

# 临夏盆地晚渐新世沉积物中坡缕石的发现及其环境气候意义

洪汉烈<sup>1</sup>, 薛惠娟<sup>1</sup>, 张克信<sup>1</sup>, 朱云海<sup>1</sup>, 向树元<sup>1</sup>, 方杰<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北地矿局第四地质大队, 湖北咸宁 437100

**摘要:** 为揭示临夏盆地晚渐新世沉积物的矿物组成对环境气候的指示意义, 利用 X 射线衍射和扫描电子显微分析方法, 对临夏盆地晚渐新世的沉积物的矿物组成以及坡缕石的矿物学特征进行了深入的研究. 结果表明, 沉积物中的坡缕石主要为自生成因, 极少量具有碎屑成因. 自生成因的坡缕石呈细长丝状的形态特征, 往往沿片状的伊/蒙混层粘土矿物颗粒的边缘交代、生长; 碎屑成因的坡缕石呈平直细纤维状的, 以单颗粒形式产出, 与细小的粘土矿物颗粒混杂, 或叠合在片状粘土矿物颗粒的表面. 在临夏盆地晚渐新世沉积物中, 下段岩层中的粘土矿物组合为伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石; 中段岩层的为伊利石、伊/蒙混层粘土; 而上段岩层则为伊利石、伊/蒙混层粘土和绿泥石, 反映在盆地形成之后, 气候演化经历从湿润→冷干的变化过程. 而沉积物中坡缕石的含量自下而上逐渐增多, 其分布特征与粘土矿物组合所反映的气候环境变化趋势相吻合. 伊利石和伊/蒙混层粘土普遍存在于临夏盆地晚渐新世沉积物中, 伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石的共存表明这些粘土矿物具有不同的来源. 坡缕石是干旱、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, 临夏盆地晚渐新世的沉积物中碎屑成因坡缕石的发现, 表明自 ~29 Ma 以来便出现风成黄土的沉积.

**关键词:** 临夏盆地; 晚渐新世; 粘土矿物; 坡缕石.

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2007)05-0598-07

收稿日期: 2007-06-16

## Occurrence of Palygorskite in Late Oligocene in Linxia Basin and Its Geological and Climatic Indicator

HONG Han lie<sup>1</sup>, XUE Hui juan<sup>1</sup>, ZHANG Ke xin<sup>1</sup>, ZHU Yun hai<sup>1</sup>, XIANG Shu yuan<sup>1</sup>, FANG Jie<sup>2</sup>

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

2. No. 4 Geological Party, Hubei Bureau of Geology and Mineral Resources, Xianning 437100, China

**Abstract** Palygorskite in the late Oligocene sediments at Dongxiang, Linxia, northwestern China was investigated by using X ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that authigenic palygorskite occurs in the late Oligocene sediments, and trace amount of detrital palygorskite also can be found in the deposits. The authigenic palygorskite is present as silk like aggregates with thin and long morphology, replacing the I/S mixed layers along the plate edges, while the detrital palygorskite shows relatively straight fibers, occurring as a single particle in mixture with other fine grained clay or covering on the surface of plated clay. Clay mineral assemblages of the lower section, the middle section, and the upper section of the late Oligocene sediments are illite, I/S mixed layers and kaolinite, illite and I/S mixed layers, and illite, I/S mixed layers, and chlorite, respectively, indicating the climatic evolution from humidity to aridity. The amount of palygorskite increasing from the lower to the upper section of the sediments reflects the similar evolution pattern with clay assemblage. Illite and I/S mixed layers are ubiquitous throughout the late Oligocene sediments. However, the coexistence of illite, I/S mixed layers, and kaolinite suggests different provenance of the clay. Palygorskite is a common clay mineral of desert soils and is characteristic of aeolian desert dust in the semi arid and arid regions, and therefore, the occurrence of de

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 1212010610103, 200413000007).

作者简介: 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工作. E-mail: hongh18311@yahoo.com.cn

trital palygorskite in the late Oligocene sediments implies the loess sedimentation from ~29 Ma in Linxia basin.

**Keywords:** Linxia basin; late Oligocene; clay mineral; palygorskite.

### 0 引言

临夏盆地位于兰州市南约 100 km, 是一个以青藏高原东北缘雷积山深大断裂、秦岭北深大断裂和祁连山马衔山东延余脉围成的一个具有山前拗陷性质的盆地(图 1)。在地理位置上, 临夏盆地处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原旱区三大自然带的交汇地带, 因此对气候变化非常敏感(Li *et al.*, 1998)。盆地中第三纪红层厚达 160 多 m, 它形成于渐新世晚期至上新世。盆地中第四系也相当发育, 下部为湖泊沉积, 上部为黄土沉积。因此整个盆地新生代地层从渐新世至今几乎呈连续沉积, 提供了比南亚西瓦利克群更完整的新生代地层记录, 有利于从连续的地质记录中探索环境变化事件的信息, 这里已成为研究第四纪以来的环境演化、青藏高原隆升和环境变化的最重要地区之一(施雅风等, 1998)。

尽管坡缕石是一种相对稀少的粘土矿物, 但坡缕石可以存在于广泛的地质环境之中, 从深海、浅海、湖沼到土壤、沙漠(Verrecchia and LeCoustumer, 1996)。坡缕石(又称凹凸棒石)是一种链层状结构的含水镁铝硅酸盐矿物。一般认为是在 SiO<sub>2</sub>、MgO 活度高, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活度低, pH 为 8~9 的溶液中自生作用形成的。在陆源沉积物中, 坡缕石常常是自生作用形成的。因此, 坡缕石被认为是季节性的干旱-半干旱气候的指示矿物(Singer, 1989)。关于青藏高原隆升和环境变化的研究表明, 青藏高原的隆升是造成我国西北地区气候干旱的主要原因(De

Celles *et al.*, 2007), 然而对于盆地沉积物中矿物气候指示的研究却十分稀少(施雅风等, 1998); Garz-one *et al.* (2005) 根据沉积物细粒组分 Nd 同位素的研究, 指出自 ~29 Ma 临夏盆地的沉积物大多来源于风成黄土; 对于临夏盆地中新世沉积物坡缕石的研究表明, 沉积物中粘土矿物主要为绿泥石和伊利石, 而坡缕石的形成与绿泥石、伊利石的转化有关(Hong *et al.*, 2007)。近来, 笔者利用 X 射线衍射、扫描电子显微分析等现代测试技术, 对临夏盆地渐新世沉积物中粘土矿物的特征开展了深入的研究, 发现沉积物中粘土矿物主要为伊利石和伊/蒙混层粘土, 坡缕石的形成主要来源于伊/蒙混层粘土的蚀变, 而岩层中碎屑成因坡缕石和自生成因坡缕石的发现则反映了自 ~29 Ma 以来出现风成黄土沉积, 也反映了该区气候环境的演化。本文报道了相关研究结果。

### 1 剖面的地质特征

临夏盆地晚渐新世剖面位于甘肃东乡县毛沟, 渐新世沉积物为他拉组(E<sub>3t</sub>), 覆盖在基底的二长花岗岩之上(施雅风等, 1998)。他拉组的岩性可以划分为上、中、下 3 段。下段为含泥的分选较差的粒序砂砾层, 上为含少量细砾石膏的纹层状和块状的泥岩, 是一套典型的干旱环境下洪积扇沉积; 中段为一套退积型的河湖三角洲沉积, 底部为三角洲顶积河流及洪泛平原沉积, 中、上部为三角洲前缘的韵律粉砂、泥岩和前三角洲前粉砂质泥岩; 上段为湖相的泥岩。由于泥岩呈紫红色, 湖水呈较强氧化状态, 说明当时为一开阔的浅湖。因此, 他拉组总的代表了一套干旱环境下由洪积扇向湖泊转化的沉积, 反映湖盆形成以来湖水不断积聚加深的过程。主要岩性为紫红色的粉砂岩、泥岩, 可进一步划分成 10 个岩性层, 自上而下分别描述如下:

(10) 紫红色块状泥岩, 局部夹青灰色泥灰岩条带, 条带宽约 5~8 cm, 厚 24.47 m;

(9) 灰红色细砂岩、粉砂岩与紫红色粉砂质泥岩组成韵律, 单层厚度约 25 cm, 其中细砂岩厚度约 5 cm, 发育低角度斜层理, 粉砂岩厚度约 15~20 cm, 发育水平层理, 泥岩厚约 2~3 cm, 旋回性十分明显, 厚 6.12 m;

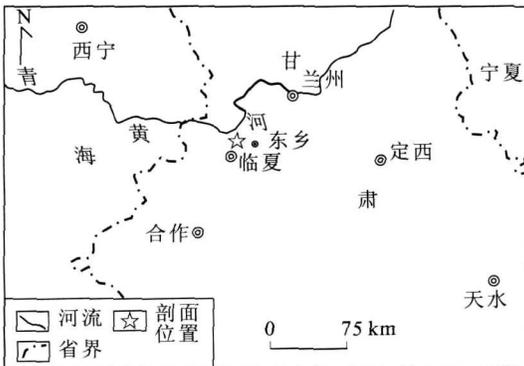


图 1 工作区区域位置图

Fig. 1 Generalized map showing the location of study area

(8) 浅紫红色粉砂质泥岩, 质地均匀, 具泥质结构, 块状构造, 厚 10.48 m;

(7) 紫红色泥岩与紫红色粉砂岩组成韵律层, 质地坚硬, 单层厚度不稳定, 两者比例为 5 : 1, 泥岩与粉砂岩中均发育水平层理, 厚 11.69 m;

(6) 浅紫红色粉砂质泥岩, 具泥质结构, 发育水平纹层, 纹层厚度小于 1 cm, 内含少量白色膏盐粉末, 厚 13.76 m;

(5) 灰白色砂岩, 灰黄色粉砂岩及紫红色粉砂质泥岩组成的韵律层, 每个单层厚度约 60 cm, 三者比例约为 1 : 1 : 1. 下部粉砂岩含量较多, 上部则粉砂质泥岩含量较多. 粉砂岩与泥岩中水平层理极为发育, 产状约 330°∠6°, 厚 14.85 m;

(4) 褐黄色粉砂岩, 发育水平层理, 固结程度中等, 胶结物为钙质, 产状为 335°∠6°, 厚 9.40 m;

(3) 浅灰红色砾岩, 与 2 层之间可见一冲刷面, 其界面起伏不平. 岩石固结程度中等, 具砾屑结构, 块状构造, 砾石砾径以 3~5 mm 为主, 大者可达 1 cm, 基底式胶结, 砾石成分以石英为主, 磨圆度为次棱角-次圆状, 胶结物为钙质和少量泥质, 内含少量次生石膏, 厚 1.76 m;

(2) 浅紫红色含砾粗砂岩与浅紫红色粉砂质泥岩组成韵律层, 粗砂岩厚约 80 cm, 粉砂质泥岩厚约 20 cm, 发育弱水平层理, 层理产状 330°∠7°, 厚 5.87 m;

(1) 露头较差, 中下部为紫红色砾质, 泥质粗砂岩, 至泥岩粒序层, 共 4 层, 每层厚约 1 m, 砾石以次棱角状石英砾岩

为主. 上部为 2 m 浅紫红色细砂岩, 夹少量砾岩, 具平行层理, 厚 6.67 m.

沉积物下覆奥陶纪片麻状二长花岗岩. 岩石呈灰白色, 具变余花岗结构, 片麻状构造, 主要矿物组成为钾长石、斜长石、石英和黑云母, 黑云母已部分定向排列, 其中夹灰绿色辉绿岩脉, 脉宽约 0.5 m 左右. 片麻理产状为 50°∠8°.

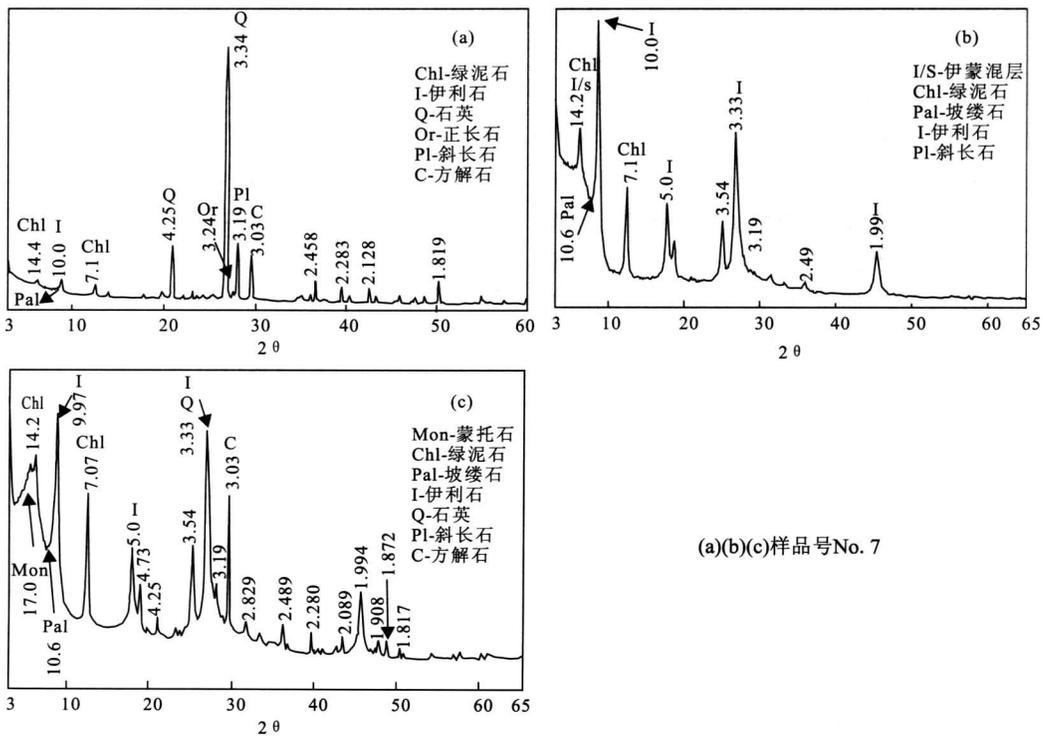
## 2 实验方法

### 2.1 样品制备

根据岩性、结构的差异特征, 在晚渐新世沉积物剖面的 10 个岩性层中, 分别采集新鲜的代表性样品 (图 2). 粘土矿物样品采用沉降法提取, 将样品研磨成颗粒细小的粉末, 置于烧杯中加水搅拌分散 2 h, 静置 24 h 后, 倒出上层溶液并用离心机分离, 获得提纯的粘土矿物样品.

### 2.2 X 射线衍射

沉积物样品矿物组成的测定采用全岩样品, 用玛瑙研钵将样品研磨成微米级粒径的细小颗粒, 然后置于样品架的凹槽中, 采用背压法制备试样; 粘土



(a)(b)(c)样品号No. 7

图 2 代表性沉积物样品(a)、粘土矿物代表性样品(b)和乙二醇饱和粘土矿物样品(c)的 X 射线衍射图

Fig. 2 The XRD pattern of the representative loess sample(a), the representative clay mineral fraction(b) and of the glycolated clay mineral fractions(c)

矿物的衍射分析则采用定向试样, 将粘土矿物样品涂布于玻璃片上, 待干燥固结后即可进行 X 射线衍射分析; 乙二醇饱和处理样品的制备, 系将涂布于玻璃片上的粘土矿物定向试样, 置于干燥皿中, 加入适量的乙二醇溶液, 在 70 °C 的条件下饱和约 3 h, 取出试样并进行 X 射线衍射分析. 测量工作在日本理学 Dmax IIIA 型 X 射线衍射仪上进行, 入射光源为 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 DS = SS = 1°; RS = 0.3 mm. 使用连续扫描方式, 扫描速度为 4°/min, 2 $\theta$  分辨率为 0.02°.

### 2.3 扫描电子显微分析

从剖面采集的样品中, 选取小块状的试样进行表面喷铂导电处理, 即可进行扫描电子显微分析. 实验在 JSM-5610 型扫描电子显微镜上进行, 加速电压为 20 kV, 束流大小在 1~3 nA. 扫描电子显微镜配备有能谱分析附件, 可以对微区进行化学成分分析. 在对微细矿物颗粒进行观察时, 能谱分析可以提供矿物颗粒的化学成分依据, 便于矿物的分析鉴定, 电子束斑大小约为 1  $\mu$ m.

## 3 结果与讨论

### 3.1 沉积物的矿物组成及成因条件

根据样品的 X 射线衍射分析结果, 本区渐新世沉积物的矿物组合类型基本相同, 主要矿物组分有石英、方解石、正长石、斜长石以及粘土矿物等, 个别层位可见石膏产出, 代表性样品的 X 射线衍射图如图 2a 所示. 为了进一步查明粘土矿物的矿物组成, 对沉积物样品进行粘土矿物的提纯并进行乙二醇饱和处理. 粘土矿物提纯样品及其乙二醇饱和产物的 X 射线衍射结果如图 2b, 2c 所示. 可以看出, 沉积物的粘土矿物组成主要包括伊利石、伊/蒙混层粘土矿物、绿泥石、高岭石和坡缕石, 不同时期沉积物中粘土矿物组成有明显的差别, 不同岩层的粘土矿物组合列于表 1.

此外, 从样品的图 2 中可以看到, 在 10 Å 衍射峰(伊利石的 001 衍射)的低度一侧, 存在一个衍射强度很弱的衍射峰, 其对应的晶面间距为 10.6 Å. 从乙二醇饱和处理后的粘土矿物提纯物的衍射结果可以看出, 该衍射峰的位置没有发生变化, 说明沉积物中含有含量较低的坡缕石.

在本区晚渐新世沉积物中, 石英、长石等是主要

表 1 不同层位粘土矿物组合及坡缕石的含量变化  
Table 1 Clay mineral assemblages and contents of palygors kite in the sediments

岩层	粘土矿物组合	坡缕石含量	备注
1	I, I/S, Ka, Chl, Pal	少	
2	I, I/S, Ka	/	
3	I, I/S, Ka	/	
4	I, I/S, Ka	/	I 伊利石
5	I, I/S, Chl, Pal	微	I/S 伊/蒙混层粘土
6	I, I/S, Chl, Pal	微	Ka 高岭石
7	I, I/S, Chl, Pal	微	Chl 绿泥石
8	I, I/S, Chl, Pal	少	Pal 坡缕石
9	I, I/S, Chl, Pal	少	
10	I, I/S, Chl, Pal	少	

的非粘土矿物碎屑成分, 这些矿物是抗风化能力很强的矿物组分, 而粘土矿物则主要为伊利石和伊/蒙混层粘土矿物, 高岭石、绿泥石和坡缕石出现在一定的层位中, 说明沉积物源地区处于干旱的气候环境 (Adatte and Keller, 1998). 高岭石是酸性火山岩或者变质岩在温暖、潮湿的气候条件下风化而成的产物, 它是最常见的土壤矿物之一, 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, 大量的降水促使离子的迁移和成壤作用, 而当气候转为干燥时, 高岭石形成的气候信息特征将很可能被保存下来 (Singer, 1984; Chamley, 1989). 伊利石/蒙脱石混层粘土矿物一般形成于中等程度化学风化的地表环境, 代表气候逐渐转为潮湿的环境 (Chamley, 1989).

伊利石一般形成于干冷的气候环境条件, 当其晶格混层中 K<sup>+</sup> 不断淋失, 可向蒙脱石演化. 如果气候变得湿热, 化学风化彻底, 碱金属(主要是 K<sup>+</sup>) 被带走, 伊利石将进一步分解形成高岭石. 因此, 气候干燥、淋滤作用弱对伊利石的形成和保存有利. 而绿泥石也是沉积物中的常见矿物, 可由重复的风化剥蚀而富集, 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)保存下来 (Ducloux et al., 1976). 因此, 绿泥石和伊利石矿物组合代表一种干旱的气候条件 (Winkler et al., 2002).

### 3.2 沉积物中坡缕石的特征

在扫描电子显微镜下, 沉积物主要由片状的粘土矿物和碎屑颗粒组成, 也常见晶形发育完好的自形方解石和石膏晶体(图 3a, 样品 2). 片状的粘土矿物多发育不规则的、残缺的边缘, 有的形成明显的港湾状或浑圆状. 碎屑颗粒形态不一, 但多具平滑的外

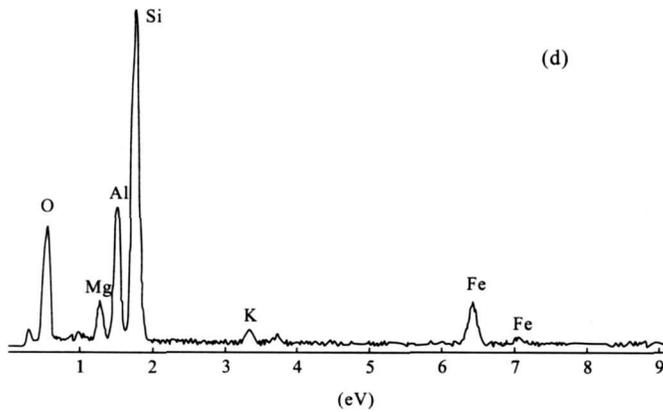
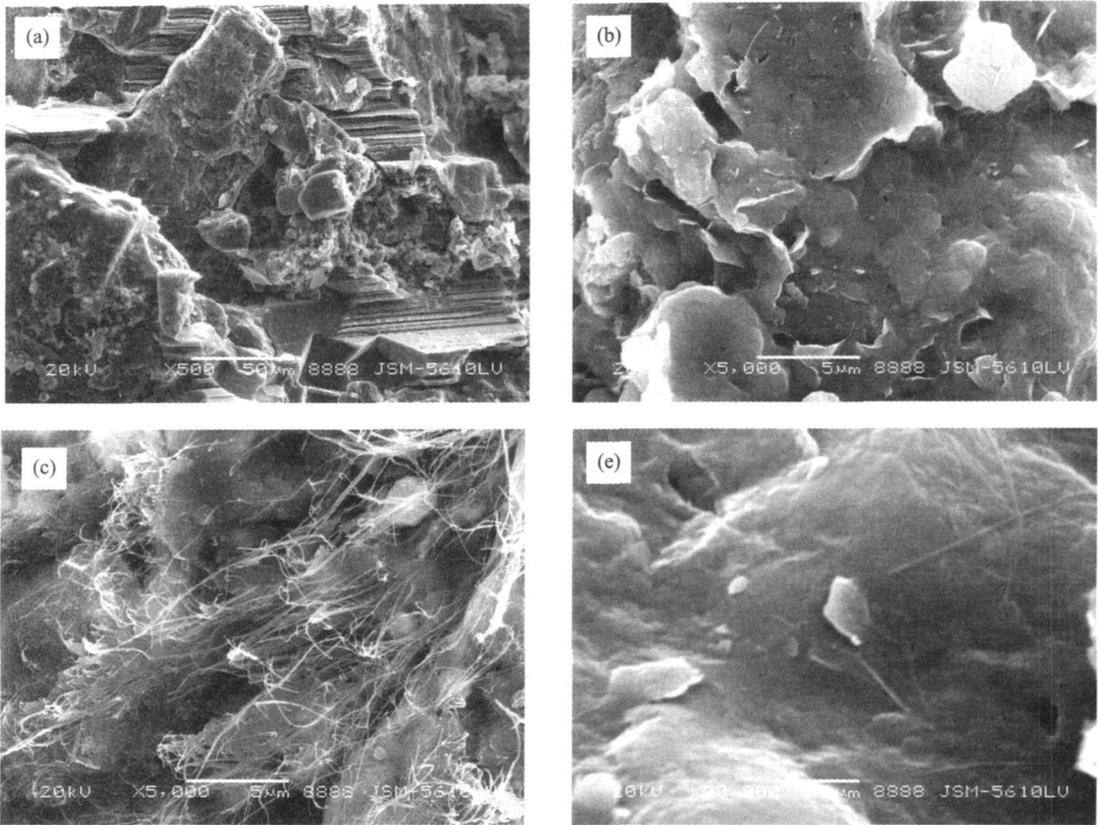


图 3 样品的扫描电子分析结果

Fig. 3 The SEM images of the sediments

(a) 板片状石膏晶体充填在碎屑颗粒的间隙; (b) 沉积物主要由片状的粘土矿物和碎屑颗粒组成, 粘土矿物多发育不规则的、残缺的边缘; (c) 自生坡缕石交代片状的伊/蒙混层粘土矿物; (d) 能谱分析结果证明丝状矿物集合体为坡缕石; (e) 碎屑成因坡缕石叠合在大片状粘土矿物颗粒的表面

形, 反映了这些碎屑颗粒是经历了一定的搬运过程而沉积的(图 3b, 样品 3). 而自形的方解石、石膏晶体则充填在碎屑颗粒的间隙之间, 说明方解石、石膏晶体是从溶液中结晶形成的, 具有明显的化学沉积特征.

扫描电子显微观察发现, 在沉积物的碎屑颗粒

间隙, 可见到丝状的细小颗粒集合体产出. 这些细丝状的晶体的长度一般在  $3 \sim 15 \mu\text{m}$  之间, 而晶体的宽度则多小于  $0.03 \mu\text{m}$ , 具有明显的一向生长的特征. 常呈束状排列, 不同排列方向的晶体颗粒相互缠绕、交织, 呈现出坡缕石特征的交织状结构(图 3c, 样品

7). 电子能谱分析结果表明, 细丝状集合体的化学组

成主要为 Si、Al、Mg、Fe, 含少量的 K、Ca, 与坡缕石的化学组成一致, 如图 3d 所示. 通过扫描电子显微观察, 同时结合 X 射线衍射分析结果, 对不同层位中坡缕石的含量进行比对分析, 结果列于表 1.

大量的观察研究发现, 发生向坡缕石晶体转化的这类粘土矿物晶片, 往往发育不平整的毛发状, 根据其晶体形态的特征可以判断, 这类粘土矿物颗粒即为伊/蒙混层粘土矿物 (Deconinck and Chamley, 1995). 细丝状坡缕石沿片状粘土矿物颗粒的边缘交代、生长, 交代强烈的晶片则基本由坡缕石晶体组成, 但坡缕石晶体集合体仍然保留着片状颗粒的外形, 而部分颗粒则可见逐渐向坡缕石转化 (图 3c). 根据坡缕石晶体交代粘土矿物颗粒的现象以及沉积物中坡缕石集合体的完整形态, 说明沉积物中的坡缕石具有自生作用的成因特征, 而具有细长丝状特征的坡缕石晶体则是从溶液中结晶沉积的坡缕石的特征标型 (Verrecchia and LeCoustumer, 1996; Hong *et al.*, 2007).

### 3.3 气候环境指示

在本区晚渐新世沉积物中, 下段岩层(层 1~4)中的粘土矿物组合为伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石; 中段岩层(层 5~7)为伊利石、伊/蒙混层粘土; 上段岩层(层 8~10)则为伊利石、伊/蒙混层粘土和绿泥石. 可以看出, 伊利石和伊/蒙混层粘土普遍存在于临夏盆地晚渐新世沉积物中, 伊/蒙混层粘土和高岭石是化学风化作用的产物, 而伊利石则主要为物理风化作用的产物, 在下段岩层中, 伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石的共存表明这些粘土矿物可能具有不同的来源. 扫描电镜观察结果表明, 沉积物中偶见呈平直细纤维状、以单颗粒形式产出的坡缕石, 这些颗粒往往与其他细小的粘土矿物颗粒混杂产出, 也可见其叠合在片状粘土矿物颗粒的表面, 具有明显的碎屑成因特征 (图 3e, 样品 1).

最新的研究结果表明, 在临夏盆地晚渐新世的沉积物中, 大部分细粒组分来源于亚洲内陆的风成黄土 (Garziona *et al.*, 2005). 坡缕石形成于干旱、半干旱的沙漠气候环境条件下, 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 (Verrecchia and LeCoustumer, 1996), 因此, 临夏盆地晚渐新世的沉积物中碎屑成因坡缕石的发现, 证明细粒组分来源于干旱气候地区的风成黄土. 伊利石和伊/蒙混层粘土贯穿于晚渐新世的沉积物剖面, 而且构成细粒组分粘土矿物的主体, 因此, 沉积

物中伊利石和伊/蒙混层粘土可能来源于风力搬运的外源区, 而高岭石则形成于表生风化作用. 从下段岩层粘土矿物组合伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石到上段岩层的伊利石、伊/蒙混层粘土和绿泥石, 反映在临夏盆地形成并开始接受沉积物之后, 气候演化经历从湿润到冷干的变化过程 (Sun and Wang, 2005). 此外, 从坡缕石在剖面中的分布特征也可以看出, 沉积物下段几乎没有坡缕石发育, 中段可见微量的坡缕石, 而在上段沉积物中, 则可见较为发育的坡缕石, 坡缕石在剖面中的分布特征与粘土矿物组合所反映的气候环境条件是一致的.

## 4 结论

(1) 在临夏盆地晚渐新世沉积物中, 下段岩层中的粘土矿物组合为伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石; 中段岩层的为伊利石、伊/蒙混层粘土; 而上段岩层则为伊利石、伊/蒙混层粘土和绿泥石, 反映在盆地形成之后, 气候演化经历从湿润→冷干的变化过程. 此外, 在沉积物下段仅见零星的碎屑坡缕石发育, 中段可见微量的坡缕石, 而在上段则可见较为发育的自生成因的坡缕石, 其分布特征与粘土矿物组合所反映的气候环境条件是一致的.

(2) 沉积物中的坡缕石主要为自生成因, 极少量具有碎屑成因. 自生成因的坡缕石呈细长丝状的形态特征, 往往沿片状的伊/蒙混层粘土矿物颗粒的边缘交代、生长; 沉积物中零星出现的、呈平直细纤维状的单颗粒形式产出的坡缕石, 往往与其他细小的粘土矿物颗粒混杂产出, 也可见其叠合在片状粘土矿物颗粒的表面, 具有明显的碎屑成因特征.

(3) 伊利石和伊/蒙混层粘土普遍存在于临夏盆地晚渐新世沉积物中, 伊利石、伊/蒙混层粘土和高岭石的共存表明这些粘土矿物具有不同的来源. 坡缕石形成于干旱、半干旱的沙漠气候环境条件下, 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, 临夏盆地晚渐新世的沉积物中碎屑成因坡缕石的发现, 证明细粒组分来源于干旱气候地区的风成黄土.

## References

- Adatte, T., Keller, G., 1998. Increased volcanism, sea level and climatic fluctuations through the K/T boundary: Mineralogical and geochemical evidences. Abstract, in

- ternational seminar on recent advances in the study of cretaceous sections. Oil and Natural Gas Corporation Limited Regional Geoscience Laboratory, Chennai, 2.
- Chamley, H., 1989. Clay sedimentology. Springer Verlag, Heidelberg, 623.
- 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.
- Decoinck, J. F., Chamley, H., 1995. Diversity of smectite origins in late Cretaceous sediments; Example of chalks from northern France. *Clay Minerals*, 30, 365 – 379.
- Ducloux, J., Meunier, A., Velds B., 1976. Smectite, chlorite and a regular interlayered chlorite vermiculite in soils developed on a small serpentinite body, Massif Central, France. *Clay Minerals*, 11, 121 – 135.
- Garziones C. N., Ikari M. J., Basu A. R., 2005. Source of oligocene to pliocene sedimentary rocks in the Linxia basin in northeastern Tibet from Nd isotopes; Implications for tectonic forcing of climate. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 1156 – 1166.
- Hong, H. L., Yu N., Xiao, P., et al., 2007. Authigenic Palygorskite in Miocene Sediments in Linxia basin, Gansu, northwestern China. *Clay Minerals*, 42, 43 – 58.
- Li, J. J., Feng, Z. D., Tang, L. Y., 1998. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 125 – 135.
- Shi, Y. F., Li, J. J., Li B. Y., 1998. Late cenozoic uplift and environmental change of Qinghai Tibet plateau. Guang dong Science & Technology Press, Guangzhou, 463 (in Chinese).
- Singer, A., 1984. The Paleoclimatic interpretation of clay minerals in Sediment A review. *Earth Science Reviews*, 21, 251 – 293.
- Singer, A., 1989. Palygorskite and sepiolite group minerals. In: Dixon, J. B., Weed, S. B., eds., Soil Science Society of America, Madison, WI, 829 – 872.
- Sun, X. J., Wang, P. X., 2005. How old is the Asian monsoon system Palaeobotanical records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222, 181 – 222.
- Verrecchia, E. P., LeCoustumer, M. N., 1996. Occurrence and genesis of palygorskite and associated clay minerals in a Pleistocene calcrete complex, SDE Boqer, Negev desert, Israel. *Clay Minerals*, 31, 183 – 202.
- Winkler, A., Wolf Welling T. C. W., Stattegger, K., 2002. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep sea basins since the middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG). *International Journal of Earth Science*, 91(1), 133 – 148.

#### 附中文参考文献

- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 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, 463.