

郑洪波, 郭正堂, 邓涛. 新生代东亚地形、水系与生物地理演变——第三届地球系统科学大会拾粹[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1280-1286. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.11.1280. [Zheng Hongbo, Guo Zhengtang, Deng Tao. Evolution of topography, drainage and biogeography in East Asia during the Cenozoic: Summary of the Third Conference on Earth System Science[J]. Advances in Earth Science 2014, 29(11): 1280-1286. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.11.1280.]

# 新生代东亚地形、水系与生物地理演变<sup>\*</sup>

## ——第三届地球系统科学大会拾粹

郑洪波<sup>1</sup>, 郭正堂<sup>2</sup>, 邓涛<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

**摘要:** 新生代期间, 亚洲及周边地区地球深部过程与地表环境发生了一系列重大变革。印度板块—欧亚板块碰撞和太平洋板块俯冲驱动下的构造—地貌过程, 导致青藏高原隆升、亚洲东部岩石圈伸展减薄、西太平洋边缘海扩张, 并最终塑造了现今的宏观地形地貌和水系格局。这一系列构造地貌过程与新生代全球气候变冷、西风环流与亚洲季风环流重组、生物地理演变之间存在紧密的关联, 成为地球科学领域重大前沿与热点课题, 是开展地球深部与浅表过程、地球表层各圈层之间相互作用研究的重要切入点。

**关键词:** 新生代; 亚洲; 构造—地貌; 生物地理

**中图分类号:** P56      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8166(2014)11-1280-07

## 1 引言

进入 21 世纪, 地球科学发展到研究“地球系统”的新阶段, 强调地球岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间的相互作用。岩石圈浅表的地质构造和地貌过程是岩石圈、软流圈与深部地幔相互作用的结果, 并深刻影响着地球上的生命演化和生态环境过程, 进而影响着人类的发展和社会生活。

宏观地貌格局演化是深部地球动力作用的浅表响应和直观表现, 是认识地球深部过程及其对浅表层影响的重要途径。新生代期间, 亚洲东部岩石圈在中生代基础上继续伸展减薄、西部岩石圈挤压加厚, 导致宏观地形地貌格局发生了“倒转”<sup>[1]</sup>, 大河流域发生重组。地球深部圈层如何运转并以怎样的地球动力学过程影响了地表? 大河流域的发育与演化如何反映、记录并参与了这些构造—地貌过程?

河系演化如何影响了新生代盆地(包括边缘海盆地)的沉积充填并继而控制了油气成储? 新生代亚洲形变与区域乃至全球气候变化有怎样的联系?

针对以上科学问题, 第三届地球系统科学大会组织开展了包括构造地质学、沉积学、海洋地质学、地貌学、地球化学、地球物理学、古生物学、古气候学等领域专家参与的交流与研讨, 本文是对研讨会成果的回顾与总结。

## 2 地貌演化与深部过程

青藏高原的隆升无疑是导致新生代东亚地形地貌格局演化的最主要和最直观的地质事件。关于青藏高原隆升的方式、时代和动力学机制, 以及高原隆升对区域乃至全球气候环境的影响等研究长期是地球科学研究的前沿领域<sup>[2]</sup>。越来越多的地质证据显示, 青藏高原地区在印度—亚洲发生陆陆碰撞之

\* 收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-10-31.

\* 基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目“青藏高原多圈层相互作用及其资源环境效应”(编号: XDB03020301) 资助。

作者简介: 郑洪波(1965-) 男, 山东乳山人, 教授, 主要从事构造—地貌与新生代环境演化研究. E-mail: zhenghb@njnu.edu.cn

后就开始了构造地貌的分异与局部隆升<sup>[3,4]</sup>,并向东北方向扩展<sup>[5,6]</sup>。尽管学术界对高原整体隆升(生长)的方式(模式)依然存在分歧,但是研究表明渐新世/中新世之交高原地区及周边的构造模式发生了重大转变,暗示着中新世早期高原主体已经完成了整体塑造<sup>[7]</sup>,这些构造地貌过程在高原内部和高原周缘的盆地保存了沉积和古环境记录<sup>[8,9]</sup>。青藏高原何时隆升到影响大气环流的临界高度一直是青藏高原研究领域争论的热点,古地形高度的再造历来也是构造地貌研究中的难点。除了传统的古生物学方法外,科学家尝试利用碳酸盐氧同位素和植物叶蜡烷烃的碳、氢同位素作为古高度估计,青藏高原古高度取得了可喜的进展,成为近来青藏高原研究的亮点<sup>[10,11]</sup>。

西太平洋边缘海,北起白令海,南至南中国海,属于环太平洋“沟—弧—盆”体系的重要组成部分,其形成演化是亚洲新生代形变的重要组成部分。就其形成机制而言,边缘海的形成与太平洋板块、欧亚板块和印—澳板块之间的相互作用有关,因而与青藏高原的隆升可能也存在一定的成因联系。以南海为例,已有的研究表明,南海的扩张主要发生于 32~17 Ma BP,然而对其发生的地球动力学机制的认识存在分歧,例如对于南海扩张与印支板块挤出之间的关系学术界就有不同的观点。南海新生代沉积体系,尤其是最近完成的南海 IODP 349 航次<sup>[12]</sup>,为研究南海的构造演化,揭示南海注入河流(珠江、红河、湄公河)的演化历史,提供了重要的材料。

青藏高原和西太平洋边缘海是控制东亚东倾地形的 2 个主要端元,位于二者之间的构造地貌单元在新生代都经历了各自不同但又相互协同的演化,构成宏观地貌演化的一部分。例如位于四川盆地和江汉盆地之间的黄陵背斜就是中国东部地貌格局中的“咽喉”。对江汉盆地西缘沉积物的物源分析表明,黄陵背斜核部花岗岩的剥露发生于渐新世/中新世之交<sup>[13]</sup>。

在岩石圈减薄的宏观构造背景下,中国东部在古近纪广泛发育断陷盆地,盆地深陷,发育烃源岩和蒸发岩,而盆地相互之间的联通有限,表明没有大型贯通型河流发育。从新近纪开始,东部区域热沉降,广泛发育凹陷盆地,大型贯通型水系(如现代的长江)的发育使江汉、苏北—南黄海盆地联通,并形成组颗粒沉积盖层。这种“双层”模式在中国东部新生代盆地中普遍存在,是区域构造—地貌协同演化的结果。理解这一构造—盆地—水系演化模式对

于认识中国东部新生代油气成储具有重要意义。

综上所述,东亚东倾地形格局的形成,是岩石圈浅表的地质构造和地貌过程的表现,是在印度板块对欧亚板块俯冲导致的西部岩石圈增厚和太平洋板块俯冲导致的东部岩石圈减薄的共同作用下发生的,是新生代岩石圈、软流圈及深部地幔相互作用的结果<sup>[14]</sup>(图 1)。

### 3 水系演化与源汇过程

亚洲的主要河流均发源于青藏高原,这一现象本身就直观地表明了亚洲水系演化与高原隆升的关系(图 2)。水系的发育和重组,是地貌格局演化的最直观表现,也是地貌演化的忠实记录者和积极参与者。构造运动增加了隆升区的物理风化和剥蚀速率,也加剧了大陆化学风化的强度和速率,导致全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度降低,引发新生代全球变冷<sup>[15]</sup>。大陆风化产物被水系携带并最终输送到边缘海域沉积,完成沉积物“从源到汇”的过程,参与到全球变化过程,极大地影响了边缘海的海洋环境。由于亚洲地势上的巨大落差,使这一地区具有非常强烈的物质和能量交换,成为全球沉积活动最活跃的地区<sup>[16]</sup>。事实的确如此,在亚洲分布着众多世界级的大河,如黄河、长江、珠江、红河、湄公河、雅鲁藏布江—布拉马普特拉河、伊洛瓦底江、恒河和印度河等,它们的形成与演化,无一不与青藏高原构造隆升密切相关,其地质地貌演化过程以及在全球变化的关系引起了地球科学家们的高度关注,构成了当前许多重大国际科学研究计划(如海岸带陆海相互作用研究计划(Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ)、MARGINS 计划中的“源到汇”计划)的研究内容,也是国际大洋发现计划(IODP)和国际地质对比计划(International Geological Correlation Programme, IGCP)关注的热点<sup>[17]</sup>。

亚洲河流的历史演化广受地球科学界关注,如长江的演化就是引起地质学界广泛兴趣的“世纪谜题”。近百年来,中外科学家对这一问题进行了不懈的探索,但争议不断<sup>[18,19]</sup>。看来关键的问题是研究思路,即在地球系统科学思想指导下,将长江作为一个系统并置于新生代亚洲构造与环境格局演化的背景之下。近年来,郑洪波等<sup>[20]</sup>采用“从源到汇”的理念,借助先进的物源示踪技术(如单矿物锆石 U-Pb 年龄谱和同位素技术),将构造与地貌结合,流域和盆地结合,陆地和海洋结合,对长江流域和中下游新生代盆地进行物源示踪,判别上游沉积物到达下

游的时代,提出在渐新世/中新世之交,与现代长江类似的水系已经诞生。长江在贯通东流之前,其上游(金沙江的上游)可能南流,后被下游袭夺,这是长江演化模式中广为熟知的“袭夺”说。郑洪波等<sup>[21]</sup>的最新研究表明,金沙江上游的袭夺发生于云南高原开始大规模隆升之时(或者之前),也就是渐新世/中新世之交。亚洲水系的重组,对中下游新生

代盆地(包括边缘海盆地)的充填和油气生储产生了重要的影响,值得引起油气勘探界的关注。

#### 4 亚洲形变与气候演化

尽管地质学界和古气候学界都相信青藏高原的隆升在很大程度上导致了新生代区域乃至全球气候变化,催生了构造—气候联系这一地球系统科学的

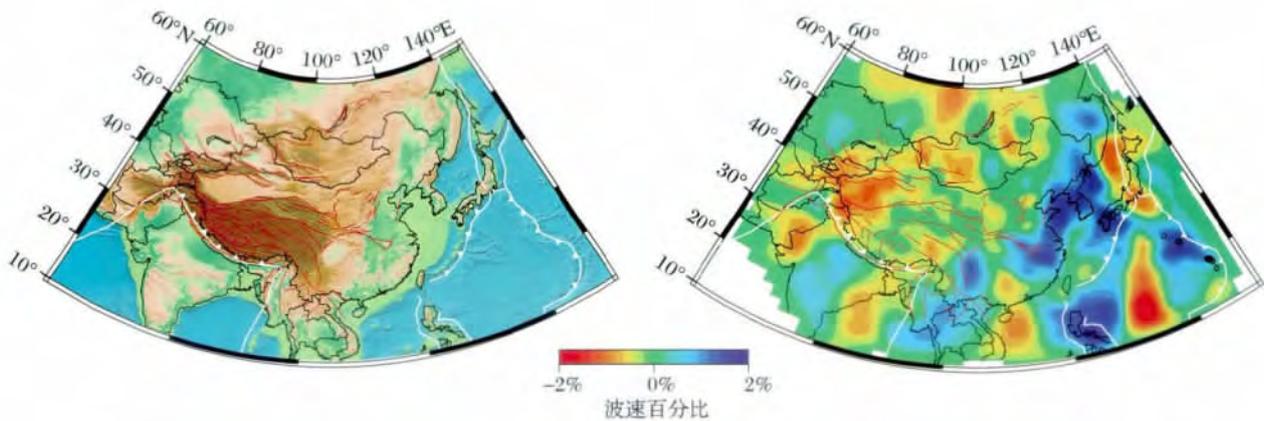


图1 亚洲地形格局(a)和600 km地震层析成像(b)显示宏观地形地貌与地球深部过程的对应关系(修改自文献[14])

Fig. 1 Surface topography of Asia (upper) and tomographic image at 600 km depth (bottom) (modified from reference [14])

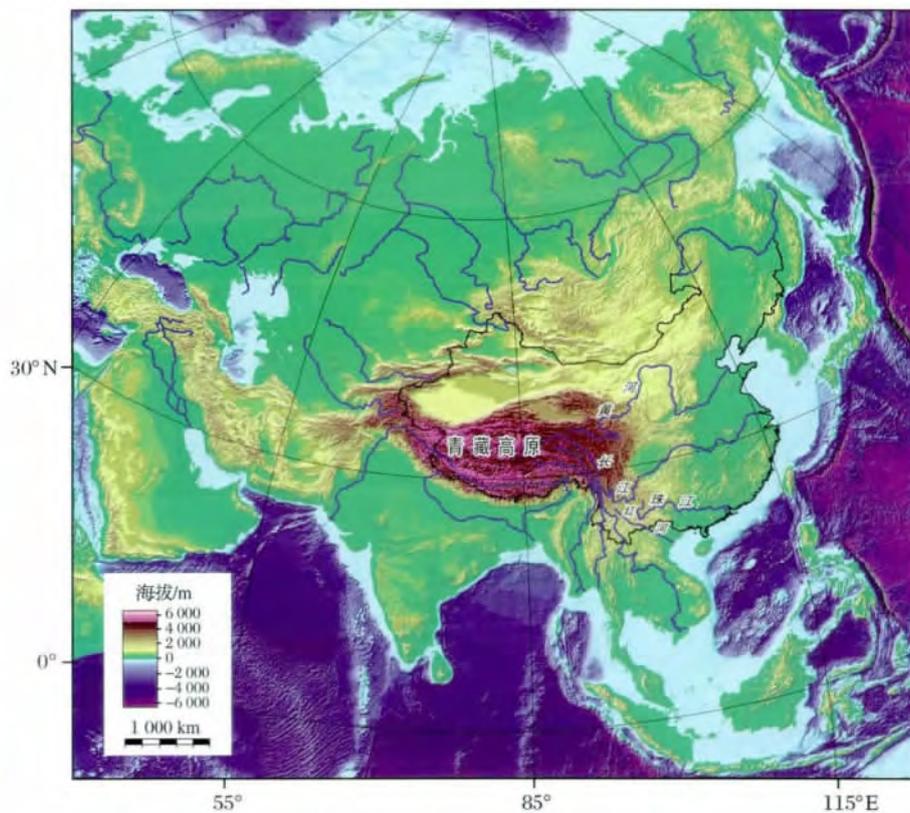


图2 亚洲地形地貌与水系分布图

Fig. 2 Topography and drainage of Asia

研究热点<sup>[22]</sup>,但要准确细致地刻画高原隆升与全球变冷和亚洲季风形成演化之间的关系依然为时尚早,这是因为我们对高原隆升(生长)的时代、幅度、方式等仍缺乏准确的认知,对于构造尺度上的亚洲季风演化历史也由于记录和指标的差异而存在分歧,迄今的数值模拟大多是敏感性实验。利用高原内部和周边丰富的新生代沉积记录,提取大陆风化指标,探讨构造隆升—硅酸盐风化—全球  $p\text{CO}_2$  的关系,将为著名的“Raymo 假说”提供实证<sup>[23]</sup>。

古近纪时期,在中国存在一个宽阔的由西向东贯穿的干旱带<sup>[24]</sup>,其中尤以古新世发育最盛,整个气候格局属于“行星风系主控型”。新近纪时期,南方地区显著湿润化,西北内陆和中亚地区的干旱化进一步加剧,成为“季风主控型”气候环境格局,与今天的气候环境格局相似。换句话说,在渐新世/中新世之交,亚洲宏观气候环境格局发生了重大变革<sup>[25]</sup>。是什么因素驱动了渐新世/中新世之交的气候格局变化?可以肯定的是,青藏高原隆升、副特提斯海的撤退<sup>[26]</sup>以及新近纪全球变冷都会加剧亚洲内陆的干旱程度。已有研究表明,副特提斯海大约在始新世晚期撤出塔里木盆地<sup>[27]</sup>,全球变冷在渐新世晚期最为剧烈<sup>[28]</sup>,青藏高原的隆升模式也在渐新世/中新世之交发生了重大转变。除了高原隆升引起的气候效应以外,高原北缘(包括帕米尔)的隆升更是加剧了造山带的风化剥蚀,催生了作为亚洲粉尘物源区的沙漠的形成,为黄土高原和北太平洋地区提供了源源不断的粉尘<sup>[29-30]</sup>。

## 5 宏观环境与生物地理演变

地貌、水系和气候演化无疑引发了新生代生物圈的重大变化。

在植物界,最大的变化莫过于  $C_4$  植物的扩张。在作为陆地生态系统内重要成分的植物中, $C_4$  光合作用的出现是对新近纪时期大气  $\text{CO}_2$  浓度和气候变化的适应性反应,对全球陆地生物圈具有深刻的影响。尽管  $C_4$  草本植物在中新世最晚期和上新世的扩散已经在世界范围内被广泛识别,但  $C_4$  扩散的时空变化仍然未被很好地了解,它的驱动机制仍然是一个有争议的问题。

在南亚和东非, $C_4$  植物分别在晚中新世和早上新世成为植被中的重要组成部分。在北美, $C_4$  植物大量出现于晚中新世。由于高冠的马科动物出现得较早,因此在北美地区稀树草原环境也相应地被认为出现于晚渐新世或早中新世,但植物证据显示草

本植物在中中新世以前并不占优势,草本植物是在晚中新世以后才大量增加的。在包括中国在内的欧亚大陆,高冠的三趾马直到晚中新世才取代了低冠的安琪马,而在这个时期草本植物已广泛存在。 $C_4$  植物的扩散被解释为大气  $\text{CO}_2$  水平的降低<sup>[31]</sup>或者亚洲夏季风系统随着喜马拉雅山和青藏高原的快速上升而加强<sup>[32]</sup>。但也有人认为并不存在全球性的  $C_4$  植物扩散,也没有证据显示大气  $\text{CO}_2$  水平在晚中新世有重大变化<sup>[33]</sup>。

研究结果显示,中国西北部自晚中新世至早上新世为  $C_3$  草本植物占优势的温带草原, $C_4$  植物直到上新世才在华北东部出现,且并未占据统治地位。这一结果明显不同于南亚、东非和北美的情况,在这些地区从 7 Ma BP 开始  $C_4$  植物就已经广泛扩散。中国三趾马动物群的生活环境显然受到了青藏高原隆升和东亚季风出现的强烈影响。青藏高原自中新世以来的隆升已经达到阻碍印度季风深入中国内陆的程度,因此随着青藏高原北侧的变冷变干,抑制了  $C_4$  植物在中国北方,尤其是西北部的扩散。直到上新世,随着东亚夏季风的加强, $C_4$  植物才在华北地区自东向西扩散,但东亚季风的强度尚不能深入到中国西部,因此中国西部一直未出现  $C_4$  植物占优势的稀树草原环境。随着第四纪冰期的来临,东亚冬季风盛行,这一变化甚至影响到中国东部地区,并在早更新世又重新回到以  $C_3$  草本植物占优势的状态<sup>[34-36]</sup>。

哺乳动物对气候环境的变化非常敏感,因此其演化历史能够反映新生代时期,特别是自新近纪以来气候环境的重大变化。中国在晚新生代的哺乳动物化石方面有着世界上得天独厚的优势,其研究结果表明,不同地区哺乳动物群的组成及特征具有明显的区域性差异,哺乳动物的分布与自然环境息息相关,生态环境的改变是动物群演替的重要驱动力。在新生代,中国既经历了全球性的气候变化,也经受了喜马拉雅运动,特别是青藏高原隆升的影响。所有这些变化,必然会对哺乳动物的分布和地理区系的演变产生影响,这些演变也会记录在埋藏的化石之中。因此,对哺乳动物化石的研究是进行自然环境恢复和古动物区系再造的重要手段。

第四纪冰期动物群以及现代青藏高原动物群长期以来被认为与更新世的全球变冷事件密切相关,其中的动物表现出对寒冷环境的充分适应。这些动物的起源和演化一直受到广泛的关注,它们曾经被假定是随着第四纪冰盖扩张演化而来,推断可能起

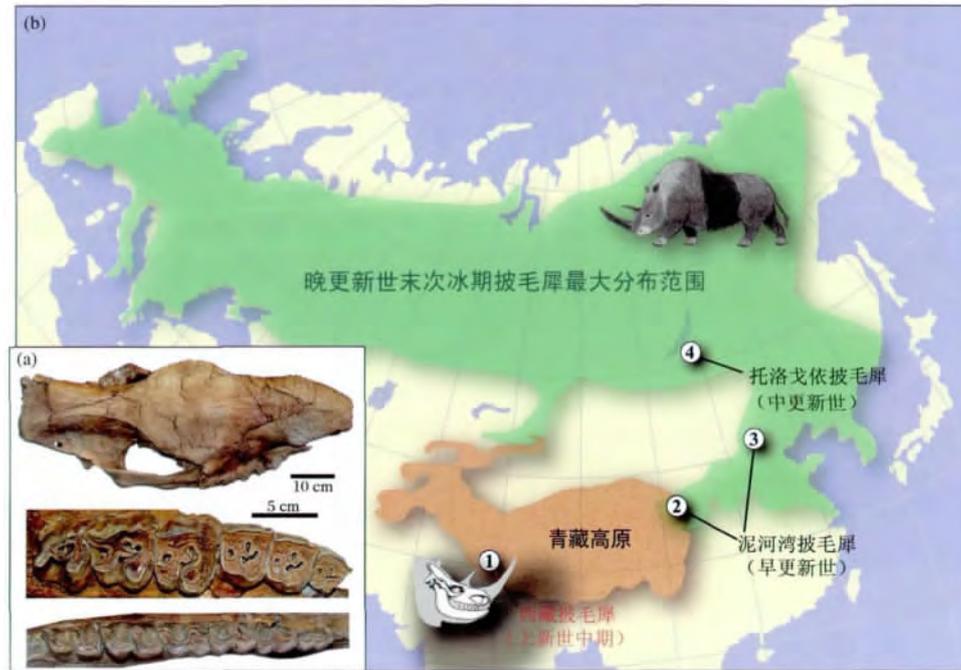


图 3 披毛犀的起源、迁徙和分布(修改自文献[37])

Fig. 3 Origin, dispersal and distribution of woolly rhino (modified from reference [37])

(a) 西藏披毛犀的头骨和上、下颊齿; (b) 披毛犀在欧亚大陆的演化历史

(a) Dorsal view of the skull (upper), occlusal view of upper cheek teeth (middle), and occlusal view of lower cheek teeth (lower) of the new woolly rhino; (b) Evolution of woolly rhino in Eurasia

源于高纬度的北极圈地区,但一直没有可信的证据。在西藏札达盆地上新世化石组合中发现的已知最原始的披毛犀<sup>[37]</sup>、雪豹<sup>[38]</sup>和北极狐<sup>[39]</sup>等哺乳动物,证明冰期动物群的一些成员在第四纪之前已经在青藏高原上演化发展。岩羊的祖先也出现在札达盆地,在随后的冰期里扩散到亚洲北部;藏羚羊的起源可以追溯到青藏高原北部柴达木盆地晚中新世的库羊;分子生物学证据指示牦牛和盘羊各自有一个起源于亚洲中部的祖先<sup>[40]</sup>。

新生代以来由于青藏高原的隆升和我国构造—地貌格架的形成,直接影响了我国和全球气候环境的变迁以及古人类迁徙的路径,因此需要地质学家、古气候和古人类学家共同探索,对我国及亚洲新生代以来古地貌、古气候变迁的历史和我国古人类的发源与迁徙得出科学的结论<sup>[41]</sup>。

化石形态的对比研究一直是古人类学研究的主要手段,人类起源与演化的主要认识来自于对化石形态及其演变过程的观察。新兴的分子生物学技术为古人类学发展注入了新的活力,使研究工作突破了化石形态的表层,而能深入到遗传变异的定量分析和演化的内在机制的层面。但一段时间以来,相

关研究主要是通过现生人群的遗传变异做溯源推导,从古人类化石上提取DNA进行测序分析具有极大的难度,受制于DNA的保存状况,还要突破从支离破碎的基因片段中获取有意义信息的瓶颈。

根据对4万年前生活在东亚的田园洞人一个个体所做的DNA提取与分析结果显示,这具人骨携带着少量古老型人类——尼安德特人的DNA,但更多表现的是早期现代人的基因特征,且与当今亚洲人和美洲土著人(蒙古人种)有着密切的血缘关系,而与现代欧洲人(欧罗巴人种)的祖先在遗传上已经分开,分属不同的人群<sup>[42]</sup>。现代人的起源与演化是目前学术界的热点课题,但对世界各地现生人群的渊源,包括我们中国人的直接祖先,学术界仍有不同的认识,针锋相对的观点还在论战之中。

## 6 结 语

青藏高原的隆升和亚洲季风系统的演化,是新生代亚洲地质演化中的两大重要事件,具有全球意义和区域特色。新生代地形、水系和生物地理演化是岩石圈浅表长期演化的表现和响应,是认识地球

深部过程对岩石圈浅表作用、地球表层各圈层相互作用, 以及圈层之间物理、化学和生物过程相互作用的切入点。

#### 参考文献(References):

- [1] Wang Pinxian. Deformation of Asia and global cooling: Searching links climate and tectonics[J]. *Quaternary Science*, 1998, 3: 213-221. [汪品先. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系[J]. 第四纪研究, 1998, 3: 213-221.]
- [2] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1 671-1 677.
- [3] DeCelles P, Kapp P, Gehrels G. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision [J]. *Tectonics*, 2014, 33, doi: 10.1002/2014TC003522.
- [4] Hu Xiumian, An Wei, Wang Jian'gang. Basin evolution in the Yarlung Zangbo Suture: From Tethyan subduction to Indian-Asian collision[C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [胡修棉, 安慰, 王建刚. 横过雅鲁藏布缝合带的沉积盆地演化: 从特提斯俯冲到印亚大陆碰撞[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [5] Zhang Peizhen, Zhang Huiping, Zheng Wenjun. Cenozoic tectonic evolution of East Asia [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [张培震, 张会平, 郑文俊. 东亚大陆新生代构造演化[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [6] Ji Junliang, Song Bowen, Zhang Kexin. Magnetostratigraphy of Dahonggou section in Qaidam Basin [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [季军良, 宋博文, 张克信. 柴达木盆地东北部大红沟剖面新生代磁性地层与构造升降[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [7] Wang E, Kirby E, Furlong K, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 640-645.
- [8] Wang C, Zhao X, Lippert P. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(13): 4 987-4 992.
- [9] Zhang K, Wang G, Ji J, et al. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2010, 53(9): 1 271-1 294.
- [10] Jia Guodong, Ma Yongjia, Sun Jimin. Palealtitude of Lunpola Basin at Oligocene/Miocene boundary [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [贾国东, 马永嘉, 孙继敏. 渐新世—中新世之交青藏高原伦坡拉盆地的古高度[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [11] Bai Yan, Fang Xiaomin, Tian Xi et al. Stable isotope paleohypsometry in southern Tibetan Plateau [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [白艳, 方小敏, 田茜, 等. 青藏高原南部稳定同位素高度计[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [12] Li Chunfeng, Lin Jian, Denise Kulhanek. Evolution of oceanic lithosphere of South China Sea: New results from IODP 349 [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [李春峰, 林间, Denise Kulhanek. 南海大洋岩石圈演化与沉积环境变迁——IODP 349 航次新成果[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [13] Wang Ping, Zheng Hongbo, Chen Jun. Cenozoic exhumation of Huangling anticline: Sedimentary evidence from western Jiangnan Basin [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [王平, 郑洪波, 陈军. 黄陵背斜的新生代剥露——来自江汉盆地西缘的沉积记录[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [14] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066.
- [15] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359: 117-122.
- [16] John Milliman, Katherine Farnsworth. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [17] He Mengying, Zheng Hongbo, Bookhagen Bodo, et al. Controls on erosion intensity in the Yangtze River Basin tracked by detrital U-Pb zircon dating [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 136: 121-140.
- [18] Ren Meie, Bao Haosheng, Han Tongchun, et al. The geomorphology of the Jinshajiang valley of northwest Yunnan and problems associated with river capture [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1959, 25(2): 135-155. [任美镛, 包浩生, 韩同春. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题[J]. 地理学报, 1959, 25(2): 135-155.]
- [19] Li J J, Xie S Y, Kuang M S, et al. Geomorphic evolution of the Yangtze gorges and the time of their formation [J]. *Geomorphology*, 2001, 41: 125-136.
- [20] Zheng H B, Clift P, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(19): 7 529-7 960.
- [21] Zheng Hongbo, Wang Ping, He Mengying. Birth of the Yangtze River: Tectonic and geomorphic processes [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [郑洪波, 王平, 何梦颖. 长江的诞生——构造与地貌过程[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [22] Ruddiman W F. Tectonic Uplift and Climatic Change [M]. New York: Plenum Press, 1997.
- [23] Fang Xiaomin, Sun Jimin, Xu Zhifang. Continental weathering in western China and uplift of Tibetan Plateau [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [方小敏, 孙继敏, 许志方. 中国西部大陆剥蚀风化与青藏高原隆升[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]
- [24] Tang Zihua, Huang Baochun, Ding Zhongli. Pollen record of Kuche area in Tarim Basin during Oligocene [C]// Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai, 2014. [唐自华, 黄宝春, 丁仲礼. 塔里木盆地库车地区渐新世以来的孢粉记录[C]// 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014.]

- [25] Sun X J, Wang P X. How old is the Asian monsoon? Palaeobotanical constraints from China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222: 181-222.
- [26] Ramstein G, Fluteau F, Besse J. Effect of orogeny, plate motion and landsea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years [J]. *Nature*, 1997, 386: 788-795.
- [27] Bosboom R, Dupont-Nivet G, Houben A, et al. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (west China) and concomitant Asian paleoenvironmental change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 299: 385-398.
- [28] Zarcos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292: 686-693.
- [29] Guo Z, Ruddiman W F, Hao Q, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [30] Pettke T, Halliday A, Rea D. Cenozoic evolution of Asian climate and sources of Pacific seawater Pb and Nd derived from eolian dust of sediment core LL44-GPC3 [J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1-31, doi: 10.1029/2001PA000673.
- [31] Wang Y, Cerling T E, MacFadden B. Fossil horses and carbon isotopes: New evidence for Cenozoic dietary, habitat, and ecosystem changes in North America [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 107: 269-279.
- [32] Quade J, Cerling T E. Expansion of C<sub>4</sub> grasses in the Late Miocene of northern Pakistan: Evidence from stable isotopes in paleosols [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 115: 91-116.
- [33] Morgan M, Kingston J, Marino B. Carbon isotopic evidence for the emergence of C<sub>4</sub> plants in the Neogene from Pakistan and Kenya [J]. *Nature*, 1994, 367: 162-164.
- [34] Wang Y, Deng T. A 25-Ma record of paleodiet and environmental change from carbon and oxygen isotopes in mammalian tooth enamel and paleosols from the NE margin of the Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236: 322-338.
- [35] Zhang C F, Wang Y, Deng T, et al. C<sub>4</sub> expansion in the central Inner Mongolia during the latest Miocene and early Pliocene [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287: 311-319.
- [36] Zhang C F, Wang Y, Li Q, et al. Diets and environments of late Cenozoic mammals in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau: Evidence from stable isotopes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 333/334: 70-82.
- [37] Deng T, Wang X M, Fortelius M, et al. Out of Tibet: Pliocene woolly rhino suggests high-plateau origin of Ice Age megaherbivores [J]. *Science* 2011, 333: 1 285-1 288.
- [38] Tseng Z J, Wang X M, Slater G J, et al. Himalayan fossils of the oldest known pantherine establish ancient origin of big cats [J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2014, 281, doi. org/10.1098/rspb.2013: 2686.
- [39] Wang X M, Tseng Z J, Li Q, et al. From 'third pole' to north pole: A Himalayan origin for the arctic fox [J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2014, 281, doi. org/10.1098/rspb.2014: 0893.
- [40] Deng Tao. Tibetan origin of Quaternary Ice Age fauna and its northward spreading [C] // Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai 2014. [邓涛. 第四纪冰期动物群的青藏高原起源及其在全北界的扩散 [C] // 第三届地球系统科学大会摘要. 上海 2014. ]
- [41] Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai. Influence of Tibetan Plateau uplift on tectonic-geomorphology, climate and migration of ancient humen [C] // Abstract of the Third Conference on Earth System Science. Shanghai 2014. [葛肖虹, 刘俊来, 任收麦. 青藏高原隆升对我国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响 [C] // 第三届地球系统科学大会摘要. 上海, 2014. ]
- [42] Fu Q M, Meyer M, Gao X, et al. DNA analysis of an early modern human from Tianyuan Cave, China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110: 2 223-2 227.

## Evolution of Topography, Drainage and Biogeography in East Asia during the Cenozoic: Summary of the Third Conference on Earth System Science

Zheng Hongbo<sup>1</sup>, Guo Zhengtang<sup>2</sup>, Deng Tao<sup>3</sup>

(1. School of Geopgraphy Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100029, China;

3. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Drastic changes in the deep Earth processes and paleoenvironments on the surface occurred in Asia and surrounding regions during the Cenozoic. Driven by India-Asia collision and Pacific plate subduction, the Tibet Plateau region in the west gained its high elevation, whereas lithosphere in east China lost its thickness, and West Pacific margin seas opened, all of which led to the establishment of the present-day topography and drainage pattern. These tectonic-geomorphic processes interplayed with global cooling, re-organization of northern westerlies, Asian monsoon regime and biogeography in this region, which have become the frontier topics in earth sciences.

**Key words:** Cenozoic; Asia; Tectonic-geomorphology; Biogeography.