

# 武山盆地中新世大型哺乳动物群的发现及其意义

王红, 王修喜

(兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 基于哺乳动物具有演化速度快和对环境变化反应灵敏的特点, 通过对已知哺乳动物化石的分析, 结合含化石地层的磁性地层学和碎屑磷灰石裂变径迹热年代学, 概述了长鼻类的演替迁徙, 探讨了大型哺乳动物的起源、辐射、扩散等方面对环境变化的反映以及对青藏高原隆升过程的响应。高原的隆升使自然环境发生改变, 环境的变化又导致动物组成和分布以及动物对环境适应性的改变。中国新近纪哺乳动物化石研究的结果不仅表明哺乳动物群的组成和特征具有明显的区域性差异, 而且中国还是一些代表性门类的起源扩散中心, 也是哺乳动物洲际迁徙的关键通道。研究青藏高原腹地及周边的哺乳动物化石的演化历史能够反演新生代时期高原的隆升过程及其对气候环境变化的重大影响。

**关键词:** 低温热年代学; 武山盆地; 中新世; 哺乳动物演化;

**中图分类号:** P531

## Discovery of Miocene macromammal fauna in Wushan Basin and its significance

WANG Hong, WANGXiuxi

(Key Laboratory of Western China's Environment, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of mammals with fast evolution rate and sensitive response to environmental changes, the analysis of mammalian fossils combined with the magnetostratigraphy of fossil-bearing strata and the thermochronology of detrital apatite fission tracks, the succession migration of proboscis is summarized, explores the origin, radiation, and dispersal of large mammals in response to environmental changes and the response to the uplift of the Tibet Plateau. The uplift of the plateau changes the natural environment, which leads to changes in the composition and distribution of animals and their adaptation to the environment. The results of Neogene mammal fossil studies in China not only show that there are obvious regional differences in the composition and characteristics of mammal groups, but also center of origin and diffusion of some representative phyla, and it is also a key migration route for the intercontinental migration of mammals. Studying the evolution history of mammal fossils in the hinterland and surrounding areas of the Tibet Plateau can invert the uplift process of the plateau during the Cenozoic era and its significant impact on climate and environmental changes.

**Keywords:** Low temperature thermochronology; Wushan Basin; Miocene; Mammalian evolution;

## 0 引言

我国新近纪陆相地层出露广泛并且含有丰富的陆相动物组合<sup>[1]</sup>, 地层中丰富的化石材料可以为沉积地层构建精准的年代学框架提供有力的证据。但是目前大多数生物化石的研究受

**作者简介:** 王红 (1996-), 女, 硕士研究生, 低温热年代学

**通信联系人:** 王修喜 (1980-), 男, 副教授、硕导, 构造地貌演化与低温热年代学研究. E-mail: wangxiuxi@lzu.edu.cn

到年代学的限制,如根据哺乳动物对高原抬升幅度的评估,只能定性或半定量。缺乏精确的年龄模型使得一些动物群年代学的可靠性成为问题,并使深入研究哺乳动物的演化和迁移模式与区域和全球环境变化的联系变得复杂<sup>[2]</sup>。因此需要结合其他测年手段来判断地层年代和化石年代的一致性。近年来,国内外众多学者在青藏高原边缘与造山带毗邻的沉积盆地利用生物地层学与古地磁和同位素等年代学方法相结合的手段来厘定沉积盆地的年代框架。

位于青藏高原最东北边缘的甘肃武山盆地是西秦岭东北部的山间盆地,该盆地新生代沉积序列保留完好,沉积物记录了西秦岭同造山期的内外力作用过程和细节。因此该区近年来成为研究新生代以来的构造、气候和生物演替的热点区域。在位于武山县四门镇的南峪剖面曾经发现了维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimanisp.*)化石,并确定化石属中新世中期<sup>[3]</sup>。然而由于缺乏精准的年代学限制,且磁性地层学分辨率相对较低,样品之间的地层间隔较大,所以这些动物群的准确年代一直存在着一些争议。

## 1 武山盆地概况及地层特征

武山盆地位于西秦岭断裂带北侧<sup>[4][5]</sup>,是巨型陇中盆地的一个次级盆地<sup>[6]</sup>,新近纪地层沉积分布广泛,富含哺乳动物化石,而且较为连续,连续地记录了盆地及周围西秦岭造山带的构造变形和气候演化历史。

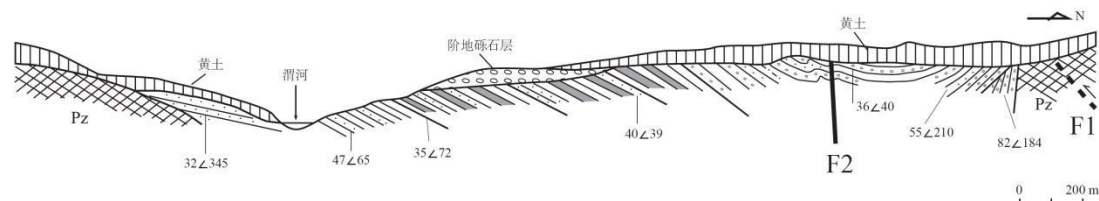


图1 武山盆地地层结构剖面图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Stratigraphic and structural architectures along cross sections through the Wushan Basin

武山盆地红层分布在渭河和漳河的南北两岸,为一向斜构造,南北两翼向盆地中心倾斜(图1)。详细地层从下向上可分为四段,根据野外考察和前人研究<sup>[4][5]</sup>综述如下:

第一段:厚约150m褐红色或褐黄色砾岩夹含砾砂岩层(图2a)。砾岩主要为褐红色或褐黄色,见少量浅灰绿色砾岩薄层,砾石成分以紫红色变质砂岩为主,含量高达50%,其次是花岗岩,同时见有少量灰岩和基性岩。砾石分选中等或差,磨圆度中等,以次棱角状和次圆状砾石为主,粒径一般在0.5-5cm,下部也见有部分粒径超过20cm的变质砂岩砾石。上部岩层水平成层,存在槽状交错层理,岩性向上变细,出现少量砖红色泥岩条带,含根管、砂岩透镜体和3cm-1m厚的钙结核层。砾岩中所夹的砾石磨圆度和分选较好,可能为辫状河河道沉积,泥岩层推测为越岸细粒沉积。

第二段:厚约585m的砖红色粉砂质泥岩夹薄层细砾岩、砾岩及砂岩(图2b)。下部50m和上部270m主要为棕红色和紫红色钙质泥岩与灰绿色泥岩互层,含有少量石膏薄层;中部265m主要由灰白色砾岩、砂岩和红色粉砂质泥岩组成,含次生石膏。所夹细砾岩的岩层厚度一般比较薄,多为10-30cm;在何家沟西侧可见到中厚层褐红色砾岩与紫红色细砾粗砂岩互层,砾石的分选度和磨圆度均很差,砾石成分以花岗岩和变砂岩为主,同时存在少量钙质结核和灰岩。该段中下部发现嵌齿象(*Gomphotherium sp.*)、库班猪(*Kubanochoerus sp.*)化石,中部发现皇冠鹿(*Stephanocemas sp.*)化石。

第三段:厚度约370m的灰白色细砾岩、砂岩和砖红色粉砂质泥岩互层(图2c)。灰白

80 色细砾岩砾石成分以风化的花岗岩碎屑物质为主，常见白色的石英脉体碎块和长英质碎块，磨圆程度较好，中等分选，砾石以次圆状为主，粒径通常在 0.2-0.5cm，最大可见 7cm 左右的砾石，砾石成分主要为长英质碎块，砂岩碎块次之。砾岩层厚度几十厘米到几厘米不等，发育少量槽状交错层理。砂岩层多见波状交错层理。砖红色粉砂质泥岩层一般厚 0.5cm-2.5cm，含少量钙质结核，岩层上部一般见冲刷构造。砾岩和砂岩透镜体可能为辫状河的河道沉积，泥岩为洪泛平原沉积并有轻微的成壤现象。

85 第四段：厚约 260m 的灰白色和砖红色砾岩、细砾岩和泥岩互层，主要分布在向斜核部。砾岩层中的砾石分选和磨圆较好，主要为次圆状砾石，砾石分选较差，主要成分为片麻岩和花岗岩碎块，杂色砂岩次之，同时也存在少量灰岩。砂砾岩层一般含大量分选较差或中等的细砾角砾岩，底部通常存在冲刷构造，岩层中也常见波状平行层理和槽状交错层理。这些砾岩和砂砾岩层可能为辫状河或冲积扇的后期沉积物(图 2d)。该段岩性整体较粗，仅存在少量薄层泥岩层，可能为洪泛平原沉积。



90

图 2 武山剖面岩性照片

Fig. 2 Lithology photo of Wushan section

## 2 材料描述

95 在对武山盆地地层详细考察的基础上，对位于康坪、南峪、杨坪三个地区的化石层位多次发掘，发现大量大型哺乳动物化石。送至中国科学院古脊椎与古生物研究所进行鉴定，发现武山盆地新近纪地层由老到新至少有三组哺乳动物化石序列<sup>[7]</sup>。本文对这些鉴定结果做简单描述和介绍。其中康坪地区的化石材料共鉴定了 4 个物种，分别是谷氏铲齿象 (*Platybelodongrangeri*)、武山西班牙犀 (*Hispanotheriumwushanensen.sp.*)、库班猪未定种 (*Kubanochoerus sp.*) 和可可买登土耳其羊相似种 (*Turcocerus cf. kekemaidengensis*)，时代

100 为 MN7/8。南峪剖面顶部，发现有同心铲齿象近亲种 (*Platybelodonaff. tongxinensis*)，时代为 MN6。杨坪地区最底部发现嵌齿象未定种 (*cf. Gomphotherium sp.*)，时代为早中新世。

105 最底部的杨坪地区发现有嵌齿象类臼齿残片被鉴定为嵌齿象未定种 (*cf. Gomphotherium sp.*)。长鼻目动物的出现标志了杨坪地区的生物化石年代为早中新世山旺期。山旺阶是中国陆相中新统的第二个阶，位于下中新统谢家阶之上，中中新统通古尔阶之下。山旺地区发现的嵌齿象化石经深入研究，认为与在日本发现的原始联合嵌齿象 (*Gomphotheriumannectens*) 形态上比较相近<sup>[8]</sup>，因此被归为联合嵌齿象相似种 (*Gomphotherium cf. G. annectens*)，其年代可能为 17~18 Ma 之间，可以与欧洲的 MN 4 相对比。而武山盆地新生代地层的沉积时代为 22~6Ma<sup>[6]</sup>，杨坪地区海拔较低 (图 3)，发现的嵌齿象类臼齿残片年代很可能为 22Ma。

110 南峪地区此前发现的化石类群有维曼嵌齿象 (*Gomphotheriumwimani*) 和光辉小古麝相似种 (*Micromeryx cf. flourensianus*)。表明其时代为中中新世早期 (MN6, 15~13.5 Ma)。此次发现的新材料为中国典型 MN6 时期铲齿象类，同心铲齿象近亲种 (*Platybelodonaff. tongxinensis*) 的下第三臼齿和肱骨，再次确认了该地层的年代。而该枚肱骨化石为同心铲齿象肱骨的首次发现，使得该类群的骨骼特征可以与其他长鼻类进行对比。

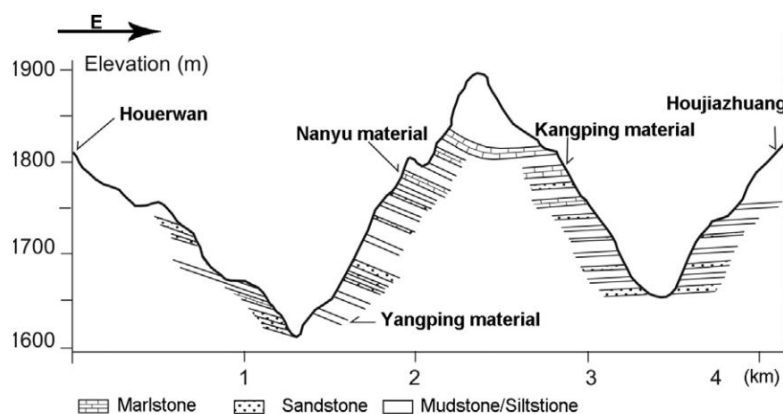


图 3 化石地点地质剖面图<sup>[7]</sup>

115 Fig. 3 Geological section of fossil localities.

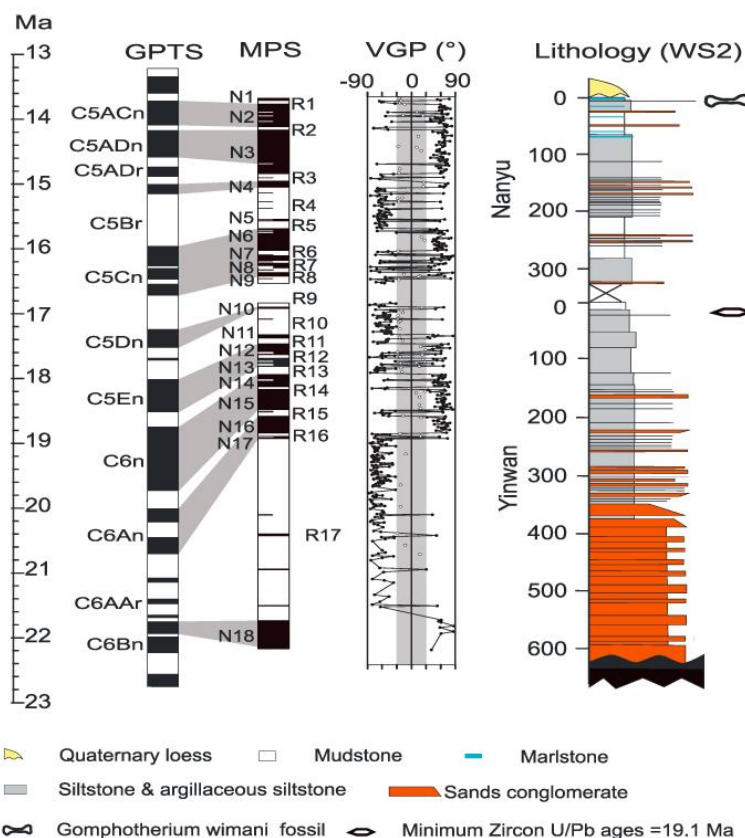
120 康坪发现的化石材料最为丰富，共发现嵌齿象科、犀科、猪科和牛科四个类群。嵌齿象科材料均为牙齿，鉴定为葛氏铲齿象 (*Platybelodongrangeri*)。确定了康坪地点的年代应为中中新世晚期 (MN7/8, 13.5-11.1 Ma)。犀科材料为一带有臼齿的上颌骨残段和一枚上第三臼齿，形态独特，与以往发现的中中新世犀类材料差异显著，故鉴定为一新种，武山西班牙犀 (*Hispanotheriumwushanense sp. nov.*)。该新种的发现揭示了西班牙犀类在中中新世时期的适应辐射，武山西班牙犀的牙齿高度复杂化。猪科材料为咬合在一起的残破上下颌骨，牙齿磨蚀非常严重，鉴定为库班猪未定种 (*Kubanocerus sp.*)，该个体体型较小，与民和库班猪 (*Kubanocerusminheensis*) 较为相近，中中新世中后期中国陆续出现体型较小的利齿猪类，如利齿猪和小型库班猪，这可能是猪科为了避免过分竞争而向不同生态位发展的一种策略。牛科材料绝大部分为牙齿，鉴定为可可买登土耳其羊相似种 (*Turcocerus cf. kekemaidengensis*)。该种首次发现于新疆可可买登地区，是生活在中新世晚期 (MN7/8) 的一种小型的土耳其羊。

125

### 3 年代学研究

#### 3.1 磁性地层学

130 磁性地层学是一个有效的地层对比工具，在哺乳动物化石年代控制的基础上，系统的磁性地层学研究是获得中新世地层年代的理想方法。武山盆地古地磁研究显示<sup>[4]</sup>，武山剖面 1360m 厚的实测地层中共检测出 18 个正极性带和 17 个负极性带，根据剖面上发现的皇冠鹿 (*Stephanoceras sp.*)、库班猪 (*Kubanochoerus sp.*) 两种中中新世时期化石的限制，以及  
135 与标准极性柱的比较，该套序列的沉积年代被确定为 14.5-6Ma，并依据沉积速率向下推算 300m，推测地层的底界年龄大约为 16Ma。本课题组对武山剖面的重新考察发现该处地层的下半段多数被逆冲断裂所掩埋，盆地北部边缘 300m 地层仅为最底部地层逆冲出露的部分。在洛门镇至四门镇之间地层的下半段出露较为完整，尤其是在南峪村至阴湾村之间，地层连续且稳定。在南峪村附近的地层中发现了完整的哺乳动物头骨化石，经王世骥鉴定后确定为维曼嵌齿象<sup>[9]</sup>，生活在中新世。之后对南峪村至阴湾村的地层进行古地磁研究，共检测出  
140 18 个可靠的正极性带和 17 个可靠的负极性带，建立了南峪-阴湾剖面的磁性地层序列 (图 4)<sup>[6]</sup>。该剖面的极性柱与标准极性柱 C5ACn 与 C6Cn 段较为一致，推测其沉积年龄为 22-13.6Ma，其中 N2 对应于 C5ACn 段，R4、R5 段对应于 C5Br 段，N6、N7、N8、N9 段对应于 C5Cn 段。



145

图 4 武山剖面磁性地层相关性<sup>[6]</sup>

Fig. 4 Correlation of the magnetostratigraphy of the Wushan section

由南峪剖面磁性地层与标准极性年表对比可知，康坪动物群的具体年代为 13.6Ma 左右，南峪动物群的具体年代为 16.8Ma 左右，而杨坪动物群的具体年代为 22Ma 左右。与先前依

150

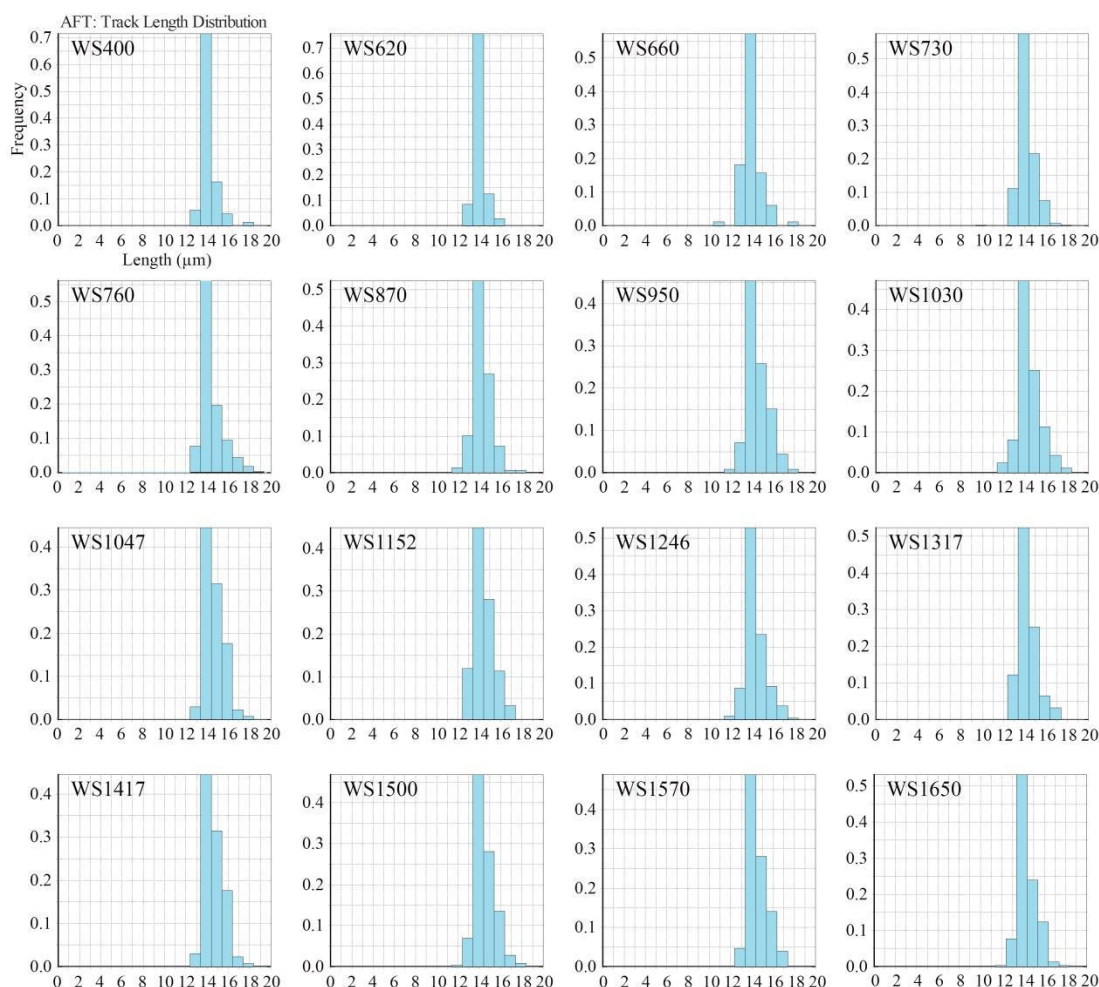
据生物化石所确定的年代相一致<sup>[7]</sup>, 不仅证明了古生物化石年代的可靠性, 还为盆地地层提供了精准的年代数据, 可以给新生代哺乳动物年代框架提供参考依据。尤其是杨坪嵌齿象化石的年代, 不仅早于欧洲在 MN3 时期发现的嵌齿象化石<sup>[10]</sup>, 而且早于在日本 (18.2Ma) 和张家坪组(19.5Ma)发现的嵌齿象化石。因此该化石是欧洲和整个东亚最古老的嵌齿象化石记录。嵌齿象自非洲往欧亚大陆迁徙, 可能首先出现在武山盆地之后向欧洲及其他东亚地区逐步扩散。

155

### 3.2 碎屑裂变径迹热年代学

根据本课题组对武山盆地进行的磷灰石裂变径迹热年代学的相关研究发现, 采集自武山盆地样品的径迹长度分布呈“单峰”状态, 峰型较窄, 绝大多数颗粒的径迹长度 $>13\mu\text{m}$  (图 5), 测试样品没有退火, 证明武山盆地的碎屑磷灰石样品并未经历沉积后退火作用的影响。对所得结果进行整理分析, 综合峰值特征和地层沉积层序, 并跟沉积年龄对比, 对分解出的年龄组分进行排列组合 (组分年龄测试结果), 获得 6 组峰值年龄 (表 1): 最年轻年龄组分为 P1(13.3–12.6Ma), 次年轻年龄组分为 P2(24.5–22.2Ma), 随后依次为 P3(28.8–27.4Ma), P4(36.0–33.2Ma), P5(61.3–48.2Ma), P6 (91.3–68.4Ma)<sup>[11]</sup>。此研究进一步证实了西秦岭造山带是武山盆地碎屑沉积的物源, 盆地沉积物未遭受退火作用, 年龄组分代表的是沉积物源区的地质信息。

160



165

图 5 磷灰石裂变径迹长度分布直方图<sup>[11]</sup>

Fig. 5 Apatite fission track length distribution histogram

表 1 武山盆地碎屑磷灰石裂变径迹组年龄测试结果<sup>[11]</sup>

Tab. 1 Age test results of detrital apatite fission track components in Wushan Basin

样号	深度 (m)	沉积年 龄 (Ma)	P( $\chi^2$ )	N	P1	P2	P3	P4	P5	P6
WS1650	0	6.0	0.10	82	-	23.6±1.5	-	36.0±2.6	-	-
WS1570	80	6.3	0.00	82	-	-	-	33.3±1.6	59.2±7.6	-
WS1500	160	6.6	0.01	82	-	-	28.8±1.6	-	53.2±10.1	-
WS1317	290	7.4	0.00	82	-	-	27.7±1.6	-	49.8±3.9	-
WS1246	370	8.0	0.06	82	-	22.2±4.4	-	35.1±4.6	-	-
WS1152	460	9.0	0.00	87	-	24.5±1.2	-	-	-	69.0±10.2
WS1047	548	9.8	0.00	80	-	24.1±0.8	-	-	48.2±3.3	-
WS1030	575	9.9	0.00	82	-	-	-	35.8±2.0	-	83.3±5.2
WS950	635	10.3	0.00	82	-	-	-	33.7±3.2	-	68.4±12.6
WS870	720	10.8	0.00	82	-	-	27.9±2.6	-	54.8±6.4	91.3±14.5
WS760	800	11.2	0.03	82	-	-	-	35.8±2.6	60.5±5.1	-
WS730	845	11.6	0.01	81	-	-	-	-	48.8±2.7	73.7±5.5
WS660	900	12.2	0.00	90	-	-	27.4±2.1	-	-	68.5±7.2
WS1417	942	12.5	0.00	82	13.3±0.9	-	-	34.3±1.7	-	75.0±9.5
WS620	1141	13.7	0.00	82	-	-	-	33.6±3.6	61.3±9.3	-
WS400	1223	14.3	99.21	82	-	-	28.0±1.7	-	-	-

170 注：n 表示单个样品所测颗粒总数；P1, P2, P3, P4, P5, P6 表示用二项峰拟合法分解的样品年龄组分；P1 表示最年轻年龄组分，P2 表示次年轻年龄组分，以此类推。

175 在 25-20Ma 期间印度与欧亚板块继续硬碰撞<sup>[12]</sup>，喜马拉雅地区基岩遭受快速侵蚀，同时构造远程效力向北传递到亚洲中部地区，导致下垫面地貌性质发生巨大的差异性变化<sup>[13][14]</sup>，亚洲季风增强<sup>[15][16]</sup>，甚至造成中国大陆气候格局在渐新世晚期到中新世早期的重组<sup>[16][17]</sup>。藏南柳曲植物群和恰布林植物群对比研究表明喜马拉雅块体在此时也由古新世晚期不足 1000m 增长到早中新世早期约 2300m 的海拔高度<sup>[18]</sup>。锆石 U-Pb 和磷灰石裂变径迹研究表明高原东北缘的拉脊山在~22Ma 经历逆冲推覆活动，山体开始快速隆起<sup>[19][20][21]</sup>。此时西秦岭及其北缘贵德-临夏-天水-成县一带靠近山前区域开始大范围强烈抬升，并伴随火山喷发<sup>[22]</sup>，探测到次年轻年龄信号(P2)。同时，盆地中的古近纪地层也发生构造变形并在部分地区遭受剥蚀。随后，西秦岭造山带北部的盆地再次大规模下陷，开始广泛接受较为连续的新近纪沉积物<sup>[5][7][23][24]</sup>。

## 4 哺乳动物演化及其意义

### 4.1 长鼻目的演化迁徙过程

185 长鼻目起源于非洲<sup>[25]</sup>，早中新世非洲板块与欧亚板块靠近，出现联系两者的“嵌齿象陆桥”<sup>[26]</sup>，这一重要地质事件致使长鼻类由非洲往欧亚大陆迁移。中中新世通过白令海峡到达美洲并在晚中新世在美洲灭绝<sup>[27]</sup>。因其广泛的分布和快速的演化通常被认为是地层对比的良好基础<sup>[28]</sup>。动物群的演化不仅对应于全球气候变化，也受全球海陆分布变化的影响。山旺期内，非洲板块与欧亚板块靠近使得长鼻目出现在欧亚大陆，因此长鼻目是山旺期的标志生物。针对长鼻目的迁徙路线还有一些不同的说法，轭齿象类从非洲向欧亚大陆的扩散

存在两点假说<sup>[29]</sup>：一种是基于比较成熟的观点，认为在早中新世，犏齿象通过特提斯海第一次关闭形成的“嵌齿象路桥”到达欧亚。而另一种假说是因为中新世东亚地区与西欧地区的象类存在较大的差异，加上象类出现在南亚的时间较早，近乎晚渐新世，由此推测犏齿象可能通过一条“南线”，经由南亚，穿过青藏高原所在的地区，迁移到东亚，而在早中新世，青藏高原隆升的高度还不足以阻挡大型哺乳动物的迁移。因此本文推断武山盆地发现的早中新世嵌齿象也很有可能从这条“南线”迁徙而来的，经过南亚，穿过青藏高原所在的地区，迁移到武山盆地，再向其他地区迁徙扩散。

亚洲位于北美，欧洲和非洲之间，是陆生哺乳动物迁徙的十字路口，因此亚洲在我们理解哺乳动物的进化以及它们作为生物年代学主要标志等相关问题上起着至关重要的作用。作为最大的大陆，亚洲是许多哺乳动物群体的起源地和重要后续进化地点，这些动物在亚洲的时空分布为它们与周边大陆相关分支提供了重要线索。早期在宁夏同心盆地发现有铲齿象、嵌齿象、库班猪等哺乳动物化石，是年代为 16Ma 左右的通古尔期丁家二沟动物群<sup>[30] [31]</sup>。西宁盆地吊沟和八盘山发现的嵌齿象化石根据古地磁结果，认为年代约为 16~15Ma。另一个重要地点是兰州的泉头沟，也是嵌齿象种型群的产地之一，古地磁数据显示泉头沟地点的时代约为 15 Ma 左右<sup>[32][33]</sup>。临夏盆地上沟地点的维曼嵌齿象化石标本发现于虎家梁组底部，根据对临夏盆地生物地层的研究，虎家梁组相当于中中新世通古尔期晚期<sup>[34]</sup>。根据化石层在虎家梁组中的位置，其时代大致可以与最早的 MN7/8 相对比，估计在~13.5 Ma<sup>[35]</sup>。由此发现，嵌齿象在中国主要分布在西部的甘肃、青海等中中新统的地层中，其时代基本上可以与 MN6~MN7/8 早期相对比，时代跨度约为 15~13 Ma。和武山盆地的嵌齿象化石相比较时代较晚，武山盆地嵌齿象化石是中国目前发现的最早的嵌齿象化石记录。这为嵌齿象的起源演化提供了新的证据，嵌齿象很有可能在早中新世时以武山盆地为中心向四周辐射扩散。

## 4.2 哺乳动物演化的意义

哺乳动物的起源和演化受其生活环境的影响，化石物种及其组合的特点与变化又是了解和再现其生活地区的气候与各种环境因子的最好依据<sup>[36][37]</sup>。因此，哺乳动物是反映气候环境变化的重要标志之一，哺乳动物化石所诠释的演化历史能够判别新近纪气候环境的重大变化<sup>[38][39]</sup>。青藏高原的隆起对东亚地区哺乳动物的演化具有直接而深远的影响。由于高原的逐渐抬升，南亚夏季风和北亚冬季风强化，我国西北部的气候越来越干旱，青藏地区越来越高寒<sup>[40]</sup>。到中新世，干旱的环境已使西北地区的植被趋于草原化，只有那些适于草原和耐旱型动物得以繁衍，而在武山地区所发现的高齿冠材料也很好的印证了这一点。自上新世以来青藏地区的恶劣生态环境已成为许多哺乳动物不可逾越的障碍。中新世中期的“铲齿象动物群”反映了相当暖湿的气候环境，可能与全球 15Ma 时的气候变暖有关，晚期“三趾马动物群”以及“三趾马红土”在华北和西北地区的广泛出露，表明了这一时期的环境又发生了一次较为明显的变化，气候变得干热<sup>[41]</sup>。新生代哺乳动物群的演替特征及环境变化显然指示了青藏高原自渐新世以来的逐渐隆升。高原的抬升使自然环境发生了变化，环境的变化又导致了动物组成和分布的分异，以及动物对环境适应性的改变<sup>[41]</sup>。

演化迅速的哺乳动物是划分对比新近纪陆相地层的有效手段<sup>[42]</sup>。哺乳动物的多样性可以很好地反映当地的生境状况，以及该生境历史的存在时间<sup>[43]</sup>，还可以反映演化水平，进而体现出演化时间的不同。在世界范围内，古生物学家已经利用哺乳动物群化石组合建立了完整而精确的大区域的新生代哺乳动物年代框架，比较完善的是欧洲、北美和亚洲的哺乳动物年代框架<sup>[44][45][46][47]</sup>。中国新近纪的哺乳动物地理区系研究已有很好的工作基础，以哺乳动物化石为标准，已经建立起由中新世的谢家期、山旺期、通古尔期、灞河期和保德期，上

新世的高庄期和麻则沟期组成的地质时代分期框架<sup>[40]</sup>, 并得到精细的古地磁定年数据支持<sup>[44]</sup>。

## 5 结论

235 本文给出了一个高分辨率的中新世哺乳动物磁性地层学年代限定, 将精细的生物地层学与古地磁和磷灰石裂变径迹热年代学方法相结合, 更新的年代结束了早期对于武山哺乳动物化石模糊的相关争论。关于长鼻目不同迁徙路线观点的提出也证明了高原的隆升在哺乳动物演化过程中扮演了非常重要的角色。

240 对武山盆地进行了磁性地层学分析, 结合古生物化石研究结果, 限定了该地区的地质年代, 南峪剖面地质年代为 22-13.6Ma。康坪动物群的具体年代为 13.7Ma 左右, 南峪动物群的年代是 16.8Ma 左右, 而杨坪动物群的大约是 22Ma 左右。武山盆地嵌齿象化石是欧洲和整个东亚最古老的嵌齿象化石记录, 这为嵌齿象的起源演化提供了新的证据, 嵌齿象很可能在早中新世时以武山盆地为中心向四周辐射扩散。

245 通过多种指标验证了武山剖面的碎屑磷灰石样品并未遭受沉积后的强烈退火作用, 其裂变径迹年龄可以代表沉积物源区的地质信号。共获得了 6 组峰值年龄, 分比为: 最年轻年龄组分 P1(13.3-12.6Ma), 次年轻年龄组分为 P2(24.5-22.2Ma), 随后依次为 P3(28.8-27.4Ma), P4(36.0-33.2Ma), P5(61.3-48.2Ma), P6(91.3-68.4Ma)。分析盆地周缘可能的物源区已发表的基岩磷灰石裂变径迹年龄数据, 通过与武山盆地未退火碎屑样品的裂变径迹年龄组对比, 判定盆地物源主要来自于西秦岭造山带。

250 武山盆地的嵌齿象很可能是经过南亚, 穿过青藏高原所在的地区, 迁移到东亚, 而在早中新世, 青藏高原隆升的高度还不足以阻挡大型哺乳动物的迁移, 之后以武山盆地为中心向四周辐射扩散。这些结果不仅丰富了我国的新近纪哺乳动物化石库, 而且对高原在该区的隆升过程具有关键指示意义。

### [参考文献] (References)

- 255 [1] 邓涛. 临夏盆地晚新生代哺乳动物群演替与青藏高原隆升背景[J]. 第四纪研究, 2004, 24: 413-420.  
[2] AO H. New magnetochronology of Late Miocene mammal fauna, NE Tibetan Plateau, China: Mammal migration and paleoenvironments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 434: 220-230.  
[3] WANG S Q, LIU S P, XU G P. Gomphotherium wimani from Wushan County, China, and its implications for the Miocene stratigraphy of the Tianshui area[J]. Vertebrata Palasiatica, 2013, 51(1): 71-84.
- 260 [4] WANG Z C, ZHANG P Z, GARZIONE C N. Magnetostratigraphy and depositional history of the Miocene Wushan basin on the NE Tibetan plateau, China: implications for middle Miocene tectonics of the West Qinling fault zone[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 44: 189-202.  
[5] 王志才. 青藏高原东北缘新生代以来的构造变形特征与时空演化: 以陇西-武山地区为例[D]. 北京: 中国地震局, 2004.
- 265 [6] LIU S P, LI J J, STOCKLI D F, SONG C H. Late Tertiary reorganizations of deformation in Northeastern Tibet constrained by stratigraphy and provenance data from Eastern Longzhong Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(8): 5804-5821.  
[7] SUN B Y, WANG X X, JI M X. Miocene mammalian faunas from Wushan, China and their evolutionary, biochronological, and biogeographic significances [J]. Palaeoworld, 2018, 27: 258-270.
- 270 [8] TOMIDA Y, NAKAYA H, SAEGUSA H. Miocene land mammals and stratigraphy of Japan[J]. Fossil Mammals of Asia, 2013, 314-333.  
[9] WANG S Q, HE W, CHEN S Q. Gomphotheriid mammal Platybelodon from the Middle Miocene of Linxia Basin, Gansu, China[J]. Acta Palaeontologica Polonica, 2013, 58(2): 221-240.
- 275 [10] GERTRUD E. The Miocene land mammals of Europe[M]. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 1999.  
[11] HINSBERGEN D, LIPPERT P, DUPONT-NIVTE G, et al. Greater India Basin Hypothesis and A Two-Stage Cenozoic Collision Between India and Asia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109 (20):

- 7659-7664.
- [12] 宋艾. 武山盆地磷灰石裂变径迹热年代学与西秦岭新生代构造活动[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- 280 [13] JOLIVET M, RITZ J F, VASSALLO R. Mongolian summits: An uplifted, flat, old but still preserved erosion surface [J]. *Geology*, 2007, 35(10): 871.
- [14] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.
- [15] GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- 285 [16] GUO Z T, SUN B, ZHANG Z S. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene [J]. *Climate of the Past*, 2008, 4(3): 153-174.
- [17] SUN X J, WANG P X. How old is the Asian monsoon system-Palaeobotanical records from China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222(3): 181-222.
- 290 [18] DING L, SPICER R, YANG J, XU Q. Quantifying the rise of the Himalaya orogen and implications for the South Asian monsoon [J]. *Geology*, 2017, 45(3): 215-218.
- [19] LEASE R O, BURBANK D W, GEHRELS G E, et al. Signatures of mountain building: Detrital zircon U/Pb ages from northeastern Tibet [J]. *Geology*, 2007, 35(3):239-242.
- [20] LEASE R O, BURBANK D W, CLARK M K, et al. Middle Miocene reorganization of deformation along the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Geology*, 2011, 39(4): 359-362.
- 295 [21] LEASE R O, BURBANK D W, HOUGH B, et al. Pulsed Miocene range growth in northeastern Tibet: Insights from Xunhua Basin Magnetostratigraphy and provenance [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 124(5-6): 657-677.
- [22] 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(23): 2638-2643.
- 300 [23] ALONSO-ZARZA A M, ZHAO Z, SONG C, et al. Mudflat/distal fan and shallow lake sedimentation (upper Vallesian-Turolian) in the Tianshui basin, central China: evidence against the late Miocene eolian loess [J]. *Geology*, 2009, 37: 42-51.
- [24] WANG W, ZHANG P Z, Kirby E, et al. A revised chronology for Tertiary sedimentation in the Sikouzi basin: Implications for the tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2011, 505 (1-4): 100-114.
- 305 [25] TASSY P. The "Proboscidean Datum Event:" How Many Proboscideans and How Many Events?[M]. New York, Springer US, 1990.
- [26] ROGL F. Circum-Mediterranean Miocene Paleogeography[J]. *The Miocene Land Mammals of Europe*, 1999, 39-48.
- 310 [27] LAMBERT W D. The biogeography of the gomphotheriid proboscideans of North America. In: *The Proboscidea: Evolution and Palaeoecology of Elephants and Their Relatives*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996, 143-148.
- [28] QIU Z X, QIU Z D. Chronological sequence and subdivision of Chinese Neogene mammalian faunas[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*, 1995, 116: 41-70.
- 315 [29] ZHANG X, WANG S. First report of *Eozygodon* (Mammutidae, Proboscidea) in Eurasia[J]. *Historical Biology*, 2020, 4: 1-10.
- [30] 叶捷, 贾航. 宁夏同心中新世铲齿象化石[J]. *古脊椎动物报*, 1986, 02: 139-151.
- [31] 邱占祥, 叶捷. 记宁夏同心发现的库班猪头骨化石[J]. *古脊椎动物学报*, 1988, 01: 77-79.
- 320 [32] QIU Z X, WANG B Y, QIU Z D. Land mammal geochronology and magnetostratigraphy of mid-Tertiary deposits in the Lanzhou Basin, Gansu Province, China[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 2001, 94: 373-385.
- [33] YUE L P, HELLER F, QIU Z X, et al. Magnetostratigraphy and paleoenvironmental record of Tertiary deposits of Lanzhou Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46: 770-774.
- [34] DENG T, QIU Z X, WANG B Y, et al. Late Cenozoic biostratigraphy of the Linxia Basin, northwestern China [J]. *Columbia University Press*, 2013
- 325 [35] 杨湘雯, 李雨, 王世骥. 临夏盆地中新统维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimani*)(长鼻目, 嵌齿象科)的头骨及颊齿. *古脊椎动物学报*, 2017, 55(4): 331-346.
- [36] FORTELIUSS M, ERONEN J, JERNVALL J, et al. Fossil mammals resolve regional patterns of Eurasian climate change over 20 million years[J]. *Evolutionary Ecology Research*, 2002, 4: 1005-1016.
- 330 [37] BARNOSKY A D, HADLY E A, BASCOMPTE J, et al. Approaching a state shift in Earth's biosphere[J]. *Nature*, 2012, 486: 52-58.
- [38] QIU Z X, WU W Y, QIU Z D. Miocene mammal faunal sequence of China: Paleozoogeography and Eurasian relationship. In: *The Miocene Land Mammals of Europe* [M]. München: Verlag Dr Friedrich Pfeil, 1999: 443-456.
- 335 [39] QIU Z D, LI C K. Evolution of Chinese mammalian faunal regions and elevation of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48: 1246-1258.
- [40] 邓涛, 王晓鸣, 王世骥, 李强, 侯素宽. 中国新近纪哺乳动物群的演化与青藏高原隆升的关系[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(04): 407-415.
- [41] 邱铸鼎, 李传夔. 中国哺乳动物区系的演变与青藏高原的抬升[J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 2004(09): 845-854.
- 340 [42] 邓涛, 侯素宽, 王世骥. 中国新近纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(01): 315-329.
- [43] OLIVEIRA B F, MACHAC A, COSTA G C, et al. Species and functional diversity accumulate differently in

- mammals[J]. *Global Ecology Biogeography*, 2016, 25: 1119-1130.
- [44] QIU Z X, QIU Z D, DENG T, et al. Neogene land mammal stages/ages of China[J]. *Neogene Biostratigraphy and Chronology*, 2013, 29-90.
- 345 [45] TING S, TONG Y, et al. Asian early Paleogene chronology and mammalian faunal turnover events[J]. *VertPalAsiat*, 2011, 49: 1-28.
- [46] VANDENBERGHE N, HILGEN F J, SPEIJER R P, et al. The Paleogene Period[J]. *The Geologic Time Scale*, 2012, 855-921.
- 350 [47] WOODBURNE M O. Late Cretaceous and Cenozoic Mammals of North America[J]. *Biostratigraphy and Geochronology*, 2004, 391.