

doi:10.3799/dqkx.2010.096

循化盆地中新世沉积物粘土矿物的特征及其古气候指示

王粉丽¹, 洪汉烈^{1,2}, 殷科¹, 徐耀明¹, 张克信^{1,2,3}, 张健钰^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

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

3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

摘要: 为揭示循化盆地沉积物对古气候及青藏高原隆升过程的指示作用, 采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 方法对循化盆地中新世沉积物中粘土矿物组成、微观形貌进行了深入研究。结果表明, 沉积物中粘土矿物以伊利石、蒙脱石为主, 绿泥石、高岭石和坡缕石含量较低; 粘土矿物相对含量及伊利石结晶度变化特征指示, 在 23.1~21.2 Ma 期间, 古气候以温暖潮湿为主; 21.2~14.3 Ma 期间古气候以冷干为主, 出现短暂的相对暖湿时段; 14.3~10.6 Ma 期间, 古气候以相对暖湿为主; 10.6~9.3 Ma 时期, 气候以冷干为主; 9.3~5.2 Ma 期间, 气候虽有冷干与暖湿波动, 但总体上以暖湿为主。在 21.2 Ma 和 5.8 Ma 时期发生的明显强降温事件, 可能与青藏高原的阶段性隆升有关。

关键词: 粘土矿物; 结晶度; 中新世; 循化盆地; 隆升。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2010)05-0828-11

收稿日期: 2010-05-31

Clay Mineralogy and Its Paleoclimatic Indicator of the Miocene Sediments of Xunhua Basin

WANG Fen-li¹, HONG Han-lie^{1,2}, YIN Ke¹, XU Yao-ming¹, ZHANG Ke-xin^{1,2,3}, ZHANG Jian-yu^{1,2}

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

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

3. Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To reconstruct the paleoclimate in the Miocene, clay mineralogy of the Xunhua sediments was investigated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) methods. Our results show that clay minerals of the Miocene sediments are mainly illite and smectite, with minor chlorite, kaolinite, and palygorskite. The apparent changes in their relative contents and illite crystallinity suggest that warm and humid paleoclimate conditions prevailed over the period of 23.1–21.2 Ma, then the mainly cold and dry climate succeeded in the period of 21.2–14.3 Ma, with short intervals of warm and humid climate conditions. The mainly warm and humid climate dominated in the period of 14.3–10.6 Ma, and it changed into a mainly cold and dry climate in the period of 10.6–9.3 Ma. The paleoclimate of the episode of 9.3–5.2 Ma was warm and humid, and it fluctuated frequently between cold/dry and warm/humid. The rapid changes in clay indices in the curves at 21.2 Ma and 5.8 Ma probably suggest the uplift in Xunhua of Qinghai-Tibet plateau.

Key words: clay mineral; crystallinity; Miocene; Xunhua basin; uplift.

青海循化盆地位于青藏高原东北缘的东南区, 同时又处在东部季风区、西北干旱区和青藏高原干旱区三大自然带的交汇处, 是气候变化的敏感区 (Li

et al., 1988; 宋春晖等, 2005)。这里已成为研究青藏高原隆升及气候环境变化的最重要的地区之一。

有关青藏高原东北缘地区气候环境演化研究,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40921062, 40872038); 中国地质调查局项目 (No. 1212010610103); 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题基金项目 (No. GPMR200910)。

作者简介: 王粉丽 (1986—), 女, 硕士, 主要从事粘土矿物学方面的研究。E-mail: cugwfl_2008@126.com

主要集中在孢粉学、盆地沉积学、地球化学、古地磁学、古生物学和区域构造学等方面(马玉贞等,1998;施雅凤等,1998;钟巍等,1998; Guo *et al.*, 2002; Fang *et al.*, 2003; Pares *et al.*, 2003;宋春晖等,2005;蔡雄飞等,2008)。比如,马玉贞等(1998)通过对临夏地区孢粉研究,指出中新世以来出现一次降温期(18.6~13.0 Ma)、3次温暖湿润期(21.8~16.8 Ma,13.0~8.5 Ma,6.0~5.0 Ma)和一次旱化时期(8.5~6.0 Ma);宋春晖等(2005)通过对临夏盆地晚新生代沉积物特征的研究,认为 13.0~7.8 Ma气候以湿润为主夹短暂干旱事件,7.8~6.2 Ma期间气候以干旱为主,6.2~4.4 Ma期间气候进一步干旱加剧;钟巍等(1998)通过对临夏盆地沉积物地球化学的研究,得出 7.00~5.35 Ma,虽有冷干与暖湿波动,但总体上呈现出一种较为温暖、稳定的气候特征,至 5.35 Ma 前后,出现具有全球意义的冷峰。循化盆地是在白垩纪古盆的基础上再次拗陷而成的前陆盆地,它记录了中新世以来循化地区气候环境演化的过程。然而,目前对循化盆地沉积物的研究却十分匮乏,利用沉积物中粘土矿物学特征对古气候指示的研究也相对较少(陈涛等,2003, 2005)。

粘土矿物广泛分布于地表各类沉积物中,其类

型及其组合与沉积环境、沉积物源、古气候、成岩作用和构造背景等有着密切的联系(Inglès *et al.*, 1998; Médard *et al.*, 2000; Manalt *et al.*, 2001; Perederij, 2001; Merriman, 2002)。本文利用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)分析方法,对循化盆地沉积物中粘土矿物的组合特征、形貌特征等进行研究,探讨中新世以来沉积物中粘土矿物的变化特征及其对古气候环境的指示意义。

1 地质背景

循化盆地位于青藏高原东北缘的东南部,与其南北两侧的西秦岭北缘逆冲带和拉脊山逆冲带一起构成菱形形态,具有青藏高原东北缘东端构造的典型特征(刘少峰等,2007)。本文研究的剖面包括羊圈沟剖面和西沟剖面,分别位于循化撒拉族自治县积石镇羊圈贡拜村和循化县城西南约 3 km 的西沟村附近(图 1)。

根据岩性的变化,剖面从下至上依次划分为渐新统一中新统他拉组(EN_t),中新统咸水河组(N_{1x}) (自下而上为中庄段(N_{1cz})、上庄段(N_{1sz})、东乡段(N_{1d})和中新统一上新统临夏组(N_{1-2l}) (自下而上

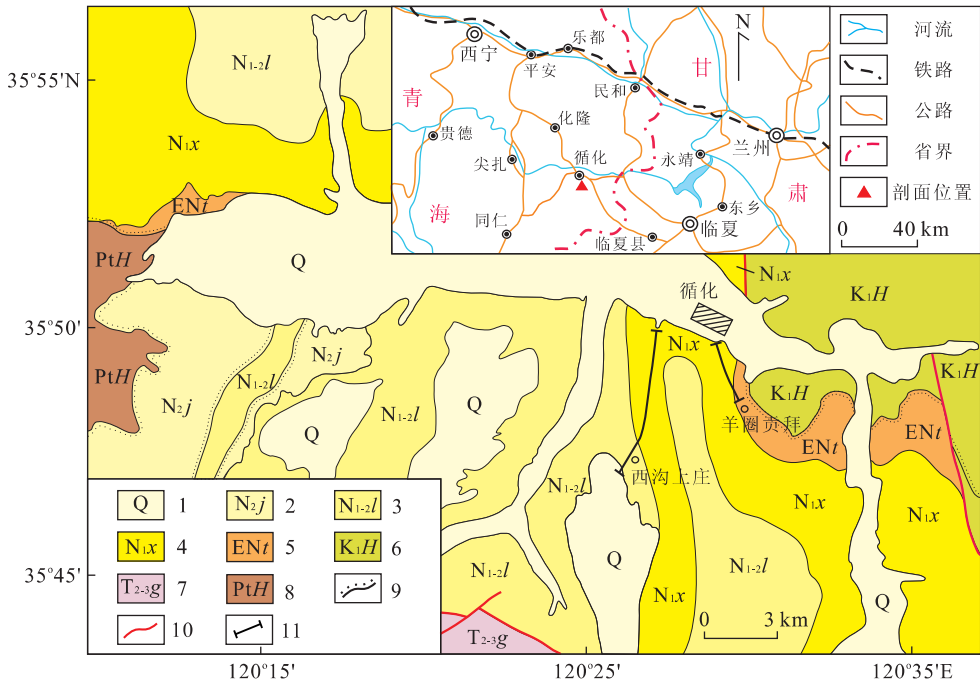


图 1 研究区地质简图及剖面位置图(据张键钰等,2010)

Fig. 1 Geological map of studied area and the location of the measured section

1. 第四系; 2. 上新统积石组; 3. 中-上新统临夏组; 4. 中新统咸水河组; 5. 渐新统一中新统他拉组; 6. 下白垩统河口群; 7. 中-上三叠统古浪堤组; 8. 元古宇化隆岩群; 9. 角度不整合; 10. 断层; 11. 实测剖面

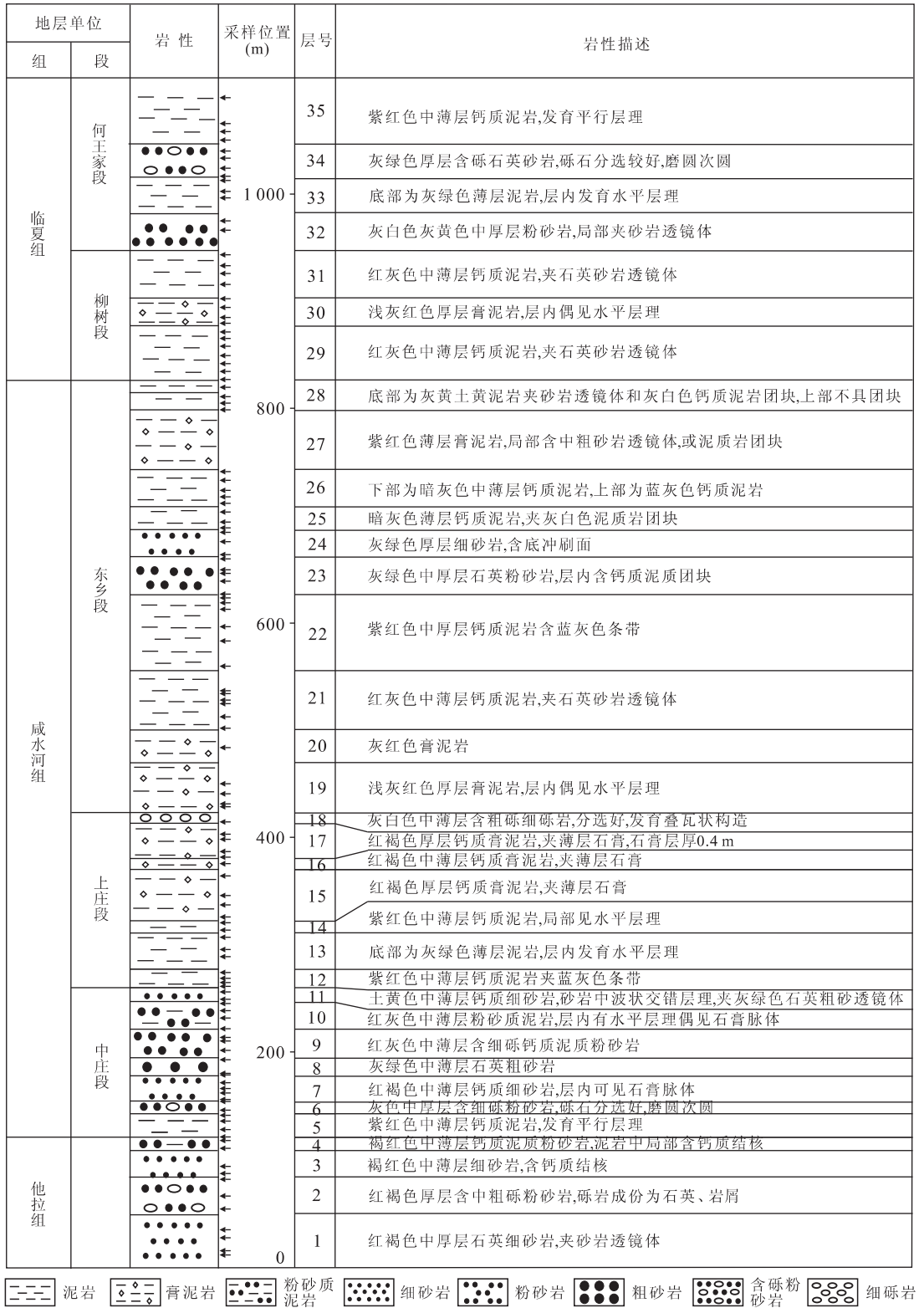


图 2 循化盆地中新世地层剖面岩性柱状图及样品层位

Fig. 2 Schematic diagram of Miocene showing the lithology and sampling position in Xunhua basin

为中新统柳树段(N_{1L})和中新统一上新统何王家段(N_{1-2h})(张克信等,2007)(图 2)。

他拉组(23.1~21.2 Ma)(季军良等,2010)以

冲积扇相为主,顶部为淡水湖相;岩性以红褐色厚层状中—粗砾岩、含砾中—粗砂岩为主,顶部发育紫红色泥岩夹层(张键钰等,2010)。

咸水河组中庄段(21.2~16.0 Ma)(季军良等, 2010),为淡水湖相—三角洲前缘相;岩性下部为紫红色粉砂质泥岩夹浅灰色中—粗砾岩和紫红色含砾中—细砂岩,偶夹石膏层;上部为红褐色、紫红色泥岩夹砂岩,含少量石膏夹层和粗砂岩夹层(张键钰等, 2010).

咸水河组上庄段(16.0~14.6 Ma)(季军良等, 2010)为微咸水湖相;紫红色、褐红色粉砂岩、泥质粉砂岩与粉砂质泥岩互层夹膏泥岩与少量薄层石膏,底部为土黄色钙质粉砂岩(张键钰等, 2010).

咸水河组东乡段(14.6~9.6 Ma)(季军良等, 2010)以淡水湖相—三角洲前缘相为主,底部为(半)咸水湖相;岩性下部蓝灰色、灰绿色膏泥岩与石膏层不等厚互层;中部为紫红色钙质泥岩、粉砂岩夹含砾粗砂岩,上部为灰红色泥岩与灰绿色含砾粗砂岩、粗砂岩互层(张键钰等, 2010).

临夏组柳树段(9.6~7.3 Ma)(季军良等, 2010)以湖相—三角洲前缘相为主;岩性下部为灰红、灰绿色砾岩、含砾粗砂岩、砂岩与灰红色钙质泥岩互层,具少量泥灰岩层,上部为灰白、灰红、暗灰色钙质泥岩和砂岩,局部夹砾岩、含砾粗砂岩(张键钰等, 2010).

临夏组何王家段(7.3~5.0 Ma)(季军良等, 2010)为水下扇相;岩性下部为浅灰色中—粗砾岩与灰黄色中—粗砂岩互层,上部为土黄色中—细砂岩与土红色、黄褐色钙质泥岩互层,夹少量泥灰岩(张键钰等, 2010).

2 材料和方法

2.1 样品制备

根据岩性变化以及地层厚度的不同,从研究剖面中采集未经风化的沉积物样品,共计 121 个.分析样品采用 Stokes 沉降法提取,将样品研磨成颗粒细小的粉末,置于烧杯中搅拌分散 1 h,静置 24 h 后,倒出上层清液离心 10 min,获取粒径 $<2\ \mu\text{m}$ 提纯的粘土矿物样品.

2.2 X 射线衍射分析

粘土矿物的衍射分析采用刮片法制备 2 种定向薄片(自然干燥片、乙二醇饱和片).在空气中自然风干制成自然干燥片(NG);将自然干燥片在乙二醇饱和蒸汽中(70 °C)浸泡 3 h 制成乙二醇饱和片(EG)(Hong *et al.*, 2008),使乙二醇分子进入具有膨胀层的粘土矿物,将其撑开,以便在 X 射线衍射图谱

上区分衍射峰位相近的粘土矿物(Liu *et al.*, 2007).测量工作在日本理学 Dmax-III A 型 X 射线衍射仪上进行,入射光源为 $\text{CuK}\alpha$ 辐射, Ni 片滤波, X 光管工作电压为 35 kV, 电流为 30 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 $4^\circ/\text{min}$, 2θ 分辨率为 0.02° ,扫描范围为 $3^\circ\sim 65^\circ$. 伊利石结晶度采用 Kübler 指数,即其(001)衍射峰的半高宽($\Delta^\circ 2\theta$)来表示(王河锦和周健, 1998).

2.3 扫描电子显微分析

选取若干具新鲜断面的小块状沉积岩原岩样品做喷碳导电处理,即可进行扫描电子显微镜分析(Hong *et al.*, 2007),扫描电子显微镜型号为 JSM-5610,加速电压 20 kV,束流 1~3 nA. 通过扫描电子显微镜可以观察粘土矿物的微观形貌特征,从而判断矿物组合,同时可通过粘土矿物的形态,判断粘土矿物成因等.

2.4 数据分析

粘土矿物的鉴定和解释主要依据自然干燥片、乙二醇饱和片的 XRD 叠加图谱的综合对比(Moore and Reynolds, 1997). 乙二醇饱和片中出现 $17.0\ \text{Å}$ 衍射峰表示蒙脱石或不规则伊蒙混层矿物存在(黄思静, 1990). 高岭石和绿泥石的峰位相近,可通过如下方法判断: $3.57\ \text{Å}$ 衍射峰表示有高岭石存在, $3.53\ \text{Å}$ 表示有绿泥石存在.

粘土矿物相对含量的计算使用 MIF 值法(Kahle *et al.*, 2002),主要采用各粘土矿物(001)晶面衍射峰的积分强度(即衍射峰的面积)来表示. 蒙脱石(含少量伊利石/蒙脱石混层矿物)、伊利石、高岭石和绿泥石 4 种粘土矿物的相对含量计算按 Biscaye (1965)的方法, $1.7\ \text{nm}$ 衍射峰面积 $\times 1$ 为蒙脱石的权重强度; $1.0\ \text{nm}$ 衍射峰面积 $\times 4$ 为伊利石的权重强度; $0.7\ \text{nm}$ 衍射峰面积 $\times 2$ 为高岭石和绿泥石合计的权重强度,两者的含量比例从绿泥石的(004)($0.354\ \text{nm}$)和高岭石的(002)($0.358\ \text{nm}$)的衍射峰面积求出,4 者强度最后校正为含量 100%(万世明等, 2008). 粘土矿物晶格的有序度和晶体颗粒的大小通常用“结晶度”来衡量(万世明等, 2008),伊利石 $1.0\ \text{nm}$ 衍射峰的半高宽值越小,表示伊利石结晶越好(Kübler, 1964; 王河锦和周健, 1998).

3 分析结果

3.1 粘土矿物的矿物学特征

X 射线分析结果表明,循化盆地沉积岩样品中

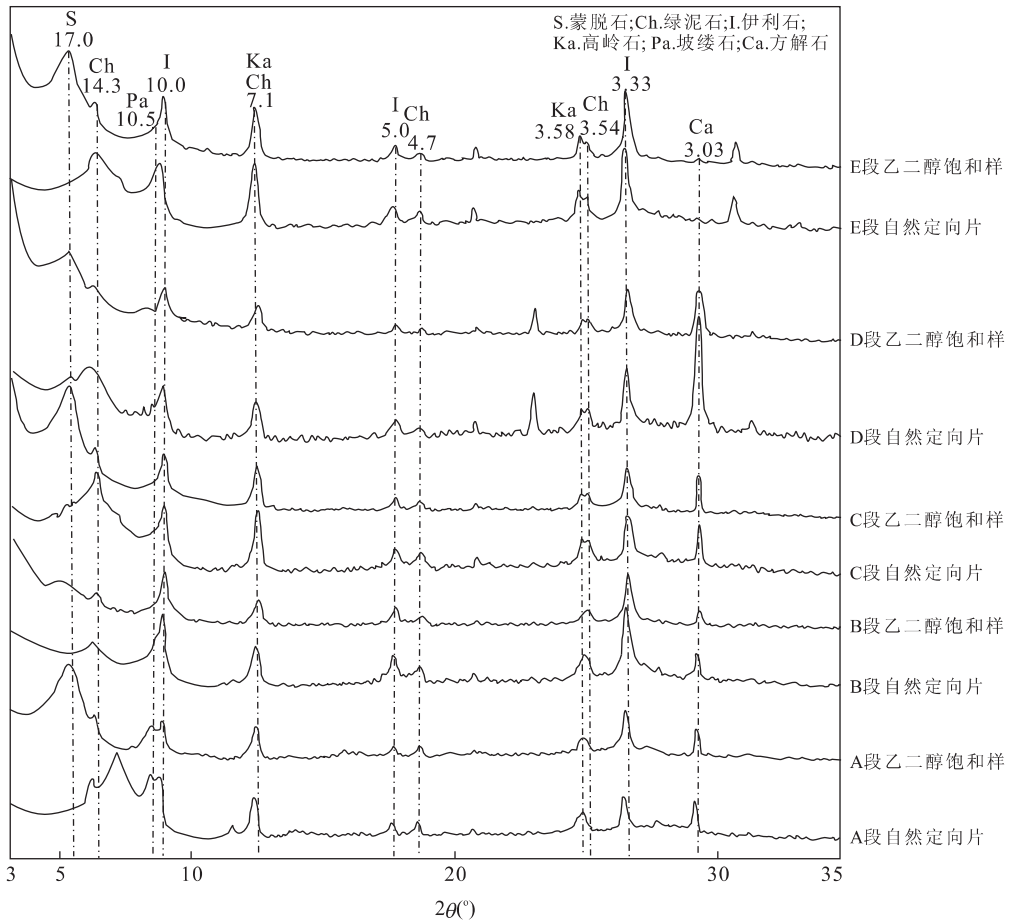


图 3 循化盆地中新世地层代表性样品粘土矿物的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of representative samples of clay fractions of Miocene in Xunhua basin

粘土矿物主要是伊利石和蒙脱石,以及少量的绿泥石、高岭石和坡缕石。图 3 为代表性样品的 X 射线衍射结果。通过上节所述处理步骤,获得样品中各粘土矿物的相对含量、伊利石结晶度值等 5 组特征指数。伊利石相对含量,最大值为 84.2%,最小值为 9.3%,平均值为 58.5%;蒙脱石相对含量,最大值为 84.7%,最小值为 0%,平均值为 20.4%;绿泥石相对含量,最大值为 32.5%,最小值为 2.9%,平均值为 18.1%;高岭石相对含量,最大值为 11.1%,最小值为 0%,平均值为 3.0%;伊利石结晶度值,最大值为 0.59°,最小值为 0.23°,平均值为 0.38°。

根据分析得到的 5 组数据作图,获得这 5 个参数值随深度变化的曲线。根据伊利石、蒙脱石和高岭石相对含量以及伊利石结晶度这 4 条曲线的变化特征,同时参考绿泥石相对含量的变化趋势,可将研究区沉积物地层自下而上分为 5 个粘土矿物组合带,并以 ABCDE 分别表示(图 4)。

A 段(23.1~21.2 Ma):蒙脱石、伊利石、绿泥石粘土矿物组合带。蒙脱石相对含量随深度急剧减

少,伊利石相对含量随深度急剧增大,绿泥石相对含量随深度急剧增大,其中不含高岭石。蒙脱石相对含量最大值为 71.9%,最小值为 11.3%,平均值为 48.1%;伊利石相对含量最大值为 67.4%,最小值为 18.7%,平均值为 37.5%;绿泥石相对含量最大值为 24.1%,最小值为 8.2%,平均值为 14.4%;伊利石结晶度值随深度急剧减少,其中,最大值为 0.59°,最小值为 0.31°,平均值为 0.44°。

B 段(21.2~14.3 Ma):伊利石、绿泥石粘土矿物组合带。伊利石相对含量缓慢增加,而蒙脱石相对含量缓慢减少,其中高岭石含量极少。伊利石相对含量最大值为 84.2%,最小值为 49.6%,平均值为 71.1%;蒙脱石相对含量最大值为 33.7%,最小值为 0%,平均值为 9.6%;绿泥石相对含量最大值为 30.5%,最小值为 2.9%,平均值为 19.0%;伊利石结晶度值最大值为 0.53°,最小值为 0.32°,平均值为 0.38°。

C 段(14.3~10.6 Ma):蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石粘土矿物组合带。该段中连续出现了高岭

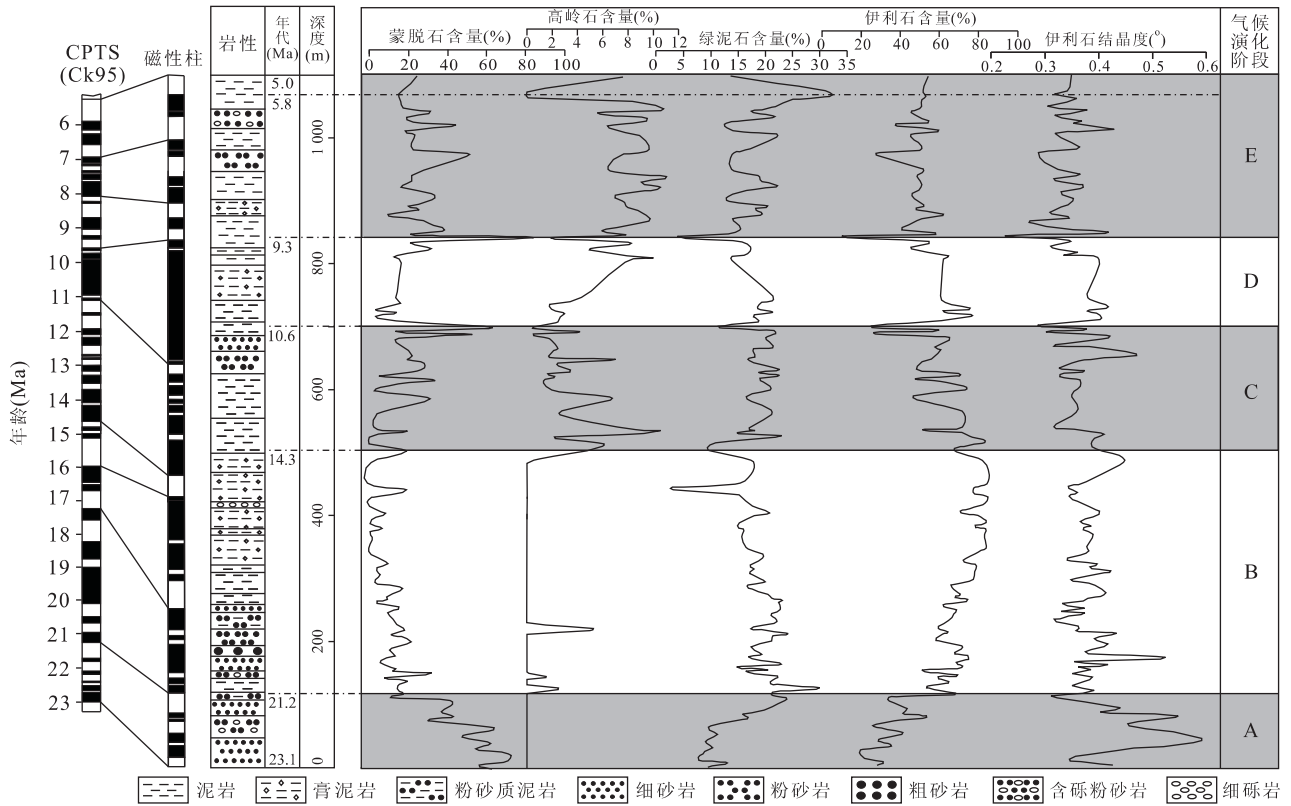


图 4 循化盆地中新世沉积物粘土矿物特征变化曲线

Fig. 4 Clay indices of the Miocene sediments in Xunhua basin

石、伊利石相对含量和伊利石结晶度值减少,蒙脱石相对含量同时增加。伊利石相对含量最大值为 82.6%,最小值为 24.0%,平均值为 58.1%;蒙脱石相对含量最大值为 63.6%,最小值为 0%,平均值为 19.3%;绿泥石相对含量最大值为 23.3%,最小值为 11.2%,平均值为 19.0%;高岭石相对含量最大值为 10.6%,最小值为 0%,平均值为 3.6%。伊利石结晶度值最大值为 0.47°,最小值为 0.29°,平均值为 0.37°。

D段(10.6~9.3 Ma):伊利石、绿泥石、高岭石粘土矿物组合带。该段总体上,蒙脱石、高岭石相对含量增加,伊利石、绿泥石相对含量和伊利石结晶度值减少,在 9.3 Ma 时期,蒙脱石相对含量急剧增加,伊利石、绿泥石相对含量和伊利石结晶度值急剧减少。蒙脱石最大值为 84.7%,最小值为 2.6%,平均值为 21.3%;伊利石最大值为 76.8%,最小值为 9.3%,平均值为 57.2%;绿泥石最大值为 21.7%,最小值为 0%,平均值为 16.8%;高岭石最大值为 10.0%,最小值为 0%,平均值为 4.8%;伊利石结晶度值最大值为 0.42°,最小值为 0.23°,平均值为 0.36°。

E段(9.3~5.0 Ma):蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石粘土矿物组合带。总体上,各粘土矿物相对含

量呈周期性地变化,在 5.8 Ma 时期,高岭石消失,绿泥石相对含量急剧增加。蒙脱石最大值为 51.4%,最小值为 9.4%,平均值为 25.1%;高岭石最大值为 11.1%,最小值为 0%,平均值为 6.8%;伊利石最大值为 61.5%,最小值为 27.0%,平均值为 48.7%;绿泥石最大值为 32.5%,最小值为 12.7%,平均值为 18.4%;伊利石结晶度值最大值为 0.43°,最小值为 0.27°,平均值为 0.34°。

纵观剖面中粘土矿物特征的变化,蒙脱石相对含量变化趋势与伊利石相对含量变化趋势相反,经历 4 个相对低值段和 4 个相对高值段。伊利石结晶度值(0.23°~0.59°)与伊利石相对含量变化趋势基本相同(除 23.1~21.2 Ma 期间),自下向上呈现阶段性变化,经历 4 个相对高值段和 4 个相对低值段。23.1~21.2 Ma 期间高岭石没有出现,21.2~14.3 Ma 期间偶有出现,直到 14.3~5 Ma 期间,高岭石呈阶段性变化,相对含量变化趋势与蒙脱石相对含量变化趋势基本相似。绿泥石相对含量变化趋势与伊利石相对含量变化趋势基本相似。

3.2 粘土矿物形貌特征

SEM 分析结果显示,循化盆地中新世沉积物主要由块状集合体、碎屑颗粒及片状、纤维状粘土矿物

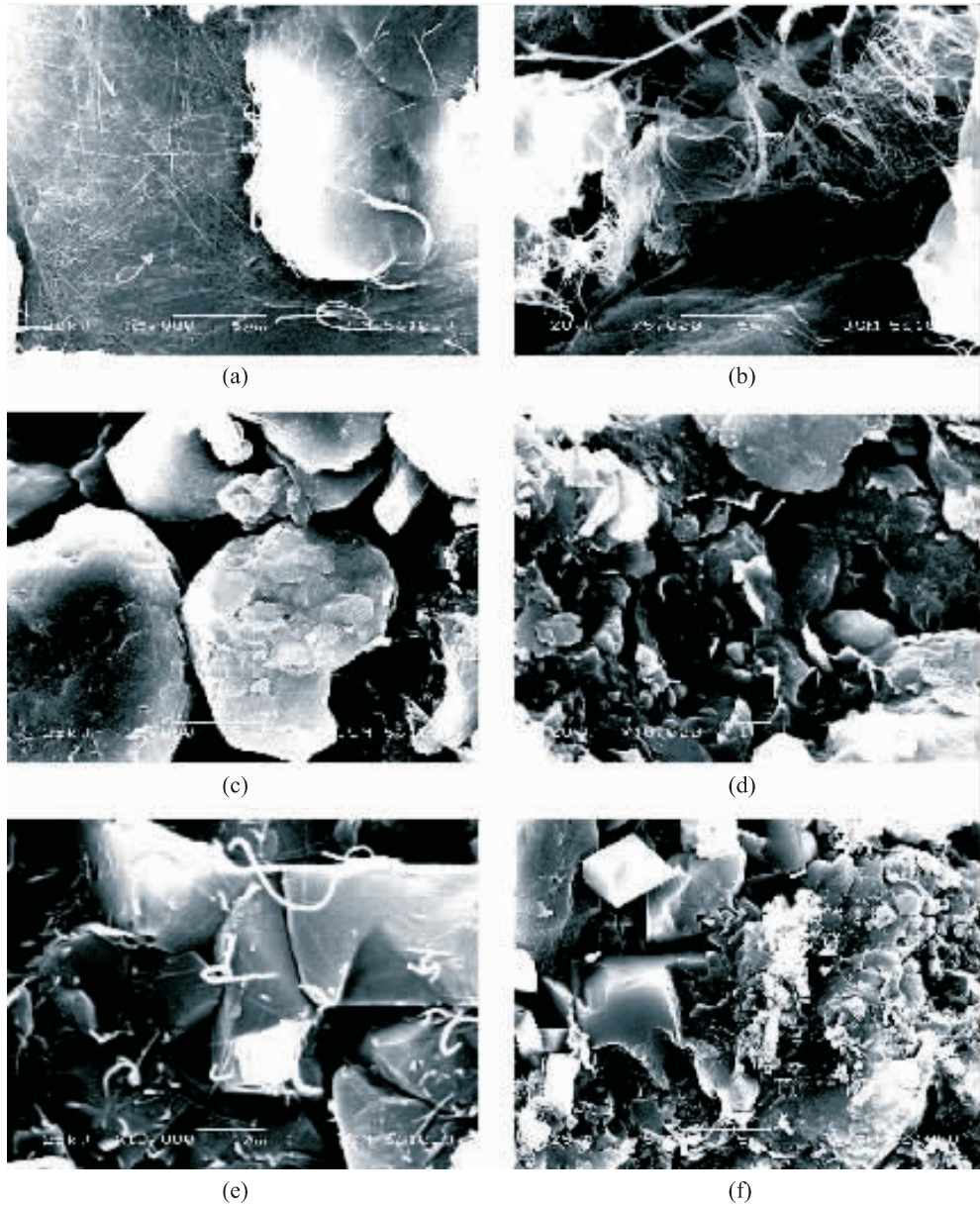


图 5 循化盆地中新世沉积粘土矿物扫描电镜照片

Fig. 5 SEM photos of the Miocene clay minerals in Xunhua basin

a. A 段碎屑坡缕石, 呈针状; b. A 段自生成因坡缕石, 呈纤维状; c. B 段片状粘土矿物, 呈弯曲晶面; d. C 段片状粘土矿物, 被磨蚀呈港湾状; e. D 段碎屑矿物间自生坡缕石; f. E 段碎屑矿物及片状粘土矿物

组成(图 5)。该区沉积物反映了沉积碎屑特征, 并未受成岩作用的改造。片状粘土矿物多发育不规则、残缺的边缘, 有的呈明显弯曲状, 边缘磨蚀明显。明显可见沉积物中存在一种一向延长的粘土矿物坡缕石, 具有呈细棒状或者针状的特征, 常以单体形式产出, 附着在其他块状矿物颗粒的表面, 为典型碎屑成因的坡缕石; 另一种呈毛发状或者丝状形态, 集合体呈缠绕线团状, 沿片状粘土矿物颗粒的边缘交代生长, 为自生成因的坡缕石。

4 讨论

盆地沉积相的研究表明, 循化盆地中新统中庄段、上庄段及东乡段沉积物来自当时隆升的西秦岭北缘逆冲带和拉脊山逆冲带剥蚀物; 柳树段和何王家段物源的主要供应区为循化盆地东部的积石山隆起; 均为水流搬运沉积, 镜下的粘土矿物磨蚀现象也证实了其搬运沉积成因。粘土矿物大多经过表生风化作用形成, 受成岩作用影响较小, 并且物源区距离研究区均较近, 故其组合特征和结晶度均可有效地

对研究区的气候环境变化进行指示。

蒙脱石形成跟水解程度增强有关(Chamley, 1989),因此,相对温暖潮湿的气候条件有利于蒙脱石的形成。伊利石一般形成于干冷的气候条件,在弱碱性条件下,由长石、云母等铝硅酸盐矿物在弱淋滤作用下形成(洪汉烈, 2010)。当其晶格层间 K^+ 不断淋失,可向蒙脱石转化,当气候变得湿热,化学风化彻底,将进一步脱钾分解形成高岭石。因此,气候干燥、淋滤作用弱对伊利石的形成和保存有利(洪汉烈等, 2007)。绿泥石是绿片岩相变质岩中的一种常见矿物,也是沉积岩的一种矿物,可由重复的风化剥蚀而富集,在风化作用期间,绿泥石水镁石层内的二价铁容易被氧化。绿泥石一般只能在化学风化作用受抑制的地区(如冰川或干旱的地表)才能保存下来(Quigley and Martin, 1961; Ducloux *et al.*, 1976),因此,绿泥石反映相对干燥的气候条件。高岭石是酸性火山岩或变质岩在温暖、潮湿的气候条件下风化而成的产物,因此,高岭石的发育表明母岩区经历了热带气候条件下的强烈化学风化过程(Adatte and Keller, 1998)。当气候转为干燥时,高岭石形成过程中记录的气候环境信息将会被保存下来(Biscaye, 1965; Singer, 1984)。坡缕石一般存在于干旱、半干旱的沙漠环境条件下(Khadkikar *et al.*, 2000; Tateo *et al.*, 2000),是干旱、半干旱地区泥灰岩风化以及风成沙漠尘土沉积物的特征矿物,也常见于钙结层或富钙土壤中,并与高 Mg 活度的环境有关(Velde, 1985)。

伊利石结晶度十分有助于解释气候的短期变化现象,在低温和干燥的气候环境下,其结晶容易被保存下来,但随降雨量增加,气温升高时,伊利石层间的 K^+ 被淋失,导致其结晶度变差(Singer, 1984)。因此,伊利石结晶度值低反映干燥寒冷的气候条件,而高的结晶度值反映相对温暖潮湿的气候条件。

从分析结果可以看出,在 A 段中,蒙脱石相对含量和伊利石结晶度值急剧下降,伊利石及绿泥石相对含量急剧上升,同时不含高岭石。此段中,自生成因坡缕石和碎屑成因坡缕石均稳定存在,说明本区气候较为干旱,同时反映物源区干旱的气候条件。样品中纤维状自生坡缕石沿边缘交代蒙脱石的现象(图 5),指示气候从湿热到干旱的转变。粘土矿物由以蒙脱石为主转变到以伊利石为主,指示在 23.1~21.2 Ma 期间,气候经历了温暖潮湿到冷干的转变,同时揭示了出现在~21.2 Ma 极端的降温事件。与全球变冷事件(~22 Ma)呈现良好的对应关系

(Zachos *et al.*, 2001),可能是青藏高原隆升及亚洲沙漠化在东北缘的响应(Guo *et al.*, 2002)。

在 B 段中,各粘土矿物相对含量变化波动均不大,以伊利石为主,在极少数层位中出现了高岭石。伊利石相对含量与伊利石结晶度值的变化趋势大致相反,少数层位变化趋势相同,这表明气候条件是影响粘土矿物相对含量变化的主要因素,可能也与物源区母岩成分的变化有关。总体来说,在 21.2~14.3 Ma 期间,气候保持相对持续冷干,其间夹有短暂的相对暖湿气候,这可能是青藏高原构造隆升及亚洲沙漠化后干旱化的结果。

在 C 段中,蒙脱石及高岭石相对含量阶段性地增大,伊利石及绿泥石相对含量阶段性减小,而伊利石结晶度值大致与伊利石相对含量同时变化。显示出,在 14.3~10.6 Ma 期间,气候条件以相对暖期为主,干冷—暖湿交替周期变化,在 10.6 Ma 时达到相对最暖湿时期;此时母岩成分以地表成岩带的富钾富铝矿物为主。

在 D 段中,总体上蒙脱石、高岭石相对含量增加,伊利石、绿泥石相对含量和伊利石结晶度值减少;至 9.3 Ma 时期,蒙脱石相对含量急剧增加,同时,伊利石、绿泥石相对含量急剧减少,伊利石结晶度值急剧减少。此期间,出现了少量的针状集合体坡缕石,指示干旱—半干旱气候。表明该段气候以冷干为主,到 9.3 Ma 时期,突变成大暖期,同时粘土矿物特征的变化可能是由于物源区母岩成分随着剥蚀的加深,转变为近变质带甚至浅变质带的富镁铁矿物和火山岩变质岩基底。

在 E 段中,总体上各粘土矿物相对含量呈周期性变化,在 5.8 Ma 时期,高岭石消失,绿泥石相对含量及伊利石结晶度急剧增加。该段粘土矿物特征说明,在 9.3~5.0 Ma 期间,气候虽有冷干与暖湿波动,但总体以一种较为暖湿、稳定的气候特征为主。至 5.8 Ma 前后,出现一次冷峰期(钟巍等, 1998; Hong *et al.*, 2009),这可能与青藏高原在小规模隆升之后逐渐趋于平衡有关(王德朝等, 2009)。

5 结论

(1) 利用 X 射线衍射(XRD)及扫描电子显微镜(SEM)分析技术,对循化盆地中新世粘土矿物的组成、结晶学特征和微形貌进行了深入研究,分析了粘土矿物所记录的气候变化及高原隆升信息。

(2) 循化盆地中新世期间气候演化经历了 5 个阶

段:23.1~21.2 Ma 古气候以温暖潮湿为主导,同时揭示了出现在~21.2 Ma 极端的降温事件;21.2~14.3 Ma古气候保持相对持续冷干,其间夹有短暂的相对暖湿气候;14.3~10.6 Ma 古气候以相对暖湿为主,干冷—暖湿交替周期变化;10.6~9.3 Ma 古气候以冷干为主,至 9.3 Ma 达相对最暖湿时期;9.3~5.0 Ma期间,古气候虽有冷干与暖湿波动,但总体上以暖湿为主,至 5.8 Ma 前后,出现强降温事件。

(3)21.2 Ma 和 5.8 Ma 左右发生了明显的强降温事件,可能与青藏高原的阶段性的隆升有关。

References

- Adatte, T., Keller, G., 1998. Increased volcanism, sea-level and climatic fluctuation through the K/T boundary; mineralogical and geochemical evidences Oil and Natural Gas Corporation Limited International Seminar on Recent Advances in the Study of Cretaceous Sections Chennai, Regional Geoscience Laboratory, Chennai, India.
- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76 (7): 803—832.
- Cai, X. F., Liu, D. M., Wei, Q., R., et al., 2008. Characteristics of north of Tibet plateau uplift at Paleocene-Miocene—the evidence from Ke Kexili basin. *Acta Geologica Sinica*, 82 (2): 194—203 (in Chinese with English abstract).
- Chamley, H., 1989. Clay sedimentology. Springer-Verlag, Berlin.
- Chen, T., Wang, H., Zhang, Z. Q., et al., 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 416—420 (in Chinese with English abstract).
- Chen, T., Wang, H. J., Zhang, Z. Q., et al., 2005. An approach to paleoclimate—reconstruction by clay minerals. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 41(2): 309—316 (in Chinese with English abstract).
- Ducloux, J., Meunier, A., Velde, B., 1976. Smectite, chlorite and a regular interlayered chlorite-vermiculite in soils developed on a small serpentinite body, Massif Central, France. *Clay Minerals*, 11(2): 121—135.
- Fang, X. M., Garzion, C., Van der Voo, R., 2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 545—560.
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416: 159—163.
- Hong, H. L., 2010. A review on paleoclimate interpretation of clay minerals. *Geological Science and Technology Information*, 29(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Clays and Clay Minerals*, 55(5): 491—503.
- Hong, H. L., Yu, N., Xue, H. J., et al., 2007. Clay mineralogy and its palaeoclimatic indicator of the Late Pleistocene in Linxia basin. *Geoscience*, 21(2): 406—414 (in Chinese with English abstract).
- 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*, 1—11.
- Hong, H. L., Zhang, N., Li, Z. H., et al., 2008. Clay mineralogy across the P-T boundary of the Xiakou Section, China; evidence of clay provenance and environment. *Clay and Clay Minerals*, 56(2): 131—143.
- Huang, S. J., 1990. Identification and diagenetic significance of interstratified illite-montmorillonite series. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 5: 23—29 (in Chinese with English abstract).
- Ingles, M., Salvany, J. M., Muñoz, A., 1998. Relationship of mineralogy to depositional environments in the non-marine Tertiary mudstones of the southwestern Ebro basin (Spain). *Sedimentary Geology*, 116(3—4): 159—176.
- Ji, J. L., Zhang, K. X., Qiang, T., et al., 2010. Magnetostratigraphy of the Neogene strata in the Xunhua basin, Qinghai Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 803—810 (in Chinese with English abstract).
- Kahle, M., Kleber, M., Jahn, R., 2002. Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils; the suitability of mineral intensity factors. *Geoderma*, 109 (3—4): 191—205.
- Khadkikar, A. S., Chamyal, L. S., Ramesh, R., 2000. The character and genesis of calcrete in Late Quaternary alluvial deposits, Gujarat, western India, and its bearing on the interpretation of ancient climates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162(3—4): 239—261.
- Kübler, B., 1964. Les argiles, indicateurs de métamorphisme. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 19 (10): 1093—1112.
- Li, J. J., Feng, Z. D., Tang, L. Y., 1988. Late Quaternary monsoon patterns on the loess plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 125—135.

- Liu, S. F., Zhang, G. W., Heller, P. L., 2007. Cenozoic basins development and its indication of plateau growth in the Xunhua-Guide district. *Science in China (Ser. D)*, 50 (Suppl. II): 277—291.
- Liu, Z. F., Christophe, C., Alain, T., et al., 2004. Erosional history of the eastern Tibetan plateau since 190 kyr ago: clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea. *Marine Geology*, 209(1—4): 1—18.
- Ma, Y. Z., Li, J. J., Fang, X. M., 1998. Palynoflora and climatic evolution records from red-beds (30.6—5.0 Ma) in Linxia area. *Chinese Science Bulletin*, 43(3): 301—304 (in Chinese).
- Manalt, F., Beck, C., Disnar, J. R., 2001. Evolution of clay mineral assemblages and organic matter in the late glacial—Holocene sedimentary infill of Lake Annecy (northwestern Alps): paleoenvironmental implications. *Journal of Paleolimnology*, 25(2): 179—192.
- Médard, T., 2000. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin. *Earth-Science Reviews*, 49(1—4): 201—221.
- Merriman, R. J., 2002. Contrasting clay mineral assemblages in British Lower Palaeozoic slate belts: the influence of geotectonic setting. *Clay Minerals*, 37(2): 207—219.
- Moore, D. M., Reynolds, R. C., 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, New York, USA.
- Pares, J. M., Van der Voo, R., Downs, W. R., et al., 2003. Northeastward growth and uplift of the Tibetan plateau: magnetostratigraphic insights from the Guide basin. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B1) 2017. doi:10.1029/2001JB001349
- Perederij, V. I., 2001. Clay mineral composition and palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits of Ukraine. *Quaternary International*, 76—77: 113—121.
- Quigley, R. M., Martin, R. T., 1961. Chloritized weathering products of a New England Glacial Till. *Clays and Clay Minerals*, 10: 107—116.
- Shi, Y. F., Li, J. J., Li, B. Y., et al., 1998. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and environmental change during Late Cenozoic. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 1—463 (in Chinese).
- Singer, A., 1984. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediment: a review. *Earth-Science Reviews*, 21(4): 251—293.
- Song, C. H., Bai, J. F., Zhao, Y. D., et al., 2005. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23 (3): 507—513 (in Chinese with English abstract).
- Tateo, F., Sabbadini, R., Morandi, N., 2000. Palygorskite and sepiolite occurrence in Pliocene lake deposits along the River Nile: evidence of an arid climate. *Journal of African Earth Sciences*, 31(3—4): 633—645.
- Velde, B., 1985. Clay minerals: a physico-chemical explanation of their occurrence (developments in sedimentology). Elsevier Science, Amsterdam, 40.
- Wan, S. M., Li, A. C., Xu, K. H., et al., 2008. Characteristics of clay minerals in the northern South China Sea and its implications for evolution of East Asian Monsoon since Miocene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 289—300 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. C., Zhang, J. J., Yang, X. Y., et al., 2009. Tectonic and environmental evolution of Gyirong basin, and its relationship to the uplift of Tibetan plateau. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45 (1): 79—89 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. J., Zhou, J., 1998. On the indices of illite crystallinity. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (3): 395—405 (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, J. Y., Zhang, K. X., Ji, J. L., et al., 2010. Oligocene-Pliocene sedimentary facies analysis and sedimentary evolution of Xunhua basin in northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35 (5): 774—788 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Chen, F. N., et al., 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32 (5): 583—597 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, W., Li, J. J., Fang, X. M., et al., 1998. Features of paleoclimatic changes since about 30 MaBP in Linxia basin—geochemical records in Cenozoic sediment. *Geographical Research*, 17(3): 258—284 (in Chinese with English abstract).

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. *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. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(2): 309—316.

- 陈涛,王欢,张祖青,等,2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析. 岩石矿物学杂志,22(4): 416—420.
- 洪汉烈,2010. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望. 地质科技情报,29(1): 1—8.
- 洪汉烈,于娜,薛惠娟,等,2007. 临夏盆地晚更新世沉积物粘土矿物的特征及其古气候指示. 现代地质,21(2): 406—414.
- 黄思静,1990. 混层伊利石—蒙脱石的鉴定及其成岩意义. 岩相古地理,5: 23—29.
- 季军良,张克信,强泰,等,2010. 青海循化盆地新近纪磁性地层学及其对青藏高原东北缘隆升的年代学制约. 地球科学——中国地质大学学报,35(5): 803—810.
- 刘少峰,张国伟,Heller,P. L.,2007. 循化—贵德地区新生代盆地发育及其对高原增生的指示. 中国科学(D辑),37(增刊 I): 235—248.
- 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.
- 施雅风,李吉均,李炳元,等,1998. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广州:广东科技出版社,1—463.
- 宋春晖,白晋锋,赵彦德,等,2005. 临夏盆地 13.0~4.4 Ma 湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨. 沉积学报,23(3): 507—513.
- 万世明,李安春,胥可辉,等,2008. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录. 地球科学——中国地质大学学报,33(3): 289—300.
- 王德朝,张进江,杨雄英,等,2009. 吉隆盆地构造、环境演化与青藏高原隆升. 北京大学学报(自然科学版),45(1): 79—89.
- 王河锦,周健,1998. 关于伊利石结晶度诸指数的评价. 岩石学报,14(3): 395—405.
- 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. 地球科学——中国地质大学学报,35(5): 774—788.
- 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. 地球科学——中国地质大学学报,32(5): 583—597.
- 钟巍,李吉均,方小敏,等,1998. 青藏高原东北边缘临夏盆地近 30 MaB. P. 以来古气候环境演变特征——沉积物地球化学元素记录. 地理研究,17(3): 258—264.