

青藏高原新近纪重大气候事件演化序列

季军良^{1,2}, 洪汉烈^{1,2}, 肖国桥^{1,2}, 林 晓^{1,2}, 徐亚东^{1,2}, 柯 学^{3,4}, 艾可可², 孙作本²
JI Jun-liang^{1,2}, HONG Han-lie^{1,2}, XIAO Guo-qiao^{1,2}, LIN Xiao^{1,2}, XU Ya-dong^{1,2},
KE xue^{1,2}, AI Ke-ke², SUN Zuo-ben²

1. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

4. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. *State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

2. *Faulty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

4. *Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*

摘要:综合分析青藏高原新近纪古气候研究的不同替代性指标,建立了高原新近纪重大气候事件的演变序列,探讨青藏高原隆升和全球重大气候事件的关系。青藏高原新近纪不同构造-地层区重大气候事件发生的时间与高原隆升事件基本吻合,说明高原隆升是青藏高原气候变化的主要因素,与全球气候变化事件既存在一致性,又存在差异性。早—中中新世青藏高原气候变化频繁,气候变冷期开始的年代早于全球约 15Ma 以来的降温期,说明早—中中新世高原隆升对全球变冷的贡献较大。晚中新世以来的气候事件与全球重要气候事件相吻合,说明青藏高原可能在晚中新世已经隆升到了一定高度,其对全球气候变化的影响较之前有所减弱。青藏高原气候变化除受到高原隆升影响外,亦受到全球气候变化的影响。

关键词: 青藏高原; 新近纪; 气候事件; 全球变化; 隆升

中图分类号: P534.62

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)01-0120-10

Ji J L, Hong H L, Xiao G Q, Lin X, Xu Y D, Ke X, Ai K K, Sun Z B. Evolutionary sequences of the Neogene major climatic events in the Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 120-129

Abstract: Through a comprehensive analysis of different indexes of the Neogene climatic studies in the Tibetan Plateau, the authors established the Neogene sequence of the major climatic events and discussed the relationship between the Tibetan Plateau uplift and the major global climate events. The fact that the time of the major climatic events in the Neogene was almost synchronous with the time of the uplift of the Tibetan Plateau means that the uplift of the Tibetan Plateau was the main factor responsible for the climate change in the Tibetan Plateau. However, there exist some temporal differences and similarities between the major climatic events in the Tibetan Plateau and the major global climate events. In the early and middle Miocene, climate change in the Tibetan Plateau was frequent, and the beginning of cooling was earlier than 15Ma, which suggests that the uplift of the Tibetan Plateau made a considerable contribution to the cooling of the Earth before the late Miocene. Since the late Miocene, major climate events in the Tibetan Plateau coincided with important global climate events, which may imply that the Tibetan Plateau had reached a certain height and its impact on global climate was weakened than before.

Key words: Tibetan Plateau; Neogene; climatic events; global climate change; uplift

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-12-30

资助项目: 中国地质调查局项目《青藏高原新近纪隆升过程与地质事件群研究》(编号: 1212011121261)、《青藏高原新生代地质作用过程与第四纪环境演变综合研究》(编号: 1212010610103)和国家自然科学基金项目《准噶尔盆地南缘安集海河剖面第三系磁性地层学研究及其对天山新生代构造隆升的年代学制约》(批准号: 40902049)

作者简介: 季军良(1977-), 男, 博士, 副教授, 从事新生代地质与环境研究。Email: jil@cug.edu.cn

新近纪时期全球重要的气候事件包括^[1]:①早中新世冰期事件,是发生于约 23Ma 的短暂寒冷事件;②中中新世气候适宜期,发生于 17~15Ma,代表了中新世气候最温暖的时期,随后气候开始变冷,并伴随东南极冰盖的重新建立;③晚中新世亚洲季风增强事件,发生于约 8Ma;④晚上新世—早更新世冰期事件,发生于 3.6~2.6Ma,代表北半球大陆冰盖的建立和扩张^[2-3]。青藏高原新近纪气候变化既与全球气候变化的背景相关,又受控于高原不同时期的地貌隆升高度,而全球重大气候事件亦可能与青藏高原隆升引起的风化加剧、全球 CO₂ 浓度下降、导致全球变冷相关^[4-6]。因此,对青藏高原新近纪重大气候事件演化序列的研究,对于认识青藏高原隆升与全球气候变化的关系有重要意义。笔者根据青藏高原及邻区构造—地层区划^[7],综合不同古气候研究替代指标,对青藏高原及邻区新近纪气候变化进行对比研究,探讨青藏高原新近纪重大气候事件的演变序列及其与青藏高原隆升和全球气候事件的关系。

1 南疆—西昆仑构造—地层区

该地层区新近纪的古气候变化研究以塔中的麻扎塔格山剖面^[8]、塔里木盆地南缘的桑株剖面^[9-10]、叶城柯克亚剖面^[11]为代表。

麻扎塔格山(Mazartag)剖面的磁极性年龄为 9.7~2.5Ma^[8]。风成沙在地层中出现的时间约为 7Ma,说明塔里木盆地中部气候干旱,沙漠开始形成。Sun 等^[8]认为这与 8~7Ma 全球的干旱化和/或青藏高原隆升阻挡了印度洋的水汽有关。

桑株剖面的磁极性年龄为 6.5~2Ma^[9]。该剖面在约 5.3Ma 时出现风成沙沉积,说明塔里木盆地已经相当干旱,沙漠已经形成^[9]。进一步对沉积物中可溶性离子的含量、沉积物的颜色、磁性矿物、磁化率及孢粉的综合对比研究表明,在约 5.3Ma 该地区气候显著变干,植被主要为寒冷干旱的灌丛草原。Sun 等^[10]认为这与昆仑山隆升阻挡了来自印度洋的水汽有关。

叶城柯克亚剖面的磁极性年龄为 8~1.8Ma^[11-12]。郑洪波等^[13]发现该剖面底部发育风成沙丘沉积,表明约 8Ma 塔里木盆地南缘已经相当干旱,而上新世—更新世时期发育的埋藏风成黄土沉积则说明,塔克拉玛干沙漠已经发育到了相当规模,极度干旱的气候形成。粘土矿物在约 8Ma 之后发生了明显变

化,较高的绿泥石含量和伊利石结晶度均表明气候转为干冷^[14]。叶荷等^[15]对该剖面进行了常量和微量元素的分析,发现约 6.6Ma 以来气候变得更为干燥,可能与青藏高原进一步隆升有关。

此外,塔里木盆地南缘西域砾岩底界的古地磁年龄约为 3.5~3Ma^[9,11],而且砾岩中夹的透镜状、条带状粉砂层经粒度、地球化学分析以及石英颗粒表面特征鉴定,认为这些粉砂层均为风成黄土^[16]。西域砾岩广泛分布于中国西北部干旱地区的山麓地带,其成因与晚上新世全球气候变冷事件有关^[17]或是与山体快速隆升到相当高度而导致的高山上冰冻作用的发育相关^[11,18]。

南疆—西昆仑构造—地层区新近纪约 8Ma 之前的沉积地层由于缺少绝对地质年龄,仅根据孢粉分析将该地区环境由老到新粗略地划分为:以亚热带—温带落叶阔叶林为主的森林植被和温带湿润的针阔叶混交林,且草本植物逐渐增多^[19]。

2 柴达木—祁连—西秦岭构造—地层区

该地层区新近纪古气候变化的研究成果是青藏高原地区气候研究中最丰富的,其代表性的剖面有酒西盆地^[20]、西宁盆地塔山剖面^[21]、兰州盆地永登剖面^[22]、临夏盆地王家山和毛沟剖面^[23-24]、循化—化隆盆地^[25-26]、柴达木盆地大红沟剖面^[27]和怀头他拉剖面^[28]。

酒西盆地建立了约 13Ma 以来地层的磁极性年代序列^[29]。孢粉记录表明,约 8.6Ma 之前该地区以半湿润的草原植被和温暖湿润的森林植被为主,约 8.6Ma 之后开始发育干旱的草原植被,经历 5.67~5.42Ma、3.66~3.30Ma 和 2.56~2.21Ma 三次荒漠草原干旱环境后,该地区的植被最终演化为干旱型的荒漠^[20]。

兰州盆地和西宁盆地 16~15Ma 以前的新近纪地层建立了磁极性年龄^[21-22]。在 20Ma 左右兰州盆地内的厚层红色粘土沉积转变为含多层白色厚层砂岩沉积^[22]。西宁盆地在约 21.7Ma 之后存在约 1.7Ma 的沉积间断,从约 19Ma 开始盆地内沉积物具有磁化率和粘土组分含量降低、粉砂组分含量增加的趋势^[21],说明在约 20Ma 时兰州和西宁盆地的环境发生了明显变化(图 1)。25~20Ma 期间是青藏高原主体发生隆升的重要时期^[7,32-36],被称为青藏高原的二期隆升^[37]。因此,兰州和西宁盆地在约 20Ma 的沉积

环境变化可能是对青藏高原二期隆升的响应。西宁盆地从约19Ma开始磁化率和粘土组分含量降低、粉砂组分含量增加,可能与青藏高原隆升导致的内陆干旱化进一步加剧有关^[21]。值得注意的是,西宁盆地在19~15.9Ma期间沉积速率稳定,粒度和磁化率的变化指示了逐渐变干的气候趋势,这与该地区孢粉组合研究得出的气候变化趋势相同^[38~40]。而全球气候在17~15Ma时期处于中中新世大暖期,说明至少从沉积记录的角度看,中中新世大暖期的全球气候变化事件在西宁盆地没有明显响应。

临夏盆地以新近纪沉积为主,盆地内古—新近纪沉积由底至顶的磁极性年龄约为29~2.58Ma^[23~24]。孢粉组合显示临夏盆地新近纪经历了几次重大气候事件:1次降温期(18.6~13.0Ma),3次温暖湿润期(21.8~16.8Ma、13.0~8.5Ma和6.0~5.0Ma)和1次干旱化事件(8.5~6.0Ma)^[41](图2)。湖相沉积中碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}$ 在约12Ma前变正,约为1.5‰,反映了青藏高原已经隆升到一定高度,从而阻止了大洋水汽的输送,最干旱时期是9.6~8.2Ma^[30](图1)。粒度分析表明,临夏盆地除积石组以外,主体为细颗粒沉积,10~70 μm 区间的颗粒分布曲线与风成沉积类似,10~40 μm 区间的沉积通量分布在约7.4Ma和5.3Ma呈阶地状显著增加(图1),这被认为与北极冰量增加导致亚洲内陆干旱化加剧、冬季风增强及青藏高原面积和海拔显著增大有关^[31,45]。从上述不同的气候指标看,17~15Ma期间的中中新世大暖期在临夏盆地是一个降温期,而约12Ma变干气候事件亦滞后于全球降温时间,说明临夏盆地的气候事件与青藏高原隆升的关系更为密切,约8Ma和5.3Ma的变干事件则反映了亚洲季风的进一步增强。此外,3.58~2.58Ma沉积的积石组与下伏地层呈平行不整合接触,其形成可能与青藏高原此时已经隆升到相当高度和全球快速变冷相关^[17~18]。

循化—化隆盆地新生代沉积的最老年龄大于30Ma,而约14.6Ma以来的磁极性年龄最为可靠^[25~26]。循化盆地有2个层位发育石膏和膏泥岩,下部层位的年代还有待于进一步确定,上部石膏、膏泥岩层持续的时间为14.6~13.5Ma^[25]。石膏一般形成于干旱环境中,同时又必须有充足水流将形成石膏的离子带入湖泊,Dupont Nivet等^[46]据此认为兰州盆地在约34Ma时厚层石膏消失是南极冰盖形成、全球变冷导致降水减少所致。循化盆地在下部石膏、膏泥岩层

中分离出的孢粉组合显示其为温暖湿润气候下的落叶阔叶林,而其上部的孢粉组合显示气候明显变得温凉,进一步说明青藏高原东北部石膏层沉积的层位代表了一种暖湿气候。因此,循化盆地14.6~13.5Ma的上部石膏、膏泥岩层应该也代表了暖湿气候,这与15Ma以来全球气候持续变干冷不符。循化盆地7.3~5.0Ma期间的孢粉组合显示温带针叶林与干旱荒漠草原植被共存,气温明显下降^[47],这与临夏盆地的孢粉记录相吻合^[41]。

柴达木盆地是青藏高原东北部最大的盆地,目前盆地北部的怀头他拉剖面^[28]和大红沟剖面^[27]分别建立了15.7~1.8Ma和34~8.5Ma的磁极性年代框架。怀头他拉剖面分别在14.7Ma、8.1Ma和3.6Ma时沉积速率快速增大,Fang等^[29]认为这代表了青藏高原的3次快速隆升(图1)。气候变干冷也会导致沉积速率的增加,如发生在4~3Ma期间的全球大范围的沉积速率快速增大就与北极冰盖发育、全球变冷有关^[17]。怀头他拉剖面3次沉积速率增大的年龄分别对应于中中新世气候适宜期之后全球降温、亚洲季风增强和北极冰盖发育的时间,但由于缺少古气候方面的研究,还不能排除这3次沉积速率的快速增加与气候事件之间存在关联。路晶芳^[44]系统地分析了长山梁剖面的孢粉化石,孢粉组合显示23~18Ma植被为温凉干旱气候下的落叶针阔叶混交林,并伴生耐干旱草甸、中生草本灌木;18~12Ma为温暖湿润气候下的针阔叶混交林,并伴生少量的干旱、中生草本灌木;12~11.5Ma、11.5~10Ma、10~9Ma和9~4Ma分别为温凉偏干旱气候下的常绿阔叶落叶混交林、温凉湿润气候下的落叶针叶林、温凉湿润气候下的阔叶针叶混交林和温暖湿润气候下的落叶阔叶林;4~2.6Ma为寒冷干旱气候下的针叶林,并伴生一定量的耐干旱的寒带草甸灌木、中生草本灌木(图2)。长山梁剖面的元素地球化学特征和黏土矿物也被用以反映古气候—环境的变化^[48]。

柴达木盆地北部鸭湖剖面磁性地层年龄为5.3~1.83Ma,孢粉和盐类化学指标分析表明,5.3Ma时湖泊周围已分布着以蒿属、藜科、麻黄、禾本科等为主的草原,气候已经变干,湖泊处于碳酸盐和少量硫酸盐沉积阶段;3.4Ma后草本植物含量略有增加,气候的季节性增强^[49]。2.6Ma后耐旱植物花粉含量与盐度指标均呈现长期明显增加的趋势,气候快速向更干旱方向发展^[49]。

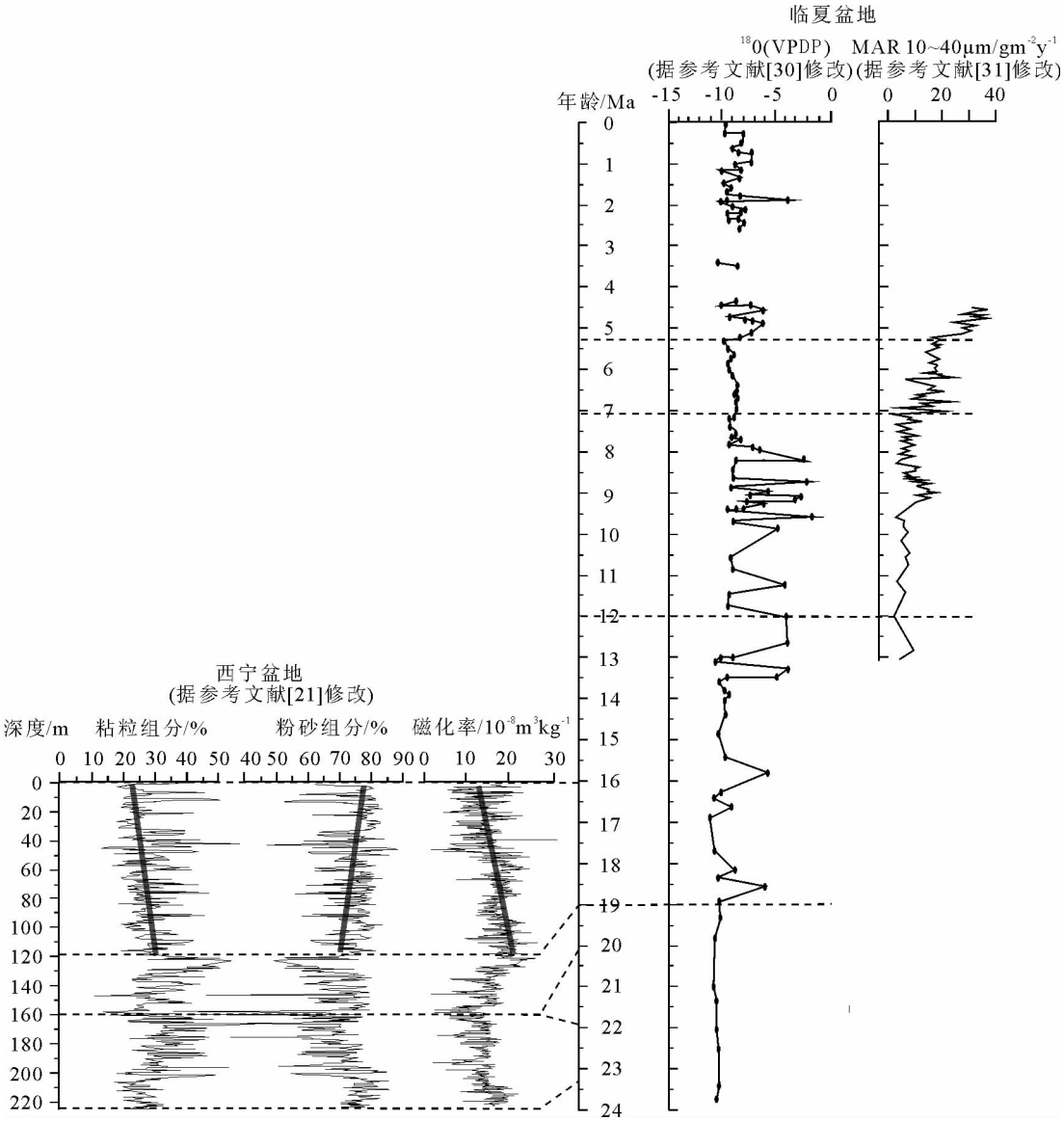


图 1 青藏高原东北部新近纪粒度、磁化率、氧同位素对比

Fig. 1 Comparison of Neogene particle sizes, magnetic susceptibilities and $\delta^{18}\text{O}$ values in northeastern Tibetan Plateau

此外,柴达木盆地发现晚中新世早期犀科化石 *A. tsaidamensis*, 从化石特征可判断当时气候温暖而湿度低,呈半干旱状态,植被以草原为主,有部分林带和灌丛存在,说明晚中新世早期青藏高原的隆升起到了阻止印度洋季风的作用,使暖湿气流对这一地区的影响逐渐减小^[50]。

3 羌塘-川西构造-地层区

对该地层区新近纪古气候变化的研究较少,且新近纪地层多缺少精确的地质年龄。

可可西里盆地湖相碳酸盐沉积在古近纪—新近纪之交湖泊由开放型转向封闭型,湖水盐度升高,生物种类趋于单一; $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值随地层变新具有明显的正向漂移趋势,在渐新统雅西措群—中新统五道梁群界线处发生突然正偏;陆源型微量元素的含量在古近纪—新近纪之交急剧减少,湖泊自生型元素则突然增加,代表气候干旱化程度波动的 Na/Ti 和 Na/K 比值亦出现相应变化,均说明渐新世—中新世研究区气候经历了从温暖湿润向炎热干旱的转变,可可西里盆地与羌塘地区同期湖相沉积物反

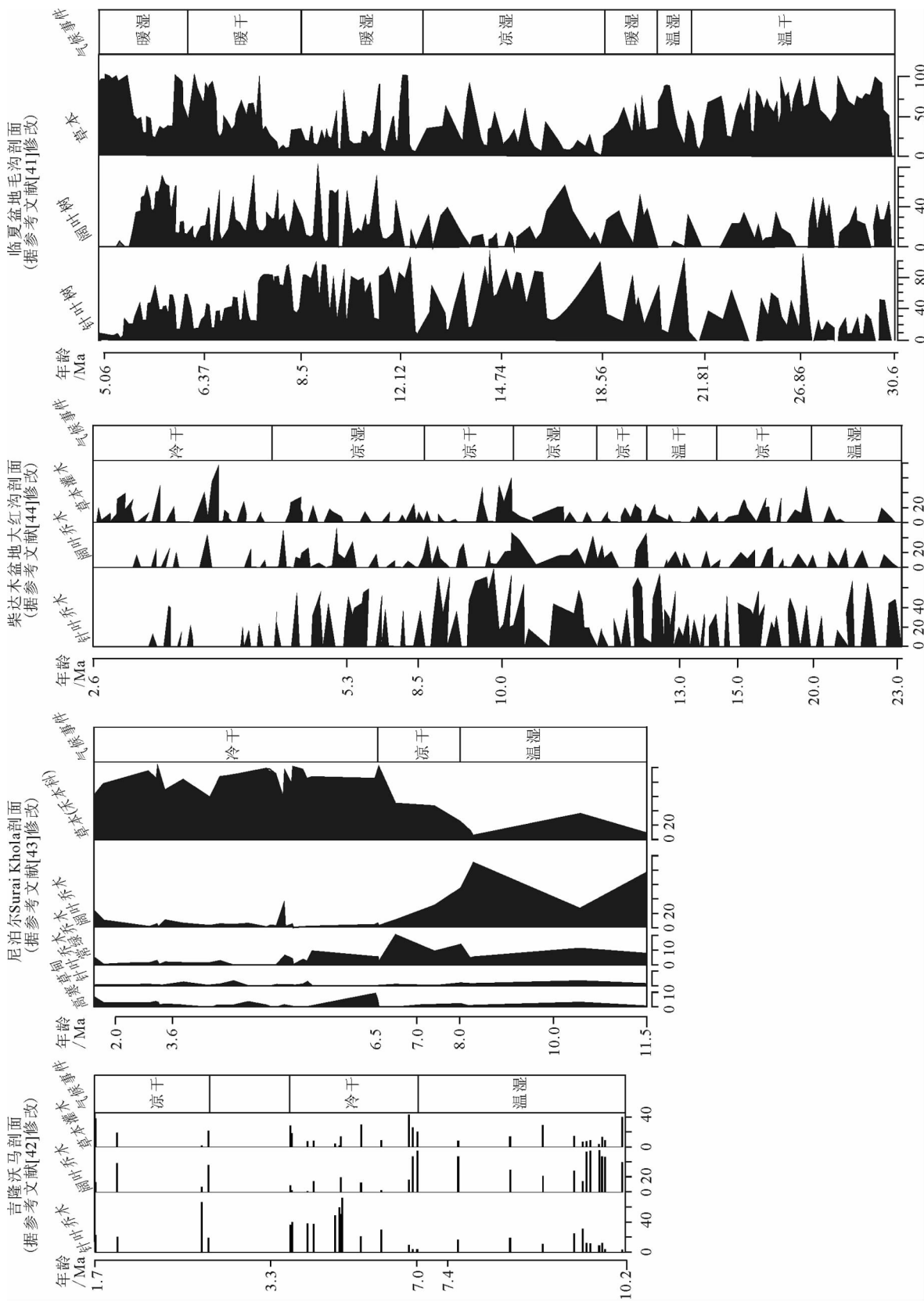


图 2 青藏高原新近纪孢粉组合对比

Fig. 2 Comparison of Neogene palynograms and major vegetation changes in the Tibetan Plateau

映的早中新世气候变暖事件具有良好的区域可对比性^[51]。25~20Ma 期间是青藏高原主体发生隆升的重要时期^[7, 32~36],周恩恩^[51]提出早中新世时期青藏高原的海拔已经达到足以改变高原内部气候状态的高度,是引起可可西里-羌塘地区湖泊系统演变和气候环境变化的主要原因。

沱沱河盆地北部、风火山西南侧(E92°36'46"、N34°18'28")新近纪孢粉化石主要分布在五道梁组中部和上部,其中前者可建立 *Pinuspollenites-Piceapollenites-Nitrariadites* 组合,后者可建立 *Quercoidites-Betulaepollenites-Chenopodipollis* 组合。孢粉组合显示植被为针叶林和干旱草原,尤以针叶林为主,表明早中新世早期该地区为温凉气候环境^[52]。

但是,该构造-地层区新近纪沉积缺少精确的年龄资料,导致不同地区不同的气候指标所反映的气候特征不一致,如 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值和微量元素比值反映了早中新世炎热干旱的气候环境^[49],而孢粉组合则反映的是温凉的气候环境^[52]。

4 扬子西缘构造-地层区

该地层区分布有众多小盆地,盆地内的沉积物主要形成于上新世以来。前人对该地区的磁性地层和气候环境进行了详细的研究。

云南省腾冲县上新统芒棒组由 3 段组成,中段为火山岩。芒棒组中段及上覆明光组火山岩的 K-Ar 测年结果分别为 3.3~3.8Ma 和 2.3Ma^[53]。戴静等^[54]在云南省腾冲县上新统芒棒组上段发现了保存较好的被子植物化石密脉鹅耳枥 *Carpinus m. iofaniana* Hu et Chaney,并通过化石与现生叶片角质层的对比分析推断,滇西地区上新世时的气候比现今温暖湿润。解三平等^[55]对腾冲县芒棒乡城子山芒棒组下段中发现的 2 种被子植物叶片及现存对应种的气孔参数和 C 同位素组成的综合分析表明,当时的大气 CO_2 浓度率高于现在水平,气候条件比当前温暖湿润。解三平等^[55]认为上新世期间,受新生代全球气候变冷和喜马拉雅运动的影响,该盆地一方面受印度洋季风的影响增强,干湿季节交替明显;另一方面受地形地貌影响,沿袭了温暖湿润的气候条件。

云南元谋盆地湾堡剖面化石植物群研究表明,盆地内气候为亚热带半湿润稀树灌木草原型,而盆地周围为湿润或半湿润的南亚热带常绿阔叶林气候,据此刘耕武等^[56]推测元谋盆地在中晚上新世已

经发育成为金沙江流域的干热河谷盆地之一。

通过云贵高原 20 多个剖面(钻孔)、近 700 个样品的孢粉分析,结合 4Ma 以来的磁极性地层年龄,童国榜等^[57]建立了云贵高原 4Ma 以来的孢粉时间序列,认为孢粉混杂堆积在 2.8Ma 出现,代表了云贵高原上升的初始时间,0.8Ma 左右则发生加剧抬升。前期地形相对高度小于 1000m,后期相对高度达 1500m。

云南曲靖盆地晚新生代孢粉植物群具有向上类型略有增多的特点,表现为原始栎树林的消退、扩张、再消退的变化规律,王伟铭等^[58]据此推测这 2 次栎树林的消退过程可能分别与发生在 3.4Ma 和 2.5Ma 的青藏高原隆升以及全球性气候变冷有关。

云南鹤庆盆地钻孔岩心的孢粉组合表明,在 2.7~2.6Ma 期间寒温带针叶林面积增加,肖霞云等^[59]认为这是由于山体强烈抬升所致,此次强烈抬升与“青藏运动 B 幕”对应。

青藏高原东缘泸定剖面上新世昔格达组湖相沉积的磁性地层年龄为 4.2~2.6Ma,沉积记录显示在 2.8Ma 青藏高原强烈隆升就已经开始,至 2.6Ma 昔格达湖完全消失^[60]。

5 冈底斯-喜马拉雅-恒河构造-地层区

对该地层区新近纪气候的研究在藏南札达盆地、吉隆盆地和喜马拉雅前陆盆地较为丰富。

藏南札达盆地形成于 9.6Ma 以来^[61]。孟宪刚等^[62]在札达盆地上新世湖相沉积层中发现犀类化石,在同一层中还采集了大量孢粉、微体古生物和植物化石,这些生物组合代表了温暖湿润向寒冷潮湿—温和干旱的气候变化过程。孢粉组合显示上新世—早更新世扎达盆地气候经历了从湿热—温暖潮湿—偏冷潮湿—寒冷干旱的变化,以及植被从森林—灌木—草原的逐渐演化^[63]。粘土矿物在 8.4Ma 之前以蒙脱石为主,伊利石结晶度较低,指示温暖、潮湿的气候条件。而在 8.4~7.2Ma 期间,粘土矿物转变为以绿泥石和伊利石为主,伊利石结晶度同步升高,指示一次明显降温事件^[48]。

藏南吉隆盆地湖相沉积形成于 7Ma 之前^[64],其下为砂砾岩沉积。根据沉积速率外推,该盆地形成于约 10Ma 以来。吉隆盆地孢粉组合自下而上可分为 3 个带:10~7Ma 为温暖偏干环境的常绿与落叶针阔叶混交林;7~3.3Ma 为寒冷干旱环境的落叶针叶林;

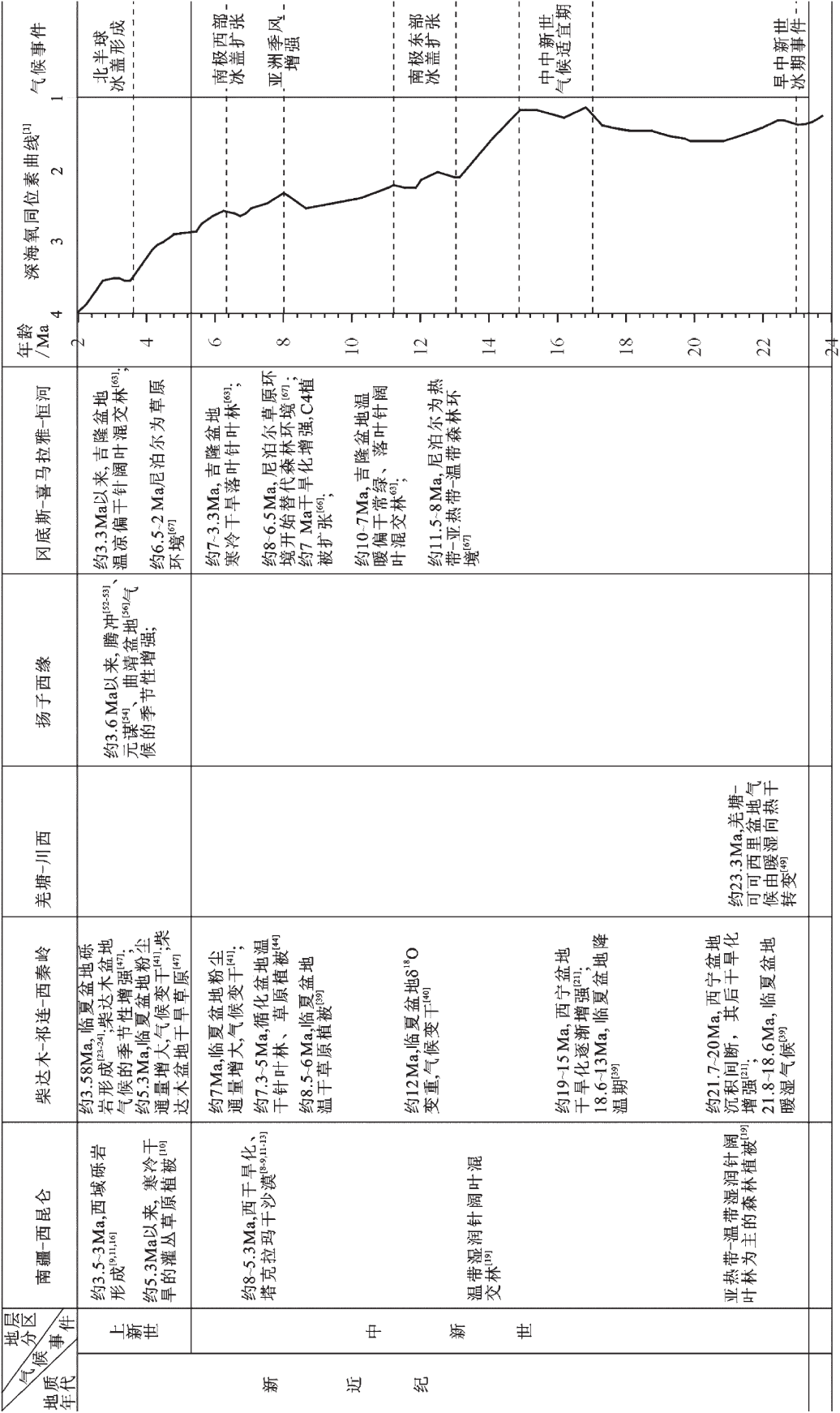


表 1 青藏高原及邻区新近纪气候事件对比

Table 1 Comparison of Neogene major climatic events between the Tibetan Plateau and its adjacent areas

3.3Ma 之后为温凉偏干气候下生长的暗针叶林和落叶阔叶林组成的针阔叶混交林^[42](图 2)。

喜马拉雅前陆盆地(印度、尼泊尔)晚中新世—上新世 Siwalik—Churia 群轮藻植物繁盛,Bhatia^[65]认为与当时季风活动引起的季节性洪水泛滥、在河漫滩形成有利于轮藻植物生长发育的局部湖泊环境有关。

尼泊尔 Surai Khola 剖面的磁性地层学年龄为 13~1Ma^[66]。西瓦利克群砂岩钙质胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 12~6Ma 均值为 $-13.6\text{‰} \pm 1.9\text{‰}$,在 6~4Ma 突然增大至 $-10.7\text{‰} \pm 1.6\text{‰}$,在 4~2Ma 增大至 $-8.8\text{‰} \pm 1.2\text{‰}$,说明大气环流发生了重大重组; $\delta^{13}\text{C}$ 值在 12~7Ma 的均值为 $-7.1\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$,7~2Ma 增大为 $-5.7\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$,说明 C_4 植被明显扩张,气候干旱化增强^[66]。Surai Khola 剖面孢粉组合在 11.5~8Ma 主要为亚热带—温带阔叶林和热带森林环境;8~6.5Ma 草原环境开始替代森林环境,这可能与季风增强有关;6.5~2Ma 以草原环境为主^[67](图 2)。

6 讨论与结论

由于青藏高原面积广阔,大部分区域地质工作环境艰苦,目前磁性地层年龄控制的新近纪气候研究在不同构造—地层区的时间范围和研究深度存在较大差异。根据上述研究结果,有磁性地层年龄控制的青藏高原各构造—地层区新近纪重要气候事件包括:南疆—西昆仑构造—地层区 8Ma 以来的干旱化导致沙漠形成,5.3Ma 以后形成寒冷干旱的灌丛草原植被,3.5Ma 以来高原上冰川发育导致磨拉石山前堆积;柴达木—祁连—西秦岭构造—地层区约 19Ma、12Ma、8Ma、5.3Ma、3.6Ma 和 2.6Ma 气候降温变干事件;羌塘—川西构造地层区约 23Ma 气候从温暖湿润向炎热干旱转变;扬子西缘构造—地层区约 3.6Ma 地形差异增大,植物多样性增加,气候的季节性增强;冈底斯—喜马拉雅—恒河构造—地层区 8~7Ma 气候干旱、季风增强事件(表 1)。

这些气候事件发生的时间与青藏高原的隆升阶段具有较好的对应性,如约 23Ma 时青藏高原及周边不整合面广布,标志着青藏高原发生整体隆升^[68-70];13~10Ma 期间,代表高原隆升到足够高度开始垮塌的藏南南北向断陷盆地形成^[70];8~5.3Ma 时高原大部分地区快速隆起为剥蚀区;3.6~2.6Ma 高原周边巨厚层砾岩堆积说明高原周边已经隆升到相当大的高

度^[7,70]。青藏高原及邻区的孢粉组合分析亦表明,在渐新世晚期—中新世早期古环境发生了显著的分异,导致青藏高原地区热带亚热带植物大幅度减小,至中新世中期濒临消亡;中新世早中期青藏地区热带亚热带植物消亡与全球温暖气候条件和较低古纬度环境不符,是青藏高原隆升的重要标志^[48]。这些均说明青藏高原新近纪气候事件与高原隆升关系密切。

不同构造—地层区的气候事件与全球新近纪气候事件有相同也有不同之处,如约 23Ma 全球短暂寒冷事件在青藏高原没有明显表现,这可能与陆相沉积分辨率不高及有精确地层年龄限定的环境指标的研究较少有关;17~15Ma 中新世气候适宜期在西宁盆地和临夏盆地是一个降温期;约 8Ma、5.3Ma 气候进一步变干、季风增强事件与深海 O 同位素记录相同;3.6~2.6Ma 青藏高原及邻区大量的砾岩堆积与全球气候变冷、北半球冰盖发育的时间相符。

显然,新近纪 8Ma 之前的气候事件在青藏高原不同部位的表现差别较大,但总体上自早中新世开始气候以干冷为主,且变冷的时间明显早于全球约 15Ma 开始的降温期,如临夏盆地的孢粉组合^[39]、 O 同位素记录^[39]和西宁盆地的磁化率、粒度记录^[21],说明晚中新世之前高原隆升对全球气候的变化起着非常重要的作用,这也可能是促使全球气候变冷的主要原因^[4-6,71-72],因为高原隆升会导致岩石风化加速,大气中的 CO_2 浓度降低,引起全球气候变冷^[4-6]。西宁盆地中的孢粉记录也表明青藏高原隆升是导致始新世/渐新世界线处全球快速降温的主要原因^[71]。晚中新世以来青藏高原的气候变化与全球变化较为一致,说明在晚中新世青藏高原已经隆升到了一定的高度,其对全球气候变化的影响较之前有所减弱。

致谢: 论文撰写中得到成都地质矿产研究所潘桂棠、王立全研究员,西安地质矿产研究所李荣社和计文化研究员,中国地质大学(武汉)王国灿和向树元教授,骆满生和王岸副教授等的建议和帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1]Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65Ma to present[J]. Science, 2001, 292: 686-693.
- [2]Pagani M, Zachos J C, Freeman K H, et al. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene[J]. Science, 2005, 309: 600-603.
- [3]Pearson P N, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentra-

- tions over the past 60 million years[J]. *Nature*, 2000, 406: 695–699.
- [4]Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. *Nature*, 1992, 359: 117–122.
- [5]Riebe C S, Kirchner J W, Granger D E, et al. Strong tectonic and weak climatic control of long-term chemical weathering rates[J]. *Geology*, 2001, 29(6): 511–514.
- [6]Molnar P. Mio–Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of east Asian climate[J]. *Palaeontologia Electronica*, 2005, 8(1): 2–23.
- [7]Zhang K X, Wang G C, Ji J L, et al. Paleogene–Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai–Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau[J]. *Science China, Earth Sciences*, 2010, 53(9): 1271–1294.
- [8]Sun J M, Zhang Z Q, Zhang L Y. New evidence on the age of the Taklimakan Desert[J]. *Geology*, 2009, 37(2): 159–162.
- [9]Sun J M, Liu T S. The age of the Taklimakan desert[J]. *Science*, 2006, 312: 1621.
- [10]Sun J M, Zhang L Y, Deng C L, et al. Evidence for enhanced aridity in the Tarim Basin of China since 5.3Ma[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 1012–1023.
- [11]Zheng H B, Powell C M, An Z S, et al. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 715–718.
- [12]Zheng H B, Tada R, Jia J T, et al. Cenozoic sediments in the southern Tarim Basin: implications for the uplift of northern Tibet and evolution of the Taklimakan Desert[M]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2010, 342: 67–78.
- [13]郑洪波, 贾军涛, 王可. 塔里木盆地南缘新生代沉积:对青藏高原北缘隆升和塔克拉玛干沙漠演化的指示[J]. *地质前缘*, 2009, 16(6): 154–161.
- [14]徐耀明, 洪汉烈, 何雅娟. 西昆仑山前陆盆地粘土矿物特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 659–670.
- [15]叶荷, 张克信, 陈奋宁, 等. 新疆叶城柯克亚 8~3.85Ma 沉积地层中常量和微量元素分布对气候演化的响应[J]. *地质科技情报*, 2010, 4: 43–50.
- [16]Zheng H B, Powell C, Butcher K, et al. Late Neogene aeolian loess deposition in Southern Tarim Basin and its palaeoenvironmental significance[J]. *Tectonophysics*, 2003, 375: 49–59.
- [17]Zhang P Z, Peter M, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. *Nature*, 2001, 410: 891–897.
- [18]Sun J M, Zhu R X, Bowler J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasse deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219: 239–253.
- [19]王大宁, 孙秀玉, 赵英娘. 青海、新疆部分地区晚白垩世—第三纪孢粉植物群[J]. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 1986, 15: 152–165.
- [20]马玉贞, 方小敏, 李吉均, 等. 酒西盆地晚第三纪—第四纪早期植被与气候变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(2): 107–116.
- [21]Xiao G Q, Guo Z T, Dupont–Nivet G, et al. Evidence for north-eastern Tibetan Plateau uplift between 25Ma and 20Ma in the sedimentary archive of the Xining Basin, Northwestern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, (317/318): 185–195.
- [22]岳乐平, Heller F, 邱占祥, 等. 兰州盆地第三系磁性地层年代与古环境记录[J]. *科学通报*, 2000, 45(18): 1998–2003.
- [23]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[J]. *科学通报*, 1997, 42(14): 1457–1471.
- [24]Fang X M, Garzione C, Voo R V d, et al. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210: 545–560.
- [25]季军良, 张克信, 强泰, 等. 青海循化盆地新近纪磁性地层学[J]. *地球科学*, 2010, 35(5): 803–810.
- [26]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]. *GSA Bulletin*, 2012, 124(5/6): 657–677.
- [27]Lu H J, Xiong S F. Magnetostratigraphy of the Dahonggou section, northern Qaidam Basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Altyn Tagh Fault[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288: 539–550.
- [28]Fang X, Zhang W, Meng Q, et al. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala section in the eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(1/2): 293–306.
- [29]宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 晚新生代六盘山隆升过程初探[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(增刊): 142–148.
- [30]Dettman D L, Fang X M, Garzione C N, et al. Uplift-driven climate change at 12 Ma: a long $\delta^{18}\text{O}$ record from the NE margin of the Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214(1/2): 267–277.
- [31]Fan M J, Song C H, Dettman D L, et al. Intensification of the Asian winter monsoon after 7.4Ma: Grain-size evidence from the Linxia Basin, northeastern Tibetan Plateau, 13.1Ma to 4.3Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248: 186–197.
- [32]Harris N. Significance of weathering Himalayan metasedimentary rocks and leucogranites for the Sr isotope evolution of sea water during early Miocene[J]. *Geology*, 1995, 23(9): 795–798.
- [33]Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. *Science*, 1992, 255: 1663–1670.
- [34]Hodges K V, Parrish R R, Searle M P. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas[J]. *Tectonics*, 1996, 15(6): 1264–1291.
- [35]Yin A, Harrison T M, Ryerson F J, et al. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B9): 18175–18201.
- [36]钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(4): 289–301.
- [37]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[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(3): 263–271.

- [38]Wang D N, Sun X Y, Zhao Y N. Late Cretaceous to Tertiary palynofloras in Xinjiang and Qinghai, China[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1990, 65: 95–104.
- [39]孙秀玉, 赵英娘, 何卓生. 西宁-民和盆地晚白垩纪—老第三纪孢粉组合特征及其地层时代、古植被、古气候的探讨[J]. 石油实验地质, 1980, 4: 44–52.
- [40]孙秀玉, 赵英娘, 何卓生. 青海西宁-民和盆地渐新世至中新世孢粉组合[J]. 地质论评, 1984, 30(3): 207–216.
- [41]马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6~5.0Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录[J]. 科学通报, 1998, 43(3): 301–304.
- [42]徐亚东, 张克信, 王国灿, 等. 西藏南部吉隆盆地中新世—早更新世孢粉组合带及其地质意义[J]. 地球科学, 2010, 35(5): 760–773.
- [43]Hoorn C, Ohja T, Quade J. Palynological evidence for vegetation development and climate change in the Sub-Himalayan Zone (Neogene, Central Nepal) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 163: 133–161.
- [44]路晶芳. 柴达木盆地大柴旦大红沟地区古近纪—新近纪孢粉学与古环境变化研究[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. 2011.
- [45]徐先海, 方小敏, 宋春晖, 等. 临夏盆地新生代沉积物粒度记录与亚洲内陆干旱化[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 65–75.
- [46]Dupont-Nivet G, Krijgsman W, Langereis C G, et al. Tibetan plateau aridification linked to global cooling at the Eocene-Oligocene transition[J]. Nature, 2007, 445: 635–638.
- [47]张键钰. 青海循化渐新世末期—上新世早期地层序列与孢粉学研究[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文. 2011.
- [48]洪烈烈, 王朝文, 徐耀明, 等. 青藏高原新生代以来气候环境演化的粘土矿物学研究[J]. 地球科学, 2010, 35(5): 728–736.
- [49]方小敏, 吴福莉, 韩文霞, 等. 上新世—第四纪亚洲内陆干旱化过程——柴达木中部鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标证据[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 874–882.
- [50]邓涛, 王晓鸣. 柴达木盆地新近纪犀科化石新材料[J]. 古脊椎动物学报, 2004, 42(3): 216–229.
- [51]周昱昱. 可可西里盆地古—新近纪湖相碳酸盐岩沉积与古环境变化研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文. 2007.
- [52]吴珍汉, 吴中海, 叶培盛, 等. 青藏高原晚新生代孢粉组合与古环境演化[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 966–979.
- [53]李大明, 李齐, 陈文奇. 腾冲火山区上新世以来的火山活动[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 363–370.
- [54]戴静, 孙柏年, 解三平, 等. 云南腾冲上新统 *Carpinus mifangiana* 的发现及其古气候意义[J]. 地球科学进展, 2009, 24(9): 1024–1032.
- [55]解三平, 孙柏年, 阎德飞, 等. 滇西新近纪植物气孔、碳同位素组成与古环境分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 883–888.
- [56]刘耕武, 李代芸, 黄翥, 等. 云南元谋盆地上新统甘棠组植物和孢粉组合及其古气候意义[J]. 古生物学报, 2002, 41(1): 1–9.
- [57]童国榜, 张俊牌, 羊向东, 等. 云贵高原晚新生代孢粉植物群与环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(3): 91–104.
- [58]王伟铭, 舒军武. 云南曲靖盆地晚新生代孢粉植物群[J]. 古生物学报, 2004, 43(2): 254–261.
- [59]肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 等. 云南鹤庆盆地 2.780~1.802Ma B P 期间的古植被和古气候[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 417–426.
- [60]赵志中, 乔彦松, 王书兵. 青藏高原东缘晚新生代地质特征与古环境变化[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1620–1626.
- [61]Wang S F, Zhang W L, Fang X M, et al. Magnetostratigraphy of the Zanda basin in southwest Tibet Plateau and its tectonic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(9): 1393–1400.
- [62]孟宪刚, 朱大岗, 邵兆刚, 等. 西藏阿里札达盆地上新统中犀类化石的发现及意义[J]. 地质通报, 2004, 23(5/6): 609–612.
- [63]朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 西藏阿里札达盆地上新世—早更新世的古植被、古环境与古气候演化[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 295–306.
- [64]岳乐平, 邓涛, 张睿, 等. 西藏吉隆—沃马盆地龙骨沟剖面古地磁年代学及喜马拉雅山抬升记录[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1009–1016.
- [65]Bhatia S B. 喜马拉雅前陆盆地中新世—上新世 SIWALIKCHURIA 群轮藻化石及其古生物地理和古生态意义[J]. 微体古生物学报, 2003, 20(2): 150–155.
- [66]Apple E, Rösler W, Corvinus G. Magnetostratigraphy of the Miocene-Pleistocene Surai Khola, Siwaliks in West Nepal [J]. Journal of Geophysical International, 1991, 105: 191–198.
- [67]Sanyal P, Bhattacharya S K, Prasad M. Chemical diagenesis of Siwalik sandstone: Isotopic and mineralogical proxies from Surai Khola section, Nepal[J]. Sedimentary Geology, 2005, 180: 57–74.
- [68]张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学, 2007, 32(5): 583–597.
- [69]Zhang K X, Wang G C, Cao K, et al. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series D), 2008, 51(11): 1658–1672.
- [70]张克信, 王国灿, 骆满生, 等. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造隆升的响应[J]. 地球科学, 2010, 35(5): 697–712.
- [71]Dupont-Nivet G, Hoorn C, Konert M. Tibetan uplift prior to the Eocene-Oligocene climate transition Evidence from pollen analysis of the Xining Basin[J]. Geology, 2008, 36(12): 987–990.
- [72]Garzione C. Surface uplift of Tibet and Cenozoic global cooling[J]. Geology, 2008, 36(12): 1003–1004.