

·环境矿物学·

青藏高原东北缘早渐新世—早中新世干旱化的 粘土矿物学证据

——以兰州盆地为例

梁国军¹, 洪汉烈^{1,2}, 殷科¹, 李荣彪¹, 王朝文¹, 张克信^{1,2}, 王锦荣³

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 中国冶金地质勘查总局 第二地质勘查院, 福建 莆田 351111)

摘要:为揭示青藏高原东北缘早渐新世—早中新世气候环境演化及干旱化事件, 采用X射线衍射(XRD)扫描电子显微分析(SEM)等现代测试技术, 对甘肃兰州盆地早渐新世—早中新世沉积物中粘土矿物的微观形貌、相对含量、 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值等参数进行了系统研究。结果表明, 早渐新世—早中新世沉积物中粘土矿物主要有伊利石、绿泥石、蒙脱石以及少量的伊-蒙混层粘土矿物, 指示该时间段气候总体以干旱为特征, 局部出现相对温暖潮湿的气候。根据粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值变化特征将兰州地区早渐新世—早中新世的气候环境演化划分为以下4个阶段: (I) 31.5~28.8 Ma 相对温干偏湿的气候阶段; (II) 28.8~26.2 Ma 相对冷干的气候阶段; (III) 26.2~22.1 Ma 相对温暖潮湿的气候阶段; (IV) 22.1~16.5 Ma 相对温干偏湿的气候阶段。扫描电子显微分析表明, 在相对温暖潮湿的时期, 粘土矿物溶蚀较明显; 在相对干旱的时期, 粘土矿物表现显著的物理风化特征。以上粘土矿物学特征所揭示的阶段性干旱可能与青藏高原的阶段性的隆升相对应。

关键词:兰州盆地; 早渐新世—早中新世; 粘土矿物; 干旱化; 微观形貌

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)03-0432-09

Clay mineralogical evidence of Early Oligocene-Early Miocene aridification on the northeast margin of the Tibetan Plateau: a case study of Lanzhou Basin

LIANG Guo-jun¹, HONG Han-lie^{1,2}, YIN Ke¹, LI Rong-biao¹, WANG Chao-wen¹,
ZHANG Ke-xin^{1,2} and WANG Jin-rong³

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. No. 2 Institute of Geological Exploration, China Exploration & Engineering Bureau, Putian 351111, China)

Abstract: To reveal palaeoclimatic evolution and aridification events of Early Oligocene-Early Miocene period on the northeast margin of Tibetan Plateau, the authors investigated micro-morphology, relative content of clay minerals and $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ ratios of sediments in Lanzhou Basin by means of X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The relative content of clay minerals shows that the sediments are composed of illite, smectite, chlorite and minor illite-smectite mixed-layer clay (Ill/Sme), indicating that aridification prevailed in Lanzhou in that period, with intervals of relatively warm and humid climate conditions. According to relative content and $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ ratios, the palaeoclimate evolution in Lanzhou could be divided into

收稿日期: 2011-10-07; 修订日期: 2012-02-05

基金项目: 青藏高原新近纪隆升过程与地质事件群研究(1212011121261) 国家自然科学基金资助项目(41072030 40872038)

作者简介: 梁国军(1984-), 男, 布依族, 硕士研究生, 岩石矿物学专业, 主要从事粘土矿物学方面的研究, E-mail: lianguojun1985@yahoo.com.cn; 通讯作者: 洪汉烈(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 岩石矿物学专业, 主要从事矿物学研究, E-mail: honghl8311@yahoo.com.cn

four stages, i. e., (I) relatively warm and dry and slightly humid period (31.5~28.8 Ma), (II) relatively cold and dry period (28.8~26.2 Ma), (III) relatively warm and humid period (26.2~22.1 Ma), and (IV) relatively warm and dry and slightly humid period (22.1~16.5 Ma). SEM results indicate that clay minerals were apparently corroded in the relatively warm and humid period and presented distinctly physical weathering characteristics in the relatively arid period. The aridification events probably resulted from the multi-stage uplifts of the Tibetan Plateau.

Key words: Lanzhou Basin; Early Oligocene-Early Miocene; clay minerals; aridification; micro-morphology

青藏高原新生代以来的构造隆升运动改变了大气环流格局,促使东亚季风和印度季风的形成和发展,从而导致亚洲内陆的干旱化(Raymo *et al.*, 1988; Raymo and Ruddiman, 1992)。亚洲内陆的干旱化事件对人类生活影响巨大,其产生及形成机制倍受国际社会及相关专家的关注。诸多研究表明,亚洲内陆干旱化与全球变冷或者青藏高原隆升密切相关(Miller *et al.*, 1991; Sun *et al.*, 1998; Rea *et al.*, 1998; Turco *et al.*, 2001; Qiang *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2002; Kimura *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2004; 王先彦等, 2006)。青藏高原东北缘是高原向东北方向扩展的最前缘部位(Meyer *et al.*, 1998),同时处于东部季风区、西北干旱区以及青藏高原高寒区 3 大自然气候带的交汇处,是气候变化敏感区域(Li *et al.*, 1988)。兰州盆地位于青藏高原东北缘,盆地内堆积的新生代沉积物与青藏高原的构造隆升密切相关,是研究青藏高原构造隆升与气候演变的理想场所。

上世纪 30 年代以来,众多学者对兰州盆地动物化石、磁性地层及沉积环境等进行了研究(Halim *et al.*, 1998; 邱占祥等, 1998; 颀光普, 1999; 岳乐平等, 2000; 顾延生等, 2000; 王伴月等, 2000; Qiu *et al.*, 2001; 耿宝印等, 2001; 岳乐平等, 2003),但关于该区气候环境演变的研究仍然较为匮乏。兰州盆地沉积连续,沉积物中富含粘土矿物,能有效记录其形成时气候环境变化(张乃娴等, 2000; 陈涛等, 2003; 洪汉烈, 2010)。粘土矿物由于晶体颗粒细小且对环境变化较为敏感(Merriman, 2002),其对气候环境的指示作用受到愈来愈多地球科学工作者的重视。大量研究表明,沉积物中粘土矿物的种类及其组合特征与气候条件密切相关,如高岭石常形成于赤道附近的热带气候地区,蒙脱石则来源于温带地区,伊利石和绿泥石多出现在极地气候地区(Dietz, 1941; Millot, 1970),坡缕石形成于季节性的干旱—半干旱气候条件(Singer, 1989)。粘土

矿物学作为一种前沿的气候环境研究手段,在环境重建中已逐渐证实其具有有效性及简易性(陈涛等, 2005),其分析结果与其他气候研究手段十分吻合。

本文从粘土矿物学的角度,采用 X 射线衍射及扫描电子显微分析等现代测试手段,对兰州盆地沉积物的粘土矿物特征进行研究,以期揭示兰州地区早渐新世—早中新世(31.5~16.5 Ma)的干旱化事件,并对其干旱化诱因展开初步探讨。

1 研究剖面地质概况

研究剖面(103°22'56"~103°24'8" E, 36°22'19"~36°22'44" N)隶属甘肃省永登县红城镇(图 1),兰州盆地第三纪地层从下至上主要出露西柳沟组、野狐城组及咸水河组(邱占祥等, 1997)。据岳乐平等(2000)对永登剖面第三系地层建立的磁性地层序列,地层年龄从老到新如下:西柳沟组顶界年龄为 51 Ma,时代为早始新世;野狐城组年龄为 51~31.5 Ma,时代为早始新世—早渐新世早期;咸水河组年龄

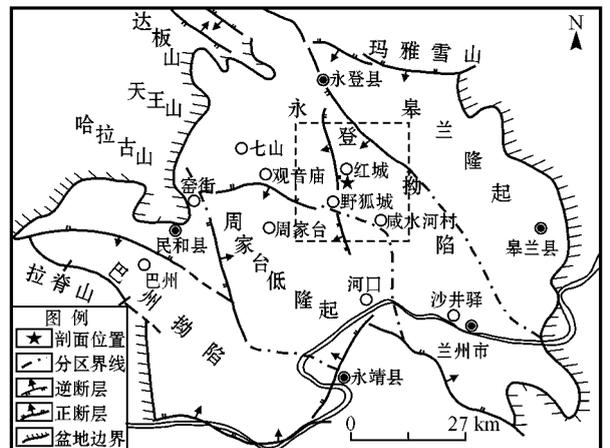


图 1 研究剖面地质构造简图[据杨虎权等(1996)修改]

Fig. 1 Geological structure map of the study profile (after Yang Huquan *et al.*, 1996)

31.5~15 Ma 时代为早渐新世—中中新世。本文研究样品采自咸水河组 (N_{1x}) 下段及中段, 地层年龄参看岳乐平等 (2000), 为早渐新世至早中新世中期 (31.5~16.5 Ma), 属河流相—微咸水、淡水滨湖相沉积 (岳乐平等, 2003), 发育水平层理及交错层理, 岩性特征描述如下:

下段: 沉积于早渐新世—早中新世早期 (31.5~20.0 Ma), 主要为砂岩、泥岩和石膏层。底部为中厚层细砾岩, 夹有石膏层, 呈脉状产出, 厚 3~10 cm; 中部为灰红色细砂岩和紫红色钙质泥岩互层, 伴有极少量石膏脉或石膏晶体; 上部为蓝灰色中—薄层钙质泥质粉砂岩与紫红色钙质砂质泥岩互层, 发育交错层理及水平层理, 厚约 170.25 m。

中段: 沉积于早中新世中期 (20.0~16.5 Ma), 下部为紫红色中—薄层石英粉砂岩夹蓝灰色粉砂质泥岩互层, 其中以紫红色为主, 钙质含量丰富; 中部夹有砾岩, 砾岩主要成分为石英, 砾石分选一般至较好, 磨圆差; 上部为桔黄色、暗红色中—厚层钙质泥岩, 发育平行层理、波状交错层理、楔状交错层理及大型前积纹层, 该段厚约 59.75 m。

2 材料与方法

根据岩性的差异, 采集新鲜的沉积岩样品, 经室内处理和筛选后, 从中挑选 49 件代表岩样制备 3 种粘土矿物定向片 (自然干燥片、乙二醇饱和片及高温处理片)。定向片制备方法如下: 首先, 将沉积岩原样研磨至无颗粒感, 取适量粉末于蒸馏水中搅拌分散 1 h。然后根据斯托克斯沉降原理 (须藤俊男, 1981), 在常温下静置样品溶液 8 h 后, 用虹吸管吸取出小于 $2 \mu\text{m}$ 的微粒, 然后采用离心机富集即可。将离心机富集的粘土矿物颗粒涂布在载玻片上, 在常温下风干制成自然干燥片 (NG)。最后将自然干燥片置于 70°C 的乙二醇蒸汽中浸泡 3 h, 制成乙二醇饱和片 (EG)。为区分绿泥石与高岭石, 需制备高温处理片 (T), 即将自然干燥片置于马弗炉中在 600°C 高温下恒温 3 h 后取出进行 X 射线衍射分析。

粘土矿物定向样品的 X 射线衍射 (XRD) 分析测试在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室进行, 仪器为荷兰帕纳科 X'Pert Pro 型 X 射线粉晶衍射仪, 入射光源为 $\text{CuK}\alpha$ 辐射, Ni 片滤波, X 光管工作电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 光阑系统为 $\text{DS}=\text{SS}=1^\circ$, $\text{RS}=0.3 \text{ mm}$ 。使用连续扫描方

式, 扫描速度为 $8^\circ/\text{min}$, 步长为 0.02° , 扫描范围为 $3^\circ \sim 35^\circ$ 。

粘土矿物的含量与其衍射强度成正比, 使其半定量计算成为可能 (Biscaye, 1965; Moore and Reynolds, 1989)。本次研究的粘土矿物相对含量计算在乙二醇饱和片的衍射曲线上进行, 主要采用 Biscaye 提出的矿物强度因子法进行 (Biscaye, 1965)。具体算法如下: 主要把蒙脱石、伊利石、绿泥石等 3 种粘土矿物总含量看作 100%, 1.7 nm 衍射峰强度 $\times 1$ 作为蒙脱石的权重强度, 1.0 nm 衍射峰强度 $\times 4$ 作为伊利石的权重强度, 0.71 nm 衍射峰强度 $\times 2$ 作为绿泥石的权重强度, 具体计算采用 MID Jade 5.0 软件完成。

为了进一步验证 X 射线衍射分析结果, 选取具新鲜断面的块状沉积岩原岩样品进行表面喷铂导电处理后进行扫描电子显微镜观察, 实验测试在武汉理工大学的 JSM-5610 型扫描电子显微镜上进行, 加速电压为 20 kV, 束流大小为 1~3 nA。

3 测试结果分析

3.1 粘土矿物的 X 射线衍射分析

X 射线衍射分析采用粘土矿物定向片 (自然干燥片、乙二醇饱和片及高温处理片), 通过各粘土矿物特征峰可鉴定其种属。从图 2a、2b 上可以看出, 石英、方解石、长石等非粘土矿物的衍射峰强度均较低, 而蒙脱石、伊利石及绿泥石等粘土矿物的衍射峰强度相对较高, 说明经过分离后样品中粘土矿物得到很好的富集。

蒙脱石在乙二醇饱和处理后, 其衍射峰从 1.5 nm 移至 1.7 nm 处 (图 2a)。伊利石分别在 1.0 、 0.5 和 0.333 nm 处同时出现较强衍射峰, 经过乙二醇饱和和处理后, 衍射峰的位置及形状保持不变。绿泥石的衍射峰为 1.42 、 0.71 和 0.353 nm , 经过乙二醇饱和和处理后, 各衍射峰的位置基本保持不变。经过乙二醇饱和及 600°C 高温处理后, 0.71 和 0.353 nm 处衍射峰也基本没有变化, 由此说明样品中不含高岭石 (图 2a、2b)。粘土矿物定向片的 X 射线衍射分析结果还表明, 少数样品在 $1.0 \sim 1.5 \text{ nm}$ 之间出现弱的衍射峰, 乙二醇饱和后该衍射峰消失, 而 1.0 nm 衍射峰略有增强, 说明样品含有少量的不规则伊—蒙混层粘土矿物 (图 2b)。总体上, 兰州盆地早渐新世—早中新世沉积物中粘土矿物主要为伊利石、绿泥

石、蒙脱石及少量的伊-蒙不规则混层粘土矿物,表明兰州地区早渐新世—早中新世气候环境总体较为干燥。粘土矿物的衍射峰峰型比较尖锐,说明沉积物中粘土矿物结晶度保存较好,指示粘土矿物形成过程中淋滤作用较弱。

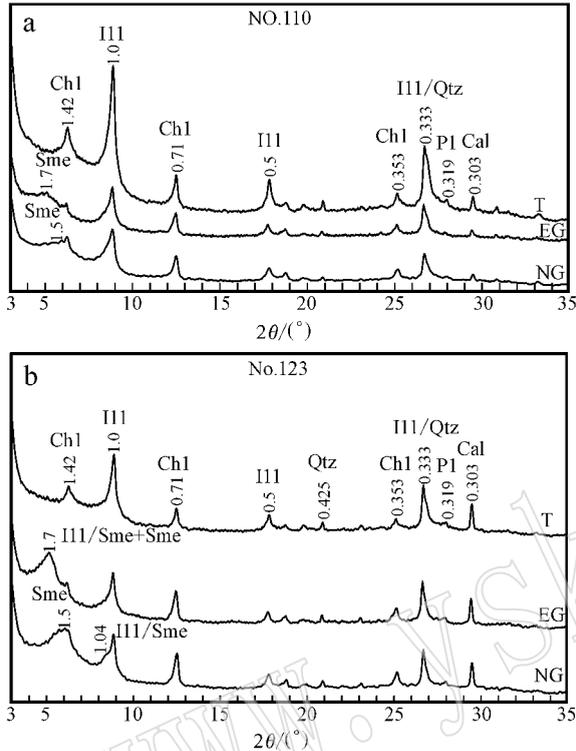


图2 研究剖面代表性样品X射线衍射图

Fig. 2 XRD patterns of representative samples from the study profile

Ill—伊利石; Sme—蒙脱石; Chl—绿泥石; Ill/Sme—伊-蒙混层粘土矿物; Cal—方解石; Pl—斜长石; Qtz—石英; NG—自然干燥片; EG—乙二醇饱和片; T—600°C高温处理片; No. 110, No. 123 分别取自第110层和第123层

Ill—illite; Sme—smectite; Chl—chlorite; Ill/Sme—illite-smectite mixed-layer clay; Cal—calcite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; NG—air dried samples; EG—ethylene glycol saturated samples; T—600°C heated samples; No. 110 and No. 123 from No. 110 and No. 123 layer, separately

3.2 粘土矿物的扫描电子形貌分析

由于自生粘土矿物才能揭示沉积区的气候变化,而碎屑粘土矿物反映的是源区的气候变化(陈涛等 2005),因此必须采用电子显微镜对粘土矿物的来源及成因进行区分。在扫描电子显微镜下发现,兰州盆地沉积物主要由粘土矿物和碎屑颗粒组成,碎屑颗粒分布较为松散,颗粒大小不一,其表面均被磨圆或溶蚀(图 3a),反映其搬运沉积特征。粘土矿

物主要呈片状及丝状两种形态产出(图 3b、3c、3d),片状粘土矿物仅(001)晶面发育较好,边缘多呈破碎状,颗粒堆积较为疏松,说明其均在沉积区经过表生风化改造形成,并且基本不受成岩压实作用的影响。片状粘土矿物部分晶粒较厚,表面可见明显的溶蚀现象(图 3b),说明该时段气候相对温暖潮湿,而部分片状粘土矿物晶粒较薄,晶面有所弯曲,边缘破碎较为明显,颗粒间可见丝状粘土矿物产出(图 3c、3d)。丝状粘土矿物沿片状粘土矿物边缘生长或附着在其表面(图 3c、3d)或者出现在碎屑颗粒之间(图 3d)。将局部片状粘土矿物放大至更高的倍数后发现其由丝状粘土矿物构成,说明丝状矿物交代了片状的粘土矿物母质。在临夏及循化盆地沉积物也发现类似的现象(Hong *et al.*, 2007; 殷科等, 2010a),该丝状粘土矿物可能为坡缕石,但在X射线衍射谱图中,其特征峰并不明显,说明其含量太低,结晶度也较差。

3.3 粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值的古气候指示意义

由于伊利石和绿泥石多出现在极地寒冷地区(Dietz, 1941; Millot, 1970),蒙脱石一般形成于相对潮湿的环境(Jain and Tandon, 2003),因此,伊利石、绿泥石及蒙脱石三者含量的此消彼长,即三者相对含量的变化可反映气候的冷暖干湿。 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 为伊利石和绿泥石相对含量与蒙脱石相对含量的比值,也可以揭示气候环境的变化,其作为粘土矿物学气候研究的新型指标,已在古气候重建中得到广泛应用(Hong *et al.*, 2010a, 2010b)。当伊利石和绿泥石相对含量较高时, $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值也较大,表明粘土矿物形成时降水量较小,气候条件相对冷干;反之,指示相对温暖潮湿的气候条件。通常来讲,冷干期气候一般较稳定,粘土矿物相对含量变化不大,因此粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值也比较稳定。而湿润期气候较复杂,粘土矿物相对含量受水解及风化作用增强,相互之间转化较快,导致粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值波动较大。因此,粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值波动较大时期为相对湿润期,而粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$ 比值稳定时期为冷干期。

4 兰州地区的气候环境演化

根据粘土矿物相对含量及 $V(\text{Ill} + \text{Chl})/V(\text{Sme})$

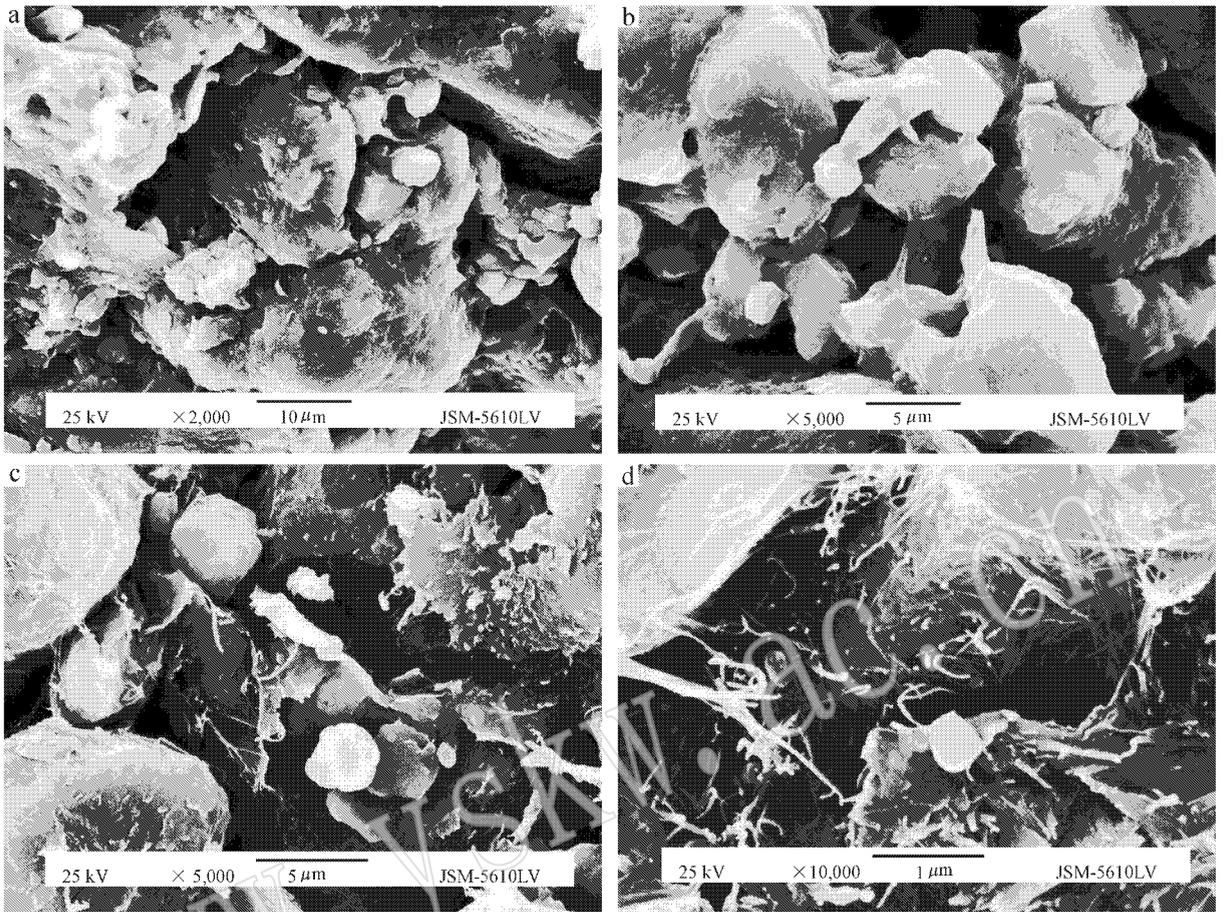


图 3 研究剖面沉积物中粘土矿物扫描电子分析典型形貌

Fig. 3 Typical SEM images of clay minerals from the study profile

- a—粘土矿物和碎屑颗粒；b—具溶蚀表面的粘土矿物；c—丝状粘土矿物交代片状粘土矿物；d—片状粘土矿物空隙中的丝状坡缕石
 a—clay minerals and detrital particles；b—clay minerals with corroded surface；c—fibrous clay minerals replacing platy clay minerals；
 d—fibrous palygorskite in the interspace of platy clay minerals

比值在地层纵向的变化特征可将兰州地区早渐新世—早中新世气候演化分为以下 4 个阶段(图 4)：

I 阶段(31.5~28.8 Ma)：伊利石相对含量在 64%~69% 之间，绿泥石相对含量在 20%~21% 之间，蒙脱石相对含量在 11%~16% 之间， $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值范围在 5.46~8.16 之间。伊利石、绿泥石、蒙脱石相对含量及 $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值发生轻微波动，表明兰州地区 I 阶段可能处于相对温干偏湿的气候条件。

II 阶段(28.8~26.2 Ma)：伊利石相对含量在 67%~68% 之间，绿泥石相对含量为 20%~21%，蒙脱石相对含量为 11%~12%， $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值范围为 7.63~8.17。粘土矿物相对含量及 $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值较为稳定，说明兰州地区 II

阶段气候条件以相对冷干为特征。

III 阶段(26.2~22.1 Ma)：伊利石相对含量在 59%~71% 之间，绿泥石相对含量为 19%~25%，蒙脱石相对含量为 10%~17%， $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值范围为 5.02~8.78。伊利石、绿泥石、蒙脱石相对含量及 $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值呈现明显的周期性波动，表明兰州地区 III 阶段处于相对温暖潮湿的气候环境。

IV 阶段(22.1~16.5 Ma)：伊利石相对含量为 63%~69%，绿泥石相对含量为 20%~23%，蒙脱石相对含量为 10%~16%， $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值范围为 5.18~8.68。粘土矿物相对含量及 $\frac{V(III+Chl)}{V(Sme)}$ 比值与 I 阶段较为相似，揭示兰州地区 IV 阶段也处于相对温干偏湿的气候环境。

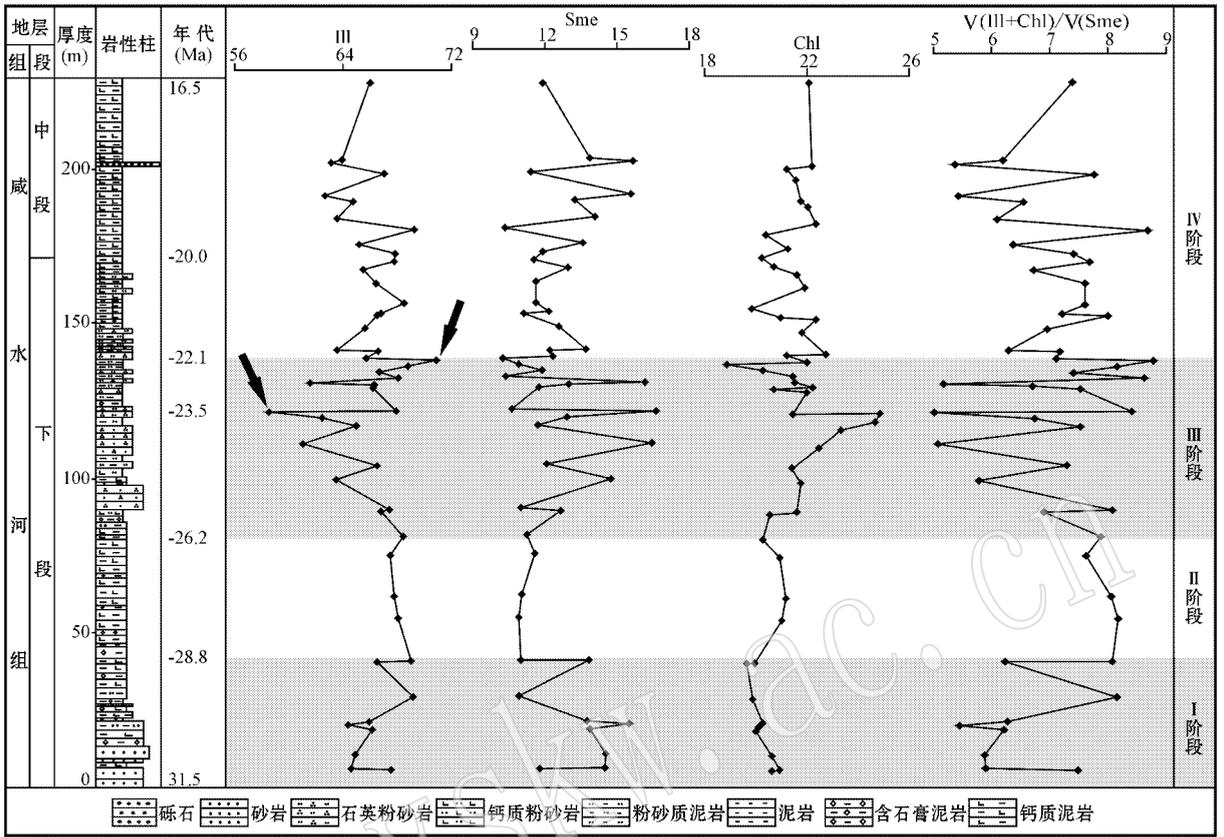


图 4 研究剖面沉积物中粘土矿物相对含量变化曲线图(粘土矿物相对含量单位 vol%)

Fig. 4 Relative content curves of clay minerals in the sediments from the study profile (clay mineral relative content in vol%)

由以上分析可知,兰州盆地沉积物中粘土矿物均以伊利石为主,局部地层中还出现坡缕石,表明兰州地区早渐新世—早中新世总体处于冷干的气候环境,而各时段的气候条件有所不同。I、III、IV 阶段处于相对湿润的气候条件,然而 III 阶段比 I、IV 阶段温度高,降水量也明显高于 I、IV 阶段,II 阶段气候环境相对比较干燥。气候冷暖干湿的变化在粘土矿物学特征中得到了较好的保存, $V(III + Chl) / V(Sme)$ 比值比粘土矿物相对含量变化更为显著,说明其对气候信号具有一定的放大作用,比粘土矿物相对含量更为灵敏。在 ~23.5 Ma 时,伊利石相对含量及 $V(III + Chl) / V(Sme)$ 比值同时降至最低,说明 ~23.5 Ma 兰州地区较为炎热潮湿,而 ~22.1 Ma 时,伊利石相对含量及 $V(III + Chl) / V(Sme)$ 比值均表现为极大值,表明 ~22.1 Ma 发生快速降温事件。进入 IV 阶段后,兰州地区气候保持相对温干偏湿的状态。

循化盆地的沉积相及物源分析结果也表明(张键钰等 2010), 23.1~21.2 Ma 期间青藏高原东北

缘发生过强烈的构造隆升,说明青藏高原在 23.1~21.2 Ma 间可能发生整体抬升,其隆升效应由南向北扩展到东北缘兰州地区。然而,地球晚新生代的 Mi-1 冰期也恰好发生在这个时间段内(Zachos *et al.*, 2001)。青藏高原东北缘的隆升可能是造成兰州地区 ~22.1 Ma 降温事件的主要驱动因素,而冰盖的扩张则加剧了兰州地区的干旱化。同时,东北缘的循化盆地及柴达木盆地也分别揭示了 ~21.3 Ma 和 ~21.5 Ma 的气候变冷事件(洪汉烈等 2010; 殷科等 2010b),与兰州地区的降温事件在时间上很接近,也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)。~23.5 Ma 时炎热的气候环境与可可西里盆地的沉积相证据相符合,但兰州盆地的同期气候环境可能较为湿润(蔡雄飞等 2008)。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,可能与夏季风

的增强有关(张克信等,2007;洪汉烈等,2010)。然而粘土矿物相对含量及 $V(III + Chl)/V(Sme)$ 比值却揭示 31.5~28.8 Ma 和 23.5~22.1 Ma 处于相对湿润期,这种特殊的气候条件可能由于高原隆升、气候环境演化的时空差异性所引起。

那么,兰州地区早渐新世—早中新世出现的干旱化事件,到底是由青藏高原的隆升引起,还是由冰量扩张导致的全球变冷事件引起的呢?笔者认为青藏高原的隆升是驱动兰州地区变干的主要因素,青藏高原作为地球的第三极,其整体或者局部的强烈隆升不仅可导致中国东部季风区、西北干旱区和青藏高原高寒区的分异(黎敦朋等,2004),也可以对亚洲及全球气候格局产生巨大的影响。晚新生代青藏高原的 3 次隆升(钟大赉等,1996)均伴随着全球冰量的增加与亚洲内陆的干旱化,说明高原的阶段性隆升可能不仅可驱使全球气候变冷、全球冰量的扩张,同时可导致亚洲内陆的干旱化并波及到东北缘兰州地区(Harrison *et al.*, 1992);反之,全球变冷事件不能引起青藏高原的隆升,但全球变冷可以加剧亚洲内陆及青藏高原地区的干旱化。有关研究表明,构造活动的气候变化事件往往早于全球气候变化事件,也体现了高原隆升在气候变化中的主导地位(洪汉烈等,2010)。

5 结论

(1) X 射线衍射分析表明,兰州盆地早渐新世—早中新世沉积物中粘土矿物主要为伊利石、绿泥石、蒙脱石及少量的伊-蒙不规则混层粘土矿物,粘土矿物的组合特征说明粘土矿物形成过程中淋滤作用较弱,兰州地区本时段气候条件较为干燥。

(2) 扫描电子显微分析表明,沉积物主要由碎屑颗粒、片状粘土矿物及丝状粘土矿物组成。碎屑颗粒分布较为零散,颗粒大小不一,其表面均被磨圆或溶蚀,反映其搬运沉积特征;以化学风化为主的片状粘土矿物表面可见明显溶蚀显现,而且可见丝状坡缕石交代片状粘土矿物的现象。

(3) 根据粘土矿物相对含量及 $V(III + Chl)/V(Sme)$ 比值变化特征,可将兰州地区早渐新世—早中新世气候环境演变划分为 4 个阶段:Ⅰ阶段:31.5~28.8 Ma 相对温干偏湿的气候阶段;Ⅱ阶段:28.8~26.2 Ma 相对冷干的气候阶段;Ⅲ阶段:26.2~22.1 Ma 相对温暖潮湿的气候阶段;Ⅳ阶段:22.1~16.5

Ma 相对温干偏湿的气候阶段。

(4) 兰州地区~22.1 Ma 降温事件与循化盆地、柴达木盆地及风成堆积的研究结果相一致,可能由青藏高原的隆升所致,而冰盖的扩张加剧了兰州地区的干旱化。

References

- Biscaye P E. 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. Geological Society of America Bulletin, 76(7): 803~832.
- Cai Xiongfei, Liu Demin, Wei Qirong, *et al.* 2008. Characteristics of north of Tibetan Plateau uplift at Paleocene-Miocene—The evidence from Ke Kexili Basir[J]. Acta Geologica Sinica, 82(2): 194~203 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tao, Wang Hejin, Zhang Zuqing, *et al.* 2005. An approach to paleoclimate-reconstruction by clay minerals[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 41(2): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, *et al.* 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4): 416~420 (in Chinese with English abstract).
- Dietz R S. 1941. Clay Minerals in Recent Marine Sediments[D]. Illinois Urbana: University of Illinois Urbana-Champaign.
- Geng Baoyin, Tao Junrong and Xie Guangpu. 2001. Early Tertiary fossil plant and paleoclimate of Lanzhou Basir[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 39(2): 105~115 (in Chinese with English abstract).
- Gu Yansheng, Li Chang'an, Huang Changsheng, *et al.* 2000. Tertiary sedimentary features and environment of the Lanzhou-Minhe basin[J]. Regional Geology of China, 19(4): 337~343 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z T, Ruddiman W F and Hao Q Z. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. Nature, 416(6877): 159~163.
- Halim N, Cogne J P, Chen Y, *et al.* 1998. New Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic results from Xining-Lanzhou basin, Kunlun and Qiangtang blocks, China: Implications on the geodynamic evolution of Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 103(B9): 21 025~21 045.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, *et al.* 1992. Raising Tibet[J]. Science, 255(5052): 1 663~1 670.
- Hong Hanlie. 2010. A review on paleoclimate interpretation of clay mineral[J]. Geological Science and Technology Information, 29(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Hong H L, Gu Y S, Yin K, *et al.* 2010b. Red soils with white net-like veins and their climate significance in south China[J]. Geoderma, 160(2): 197~207.
- Hong H L, Li Z H, Xue H J, *et al.* 2007. Oligocene clay mineralogy of the Linxia Basin: Evidence of Paleoclimatic evolution subsequent to

- the initial-stage uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Clays and Clay Minerals*, 55(5): 491~503.
- Hong Hanlie, Wang Chaowen, Xu Yaoming, *et al.* 2010. Paleoclimate evolution of the Qinghai-Tibet Plateau since the Cenozoic[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 728~736(in Chinese with English abstract).
- Hong H L, Zhang K X and Li Z H. 2010a. Climatic and tectonic uplift evolution since ~7 Ma in Gyirong basin, southwestern Tibet plateau: clay mineral evidence[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 99(6): 1305~1315.
- Jain M and Tandon S K. 2003. Quaternary alluvial stratigraphy and palaeoclimatic reconstruction at the Thar margin[J]. *Current Science*, 84(8): 1048~1055.
- Kimura S, Shikazono N, Kashiwagi H, *et al.* 2004. Middle Miocene-early Pliocene paleo-oceanic environment of Japan Sea deduced from geochemical features of sedimentary rocks[J]. *Sedimentary Geology*, 164(1~2): 105~129.
- Li Dunpeng, Xiao Aifang, Li Xinlin, *et al.* 2004. The uplifting and environmental effectivity in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology of Shaanxi*, 22(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Li J J, Feng Z D and Tang L Y. 1988. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(2): 125~135.
- Millot G. 1970. *Geology of Clays: Weathering, Sedimentology, Geochemistry*[M]. Paris: Springer Verlag.
- Merriman R J. 2002. Contrasting clay mineral assemblages in British lower Palaeozoic slate belts: the influence of geotectonic setting[J]. *Clay Minerals*, 37(2): 207~219.
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, *et al.* 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 135(1): 1~47.
- Miller K G, Wright J D and Fairbanks R G. 1991. Unlocking the ice house: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B4): 6829~6848.
- Moore D M and Reynolds J R C. 1989. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*[M]. New York: Oxford University Press.
- Qiang X K, Li Z X, Powell C, *et al.* 2001. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the East Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 187(1~2): 83~93.
- Qiu Zhanxiang, Wang Banyue, Qiu Zhuding, *et al.* 1997. Recent advances in study of the Xianshuihe formation in Lanzhou basin[A]. Tong Yongsheng, *et al.* Evidence for Evolution—Essays in Honor of Prof. Chungchien Young on the Hundredth Anniversary of His Birth[C]. China Ocean Press, 177~192(in Chinese with English abstract).
- Qiu Z, Wang B, Qiu Z, *et al.* 2001. Land mammal geochronology and magnetostratigraphy of mid-Tertiary deposits in the Lanzhou Basin, Gansu Province, China[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 94(3): 373~385.
- Qiu Zhanxiang, Wang Banyue and Xie Junyi. 1998. Mid-Tertiary chalicotheres(perissodactyla) fossils from Lanzhou, Gansu, China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 36(4): 297~318(in Chinese with English abstract).
- Raymo M E and Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. *Nature*, 359(6391): 117~122.
- Raymo M E, Ruddiman W F and Froelich P N. 1988. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles[J]. *Geology*, 16(7): 649~653.
- Rea D K, Snoeckx H and Joseph L H. 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift and cooling of the northern hemisphere[J]. *Paleoceanography*, 13(3): 215~224.
- Sun D H, An Z S, Shaw J, *et al.* 1998. Magnetostratigraphy and palaeoclimatic significance of late Tertiary eolian sequences in the Chinese loess plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 134(1): 207~212.
- Singer A. 1989. The Palygorskite and sepiolite group minerals[A]. Dixon J B and Weed S B. *Soil Science Society of America*[C]. W I : 829~872.
- Sudo Toshi(translated by Yan Shouhe and Liu Wan). 1981. *Clay Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Turco E, Hilgen F J, Lourens L J, *et al.* 2001. Punctuated evolution of global climate cooling during the late Middle to early Late Miocene: High-resolution planktonic foraminiferal and oxygen isotope records from the Mediterranean[J]. *Paleoceanography*, 16(4): 405~423.
- Wang Banyue and Qiu Zhanxiang. 2000. Micromammal fossils from red mudstone of lower member of Xianshuihe formation in Lanzhou Basin, China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 38(1): 10~35(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianyan, Lu Huayu, Ji Junfeng, *et al.* 2006. Origin of the Red Earth sequence on the northeastern Tibetan Plateau and its implications for regional aridity since the middle Miocene[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 49(5): 505~517.
- Xie Guangpu. 1999. Tertiary bivalves from the Xianshuihe Formation of Lanzhou Basin, Gansu[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 38(1): 94~101(in Chinese with English abstract).
- Yin Ke, Hong Hanlie, Li Rongbiao, *et al.* 2010a. Characteristics of clay mineralogy of Late Oligocene sediments in Xunhua Basin, Qinghai Province and their implications for palaeoclimate[J]. *Geoscience*, 24(1): 187~194(in Chinese with English abstract).
- Yin Ke, Hong Hanlie, Li Rongbiao, *et al.* 2010b. Clay mineralogy and its palaeoclimatic indicator of the Late Oligocene and Early Miocene in Xunhua Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 41~48(in Chinese with English abstract).
- Yue L P, Heller F, Qiu Z X, *et al.* 2001. Magnetostratigraphy and paleo-environmental record of Tertiary deposits of Lanzhou Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(9): 770~773.
- Yue Leping, Qiu Zhanxiang, Xie Guangpu, *et al.* 2003. Sedimentary environment of Tertiary recorded in the Yongdeng Section of

- Lanzhou Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(4): 683 ~ 687 (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 [J]. *Science*, 292(5 517): 686 ~ 693.
- Zheng H, Powell C, Rea D K, *et al.* 2004. Late Miocene and mid-Pliocene enhancement of the East Asian monsoon as viewed from the land and sea [J]. *Global and Planetary Change*, 41(3 ~ 4): 147 ~ 155.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Fenning, *et al.* 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogen [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 583 ~ 597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Naixian, Wan Guojiang and Ma Yuguang. 2000. The clay mineral and its environmental record in the sediment core of Caohai, Weinling [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 206 ~ 211 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianyu, Zhang Kexin, Ji Junliang, *et al.* 2010. Oligocene-Pliocene sedimentary facies analysis and sedimentary evolution of Xunhua Basin in northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 774 ~ 788 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai and Ding Lin. 1996. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its mechanism [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 39(4): 369 ~ 379.
- 洪汉烈. 2010. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望 [J]. *地质科技情报*, 29(1): 1 ~ 8.
- 洪汉烈, 王朝文, 徐耀明, 等. 2010. 青藏高原新生代以来气候环境演化的黏土矿物学特征 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 728 ~ 736.
- 黎敦朋, 肖爱芳, 李新林, 等. 2004. 青藏高原隆升与环境效应 [J]. *陕西地质*, 22(1): 1 ~ 10.
- 邱占祥, 王伴月, 邱铸鼎, 等. 1997. 甘肃兰州盆地咸水河组研究新进展 [A]. 董永生等. 演化的实证——纪念杨钟健教授百年诞辰论文集 [C]. 海洋出版社: 177 ~ 192.
- 邱占祥, 王伴月, 谢骏义. 1998. 记兰州盆地第三纪中期的爪兽(奇蹄目) 化石 [J]. *古脊椎动物学报*, 36(4): 297 ~ 318.
- 王伴月, 邱占祥. 2000. 甘肃兰州盆地咸水河组下段红色泥岩中的跳鼠化石 [J]. *古脊椎动物学报*, 38(1): 10 ~ 35.
- 王先彦, 鹿化煜, 季峻峰, 等. 2006. 青藏高原东北缘中新世红色土状堆积序列的成因及其对亚洲干旱过程的指示 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 36(3): 261 ~ 272.
- 须藤俊男. 1981. 黏土矿物学 [M]. 严寿鹤, 刘万, 译. 北京: 地质出版社.
- 颜光普. 1999. 甘肃兰州盆地第三系咸水河组的双壳类 [J]. *古生物学报*, 38(1): 94 ~ 101.
- 岳乐平, Heller F, 邱占祥, 等. 2000. 兰州盆地第三系磁性地层年代与古环境记录 [J]. *科学通报*, 45(18): 1998 ~ 2003.
- 岳乐平, 邱占祥, 颜光普, 等. 2003. 兰州盆地永登剖面记录的第三纪沉积环境 [J]. *沉积学报*, 21(4): 683 ~ 687.
- 殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 等. 2010a. 青海循化盆地晚渐新世沉积物中坡缕石的特征及其古气候指示意义 [J]. *现代地质*, 24(1): 187 ~ 194.
- 殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 等. 2010b. 循化盆地晚渐新世—早中新世沉积物中黏土矿物特征及其古气候指示意义 [J]. *地质科技情报*, 29(3): 41 ~ 48.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等. 2007. 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——中国地质大学学报*, 32(5): 583 ~ 597.
- 张乃娴, 万国江, 马玉光. 2000. 威宁草海沉积物中的黏土矿物及其环境记录 [J]. *地质科学*, 33(2): 206 ~ 211.
- 张键钰, 张克信, 季军良, 等. 2010. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世—上新世沉积相分析与沉积演化 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 774 ~ 788.
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 26(4): 289 ~ 295.

附中文参考文献

- 蔡雄飞, 刘德民, 魏启荣, 等. 2008. 古新世—中新世以来青藏高原北缘隆升的特征——来自可可西里盆地的报告 [J]. *地质学报*, 82(2): 194 ~ 203.
- 陈涛, 王河锦, 张祖青, 等. 2005. 浅谈利用黏土矿物重建古气候 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(2): 309 ~ 316.
- 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 2003. 黏土矿物对古气候指示作用浅析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22(4): 416 ~ 420.
- 耿宝印, 陶君容, 颜光普. 2001. 兰州盆地早第三纪植物及古气候意义 [J]. *植物分类学报*, 39(2): 105 ~ 115.
- 顾延生, 李长安, 黄长生, 等. 2000. 兰州—民和盆地第三纪沉积特征及环境 [J]. *中国区域地质*, 19(4): 337 ~ 343.