

# 从中国古植被记录看东亚季风的年龄

孙湘君<sup>1,2</sup>, 汪品先<sup>1</sup>

(1. 同济大学 海洋地质国家实验室, 上海 200092; 2. 中国科学院 植物研究所, 北京 100093)

**摘要:** 我国最近发现的早中新世季风记录, 对东亚季风系统何时形成又提出了疑问. 现代季风系统的一个明显特征, 在于它打乱了行星气候系统纬向分布的带状模式, 因而地质记录中季风气候地理模式的出现, 就应当意味着季风系统的建立. 据此汇总了中国大陆 125 个地点所获得的古植物和岩性资料, 揭示了两种完全不同的气候分带模式: 早第三纪宽阔的干旱带由西向东横跨中国大陆, 而晚第三纪至今的干旱带仅局限在中国西北部. 渐新世/中新世交界时气候系统的大改组, 就是现代东亚季风建立的证据. 其后, 季风系统在晚第三纪又经历了巨大变化, 包括 15~13 Ma 前、8 Ma、3 Ma 前干旱气候的加剧和季风系统的加强. 所获得的新资料并不支持亚洲季风系统起源于约 8 Ma 前这一观点, 而认为东亚大约是在晚渐新世向季风气候转变这一假设更为合适.

**关键词:** 东亚季风; 古新世; 新近纪; 花粉; 古植被; 干旱

**中图分类号:** P 52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-374X(2005)09-1137-07

## How Old is the Asian Monsoon System? —Palaeobotanical Constraints from China

SUN Xiang-jun<sup>1,2</sup>, WANG Pin-xian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The recent discovery of monsoon records in early Miocene raised a question of the time when the East Asian monsoon system initiated. A distinguishing feature of the modern monsoon system is its geographic distribution which disturbs the zonal pattern of indigenous to the planetary climate system, and the appearance of the monsoonal climate pattern in the geological records should signify the onset of the monsoon system. Here we present the results of a compilation of palaeobotanical and lithological data from 125 sites over China, that has revealed two completely different patterns of climate zones: the Palaeogene pattern with a broad belt of aridity stretched across China from west to east, and the Neogene pattern with the arid zone restricted to northwest of China which has persisted until today. The reorganization of the climate system around the Oligocene/Miocene boundary provides evidence for the establishment of the modern East Asian monsoon. Since then, the Neogene has witnessed significant variations of the monsoon system, including enhancement of aridity and monsoon intensity at about 15~13 Ma, around 8 Ma and 3 Ma. The new data do not support the onset of the Asian monsoon system around 8 Ma. Rather, the new data led to a hypothesis that the transition to the monsoon

收稿日期: 2005-09-20

作者简介: 孙湘君(1934-), 女, 山东烟台人, 研究员. E-mail: sunxj@tongji.edu.cn

注: 此文为原载于“Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology”2005 年 222 卷 181-222 页“How old is the Asian monsoon system? -Palaeobotanical records from China”一文的摘译, 由王晓梅、贺娟译, 郑洪波校。

climate system in East Asia occurred in the latest Oligocene.

Key words: east asian monsoon; palaeogene; neogene; pollen; palaeovegetation; aridity

过去 20 年里亚洲季风已经得到越来越多的关注,并且已经获得季风演变大量的古记录.季风研究中一个至关重要的问题是现在季风系统的年龄,因为研究当前季风的起源对于理解季风的历史和变化机理非常重要.

亚洲季风长期历史的研究开始于 1987 年阿拉伯海的 ODP117 航次<sup>[1]</sup>,航次后分析认为与季风相关的上升流开始于 8.5 Ma<sup>[2]</sup>,海陆证据的结合发现在大约 8 Ma 时印度季风突然加强<sup>[3,4]</sup>.另一方面,东亚季风的历史在中国的黄土剖面中有广泛的记录,黄土和古土壤互层反映了冬夏季风优势的交替,由此推断东亚季风开始于 2.6 Ma<sup>[5~7]</sup>;后来发现黄土之下的红土也是风成的,故黄土高原的风成沉积历史追溯到 7~8 Ma<sup>[8~12]</sup>.由于喜马拉雅山脉和青藏高原的抬升可以加强亚洲的干旱气候和季风系统<sup>[13]</sup>,既然在 8 Ma 时印度洋的上升流和中国内陆的风尘堆积同时开始,说明这就是印度和东亚季风的开始,而且也反映了青藏高原的抬升<sup>[12]</sup>.

早在 20 年前,中国的科学家们在进行油气勘探和地层研究的同时,已经注意到季风演化的早期证据.综合孢粉数据,就发现从白垩纪到古新世中国由西向东存在一条广阔的干旱带<sup>[14]</sup>.从渐新世到中新世,中国东部由干旱转变为湿润,到上新世干旱带只存在于西北地区,这种改变被解释为大气环流从行星风系转变为季风风系<sup>[15,16]</sup>.中国的科学家认为,正是东亚夏季风把海洋的水分带到中国东部,而渐新世到中新世转折时气候系统的改组,也正是东亚夏季风加强或者确立的证据<sup>[17,18]</sup>.

过去几年里,笔者收集了中国 125 个地点的古新世到上新世的孢粉和其他古植被数据进行总结,并利用这些数据探讨渐新世末期植物地理和气候分区的改组,相信会有助于澄清对亚洲季风和干旱气候演变的种种误解.

## 1 材料和方法

### 1.1 气候参数

笔者对东亚夏季风演化的研究,主要是基于早、晚第三纪的古植物资料,包括孢粉化石以及叶和种

子等大化石.尽管不敢说齐全,但是相信重要资料已经包括在内.同时注意到反映气候的沉积学特点.

#### 1.1.1 反映干旱的孢粉参数

选择了广泛分布在石膏、岩盐、芒硝、钙芒硝等能指示干旱气候沉积中的新生代孢粉类型,如麻黄粉(*Ephedripites*),它是产生于三叠纪的裸子植物,现在广泛发育在中国西北的干旱、半干旱地区<sup>[19]</sup>,它的化石非常易于识别,并广泛分布于新生代的蒸发岩中.例如在江西<sup>[20~21]</sup>,麻黄在古新世岩盐中占 10%~50%,Tong 等从始新世中晚期蒸发岩的 313 个孢粉样品中发现<sup>[22]</sup>,岩盐中 30%,钙芒硝中 20%,紫色泥岩中 15%的孢粉都是麻黄粉.所有上面提到的沉积物都是在干旱条件下形成的,因此推测麻黄粉含量超过 15%的孢粉组合指示干旱和半干旱的环境.

除了麻黄,也有一些形态特殊而又反映干旱气候的其他孢粉类型,比如山龙眼粉(*Proteacidides*),它经常和麻黄一起存在于中国西北地区和内蒙古的蒸发岩中.另外白刺和藜科花粉也广泛存在于晚第三纪和第四纪的蒸发岩中,也可以作为干旱气候的标志.

晚第三纪的孢粉组合中,出现高含量的蒿和其他菊科(*Asteraceae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、禾本科(*Poaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、百合科(*Liliaceae*)、蒺藜科(*Zygophyllaceae*)等草本植物和灌木的花粉,都能指示干旱气候.另外,希指蕨孢(*Shizaeisporites*)和克拉索粉(*Classopollis*)长期以来被认为属于绝灭植物,广泛存在于北半球晚白垩纪和早古新世的蒸发岩中<sup>[23,24]</sup>,也可以用作干旱气候的标志.

#### 1.1.2 反映干旱的叶化石

植物叶化石的形态(尺寸、结构、叶缘)能够反映生态环境.例如,大型、全缘和纸质的叶片,反映湿润的气候,而小型、革质和具齿状边缘的叶化石指示干旱的环境<sup>[25]</sup>.一种绝灭的叶化石 *Palibinia* 在中国东南古新和始新世的含膏盐的红土中广泛存在,也是干旱、半干旱气候的一种替代性指标.

与此同时,收集了古新世到更新世的沉积数据,例如蒸发岩(石膏、岩盐、钙芒硝)代表干旱气候指标,而油页岩和煤则指示潮湿气候<sup>[26,27]</sup>.

### 1.2 地层学

除西部的特底斯区外,中国的新生代主要是陆相沉积分布于几百个盆地中,因此,地层的定年面临着巨大的挑战.中国的石油系统,已经用古地磁等各种方法对众多的油气盆地进行新生代地层年代的测年对比,到上世纪 90 年代,中国许多的油气盆地都已完成了地层对比<sup>[27]</sup>.在这篇文章中大体上接受其对比方案,但大多数情况下所用的定年主要基于古生物证据.

## 2 中国新生代干旱带的进化

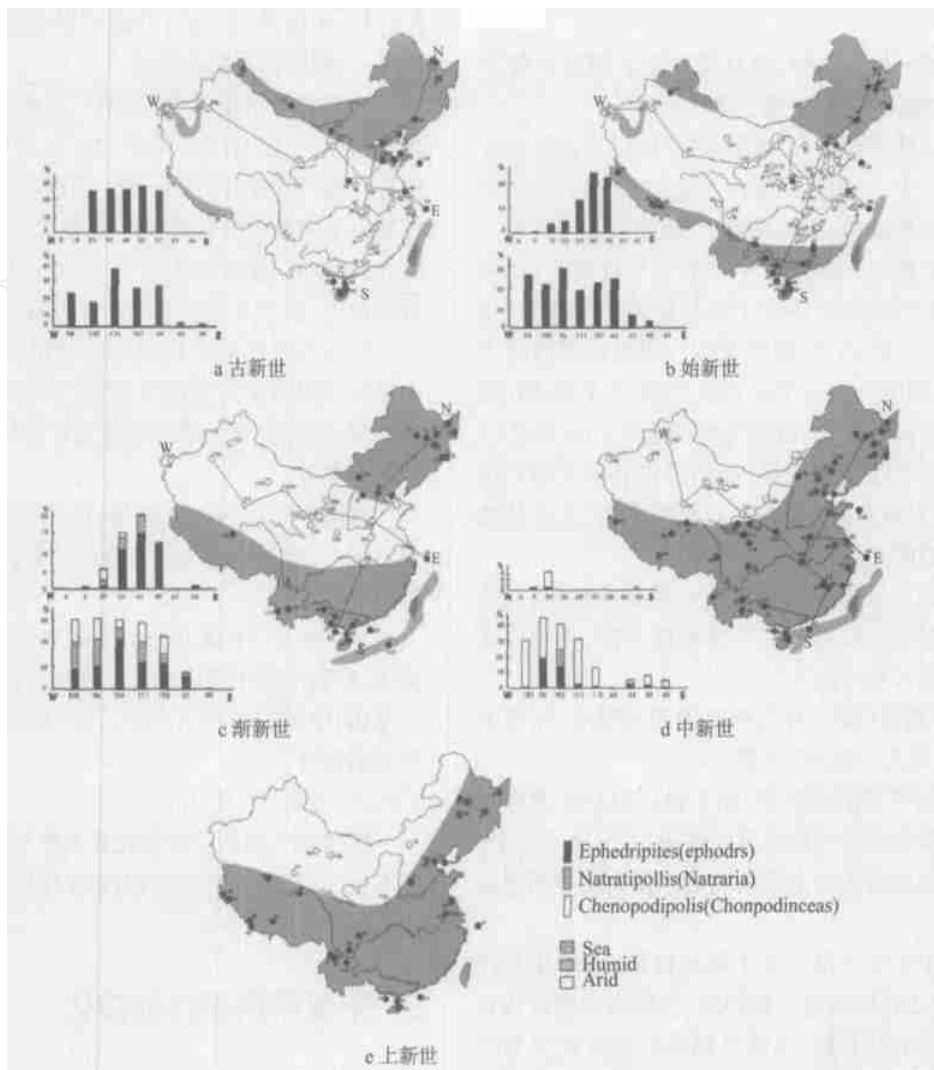
根据上述方法,对 100 多个地点的古植物和岩

性资料进行汇总、分析,得出了从古新世到上新世五个时期中国干旱带的不同位置(图 1),据此可以讨论干旱带的迁移和季风气候的演化.

### 2.1 早第三纪

晚中生代构造变形(燕山运动)和接下来的喜马拉雅-西藏造山带的生成,导致了东部裂谷盆地和西部挤压盆地的形成.在石油和天然气勘探的过程中,发现了 246 个新生代沉积盆地,大部分充填早第三纪的非海相沉积物,而同时代的海相沉积物则仅分布于塔里木盆地西部、西藏南部和台湾<sup>[28,29]</sup>.

#### 2.1.1 古新世(图 1a):分成大小不等的南北两个气候带



黑圈表示湿润一半湿润气候,白圈表示干旱一半干旱气候;NS 与 EW 剖面的干旱花粉含量示于 a~d 的左下方; a, b 的直方图表示孢粉谱中麻黄的百分比; c, d 的直方图表示麻黄(黑色)、白刺(灰色)和藜科(白色)的百分比.

图 1 孢粉与古植物资料反映的中国新生代气候带的演变

Fig.1 Evolution of climate zones in China throughout Cenozoic based on palynological and paleobotanical data

北部温带—亚热带湿润植被带:此带的古新世 沉积物只是零星分布于像抚顺盆地一类的小盆地

中,煤和油页岩沉积广泛分布,但迄今为止还没有发现蒸发岩.孢粉(*Paraalnipollenites*, *Betulaepollenites*, *Momipites*等)和叶化石(*Metasequoia*, *Sequoia*, *Taxodium*等)都指示温暖和湿润的气候.

南部亚热带干旱植被带:此带占中国大部分面积,其北界在东部是37到38°N,在西部为45°N,南界几乎到了中国的最南部,干旱带向西延伸超出国界.此带的孢粉组合以麻黄高含量为特征,石膏、岩盐、芒硝、碳酸钾、碱岩广泛分布.

总之,当时中国的中低纬度区有一条宽阔的干旱带贯穿,仅在现代东部海岸和南海干旱程度减弱,因此在南北剖面的中部孢粉组合中麻黄的百分比非常高.

2.1.2 始新世(图1b):是众多盆地大幅度沉降和大湖发育期,分成三个气候带

北部亚热带湿润植被带:此带特征与古新世时相比变化不大.例如抚顺煤田发现的70多种植物叶片中有苏铁和蕨类,反映热带、亚热带的暖湿气候.

中部亚热带—热带干旱—半干旱植被带:此带从古新世中国南部亚热带干旱植被带发展而来.指示其南界向北移动,东部到25°N,西部到雅鲁藏布江以北.孢粉组合中多干旱分子,如柴达木盆地和西域里木盆地,麻黄粉和白刺属均可达到30%左右.

南部热带湿润植被带:始新世煤和油页岩广泛分布,没有发现蒸发岩,而有大量的蕨类、水生植物和常绿植物的大化石.

可见始新世干旱带与古新世的非常相似,只是到现代东部沿海和南海区干旱程度下降,并且麻黄的百分比比较古新世为低.

2.1.3 渐新世(图1c):沉积范围明显缩小,东部大片缺失,仍分三个带

东北温带湿润植被带:渐新世以前从东北穿越蒙古到新疆的湿润气候带已经缩小,西北已经变干,但叶化石和孢粉资料指示东北地区仍为暖温而湿润的气候.

中部亚热带干旱—半干旱植被带:由于化石点稀少,此带边界的确定比较困难,但现有的孢粉和岩性资料表明南界北移,且西北部的北部变得更为干旱.整体而言,干旱带在东部变窄,西部变宽.植被的重要变化是麻黄被藜科和白刺等C4植物替代.

南部热带—亚热带湿润植被带:三水、百色、南宁等含煤小盆地发现的化石指示亚热带常绿阔叶林,反映暖湿气候.南海钻孔中获得的也是以蕨类孢子和常绿阔叶林花粉为标志的孢粉组合,均属热带

亚热带气候.

总体而言,渐新世的气候模式与古新世和始新世相似,但横跨中国的干旱带变窄.东部晚渐新世局部见有潮湿气候的孢粉组合出现,但因地层分布过窄,难作结论.

## 2.2 晚第三纪

无论古植物或岩性的证据,都表明早、晚第三纪之间气候和植物发生了重大变化,宽阔的干旱带变得狭窄,而且集中于中国的西北部,而东部在东亚季风环流影响之下变为湿润<sup>[17]</sup>,因此在新生代中国主要有两个植被带:西北部的干旱带和东部、东南部的湿润带.

2.2.1 中新世(图1d):分成干旱和潮湿两带,但西藏的植被明显不同

西北部干旱植被带:早第三纪横贯中国的干旱带推到西北,此时干旱带的北界已移到35°N.在此边界外侧的临夏,孢粉剖面说明渐新世的森林草原植被由早中新世的针叶阔叶林替代,但到8.0~6.5 Ma时草本植物又大量增加.这种变化趋势在干旱带的西宁、柴达木等盆地同样可以看到.

东亚季风影响下的湿润森林植被带:这是跨越中国东部到东南的宽阔植被带,从东北的敦化到南海陆架,都有湿润气候的植被发育,但不同的地区之间都有差异.

青藏高原温带针叶林带:植物化石和孢粉反映潮湿气候,有的剖面指示变冷的趋势,可能由高度上升引起.

总体而言,中新世开始植被和气候发生很大的变化,跨越中国中纬区的干旱气候带消失,退为西北干旱区;中国东部和东南部,以及青藏高原,都发育有湿润植被.

2.2.2 上新世(图1e)

植被和气候的分布模式在上新世和中新世的区别不大,只是在上新世时中国的西北部干旱带进一步扩张.

## 3 东亚季风系统的演化

综上所述,古植物和岩性资料揭示,在新生代过程中,中国的气候模式发生了根本性的变化.古新世时麻黄等旱生植物的大量分布,中国东南地区特别是长江中下游地区岩盐和石膏的巨厚堆积,都与今天的湿润气候形成强烈对比.从上面的讨论可以看出,中国在古新世时经历了典型的干旱气候,宽阔的

干旱带沿东西向横跨大陆;而在始新世干旱气候有所波动,出现了指示相对湿润条件的夹层;更显著的波动发生在渐新世,尤其是在它的晚期,但这一时期沉积物的局限分布阻碍了进一步的重建.中新世展示了另一种完全不同的气候带分布模式,干旱带仅局限于西北地区,上新世时,干旱带向东和东南扩展,一直保持到第四纪.

虽然新生代每一个世的气候带分布细节不同,但在中国大陆仍可以分辨出两种完全不同的模式:早第三纪时干旱带横跨大陆(图2c),而晚第三纪时干旱带仅局限于西北地区(图2b).后者与今天的模式非常相像:干旱—半干旱带集中在西北地区(图2a).中国现代的气候模式是东亚季风环流的产物,夏季风给中国大陆的东部和东南部带来水气,西北地区由于夏季风无法到达而干旱.

初步估计,中国东部夏季降水的水汽来源主要是东亚季风(68%),剩下的32%由印度季风提供<sup>[30]</sup>.晚第三纪和现代的气候模式的相似性,说明中新世时季风系统就已经存在.笔者的资料为汪渐新世/中新世界线附近中国气候系统发生改组提供了进一步的证据,支持了东亚季风系统在早中新世时就已建立的观点<sup>[15,17,18,31]</sup>.

然而,东亚季风在早中新世形成的证据,与以前提出的约8 Ma前青藏高原剧烈隆盛导致印度和东亚季风形成的结论相互矛盾<sup>[12]</sup>.图3展示了晚第三纪季风和干旱气候替代性指标的海陆记录:南海浮游有孔虫 *Neogloboquadrina dutertrei* 的百分比,指示与季风有关的高生产力(图3b)<sup>[32,33]</sup>;南海地层中炭黑的<sup>13</sup>C值,可作为C4植物的替代性指标(图3a)<sup>[34]</sup>;黄土高原的黄土和红粘土剖面中,粒度大于19 mm的风尘所占比例(冬季风的替代性指标)和磁化率的变化(夏季风替代性指标)(图3d, c)<sup>[12,35]</sup>;反映亚洲干旱程度的中太平洋风尘通量(图3e)<sup>[36]</sup>.炭黑的<sup>13</sup>C重值指示陆上C4植物的出现,而C4植物更适应季风气候.由于最早的<sup>13</sup>C峰值出现在20 Ma前(图3a),因此认为季风系统开始于早中新世<sup>[34]</sup>.这一观点与我国中新世黄土(22~6 Ma)的发现相吻合<sup>[35]</sup>.和更新世黄土一样,中新世时的黄土表明了风尘源区干旱性的加剧,及搬运风尘所需的冬季风加强.而中新世黄土层有古土壤发育,说明夏季风提供的水分增多.因此,东亚季风在整个晚第三纪就已经存在,最晚不超过20~22 Ma前.



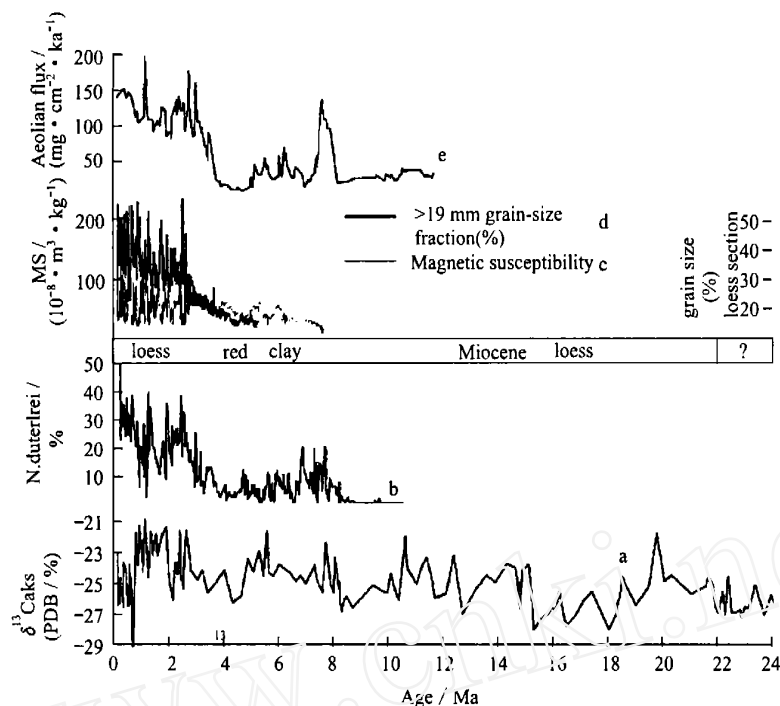
a. 现代,200 mm和400 mm的年降水量等值线之间为半干旱区;b. 中新世,代表晚第三纪干旱带分布格局;c. 始新世,代表早第三纪

图2 中国干旱带的分布

Fig. 2 Distribution of arid zone in China

图3同样也展示了东亚季风形成以后的演化.大约8 Ma前,无论是亚洲的风尘通量(图3e),南海 *Neogloboquadrina* 的百分比(图3b),还是南海炭黑同位素(图3a)都有非常显著的峰值,表明东亚季风系统加强.这一事件大体上与黄土高原红粘土堆积的开始和阿拉伯海 *Globigerina bulloides* 百分比的增加同时发生,以前被认为是东亚季风系统开始的证据<sup>[12]</sup>.现在看来这只是季风系统长期演化中的一次重大事件.在中新世的黄土层序之中,可辨认出风尘快速堆积的两个时段:15~13 Ma前和8~7 Ma前<sup>[35]</sup>.这两个时间段源区的干旱性加强,从酒西盆地、青藏高原东北部所获得的孢粉数据<sup>[37]</sup>,以及太平洋的风尘沉积记录<sup>[36]</sup>都证明了这一变化.演化中的下一个重大事件,是大约3 Ma前黄土开始堆积时季风的加强,这时所有的季风指标都达到新的高

值(图3).



a. 南海 ODP 1148 井黑炭稳定同位素值<sup>[34]</sup>; b. 南海 ODP 1146 井 *Neogloboquadrina dutertrei* 百分比<sup>[32,33]</sup>;  
c. 黄土高原赵家川剖面的磁化率; d. 粒径  $> 19 \mu\text{m}$  颗粒的百分比<sup>[12]</sup>和中国黄土、红粘土、中新世黄土的年代分布<sup>[35]</sup>;  
e. 中太平洋 ODP 885/886 井粉尘通量<sup>[36]</sup>;虚线范围表示约 8 Ma 和 3 Ma 时的东亚季风加强期

图3 东亚季风雨干旱气候演变的晚第三纪记录

Fig. 3 Neogene records of East Asian monsoon and aridity evolution

因此,亚洲季风系统比原先所设想的历史更长,同时季风系统也展示了巨大的波动.有关季风演化驱动机制的进一步讨论,读者可以参考文献[31,38],这里只是论证:早、晚第三纪交界前后中国气候模式的改组,反映了亚洲季风系统的形成.至于气候系统转变的确切时间及转化性质,是逐渐的、阶段性的还是突变的,这一问题尚待进一步的研究解决.由于笔者的大部分数据主要来源于陆上的石油开发钻井记录,而这些非海洋沉积目前还缺少严格的年代控制,因此对于渐新世/中新世之间的转变,一时还难以进行更为详细的研究.庆幸的是,南海北部 ODP1148 航次取得了 32 Ma 的地层记录,发现在 25 Ma 前发生的构造形变最为强烈<sup>[33]</sup>,当时的晚渐新世滑塌层剖面中,各项录井曲线都表现出强烈的偏移,而 4 次沉积间断总共造成约 3 Ma 沉积记录的缺失<sup>[39]</sup>.同时,地球化学分析也发现在这段时间里沉积物源区发生了巨大变化<sup>[40]</sup>.这些发现,与笔者这里所说的晚渐新世气候不稳定记录相一致,应非巧合.

因此,可以假设:东亚季风系统作为对亚洲构造形变的一种响应,在晚渐新世的晚期就开始发展.尽

管目前所获的数据资料还很有限,这个假设是可以通过后工作取得新资料来加以检验的.

## 5 结论

(1) 汇总中国油气勘探和地层研究所得到的古植被和岩性资料,发现早第三纪中国的气候分带模式与现在完全不同,从西向东存在一条广阔的干旱带.

(2) 从中新世到现在,干旱带限于西北地区,早、晚第三纪气候分带的不同说明大气环流由行星风系转变为季风风系.换句话说,是东亚季风把大洋的水分带到中国东部,气候系统从渐新世到中新世的转变为东亚季风的建立提供了证据.

(3) 东亚季风在中新世出现,还得到其他发现的证明:秦安从 22 Ma 到 6 Ma 的黄土古土壤层的发现<sup>[36]</sup>,南海南部 C4 植物在 20 Ma 的出现<sup>[34]</sup>,以及泰国北部指示季风气候的中新世(约 16~14 Ma)哺乳动物的出现<sup>[41]</sup>.

(4) 在晚第三纪,季风系统经历了巨大的时空变化,有证据表明 15~13 Ma,8 Ma 和 3 Ma 时干旱气候和季风加强,新资料并不支持东亚季风在 8 Ma

时形成。

(5) 由于中国的非海相新生代地层的年代控制至今欠佳,难以为渐新世到中新世气候转折过程提供细节,需要做更多的工作,去确定这次转折的确切时间(晚渐新世,还是渐新世末)和转折的性质(渐变还是突变)。根据目前的数据看,推测转换可能发生于渐新世的最晚期。

#### 参考文献:

- [1] Prell W L, Niitsuma N. ODP, Sci Results, vol 117. Ocean drilling program[R]. [s.l.]: College Station, TX, 1991.
- [2] Kroon D, Steens T N F, Troelstra S R. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea[J]. Proc ODP Sci Results, 1991, 117: 257 - 264.
- [3] Prell W L, Murray D W, Clemens S C, et al. Evolution and variability of the Indian Ocean summer monsoon: Evidence from the western Arabian Sea drilling program[A]. The Indian Ocean: A Synthesis of Results from the Ocean Drilling Program. Geophysical Monograph 70[C]. [s.l.]: AGU, 1992. 447 - 469.
- [4] Prell W L, Kutzbach J E. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution[J]. Nature, 1992, 360: 647 - 653.
- [5] LI J-jun. The uplift of the Qinghai-Xizang Plateau and its effect on environment [A]. Quaternary Geology and Environment in China[C]. Beijing: Science Press, 1991. 265 - 272.
- [6] Ding Z, Rutter N W, Han J, et al. A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma over East Asia[J]. Palaeogeogr, Palaeoclimato, Palaeoecol, 1992, 94: 223 - 242.
- [7] Liu T S, Ding Z L. Stepwise coupling of monsoon circulations of global ice volume variations during late Cenozoic[J]. Glob Planet Change, 1993, (7): 119 - 130.
- [8] SUN Dong-huai, Liu T, Cheng M, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimate of red clay sequences from the Chinese Loess Plateau [J]. Science in China D, 1997, 40: 337 - 343.
- [9] Sun D, Shaw J, An Z, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25: 85 - 88.
- [10] Ding Z, Sun J, Yang S, et al. Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25: 1225 - 1228.
- [11] Ding Z, Yang S L, Sun J M, et al. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma[J]. Earth Planet Sci Lett, 2001, 185: 99 - 109.
- [12] An Z, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoon and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since late Miocene time[J]. Nature, 2001, 411: 62 - 66.
- [13] Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau[J]. J Geol, 1993, 101: 177 - 190.
- [14] SUN Xiang-jun. Palynofloristical investigation of the Late Cretaceous and Paleocene of China[J]. Acta Phytotaxon Sin, 1979, 17(3): 8 - 23 (in Chinese with English abstract).
- [15] ZHOU Ting-ru. Chinese natural geography. Paleogeography, vol. 1[M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese).
- [16] Wang P. Progress in late Cenozoic palaeoclimatology of China: A brief review[A]. The Evolution of the East Asian Environment, vol. 1[C]. Hong Kong: Hong Kong University, 1984. 165 - 187.
- [17] Wang P. Neogene stratigraphy and paleoenvironments of China[J]. Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol, 1990, 77: 3125 - 3134.
- [18] Liu T. Geological environments in China and global change[A]. Origin and History of the Earth, Proceedings of the 30th International Geological Congress, vol. 1[C]. Utrecht and Tokyo: VSP, 1997. 5 - 26.
- [19] YANG Yong. Systematic and evolution of Ephedra L. (Ephedraceae) from China[D]. Beijing: Institute of Botany Chinese Academy of Sciences, 2002. 1 - 231 (In Chinese with English summary).
- [20] HE Yue-ming, Sun X. Palynological investigation of Palaeogene in the Qingjiang Basin, Kiangsi Province[J]. I Acta Bot Sinica, 1977, 19(1): 72 - 82 (in Chinese with English Title).
- [21] He Y, Sun X. Palynological investigation of Palaeogene in the Qingjiang Basin, Kiangsi Province [J]. Acta Bot Sin, 1977, 19(3): 237 - 243 (in Chinese with English abstract).
- [22] TONG Guo-bang, Zheng M, Yuan H, et al. A study of middle and late Eocene palynological assemblages in Jiangnan Basin and their environmental significance [J]. Acta Geosci Sin, 2001, 22(1): 73 - 78 (in Chinese with English abstract).
- [23] WANG Da-ning, Sun X Y, Zhao Y. Late Cretaceous to Tertiary palynofloras in Xinjiang and Qinghai China [J]. Rev Palaeobot Palynol, 1990, 65: 95 - 104.
- [24] Wang D, Sun X Y, Zhao Y, et al. Palynoflora from Late Cretaceous to Tertiary in Some Regions of Qinghai and Xinjiang[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese with English abstract).
- [25] Tao J, Zhou Z, Liu Y. The Evolution of the Late Cretaceous-Cenozoic Floras in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese).
- [26] Song Z, Li W, He C. Cretaceous and Palaeogene palynofloras and distribution of organic rock in China[J]. Scientia Sinica B, 1983, 26(5): 538 - 549.
- [27] Liu T, Zheng M, Guo Z. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asian[J]. Quat Sci, 1998, (3): 193 - 204 (in Chinese with English abstract).
- [28] YE De-quan, Zhong X, Yao Y, et al. Tertiary in Petroliferous Regions of China, I. Introduction [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. (in Chinese with English title).
- [29] WANG Hong-zhen. Atlas of Palaeogeography of China[M]. Beijing: Cartographic Publishing House, 1985. (in Chinese with English abstract).

(下转第 1159 页)

- of Sciences, 2002, 19(2): 134 - 139.
- [6] 李幼铭. 知识创新重大工程项目在大庆油田的技术成果要览[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 5 - 18.  
LI You-ming. Summary of key project technique achievements in knowledge innovation engineering for Daqing Oilfield [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 5 - 18.
- [7] 刘光鼎. 论综合地球物理解释——原则与实例[A]. 八十年代地球物理学进展[C]. 北京: 学术书刊出版社, 1989. 231 - 242.  
LIU Guang-ding. Integrated geophysical interpretation——Principles and examples [A]. Progress in Geophysics in 1980s [C]. Beijing: Academic Press, 1989. 231 - 242.
- [8] 刘光鼎, 肖一鸣. 油气沉积盆地的综合地球物理研究[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(5): 445 - 454.  
LIU Guang-ding, XIAO Yi-ming. Integrated geophysical studies on petroliferous sedimentary basins [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1985, 20(5): 445 - 454.
- [9] 王家林, 吴健生. 中国典型含油气盆地综合地球物理研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995.  
WANG Jia-lin, WU Jian-sheng. Integrated geophysical researches on typical petroliferous basins in China [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995.
- [10] 王家林, 张新兵, 吴健生, 等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 13 - 22.  
WANG Jia-lin, ZHANG Xin-bing, WU Jian-sheng, et al. Integrated geophysical researches on base texture of Zhujiang River Mouth Basin [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 13 - 22.
- [11] 吴健生, 陈冰, 王家林. 东海陆架区中北部前第三系基底综合地球物理研究[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 8 - 15.  
WU Jian-sheng, CHEN Bing, WANG Jia-lin. Integrated geophysical researches on basement structure of pre-cenozoic sediment basin in central and northern east sea shelf basin [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 8 - 15.
- [12] 朱夏. 论中国含油气盆地构造[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.  
ZHU Xia. Tectonic of petroliferous basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.

(编辑: 张弘)

## (上接第 1143 页)

- [30] Chen L. Features of the East Asian monsoon [A]. Studies of Asian Monsoon in Japan and China [C]. Ibaraki: Meteorological Research Institute, 1992. 220 - 235.
- [31] Wang P. Cenozoic deformation and the history of sealand interactions in Asia [A]. Continental-Ocean interactions in the East Asian Marginal Sea [C]. [s. l.]: AGU Monograph, 2005. 1 - 22.
- [32] WANG Ji-lang. Planktonic Foraminiferal Assemblages and Paleoclimatology during the last 18 Ma: A study on ODP Sites 1146 and 1148, Northern South China Sea [D]. Shanghai: Tongji University, 2001. (in Chinese with English abstract).
- [33] WANG Pin-xian, Jian Z, Zhao Q, et al. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep sea records [J]. Chin Sci Bull, 2003, 48: 2549 - 2561.
- [34] Jia G, Peng P, Zhao Q, et al. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea [J]. Geology, 2003, 31: 1093 - 1096.
- [35] Guo Z, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Ma ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416: 159 - 163.
- [36] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere [J]. Paleoceanography, 1998, 13: 215 - 224.
- [37] Ma Y, Fang X, Li J, et al. Vegetational and environmental changes during late Tertiary-early Quaternary in Jiuxi Basin [J]. Sci China, Ser D: Earth Sci, 2004, 34: 107 - 116 (in Chinese).
- [38] Wang P, Clemens S, Beaufort L, et al. Evolution and variability of the Asian monsoon system: State of the art and outstanding issues [J]. Quat Sci Rev, 2005, 24: 595 - 629.
- [39] Li Q, Jian Z, Su X. Late Oligocene rapid transformations in the South China Sea [J]. Mar Micropaleontol, 2005, 54: 5 - 25.
- [40] Li X, Wei G, Shao L, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: A response to Cenozoic tectonism in SE Asia [J]. Earth Planet Sci Lett, 2003, 211: 207 - 220.
- [41] Ducrocq S, Chaimanee Y, Suteethorn V, et al. Ages and paleoenvironment of Miocene mammalian faunas from Thailand [J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1994, 108: 149 - 163.

(编辑: 杨家琪)