

doi:10.3799/dqkx.2010.087

青藏高原新生代以来气候环境演化的粘土矿物学特征

洪汉烈^{1,2}, 王朝文², 徐耀明², 张克信^{1,2}, 殷科²

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为探究青藏高原的气候环境演化, 对青藏高原不同部位的盆地沉积物的粘土矿物特征进行深入系统的研究。结果表明, 古新世阶段—始新世阶段时期, 青藏高原古气候以行星风系居主导地位, 青藏高原北部以温暖和季节性干旱为特征。柴达木地区在~36 Ma的降温事件则明显早于全球降温事件(~34 Ma)近2 Ma。在渐新世(34~23 Ma)期间, 古气候以干旱炎热为特征, 但气温相对要低于始新世。在中新世—上新世(23.0~2.6 Ma)期间, 青藏高原北缘的柴达木、循化盆地均在~21.5 Ma发生气候变冷事件, 而8~7 Ma的气候变化事件遍及整个青藏高原。在藏南的吉隆盆地、青藏高原西北部的叶城盆地, ~1.8 Ma之前的盆地沉积物中仍然有相当高含量的蒙脱石, 说明这些地区在~1.8 Ma之前, 虽然总体上气候变冷、变干, 但仍然处于一种相对湿润的气候环境。

关键词: 青藏高原; 柴达木盆地; 札达盆地; 叶城盆地; 粘土矿物; 古气候。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2010)05-0728-09

收稿日期: 2010-05-31

Paleoclimate Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau since the Cenozoic

HONG Han-lie^{1,2}, WANG Chao-wen², XU Yao-ming², ZHANG Ke-xin^{1,2}, YIN Ke²

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Clay mineralogy of sediments of the basins in different locations of the Qinghai-Tibet plateau was investigated to reveal the paleoclimate evolution in Tibet. Our results show that the planetary wind system prevailed over the Paleocene-Eocene in Tibet. A rapid cooling in Qaidam was found in ~36 Ma, prior to the global cooling event by ~2 Ma. In the Oligocene, paleoclimate was warm and dry and the temperature was lower than that of the previous stage. In Miocene-Pliocene period cooling event was found in ~21.5 Ma in Qaidam and Xunhua basins, northeastern Tibet. Climate change in 8–7 Ma occurred in the whole Qinghai-Tibet plateau. In Gyirong, southern Tibet and in Yecheng, western Tibet, smectite occurred in a certain amount in the sediments prior to ~1.8 Ma, indicating that climate was relatively humid in these regions prior to ~1.8 Ma though the climate changed into cool and dry in the Qinghai-Tibet plateau.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; Qaidam basin; Zhada basin; Yecheng basin; clay mineral; paleoclimate.

0 引言

青藏高原的隆升是地球上新生代最壮观的地质事件, 它形成的规模和高度, 对大气环流产生重大影响, 同时对季风环境的形成、演化和西风环流的行为有着重要的影响 (Molnar *et al.*, 1993; 刘东生等, 1998; 施雅风等, 1999; An *et al.*, 2001)。长期以来, 国内外学者对青藏高原隆升的环境影响做了大

量的研究, 获得了大量的实际资料和理论认识。目前, 对青藏高原隆升过程的气候环境变化研究主要来自两个方面: 一是高原地区本身; 二是高原周边地区。从中国风成沉积物的研究成果来看, 新近纪高原隆升导致的重大气候事件主要发生约在 24~20 Ma, 16~14 Ma, 10~7 Ma 和 3.6~2.6 Ma, 是东亚季风阶段性增强的 4 个时期, 这些气候事件与青藏高原周边其他地区的记录基本吻合, 如印度半岛、

孟加拉湾、阿拉伯海、太平洋地区粉尘记录及青藏高原内部等,而且这些气候事件与新近纪青藏高原的加速隆升时段基本相同(安芷生等,2006)。相对而言,对高原周边地区的气候环境变化的研究相对较多,而对高原地区本身的研究则相对较为匮乏。此外,由于大部分研究者认为青藏高原的主要隆升活动发生在新近纪—第四纪(施雅风等,1999;李吉均等,2001; Molnar, 2005; 张培震等,2006; Clift *et al.*, 2008)。因此,关于青藏高原隆升过程的气候环境效应的研究,从时间尺度上也多集中在对中新世以来沉积物的研究(安芷生等,2006)。越来越多的资料积累表明,青藏高原从新生代开始发生快速的构造隆升,而且有些构造过程被认为与青藏高原的气候事件和过程的发生有关(潘裕生,1999; DeCelles *et al.*, 2007)。此外,在以往对高原周边地区环境变化的研究中,对青藏高原隆升引发的气候事件一般强调青藏高原作为统一体隆升的结果,而对高原不同部位构造隆升的时间差异性所导致的气候环境变化的研究较少,由于对青藏高原隆升阶段性的划分往往是将一些局部片段的证据外延到整个青藏高原,或建立在一定的动力模型上将局部资料信息推广到整个青藏高原。因此,要全面探究青藏高原隆升及其气候环境效应,就需要对高原内部不同部位沉积盆地的气候环境演化有充分的认识。本文在对

青藏高原重点盆地沉积物的气候环境记录分析研究的基础上,对青藏高原新生代以来的古气候环境演化进行了分析和探讨。

1 新生代沉积物盆地沉积地层学及其粘土矿物气候环境意义

张克信等(2008)和 Zhang *et al.* (2010)在综合研究青藏高原及邻区新生代地层资料的基础上,将青藏高原及邻区古近纪—新近纪 98 个残留盆地划分为南疆(I)、柴达木—兰州(II)、羌塘—川西(III)、成都—滇西(IV)、藏南—恒河(V)等 5 个地层区(图 1)。越来越多的资料积累表明,青藏高原新生代构造过程不仅存在明显的阶段性,而且表现出明显的空间差异性。这种时空差异性上的构造隆升不仅表现在不同地区的地形地貌演化过程方面,也表现在与之相关的气候变化及演化过程上。通过对高原不同地层分区沉积盆地中沉积物粘土矿物学特征研究,有助于了解青藏高原构造隆升与气候环境演化的时空差异性。本文着重对青藏高原南部、东北部及西部的藏南—恒河、柴达木—兰州以及南疆地层区的代表性盆地进行研究。

1.1 藏南—恒河地层区

代表性沉积盆地札达盆地为新近纪晚期断陷盆

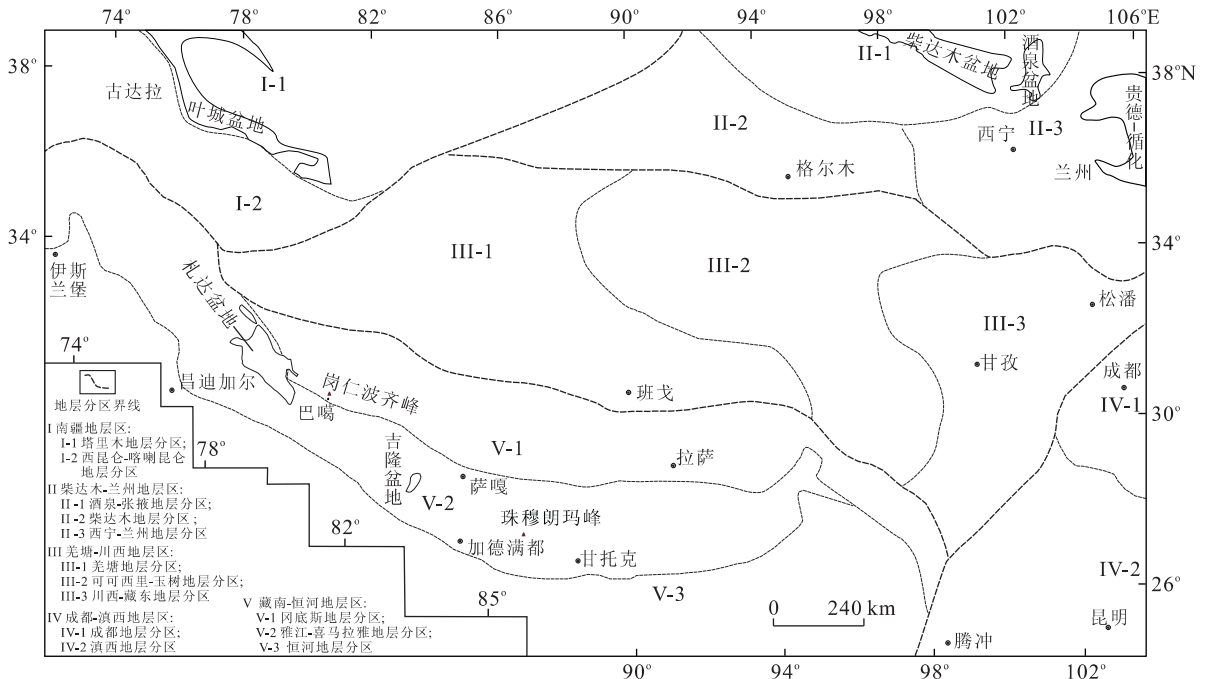


图 1 青藏高原及邻区沉积盆地地层分区(据张克信等,2008 修改)

Fig. 1 Stratigraphic regions of the remnant basins in the Tibetan plateau

地,为喀喇昆仑断裂活动影响形成的北西—南东向分布的较大型断陷盆地,充填了河流—洪冲积—扇三角洲—湖泊环境沉积.从老至新岩石地层序列沉积特征如下:(1)托林组(N_2t):厚 842 m,分为 3 段:一段下部为灰色—厚层砾岩夹砂岩透镜体,含向上变细的两个沉积韵律,中部为褐黄色含砾粗砂岩、中粗粒砂岩夹细砾岩,上部为厚层砾岩;二段为黄绿色—灰色中—厚层含砾粗砂岩、粗砂岩、泥质粉砂岩夹粉砂质泥岩透镜体;三段为青灰色—土黄色泥岩和泥质粉砂岩组成,为湖泊和扇三角洲环境沉积,与下伏地层呈角度不整合接触.(2)香孜组(N_2Qp^{1xz}):厚 654.4 m,为褐黄—褐灰色中层—巨厚层砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩夹少量细砂岩和粉砂质泥岩,与下伏托林组整合接触.

藏南—恒河地层分区札达盆地沉积物的粘土矿物学特征如图 2 所示.总体上,札达盆地经历了 5 个气候环境演化阶段:在 9.5~8.4 Ma 期间,粘土矿物以蒙脱石为主,伊利石结晶度较低,指示温暖、潮湿的气候条件;8.4~7.2 Ma 期间,粘土矿物主要为绿泥石、伊利石,伊利石结晶度明显升高,表明此期间以相对冷干的气候为主导;7.2~4.5 Ma 期间,高岭石含量明显增加,粘土矿物主要以绿泥石、伊利

石、高岭石为主,伊利石的结晶度降低,而且发生明显的波动,说明此时期的气候以温暖和季节性的干湿变化为特征;4.5~3.6 Ma 期间,粘土矿物主要为绿泥石、伊利石,蒙脱石含量明显降低,而伊利石结晶度升高,指示冷湿的气候条件;3.6~3.0 Ma 期间,蒙脱石含量明显升高,粘土矿物主要为绿泥石、伊利石和蒙脱石,伊利石结晶度略有降低,表明温暖潮湿的气候条件.粘土矿物指标表明札达地区在 8.4 Ma 和 3.6 Ma 时期发生强烈的山体隆升,而在~7.0 Ma 和 4.5 Ma 时期札达盆地发生两次沉降事件(Saylor *et al.*, 2010).

1.2 柴达木—兰州地层区(II)

该区代表性沉积盆地为柴达木盆地,该盆地始新世早期初始拗陷,~53.5 Ma 开始接受路乐河组粗碎屑沉积,渐新世—中新世早期为盆地稳定发展期,盆地整体持续下降,形成比路乐河组分布范围更广、几乎遍及全盆地的干柴沟组和油砂山组的细碎屑沉积,沉积厚度巨大.中新世晚期(~8.2 Ma)—上新世,盆地西部逐渐抬升,沉积中心逐渐向中、东部迁移,盆地沉积面积缩小,接受粗碎屑的狮子沟组沉积,盆地演化进入萎缩和消亡的发展阶段.2.6 Ma 以后盆地进入山间盆地阶段,湖盆沉降中心

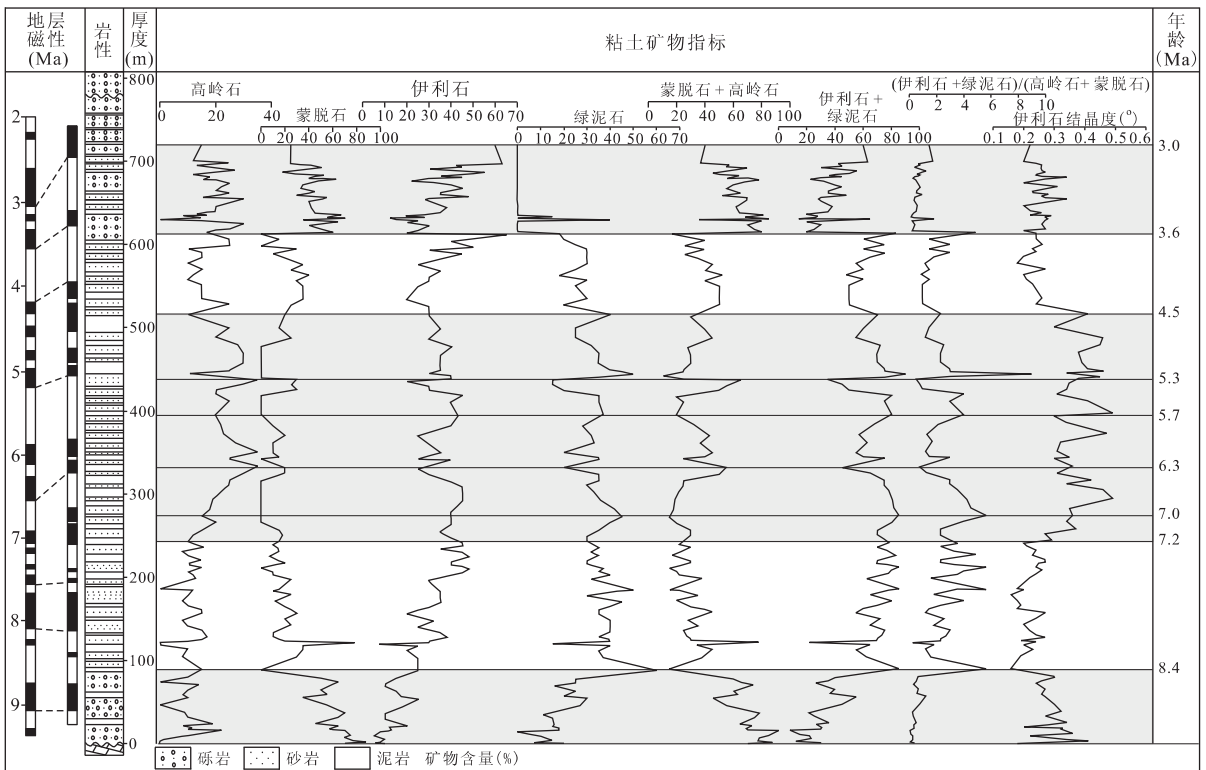


图 2 札达盆地沉积物粘土矿物变化特征
Fig. 2 Clay indices of the Zhada sediments

东移至盆地东部三湖凹陷地区,彻底改变了柴达木古湖盆的全貌.从老至新岩石地层序列沉积特征如下:(1)路乐河组(E_2l):厚度 300~1 200 m.为一套紫红色泥、砂、砾混杂的粗碎屑沉积,有棕褐色、紫灰色、红色砾岩、含砾砂岩,以及灰棕褐色、棕红色砂岩、泥岩、砂质泥岩,夹少量薄层膏泥岩和膏盐层.本组具下部粗、中部细、上部又变粗的沉积旋回特征,反映出早期以山麓洪积扇—河流相沉积为主,中期—晚期为滨浅湖—三角洲前缘—三角洲平原沉积,与下伏地层为角度不整合接触.(2)干柴沟组(ENg):厚度 800~3 300 m.下段在盆地中各区有所差异,盆地西部以棕红色泥岩、泥质粉砂岩夹砂岩为主;东部地区则为黄绿色、灰白色砾岩、砾状砂岩及紫红色砂质泥岩.上段在盆地西部以灰色、深灰色、棕红色泥岩夹钙质泥岩、泥灰岩及粉砂岩条带为主;盆地东部为巨厚层黄绿色砂岩与棕红、棕灰色砂质泥岩不等厚互层.上、下段均夹薄层膏泥岩和膏盐层,与下伏路乐河组为整合或平行不整合接触.(3)油砂山组(N_{1y}):厚 550~3 300 m.下段在盆地西部以棕红色砂质泥岩与灰色泥质粉砂岩为主,上部夹砾岩及较多的泥灰岩、疙瘩灰岩和杂色泥岩.盆地东部以黄绿色砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主,夹杂色泥岩、泥灰岩、薄层膏泥岩和膏盐层.上

段在盆地西部以灰棕、浅棕黄色砂岩、泥岩与灰色和棕灰色含砾砂岩互层为主,东部以黄色、黄褐色、棕灰色泥岩、砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,夹灰色、灰白色粉砂岩、砂岩和含砾砂岩、薄层膏泥岩和膏盐层,与下伏干柴沟组为连续沉积.(4)狮子沟组(N_{sz}):厚 300~1 300 m.盆地西部以灰绿色、灰色泥岩、砂质泥岩为主,夹粉砂岩、砂岩、砾岩、石膏及泥灰岩.盆地东部以灰色、黄灰色和土黄色粗砂岩、含砾砂岩和砾岩为主,与下伏油砂山组在盆地中心为连续沉积,在盆地边缘为不整合接触.

柴达木盆地沉积物的粘土矿物学特征如图 3 所示.在 53.5~36.0 Ma 期间,粘土矿物主要以伊利石、蒙脱石为主,伊利石结晶度明显低于其他时期的沉积物,说明在此时期柴达木的古气候以温暖季节性干旱为特征.棕褐色、紫灰色、红色砾岩、含砾砂岩,灰棕褐色、棕红色砂岩、泥岩、砂质泥岩,以及薄层膏泥岩、膏盐层等沉积物,同样指示温暖和季节性干旱的气候特征,与粘土矿物所反映的气候条件相一致.该时期柴达木地区的气候条件对应于全球气候变化中新世代最温暖的时期,表明柴达木的古气候变化主要受全球气候变化影响.但在~40.3 Ma 和~36.0 Ma 时期,绿泥石、伊利石的含量明显增大,指示在古新世阶段—始新世阶段,柴达木地区发

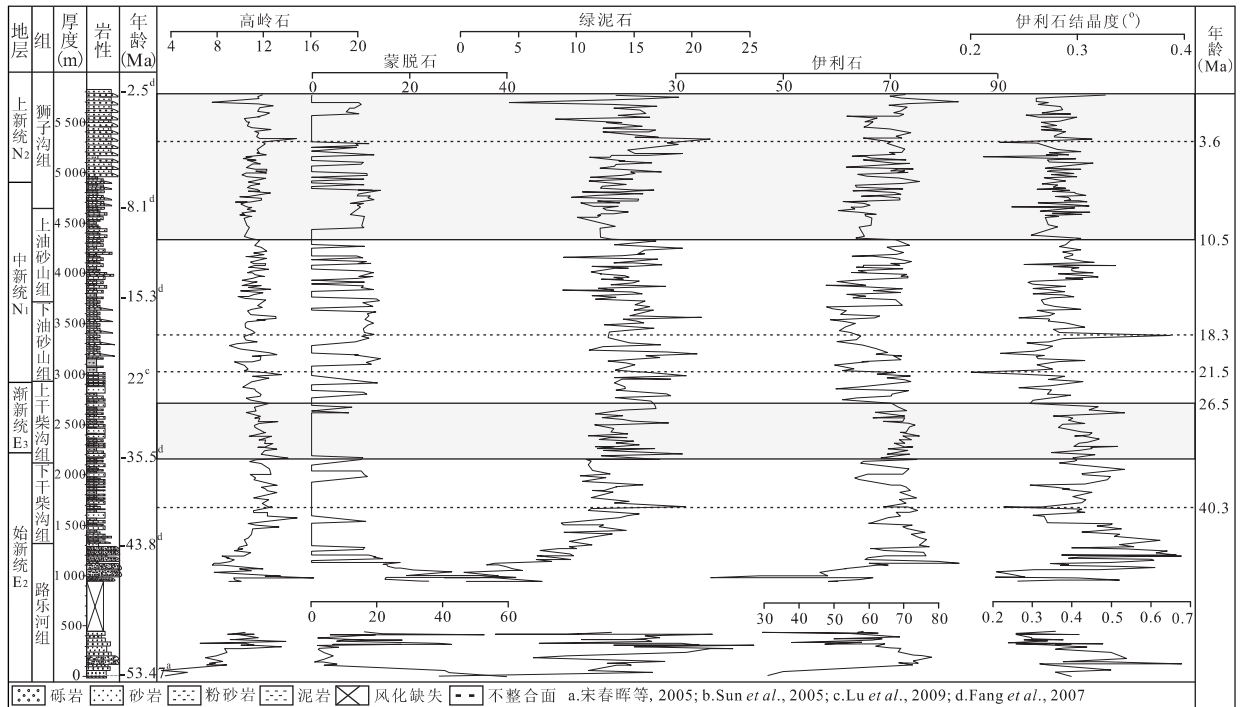


图 3 柴达木盆地沉积物粘土矿物变化特征

Fig. 3 Clay indices of the Qaidam sediments

生两次明显的降温事件. 而发生在 ~ 36 Ma 时期的降温事件明显早于全球降温事件(~ 34 Ma)近 2 Ma (Zachos *et al.*, 2001). 在 $\sim 26.5 \sim 10.5$ Ma 时期, 粘土矿物主要以伊利石为主, 绿泥石和高岭石含量较少, 而蒙脱石则呈现出十分强烈的波动, 相对于其他时期的沉积物而言, 此期间的沉积物中绿泥石的含量较高, 说明此期间的气温相对于始新世有所降低, 而古气候条件主要以炎热和季节性干旱为特征, 与棕灰色的沉积物以及广泛发育的薄层膏泥岩和膏盐层相吻合. 在 $\sim 10.5 \sim 2.5$ Ma 时期, 绿泥石、伊利石的含量降低, 而伊利石结晶度升高. 沉积物则以灰绿色、灰黄色为主, 指示冷干的气候条件. 粘土矿物含量在 10.5 Ma 期间发生明显变化, 指示气候转型事件, 并且以相对干冷的气候为特征. 纵观柴达木盆地沉积物粘土矿物的特征可以发现, 在 ~ 26.5 和 ~ 18.3 Ma 时期, 绿泥石、伊利石的含量明显减少, 而伊利石的结晶度降低, 指示两次升温事件; 而在 ~ 40.3 、 ~ 36.0 、 ~ 21.5 和 ~ 3.6 Ma 期间, 绿泥石、伊利石的含量明显增大, 伴随着伊利石结晶度的明显升高, 可能代表了在柴达木地区发生的 4 次明显的构造—气候事件.

1.3 南疆地层区

该区代表性沉积盆地为塔里木叶城盆地, 该盆地为挤压构造背景下的构造挠曲前陆盆地. 盆地新

生代沉积与下伏白垩纪海相地层为连续沉积. 古近纪盆地为新特提斯残留海的一部分, 以半封闭的海湾滨浅海沉积为主. 新近纪盆地由残留海转换为构造挠曲性的前陆盆地, 为大型陆相湖盆沉积. 中新世早期偶受西去的新特提斯残留海的海泛影响, 中新世晚期完全脱离海泛, 进入内陆大型湖盆至湖盆消亡期沉积阶段. 该分区地层序列沉积特征从老至新分别为: (1) 阿图什组(N_2a): 厚 595 \sim 2 042 m. 灰、褐灰色复成分砾岩与浅红色细粒石英砂岩互层, 夹泥岩、粉砂岩和少量膏泥岩和薄层膏盐层, 为山麓河流—湖三角洲—微咸水滨浅湖沉积, 与下伏帕卡布拉克组呈整合接触. (2) 西域组(N_2Qp^{1x}): 厚 317 \sim 4 568 m. 褐灰色、灰色厚—块状复成分砾岩, 夹紫红色、灰红色薄层状粗—细砂岩或透镜体, 为山前冲、洪积扇相, 与下伏阿图什组呈整合接触, 局部呈角度不整合接触, 区域上多为角度不整合覆盖于更老的不同岩层之上.

叶城盆地沉积物的粘土矿物学特征如图 4 所示. 在 $\sim 8.0 \sim 3.5$ Ma 期间, 伊利石含量占绝对优势, 但均有少量的高岭石产出, 而且伊利石结晶度较低, 这些指示母岩应为含富钾富铝矿物的沉积岩, 且物源区为近地表的成岩带. 说明此时作为物源区的西昆仑山剥蚀作用弱, 构造环境稳定, 尚未发生明显的隆升. 这与前人研究得出的该段岩屑成分以沉积

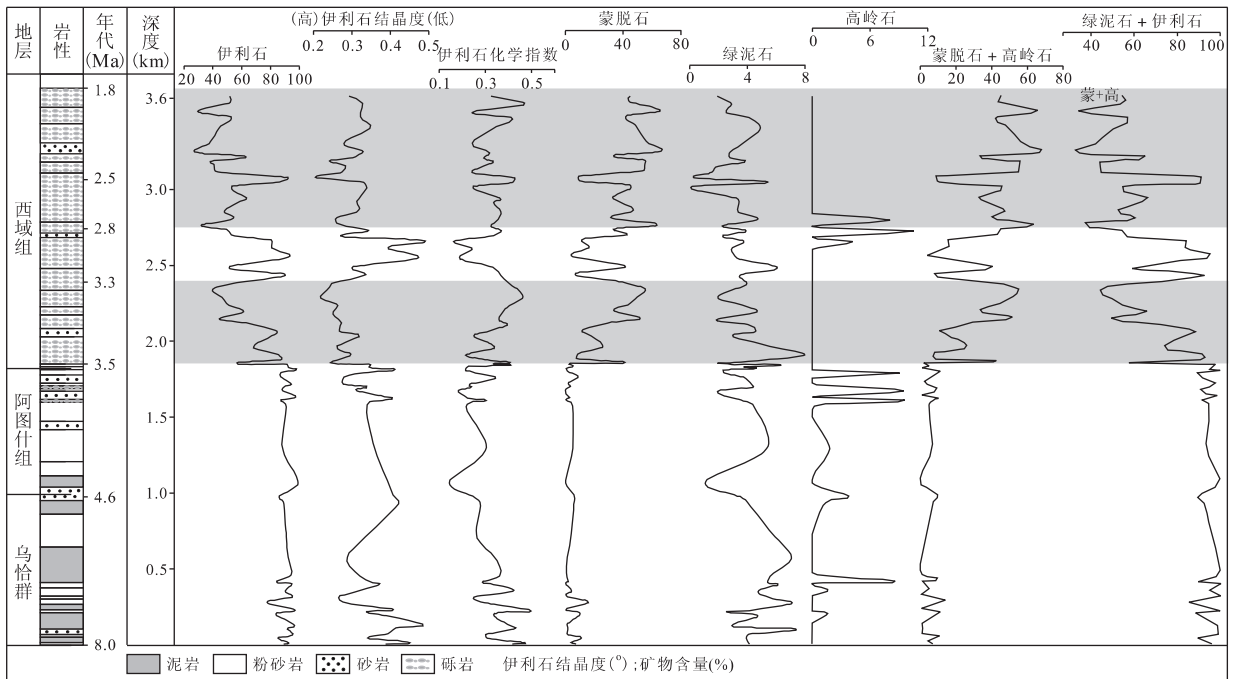


图 4 叶城盆地沉积物粘土矿物变化特征

Fig. 4 Clay indices of the Yecheng sediments

岩为主的结果相一致(Zheng *et al.*, 2006). 沉积地层中化学沉积矿物石膏的出现、以及自生粘土矿物坡缕石的产出也都说明干旱一半干旱的古气候条件,这与孢粉分析结果相吻合(黄赐璇, 1994). 在3.5~3.3 Ma期间,伊利石相对含量降低而其结晶度升高,同时蒙脱石相对含量突然上升,说明此期间以温暖潮湿气候为特征,而物源区母岩中镁铁质矿物增多或者火山岩比例升高,并且物源由成岩带向近变质带转变,这些变化均表明剥蚀作用的加剧,反映出西昆仑山体快速抬升,使风化剥蚀源区发生了改变. 岩屑中镁质矿物出现、火成岩岩屑和浅变质岩屑的增加,以及沉积相分析结果均说明山体的隆升(Zheng *et al.*, 2006). 在3.3~2.8 Ma期间,伊利石相对含量升高,但其结晶度下降,蒙脱石相对含量减少,与~8~3.5 Ma时期沉积物的粘土矿物特征相似,指示母岩中镁铁质矿物及火山岩比例的下降,富钾富铝矿物增多,而物源区接近于成岩带,说明物源再次发生了变化. 推测在这段时间中,西昆仑山主体隆升的速度减缓,剥蚀作用强度下降. 而古气候条件则以干旱一半干旱为特征. 在2.8~1.8 Ma期间,伊利石相对含量下降而其结晶度升高,蒙脱石相对含量升高,说明温暖和季节性湿润的古气候条件. 粘土矿物变化所反映出的物源变化,指示西昆仑山主体再次进入隆升阶段,或西昆仑地区发生了大规模的整体抬升. 岩屑成分中镁质片麻岩、镁质麻粒岩以及火山成因砾石增多也说明剥蚀作用的加强(郑洪波等, 2002). 在3.5 Ma和2.5 Ma附近,伊利石、绿泥石相对含量升高,而同时伊利石结晶度也急剧升高,说明两次快速的隆升事件.

2 青藏高原新生代以来的古气候演化

古新世阶段—始新世阶段(65~34 Ma)碰撞及碰撞后的持续挤压引起青藏高原地域广泛的岩石抬升剥露(张克信等, 2008). 强构造抬升区主要分布于冈底斯、北喜马拉雅构造带、喜马拉雅东构造雅鲁藏布江大拐弯地区、甜水海、阿尔金山北部的拉配泉—红柳沟、柴达木北缘的祁连山和高原东北缘的东昆仑东段及黄河源地区. 隆起蚀源区主要位于松潘—甘孜—巴颜喀拉、阿尔金—祁连山、甜水海、冈底斯地区;羌塘—可可西里—柴达木以及西宁—兰州地区为低海拔冲泛平原区;西北部和南部地区尽管存在强烈的岩石抬升,但地表大面积仍保持为残留海沉积区. 青藏高原以狮泉河—改则—班戈—丁青

一线为界,南部气候湿热,森林茂密,煤系地层发育,为热带雨林植被;以北则气候炎热干燥,多含石膏,是副热带稀树草原景观. 此时整个青藏地区海拔高度较低,基本上不存在垂直气候分异,行星风系尚居主导地位(李吉均等, 1979). 在青藏高原的东北缘形成了一些大型的湖盆,如柴达木、西宁—民和盆地等. 沉积物粘土矿物学特征表明,青藏高原的东北缘古气候以温暖和季节性干旱为特征. 但在~36 Ma时期的降温事件则明显早于全球降温事件(~34 Ma)近2 Ma. 说明此时柴达木地区的气候虽主要受全球气候变化的控制,但与全球气候变化过程有所差别.

在渐新世(34~23 Ma)期间,随着冈底斯和藏南带的隆升,昆仑—阿尔金—祁连的进一步崛起,以及古特提斯洋从塔里木西部推出,形成了青藏高原的一些山系. 高原腹地从渐新世开始干旱炎热气候的盛行. 沉积盆地如柴达木、塔里木、西宁—民和、酒泉、临夏及准格尔等主要沉积红色碎屑岩系和膏盐层. 在柴达木地区发生在~26.5 Ma时期的升温事件也与全球气候演化相一致. 孢粉分析结果表明,此期间盆地周围植被主要为稀树草原类型,气候干热,但气温相对要低于始新世(Sun and Wang, 2005).

在中新世—上新世(23.0~2.6 Ma)期间,南部的冈底斯和喜马拉雅带、西部的喀喇昆仑—西昆仑进一步隆起,东部的滇西、东北部的西宁—贵德—兰州拗陷形成盆地,北缘系列山系进一步崛起于盆地之上,高原腹地羌塘—可可西里地区,盆地发生区域性的抬升. 在此期间,青藏高原一个最突出的构造现象是近南北向地堑盆地的发育,这些近南北向的地堑盆地被认为是由于青藏高原达到最大地壳厚度和海拔高度后重力垮塌的结果(Yin *et al.*, 1999). 而发生在此期间的气候事件,被认为大多与岩石圈构造运动相关. 如甘肃秦安的风成堆积的年龄底界为22 Ma,西宁地区15~13 Ma的风尘堆积以及8~7 Ma黄土高原大面积红粘土堆积,都指示了晚新生代亚洲内陆的干旱事件的存在. 而海洋沉积物中有孔虫氧同位素和生物化石的研究表明在~10.4 Ma发生全球变冷事件. 青藏高原北缘的柴达木、循化盆地沉积物粘土矿物特征均指示~21.5 Ma的气候变冷事件(殷科等, 2010),与风成堆积加强的事件相对应,表明亚洲内陆的干旱化至少开始于早中新世(Guo *et al.*, 2002);而发生在~18.3 Ma的升温事件,则早于中新世气候最温暖的时期(Mid-Miocene climatic optimum, 17~15 Ma)事件.

在中新世—上新世期间,沉积物中绿泥石的含量较高,说明此期间干旱化加剧,气温相对于始新世有所降低,而古气候条件仍然以温暖和季节性干旱为特征。南海 1148 孔底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从 17 Ma 开始增加,在 16 Ma 达到峰值,并持续到 14 Ma (Wang *et al.*, 2003),这表明夏季风与亚洲内陆干旱化同步增强。

青藏高原地区发生在 $\sim 8\sim 7$ Ma 的气候变化事件在很多盆地沉积物中均有记录。在藏南的札达盆地,在 8.4 Ma 时期之前,粘土矿物以蒙脱石为主,伊利石结晶度较低,指示温暖、潮湿的气候条件,而在 8.4 \sim 7.2 Ma 期间,粘土矿物则主要为绿泥石、伊利石,伊利石结晶度同步升高,指示一次降温事件。在青藏高原西北部的叶城盆地 ~ 8 Ma 时期之后,沉积物中粘土矿物组成发生明显的变化,较高的绿泥石含量和较高的伊利石结晶度均指示气候变冷(徐耀明等,2010)。在青藏高原东北缘的临夏盆地,孢粉在 ~ 8.5 Ma 变成以草类植物为主(马玉贞等,1998),风成砂的含量明显增高(王建力等,1999)。青藏高原北缘酒西盆地孢粉在 ~ 8.6 Ma 开始草本植物含量大增(马玉贞等,2004),中太平洋粉尘通量在 $\sim 8\sim 7$ Ma 期间明显增高(Rea *et al.*, 1998),南海 1148 孔底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和含量也在 $\sim 8\sim 7$ Ma 时显著增加,东亚的 C_4 植被开始扩张(Cerling *et al.*, 1997; An *et al.*, 2005)。更多的研究表明,8 \sim 7 Ma 是中国风尘堆积发展的一个重要阶段,风尘堆积面积急剧扩大,沉积速率加快,表明了亚洲干旱气候的加强。对这一阶段红粘土粒度空间变化的分析表明,风尘的源区在中国北方和亚洲中部,风尘堆积向偏东南方向扩张,表明 $\sim 10\sim 7$ Ma 亚洲夏季风与内陆干旱化同步增强,指示了与现代环境格局相似的风尘环境已经形成(鹿化煜等,2008)。

在藏南的札达盆地,在 $\sim 7.2\sim 4.5$ Ma 期间,沉积物中无论是粘土矿物指标还是化学沉积矿物石膏、白云石、文石和方解石等,均出现强烈的波动,指示相对炎热和干旱到季节性干旱的气候条件,而在吉隆盆地,相应的气候阶段出现在 $\sim 6.7\sim 5.5$ Ma (Hong *et al.*, 2009)。青藏高原北缘的柴达木地区在 ~ 3.6 Ma 发生强烈的降温事件。快速隆升引起的气候变化造成了 $\sim 3.6\sim 2.6$ Ma 亚洲季风的再次增强;酒西盆地的孢粉研究表明,在 $\sim 3.6\sim 3.3$ Ma 该地区由半干旱草原植被转变为干旱的荒漠草原(马玉贞等,2004);在 3.6 \sim 2.6 Ma 红粘土堆积速率的加快和颗粒变粗,揭示了亚洲又一次重要干旱加剧

阶段(鹿化煜等,2008)。但在藏南的吉隆盆地和青藏高原西北部的叶城盆地, ~ 1.8 Ma 之前的盆地沉积物中,仍然有相当高含量的蒙脱石,说明在这些地区 ~ 1.8 Ma 之前,虽然总体上气候变冷、变干,但仍然处于一种相对湿润的气候环境。

从青藏高原盆地沉积物的气候环境研究结果可以看出,青藏高原沉积盆地的气候演化过程既受到全球气候变化的影响,同时也受局部构造隆升造成的气候变化的影响。然而,构造活动的气候变化事件往往早于全球气候变化事件,这可能反映了青藏高原的隆升对全球气候变化的影响。

3 结论

在古新世阶段—始新世阶段(65 \sim 34 Ma)时期,青藏高原基本上不存在垂直气候分异,行星风系尚居主导地位。青藏高原北部以温暖和季节性干旱为特征。柴达木地区在 ~ 36 Ma 的降温事件则明显早于全球降温事件(~ 34 Ma)近 2 Ma,说明此时柴达木地区的气候虽主要受全球气候变化的控制,但与全球气候变化过程有所差别。在渐新世(34 \sim 23 Ma)期间,古气候以干旱炎热为特征,但气温相对要低于始新世。在中新世—上新世(23.0 \sim 2.6 Ma)期间,青藏高原北缘的柴达木、循化盆地均发生在 ~ 21.5 Ma 的气候变冷事件,而 8 \sim 7 Ma 的气候变化事件遍及整个青藏高原。在藏南的吉隆盆地、青藏高原西北部的叶城盆地, ~ 1.8 Ma 之前的盆地沉积物中仍然有相当高含量的蒙脱石,说明在这些地区在 ~ 1.8 Ma 之前,虽然总体上气候变冷、变干,但仍然处于一种相对湿润的气候环境。青藏高原沉积盆地的气候演化过程既受到全球气候变化的影响,同时也受局部构造隆升造成的气候变化的影响。

References

- An, Z. S., Huang, Y. S., Liu, W. G., et al., 2005. Multiple expansions of C_4 plant biomass in East Asia since 7 Ma coupled with strengthened monsoon circulation. *Geology*, 33: 705–708.
- 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. *Nature*, 411(6833): 62–66.
- An, Z. S., Zhang, P. Z., Wang, E. Q., et al., 2006. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan plateau since the Miocene. *Quaternary Sciences*, 26

- (5):678—693 (in Chinese with English abstract).
- Cerling, T. E., Harris, J. M., MacFadden, B. J., et al., 1997. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 389: 153—158.
- Clift, P. D., Hodges, K. V., Heslop, D., et al., 2008. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1: 875—880. doi: 10.1038/ngeo351
- DeCelles, P. G., Quade, J., Kapp, P., et al., 2007. High and dry in Central Tibet during the Late Oligocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 253: 389—401.
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416: 159—163.
- Hong, H. L., Zhang, K. X., Li, Z. H., 2009. Climatic and tectonic uplift evolution since ~7 Ma in Gyirong basin, southwestern Tibet plateau; clay-mineral evidence. *International Journal of Earth Sciences*. doi: 10.1007/s00531-009-0457-x
- Huang, C. X., 1994. Comparison study of paleovegetation and paleoclimate in South and North Kunlun Mountains in Pliocene. *Science in China (Ser. B)*, 37 (12): 1489—1498.
- Li, J. J., Fang, X. M., Pan, B. T., et al., 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 21: 381—391 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., Wen, S. X., Zhang, Q. S., et al., 1979. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang plateau. *Science in China (Ser. A)*, 22 (11): 1314—1328.
- Liu, D. S., Zheng, M. P., Guo, Z. T., 1998. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. *Quaternary Sciences*, 3: 194—204 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. J., Xiong, S. F., 2009. Magnetostratigraphy of the Dahonggou Section, northern Qaidam basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of the Qilianshan and Altyn Tagh fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 539—550.
- Lu, H. Y., Wang, X. Y., Li, L. P., 2008. Aeolian dust records indicate the linkage of global cooling and Asian drying in Late Cenozoic. *Quaternary Sciences*, 28: 949—956 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. Z., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 2005. The vegetation and climate change during Neocene and Early Quaternary in Jiuxi basin, China. *Science in China (Ser. D)*, 48 (5): 676—688.
- Ma, Y. Z., Li, J. J., Fang, X. M., 1998. Pollen assemblage in 30.6—5.0 Ma redbeds of Linxia region and climate evolution. *Chinese Science Bulletin*, 43 (3): 301—304 (in Chinese).
- Molnar, P., England, P., Matinod, J., 1993. Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan plateau, and the Indian monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357—396.
- Molnar, P., 2005. Mio-Pliocene growth of the Tibetan plateau and evolution of East Asian climate. *Palaeontologia Electronica*, 8(1): 1—23.
- Pan, Y. S., 1999. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 153—163 (in Chinese with English abstract).
- Rea, D. K., Snoeckx, H., Joseph, L. H., 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific; Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. *Paleoceanography*, 13(3): 215—224.
- Saylor, J., DeCelles, P., Gehrels, G., et al., 2010. Basin formation in the High Himalaya by arc-parallel extension and tectonic damming: Zhada basin, southwestern Tibet. *Tectonics*, 29, TC1004. doi: 10.1029/2008TC002390
- Shi, Y. F., Li, J. J., Li, B. Y., et al., 1999. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54: 10—21 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. J., Wang P. X., 2005. How old is the Asian monsoon system? —Palaeobotanical records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222: 181—222.
- Wang, J. L., Fang, X. M., Li J. J., 1999. Eolian sand deposition and its environmental significance in the northeastern margin of the Qinghai-Xizang plateau. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2250—2255.
- Wang, P. X., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., et al., 2003. Thirty million year deep sea records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2524—2535.
- Xu, Y. M., Hong, H. L., He, Y. J., 2010. Clay mineralogy and its geological significance of sediments in the foreland basin of West Kunlun Mountains. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 138—147 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Kapp, P. A., Murphy, M. A., et al., 1999. Significant Late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 27(9): 787—790.
- Yin, K., Hong, H. L., Li, R. B., et al., 2010. Clay mineralogy and its palaeoclimatic indicator of the Late Oligocene

- and Early Miocene in Xunhua basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517): 686–693.
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Cao, K., et al., 2008. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet plateau. *Science in China (Ser. D)*, 51(11): 1658–1672.
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji, J. L., et al., 2010. Stratigraphic realm and sedimentary sequence of Paleogene-Neogene of Qinghai-Tibet plateau and the response on the uplift of the plateau. *Science in China (Earth Sciences)*, 53(9): 1271–1294.
- 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. *Quaternary Sciences*, 26: 5–13 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. B., Butcher, K., Powell, C., 2002. Evolution of Neogene foreland basin in Yecheng, Xinjiang, and uplift of northern Tibetan plateau—I stratigraphy and petrology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 274–281 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. B., Huang, X. T., Butcher, K., 2006. Lithostratigraphy, petrography and facies analysis of the Late Cenozoic sediments in the foreland basin of the West Kunlun. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(1): 61–78.
- 附中文参考文献**
- 安芷生, 张培震, 王二七, 等, 2006. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长. *第四纪研究*, 26(5): 678–693.
- 黄赐璇, 1994. 上新世时期昆仑山南北古植被和古气候比较研究. *中国科学(B辑)*, 24(1): 87–93.
- 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等, 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 21: 381–391.
- 李吉均, 文世宣, 张青松, 等, 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. *中国科学(A辑)*, 6: 608–616.
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂, 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. *第四纪研究*, 3: 194–204.
- 鹿化煜, 王先彦, 李郎平, 2008. 晚新生代亚洲干旱气候发展与全球变冷联系的风尘沉积证据. *第四纪研究*, 28: 949–956.
- 马玉贞, 方小敏, 李吉均, 等, 2004. 酒西盆地晚第三纪—第四纪早期植被与气候变化. *中国科学(D辑)*, 34(2): 107–116.
- 马玉贞, 李吉均, 方小敏, 1998. 临夏地区 30.6~5.0 Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录. *科学通报*, 43(3): 301–304.
- 潘裕生, 1999. 青藏高原的形成与隆升. *地学前缘*, 6(3): 153–163.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等, 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. *地理学报*, 54: 10–21.
- 王健力, 方小敏, 李吉均, 1999. 青藏高原东北部 15 Ma 以来的风沙沉积. *科学通报*, 44(12): 1326–1331.
- 徐耀明, 洪汉烈, 何雅娟, 2010. 西昆仑山前陆盆地黏土矿物特征及其地质意义. *沉积学报*, 28(5): 138–147.
- 殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 等, 2010. 循化盆地晚渐新世—早中新世沉积物黏土矿物特征及其古气候指示意义. *地质科技情报*, 29(3): 41–48.
- 张克信, 王国灿, 曹凯, 等, 2008. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录. *中国科学(D辑)*, 38(12): 1575–1588.
- 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. *第四纪研究*, 26: 5–13.
- 郑洪波, Butcher, K., Powell, C., 2002. 新疆叶城晚新生代山前盆地演化与青藏高原北缘的隆升—I 地层学与岩石学证据. *沉积学报*, 20(2): 274–281.