract)
- Research China Seismological Bureau, 1988. Ordos peripheral active faults [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- CLARK M K, FARLEY K A, ZHENG D W, et al., 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296 (1-2): 78-88.
- CUI J W, LI Z H, LIU F, et al., 2018. Redefinition of the sedimentary time of the Salawusu formation in the Hongsibu basin, Ningxia and its significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (2): 283-292. (in Chinese with English abstract)
- DENG Q D, SUNG F, ZHU S L, et al., 1984. Active faulting and tectonics of the Ningxia-Hui autonomous region, China [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 89 (B6): 4427-4445.
- DING Z L, XIONG S F, SUN J M, et al., 1999. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~ 7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, North-central China and the implications for paleomonsoon evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152 (1-2): 49-66.
- DUVALL A R, CLARK M K, KIRBY E, et al., 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis [J]. *Tectonics*, 32 (5): 1190-1211.
- ENGLAND P, HOUSEMAN G, 1985. Role of lithospheric strength heterogeneities in the Tectonics of Tibet and neighbouring regions [J]. *Nature*, 315 (6017): 297-301.

- ENKELMANN E, RATSCHBACHER L, JONCKHEERE R, et al., 2006. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? [J]. *GSA Bulletin*, 118 (5-6): 651-671.
- FAN L G, MENG Q R, WU G L, et al., 2019. Paleogene crustal extension in the eastern segment of the NE Tibetan plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 514: 62-74.
- FANG X M, GARZIONE C, VAN DER VOO R, et al., 2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 210 (3-4): 545-560.
- HU Z C, GAO S, LIU Y S, et al., 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23 (8): 1093-1101.
- HU Z C, LIU Y S, GAO S, et al., 2012. A “wire” signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50-57.
- HUANG T, LI Z H, LIU F, et al., 2018. The current situation of desertification in the Hongsibu basin, Ningxia, and its main geological controlling factors [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (4): 505-514. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X F, FENG S Y, GAO R, et al., 2016. High-resolution crustal structure of the Yinchuan basin revealed by deep seismic reflection profiling: implications for deep processes of basin [J]. *Earthquake Science*, 29 (2): 83-92.
- JIANG H C, DING Z L, XIONG S F, 2007. Magnetostratigraphy of the Neogene Sikouzi section at Guyuan, Ningxia, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243 (1-2): 223-234.
- JIANG H C, DING Z L, 2008. A 20 Ma pollen record of East-Asian summer monsoon evolution from Guyuan, Ningxia, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265 (1-2): 30-38.
- JIANG H C, JI J L, GAO L, et al., 2008. Cooling-driven climate change at 12-11 Ma: Multiproxy records from a long fluviolacustrine sequence at Guyuan, Ningxia, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265 (1-2): 148-158.
- LI C Y, ZHANG P Z, YIN J H, et al., 2009. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 28 (5): TC5010.
- LI Y, SONG Y G, QIAN L B, et al., 2013. Paleomagnetic and fission-track dating of a Late Cenozoic red earth section in the Liupan Shan and associated tectonic implications [J]. *Journal of Earth Science*, 24 (4): 506-518.
- LIN A M, HU J M, GONG W B, 2015. Active normal faulting and the seismogenic fault of the 1739 *M* 8.0 Pingluo earthquake in the intracontinental Yinchuan Graben, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 155-173.
- LIN X B, CHEN H L, WYRWOLL K H, et al., 2010. Commencing uplift of the Liupan Shan since 9.5 Ma: Evidences from the Sikouzi section at its east side [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37 (4): 350-360.
- LIU X B, SHI W, HU J M, et al., 2019. Magnetostratigraphy and tectonic implications of Paleogene-Neogene Sediments in the Yinchuan Basin, western North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 173: 61-69.
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257 (1-2): 34-43.
- LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al., 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51 (1-2): 537-571.
- LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al., 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55 (15): 1535-1546.
- LUDWIG K R, 2003. ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center: 39.
- MA Y S, 2003. Neotectonic activities and geological disaster risk assessment in the upper Yellow River [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- MEYER B, TAPPONNIER P, BOURJOT L, et al., 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau [J]. *Geophysical Journal International*, 135 (1): 1-47.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 189 (4201): 419-426.
- Ningxia Hui Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources, 1990. Regional geology of Ningxia Hui Autonomous region [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Ningxia Hui Autonomous Region Geological Survey Institute, 2017. Regional geology of China [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- PEI X Z, SUN R Q, DING S P, et al., 2007. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Yanjiadian diorite in the eastern Qilian Mountains and its geological significance [J]. *Geology in China*, 34 (1): 8-16. (in Chinese with English abstract)
- QIANG X K, LI Z X, POWELL C M, et al., 2001. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the east Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 187 (1-2): 83-93.
- QIU Z X, YE J, HUO F C, 1988. Description of a *kubanochoerus* skull from Tongxin, Ningxia [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 26 (1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z X, QIU Z D, 1990. Sequencing and staging of late tertiary local mammals in China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 14 (4): 241-260. (in Chinese)
- SHEN X H, TIAN Q J, DING G Y, et al., 2001. The late cenozoic stratigraphic sequence and its implication to Tectonic evolution

Hejiakouzi Area Ningxia Hui Autonomous regin [J]. Earthquake Research in China, 17 (2): 156-166. (in Chinese with English abstract)

SHI W, ZHANG Y Q, MA Y S, 2006. Elevation distribution pattern of red clay beds in the regions east and west of Liupanshan and Neotectonic significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 26 (5): 123-130. (in Chinese with English abstract)

SHI W, LIU Y, LIU Y, et al., 2013. Cenozoic evolution of the Haiyuan fault zone in the northeast margin of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 20 (4): 1-17. (in Chinese with English abstract)

SHI W, HU J M, CHEN H, et al., 2015. Cenozoic tectonic evolution of the arcuate structures in the Northeast Tibetan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 89 (2): 676-677.

SONG F M, ZHU S L, WANG Y P, et al., 1982. The maximum horizontal displacement in the Haiyuan earthquake of 1920 and the estimation of the earthquake recurrence along the northern marginal fault of the Xihuashan [J]. Seismology and Geology, 5 (4): 29-38. (in Chinese with English abstract)

SUN D H, SHAW J, AN Z S, et al., 1998. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 25 (1): 85-88.

TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 294 (5547): 1671-1677.

TIAN Q J, SHEN X H, DING G Y, et al., 2000. Discovery and preliminary study of the Laolongwan tertiary pull-apart basin in the Haiyuan fault zone [J]. Seismology and Geology, 22 (3): 329-336. (in Chinese with English abstract)

WANG W T, 2012. Sedimentary evolution of Cenozoic basins in southern Ningxia and its response to tectonic deformation in the northeast corner of Qinghai-Tibet plateau [J]. Recent Developments in World Seismology (10): 40-43. (in Chinese)

WANG W T, ZHENG D W, PANG J Z, 2013. Provenancial tracing for the Cenozoic Sikouzi section in the northeastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic Implications [J]. Acta Geologica Sinica, 87 (10): 1551-1569. (in Chinese with English abstract)

WANG W T, ZHANG P Z, ZHENG D W, et al., 2014. Late Cenozoic tectonic deformation of the Haiyuan fault zone in the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 21 (4): 266-274. (in Chinese with English abstract)

WEI F H, PEI X Z, LI R B, et al., 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of early Paleozoic Huangmenchuan granodiorite in Tianshui area of Gansu province and its tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 31 (9): 1496-1509. (in Chinese with English abstract)

WIEDENBECK M, ALLÉ P, CORFU F, et al., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. Geostandards Newsletter, 19 (1): 1-23.

XU Y, YUE L P, LI J X, et al., 2012. Red clay deposits on the Chinese Loess Plateau during 11.0-2.6 Ma and its implications for long-term evolution of East Asian monsoon [J]. Environmental Earth Sciences, 66 (7): 2021-2030.

YIN A, RUMELHART P E, BUTLER R, et al., 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. GSA Bulletin, 114 (10): 1257-1295.

YU X X, MO X X, ZHAO Z D, et al., 2011. Cenozoic bimodal volcanic rocks of the West Qinling; Implication for the genesis and nature of the rifting of north-south tectonic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 27 (7): 2195-2202.

ZHANG J, MA Z J, REN W J, 2005. The Sedimentary characteristics of Cenozoic strata in central and southern Ningxia and their relationships with the development of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 79 (6): 757-773. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, MA Z J, REN W J, 2006. Discussion on the tectonic setting of deposition of the Eocene Sikouzi formation in Ningxia region [J]. Geological Review, 52 (2): 207-214. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, CUNNINGHAM D, CHENG H Y, 2010. Sedimentary characteristics of Cenozoic strata in central-southern Ningxia, NW China: Implications for the evolution of the NE Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 39 (6): 740-759.

ZHANG J, WANG Y N, ZHANG B H, et al., 2016. Tectonics of the Xining Basin in NW China and its implications for the evolution of the NE Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Basin Research, 28 (2): 159-182.

ZHANG P Z, BURCHFIEL B C, MOLNAR P, et al., 1991. Amount and style of Late Cenozoic Deformation in the Liupan Shan Area, Ningxia Autonomous Region, China [J]. Tectonics, 10 (6): 1111-1129.

ZHANG P Z, ZHENG D W, YIN G M, et al., 2006. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 26 (1): 5-13. (in Chinese with English abstract)

ZHENG D W, ZHANG P Z, WAN J L, et al., 2005. Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48 (1): 157-164. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHOU T X, WANG L, CAO M Z, 1985. Morphotectonic Patterns of Ningxia Hui Autonomous region and its formation and evolution [J]. Acta Geographica Sinica, 40 (3): 215-224. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

安芷生，孙东怀，陈明扬，等，2000. 黄土高原红粘土序列与晚第三纪的气候事件 [J]. 第四纪研究, 20 (5): 435-446.

卞爽，于志泉，龚俊峰，等，2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 178-194.

陈虹, 胡建民, 公王斌, 等, 2013. 青藏高原东北缘牛首山—罗山断裂带新生代构造变形与演化 [J]. 地学前缘, 20 (4): 18-35.

陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 等, 2007. 秦祁结合部位王家盆石英闪长岩体锆石 LA-ICP-MS 定年及地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 37 (3): 423-431.

崔加伟, 李振宏, 刘锋, 等, 2018. 宁夏红寺堡盆地萨拉乌苏组地层时代重新厘定及意义 [J]. 地质力学学报, 24 (2): 283-292.

国家地震局, 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社.

黄婷, 李振宏, 刘锋, 等, 2018. 宁夏红寺堡盆地地表沙漠化现状及其地质主控因素 [J]. 地质力学学报, 24 (4): 505-514.

马寅生, 2003. 黄河上游新构造活动与地质灾害风险评价 [M]. 北京: 地质出版社.

宁夏回族自治区地质调查院, 2017. 中国区域地质志—宁夏志 [M]. 北京: 地质出版社.

宁夏回族自治区地质矿产局, 1990. 宁夏回族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.

裴先治, 孙仁奇, 丁仁平, 等, 2007. 陇东地区阎家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 中国地质, 34 (1): 8-16.

邱占祥, 叶捷, 霍福臣, 1988. 记宁夏同心发现的库班猪头骨化石 [J]. 古脊椎动物学报, 26 (1): 1-14.

邱占祥, 邱铸鼎, 1990. 中国晚第三纪地方哺乳动物群的排序及其分期 [J]. 地层学杂志, 14 (4): 241-260.

申旭辉, 田勤俭, 丁国瑜, 等, 2001. 宁夏贺家口子地区晚新生代地层序列及其构造意义 [J]. 中国地震, 17 (2): 156-166.

施炜, 张岳桥, 马寅生, 2006. 六盘山两侧晚新生代红黏土高程分布及其新构造意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 26 (5): 123-130.

施炜, 刘源, 刘洋, 等, 2013. 青藏高原东北缘海原断裂带新生代构造演化 [J]. 地学前缘, 20 (4): 1-17.

宋方敏, 朱世龙, 汪一鹏, 等, 1982. 1920 年海原地震中的最大水平位移及西华山北缘断裂地震重复率的估计 [J]. 地震地质, 5 (4): 29-38.

田勤俭, 申旭辉, 丁国瑜, 等, 2000. 海原断裂带内第三纪老龙湾拉分盆地的地质特征 [J]. 地震地质, 22 (3): 329-336.

王伟涛, 2012. 宁夏南部新生代盆地沉积演化及其对青藏高原东北角构造变形的响应 [J]. 国际地震动态 (10): 40-43.

王伟涛, 郑德文, 庞建章, 2013. 青藏高原东北缘寺口子剖面碎屑锆石示踪及其构造意义 [J]. 地质学报, 87 (10): 1551-1569.

王伟涛, 张培震, 郑德文, 等, 2014. 青藏高原东北缘海原断裂带晚新生代构造变形 [J]. 地学前缘, 21 (4): 266-274.

魏方辉, 裴先治, 李瑞保, 等, 2012. 甘肃天水地区早古生代黄门川花岗闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及构造意义 [J]. 地质通报, 31 (9): 1496-1509.

张进, 马宗晋, 任文军, 2005. 宁夏中南部新生界沉积特征及其与青藏高原演化的关系 [J]. 地质学报, 79 (6): 757-773.

张进, 马宗晋, 任文军, 2006. 试论宁夏地区始新统寺口子组沉积的构造背景 [J]. 地质论评, 52 (2): 207-214.

张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论 [J]. 第四纪研究, 26 (1): 5-13.

郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2005. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据 [J]. 地球物理学报, 48 (1): 157-164.

郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 699-721.

周特先, 王利, 曹明志, 1985. 宁夏构造地貌格局及其形成与发展 [J]. 地理学报, 40 (3): 215-224.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

