

# 鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的分布特征及其 沉积-成岩环境意义

谢 渊<sup>1</sup>, 王 剑<sup>1</sup>, 李令喜<sup>2,3</sup>, 谢正温<sup>4</sup>, 邓国仕<sup>1</sup>, 李明辉<sup>1</sup>, 江新胜<sup>1</sup>

XIE Yuan<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LI Ling-xi<sup>2,3</sup>, XIE Zheng-wen<sup>4</sup>,

DENG Guo-shi<sup>1</sup>, LI Ming-hui<sup>1</sup>, JIANG Xin-sheng<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3. 中国石化中原油田分公司, 河南 濮阳 457001; 4. 中国石油川庆钻探工程公司, 四川 成都 610051

1. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;*  
2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*  
3. *SINOPEC Zhongyuan Oilfield Sub-Company, Puyang 457001, Henan, China;*  
4. *CNPC Sichuan-Changqing Drilling Engineering Company, Chengdu 610051, Sichuan, China*

**摘要:**系统地分析了鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的特征及其沉积、成岩环境意义。研究表明:白垩系砂岩、泥质岩的粘土矿物组合以 I+C+I/S 型、I+C 型为主,具有高伊利石含量,较高绿泥石、伊/蒙混层矿物含量的粘土矿物组成特点;其中泥质岩粘土矿物主要为陆源碎屑成因,次为沉积成岩过程中形成的自生粘土矿物,而砂岩粘土矿物兼有陆源碎屑成因和沉积成岩过程自生成因的特征;白垩系沉积时气候总体特征为干旱—半干旱,但局部时段发生干—湿气候波动而处于短暂的湿热气候环境;白垩系沉积物源富含长石等硅酸盐矿物,沉积物质主要自北、南、西向盆地内部搬运沉积;白垩系沉积和埋藏成岩过程中水介质的整体上具有盐度较高,偏碱性,富 K<sup>+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的特点,且总体上盆地南部水介质中的这些指标都高于北部。

**关键词:**鄂尔多斯盆地;白垩系;粘土矿物;古气候;物源;沉积-成岩环境水化学性质

中图分类号:P534.53;P578.962 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2010)01-0093-12

**Xie Y, Wang J, Li L X, Xie Z W, Deng G S, Li M H, Jiang X H. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1):93-104**

**Abstract:** The paper analyses distribution of Cretaceous clay mineral and its sedimentary and diagenetic significance in Ordos basin. The clay mineral components of the Cretaceous sandstone and mudstone samples are dominated by illite, chlorite and illite/smectite mixed layers in Ordos basin. The clay minerals of mudstones are mainly from siliciclastic deposits, and a small amount is authigenic mineral assemblage formed during deposition and diagenesis, however the clay minerals of sandstones are both from siliciclastic deposits and authigenic mineral assemblage in diagenesis. The clay components and distribution of the sandstones and mudstones show that Ordos basin has totally experienced arid-semiarid climate during the Cretaceous but occasionally humid climate, and the Cretaceous deposits have rich silicate minerals such as feldspar, and the sediments are sourced mainly from the northern, southern and western margins of the Ordos basin. The salinity of sedimentary and diagenetic water bodies both are high, and are rich in K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. It generally shows that the salinity is higher in the south than in the north and the K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> contents are richer in the south than in the north.

**Key words:** Ordos basin; Cretaceous; clay minerals; Paleoclimate; sources; hydrochemical quality of sedimentary and diagenetic environment

收稿日期:2009-11-23;修订日期:2009-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:40302020、40872085)、“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金课题、中国地质调查局国土资源大调查项目(编号:200112100006、1212010331302ZT1-2)、四川省学术技术带头人培养资金重点项目和四川省杰出青年学科带头人培养计划项目(编号:07ZQ026-037)联合资助

作者简介:谢渊(1971-),男,博士,研究员,从事油气地质、沉积地质及水文地质调查研究。E-mail:chdx Yuan@sina.com

粘土矿物广泛地分布于各类沉积物和沉积岩中,是一定气候条件、水介质条件、物源条件下受沉积作用、成岩作用综合影响的产物,因此通过对粘土矿物及其组合的研究可以揭示古气候、物源、沉积环境和成岩环境的特征,帮助再现沉积作用、成岩作用的过程。

20世纪60—70年代,人们就试图利用海洋沉积中的粘土矿物重建古气候、恢复古环境<sup>[1-4]</sup>,至今海洋沉积中粘土矿物研究已经成为重建古气候、恢复大陆古环境的重要途径,并取得很多成果<sup>[5-12]</sup>。80年代后期以来,利用粘土矿物对湖泊和河流沉积环境演变、沉积物源及构造背景的研究成为十分活跃的领域<sup>[13-24]</sup>;利用粘土矿物研究黄土和古土壤形成的气候环境及其演变也取得了重要进展<sup>[25-26]</sup>;根据粘土矿物进行储集岩沉积环境分析、成岩阶段划分、热演化模拟、储集性研究、油气生成与运移分析、盖层评价、测井解释及储层敏感性评价,已成为沉积地质、石油地质研究不可或缺的重要内容<sup>[19,27-38]</sup>;在水文地质研究中,粘土矿物研究对地下水水化学形成演化模拟、地下水盐度和酸碱度分析也发挥了重要作用<sup>[39]</sup>,但相对在其他领域的应用研究而言,水文地质中粘土矿物的研究应用还不广泛。目前普遍认为粘土矿物具有标识古气候的重要意义<sup>[40]</sup>,对沉积、成岩环境及其水化学演变的恢复也具有重要作用,成为上述专业领域研究的重要手段和内容。

近年来,笔者在开展鄂尔多斯盆地白垩系沉积岩相古地理及其与地下水关系的多个项目中,利用取自水文钻孔和露头剖面的大量岩石样品,首次较详细地对白垩系粘土矿物的发育及分布特征进行了研究,认为粘土矿物及其组合不但对白垩纪沉积环境、气候条件具有重要的指示意义,同时能够提供白垩系成岩环境地下水化学性质及其演变的重要信息。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国典型的富集石油、天然气、煤炭、铀矿等多种能源资源的盆地,也是一个巨型的地下水盆地。在分布面积超过 $13\times 10^4\text{m}^2$ 、厚逾千米的白垩系碎屑岩系中,自下而上发育的洛河组( $K_{1l}$ ,包括原宜君组 $K_{1y}$ 和洛河组 $K_{1l}$ )、环河组( $K_{1h}$ ,包括原华池组和环河组)、罗汉洞组( $K_{1lh}$ )及泾川组( $K_{1j}$ )都不同程度地赋存着可资开发利用的地下水<sup>[41-48]</sup>。

然而,鄂尔多斯盆地白垩系发育河流、沙漠、湖泊等多种相类型的碎屑岩和泥质岩沉积,经历了复杂的沉积和成岩过程,白垩系水文地质结构、地下水赋存条件及地下水水化学的形成演化复杂<sup>[41-50]</sup>,沉积物源、古气候、沉积-成岩环境水介质化学性质对地下水水化学的形成演化影响明显。因此,深入分析沉积物源、古气候、沉积-成岩环境水介质化学性质,既对白垩系沉积岩相古地理演化和成岩过程研究具有重要的理论价值,又对白垩系地下水的勘查开发利用具有重要的现实意义。

本文通过对基本覆盖全盆地的白垩系水文钻孔和露头剖面的岩石样品粘土矿物的X射线衍射分析,结合大量岩石薄片、扫描电镜、阴极发光等分析鉴定资料,系统地分析了白垩系粘土矿物的分布特征,深入研究了白垩系沉积时的气候、水文及成岩环境水化学性质,为勘查、开发、利用白垩系地下水提供了科学依据。

文中样品的全岩组分和粘土矿物组分的X射线衍射分析由中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院采用X射线衍射(XRD)分析技术进行分析测试。全岩组分检测依据为ICDD-JCPDS,检测温度为 $20^\circ\text{C}$ 、湿度为60%RH;粘土矿物组分定量分析检测依据为SY/T 5163-1995,检测温度为 $18^\circ\text{C}$ 、湿度为65%RH。

## 2 白垩系粘土矿物的分布特征

通过对全盆地主要的白垩系水文勘探钻孔(图1)岩心和露头剖面的调查采样测试,获得163件白垩系(不含泾川组)砂岩全岩组分(包括粘土矿物)、186件白垩系(不含泾川组)砂岩粘土矿物组分数据和181件(不含泾川组)白垩系泥质岩粘土矿物组分测试资料,结合大量岩石薄片镜下观察、扫描电镜、阴极发光和电子探针分析测试资料,较系统地揭示了鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩和砂岩的粘土矿物发育及分布特征。

### 2.1 白垩系泥质岩粘土矿物的分布特征

对覆盖全盆地的181件白垩系泥质岩粘土矿物组分测试得出,几乎每件岩样中都含较多的伊利石和绿泥石,含量分别为52%、25%;大多数样品都含伊/蒙混层矿物,平均含量为21%,其中蒙脱石混层含量主要局限于75%左右和10%左右2个范围内,一般地表样品中蒙脱石混层的含量高于埋藏样品,

平均含量为 32%;个别样品(25 件,占总数的 14%)中见少量高岭石,平均含量仅 2% (表 1);仅在盆地北部 B7 孔环河组泥岩中见到少量绿/蒙混层矿物(B7-GP5, 环河组);所有样品中均未发现蒙脱石。

白垩系不同地层泥质岩的粘土矿物组分组成基本相似(表 2),但各组分含量存在差别,且均未发现有蒙脱石和绿/蒙混层矿物。自下而上,洛河组 24 件泥质岩样品的粘土矿物中伊利石含量为 51%,绿泥石含量为 21%,大多数样品含伊/蒙混层矿物,平均含量为 24%,其中 S 混层含量为 31%,个别样品(15 件,占总数的 31%)中见少量高岭石,平均含量仅为 4%;120 件环河组泥质岩样品的粘土矿物中伊利石、绿泥石分布普遍,含量分别为 52% 和 26%,2/3 的样品含伊/蒙混层矿物,平均含量为 21%,其中 S 混层含量为 32%,个别样品(10 件,占总数的 8%)中见少量高岭石,平均含量仅 1%;12 件罗汉洞组泥质岩样品中每件都含伊利石和绿泥石,平均含量分别为 56%和 24%,60%的样品都含伊/蒙混层矿物,平均含量为 20%,其中 S 混层含量为 26%。

统计分析同时发现,不同地区白垩系泥质岩的粘土矿物组分基本相似,但含量存在差别。盆地北部 100 件泥质岩样品几乎每件都含伊利石、绿泥石粘土矿物,平均含量分别为 47%、26%;3/4 的样品都含伊/蒙混层矿物,平均含量为 25%,其中 S 混层含量为 35%;在个别样品(16 件,占总数的 16%)中见少量高岭石,平均含量仅为 2%。盆地中部 32 件泥质岩样品每件都含有伊利石、绿泥石粘土矿物,含量分别为 55%、25%,3/4 的样品都含伊/蒙混层矿物,平均含量 18%,其中 S 混层含量为 33%;5 件样品(占总数的 16%)见少量高岭石,含量仅 2%。盆地南部 49 件泥质岩样品几乎每件都含伊利石、绿泥石粘土矿物,伊利石含量增高到 60%,而绿泥石含量降低到 23%;只有 1/2 的样品见伊/蒙混层矿物,平均含量降低为 16%,其中伊/蒙中 S 混层含量为 27%;仅 4

件样品(占总数的 8%)见少量高岭石,平均含量仅为 1%。

进一步的统计分析表明,尽管不同地区环河组

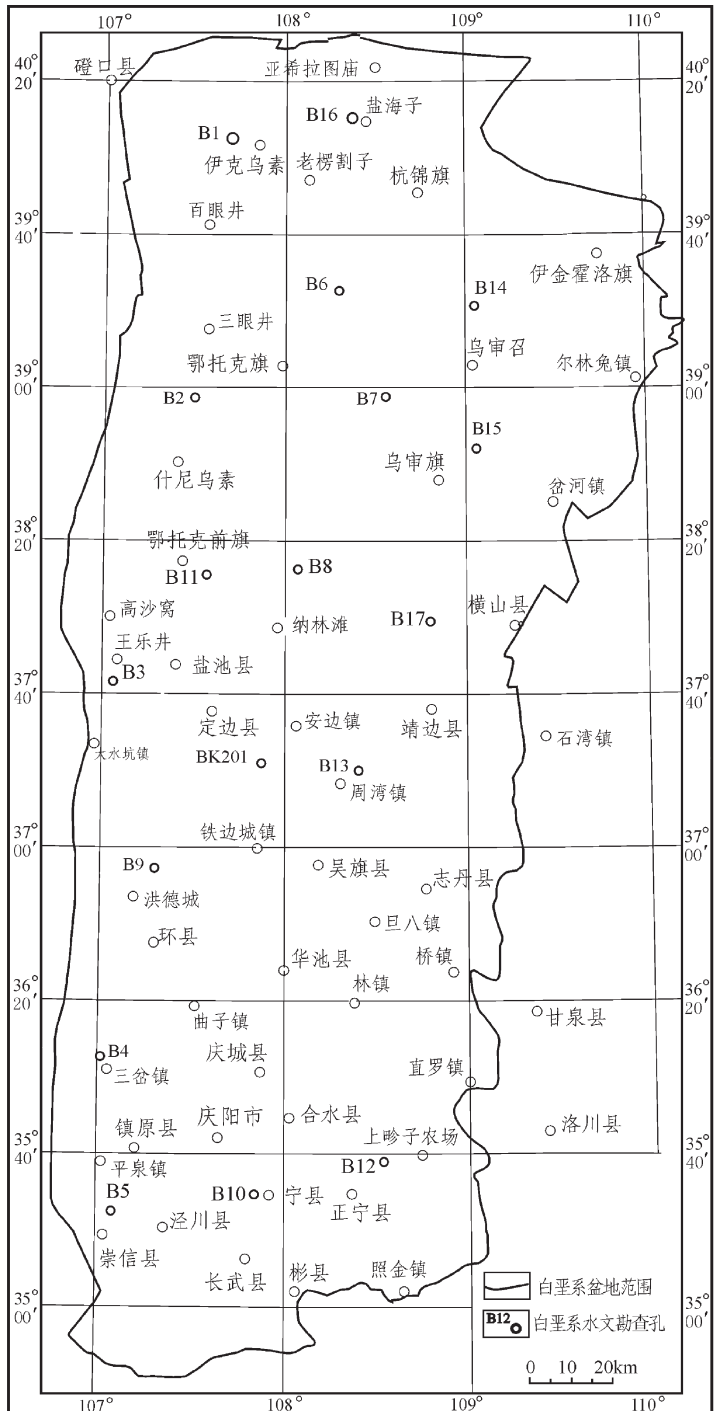


图 1 鄂尔多斯白垩系盆地的范围和主要采样水文钻孔的位置

Fig. 1 Distribution of the Cretaceous and the hydrogeological drilling wells in the Ordos basin

表1 白垩系及各组泥质岩粘土矿物平均含量

Table 1 Abundance of clay minerals in the mudstones from Cretaceous and different formations

地 层	蒙脱石 (S) /%	高岭石 (K) /%	伊利石 (I) /%	绿泥石 (C) /%	伊/蒙混层 (I/S) /%	绿/蒙混层 (C/S) /%	I/S 的 S 含量/%
白垩系 (181 件)		2	52	25	21		32
洛河组 (49 件)		4	51	21	24		31
环河组 (120 件)		1	52	26	21		32
罗汉洞组 (12 件)			56	24	20		26

表2 全盆及不同地区白垩系泥质岩粘土矿物平均含量

Table 2 Abundance of clay minerals in the Cretaceous mudstones  
in Ordos basin and different areas

地 区	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
全盆 (181 件)		2	52	25	21		32
北部 (100 件)		2	47	26	25		35
中部 (32 件)		2	55	25	18		33
南部 (49 件)		1	60	23	16		27

表3 不同地区环河组泥质岩粘土矿物平均含量

Table 3 Abundance of clay minerals in the mudstones  
from the Cretaceous Huanhe Formation in different areas of Ordos basin

地 区	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
北部 (51 件)		1	44	29	26		40
中部 (28 件)		2	52	26	20		31
南部 (41 件)		1	60	24	15		27

泥质岩的粘土矿物组分基本相似,但含量仍存在一些差别(表3)。盆地北部51件环河组泥质岩样品每件都含伊利石、绿泥石,平均含量分别为44%、29%;3/4的样品含伊/蒙混层矿物,平均含量为26%,其中S混层含量为40%;仅5件样品(占总数的10%)中见少量高岭石,平均含量仅为1%。盆地中部28件泥质岩样品的伊利石、绿泥石平均含量分别为55%、25%,伊利石含量明显增高,而绿泥石含量降低;71%的样品含伊/蒙混层矿物,平均含量为18%,其中S混层含量为31%;仅3件样品(占总数的10%)中见少量高岭石,平均含量仅2%。盆地南部41件泥质岩样品中每件都含伊利石、绿泥石粘土矿物,平均含量分别为60%、24%,可见盆地范围内南部泥质岩中伊利石含量最高;仅1/2样品含伊/蒙混层矿物,且平均含量降低为15%,其中伊/蒙中S混层含量为27%;在2件样品(占总数的5%)中见少量高岭石,

平均含量仅为1%。

上述分析表明,无论是不同地区还是不同地层,白垩系泥质岩粘土矿物组合均以I+C+I/S型为主,其次为I+C型,均普遍含有伊利石、绿泥石,均未发现蒙脱石和绿/蒙混层矿物,在大多数样品中分布有20%左右的伊/蒙混层矿物,仅在个别样品中可见少量高岭石。

## 2.2 白垩系砂岩粘土矿物的分布特征

对覆盖全盆地的163件白垩系(不含泾川组)砂岩样品全岩组分X射线衍射分析得出,白垩系砂岩中粘土矿物含量平均为6%,其中洛河组和罗汉洞组砂岩中粘土矿物含量低于白垩系砂岩平均值,分别为3%、4%,而环河组砂岩中粘土矿物含量偏高,为9%(表4,图2)。

进而对186件白垩系(不含泾川组)砂岩样品的粘土矿物组分进行X射线衍射分析得出,每件砂岩



表 4 鄂尔多斯盆地白垩系砂岩粘土矿物平均含量

Table 4 Contents of clay mineral in the sandstones from Cretaceous in Ordos basin

地 层	白垩系	洛河组	环河组	罗汉洞组
样品数/件	163	80	73	10
含量范围/%	0~30	0~21	0~30	0~18
平均值/%	6	3	9	4

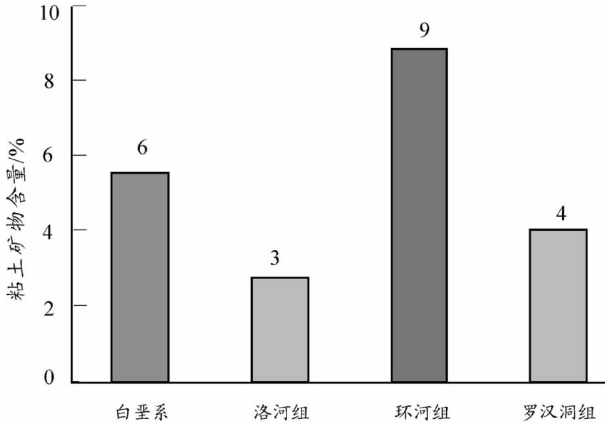


图 2 鄂尔多斯盆地白垩系及各组砂岩粘土矿物平均含量分布柱状图

Fig. 2 Histograms of the average contents of clay minerals of Cretaceous and its formations sandstones in Ordos basin

样品都含伊利石, 含量为 42%;93%的样品含绿泥石, 平均含量为 24%;77%的样品含伊/蒙混层矿物, 平均含量为 29%, 其中 S 混层含量主要局限于 75% 左右与 10%左右 2 个范围内, 一般地表样品中蒙脱石混层含量高于埋藏样品, S 混层平均含量为 47%, 高于泥质岩伊/蒙混层矿物中蒙脱石的平均含量;25 件样品(占总数的 15%)中见少量高岭石, 平均含量仅 4%;仅 2 件样品含蒙脱石, 含量均为 100%;所有样品中均未见绿/蒙混层矿物(表 5)。总体上, 白垩系砂岩中粘土矿物组成与泥质岩类似, 仍以伊利石

为主, 次为绿泥石、伊/蒙混层矿物, 高岭石、蒙脱石及绿/蒙混层矿物含量极少。

对白垩系不同地层砂岩的粘土矿物组分的统计分析(表 5)表明, 各组砂岩均未见绿/蒙混层矿物, 粘土矿物组合类型基本一致, 但各组分的含量有些差别。洛河组 91 件砂岩样品中, 几乎都含伊利石, 含量为 41%;89%的样品含绿泥石, 平均含量为 22%;75%的样品含伊/蒙混层矿物, 平均含量为 30%, 其中 S 混层含量为 46%;21 件样品(占总数的 23%)中见少量高岭石, 平均含量为 5%;仅 2 件样品含蒙脱石, 含量均为 100%。环河组 79 件砂岩样品几乎全都含伊利石、绿泥石, 含量较洛河组砂岩有所增加, 平均值分别为 43%、27%;76%的样品含伊/蒙混层矿物, 平均含量为 28%, 其中 S 混层含量为 47%;仅 4 件样品(占总数的 5%)见少量高岭石, 平均含量为 2%;所有样品均不含蒙脱石。罗汉洞组 16 件砂岩样品几乎都含伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物, 平均含量分别为 43%、17%、37%, 绿泥石含量较洛河组、环河组减少, 而伊/蒙混层矿物含量增加, 且其中 S 混层含量较高, 为 55%;仅 3 件样品(占总数的 19%)中见少量高岭石, 平均含量为 3%;未见有蒙脱石分布。

进一步统计(表 6)表明, 不同地区白垩系砂岩的粘土矿物组成基本一致, 但各组分的含量有些差别。盆地北部 114 件白垩系砂岩几乎每件样品都含伊利石、绿泥石粘土矿物, 平均含量分别为 41%、24%;大多数样品都含伊/蒙混层矿物, 平均含量为 31%, 其中 S 混层含量为 49%;在个别样品中见到少量高岭石, 平均含量仅为 3%。盆地中部 21 件砂岩样品都含有伊利石、绿泥石粘土矿物, 含量分别为 40%、18%;大多数样品都含伊/蒙混层矿物, 平均含量 34%, 其中 S 混层含量为 51%;少数样品见少量高岭石, 含量仅 3%。盆地南部 51 件砂岩样品仍均含有

表 5 全盆白垩系及各组含水层砂岩粘土矿物平均相对含量

Table 5 Relative abundance of clay minerals in the sandstones from Cretaceous and different formations in Ordos basin

地 层	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
白垩系 (186 件)	1	4	42	24	29		47
洛河组 (91 件)	2	5	41	22	30		46
环河组 (79 件)		2	43	27	28		47
罗汉洞组 (16 件)		3	43	17	37		55

伊利石、绿泥石粘土矿物,含量分别增高到46%、25%;大多数样品见伊/蒙混层矿物,平均含量降低到24%,其中伊/蒙中S混层含量也降低到40%;仅少量样品见少量高岭石,平均含量仅为5%。

对洛河组砂岩粘土矿物组成的统计分析(表7)表明,不同地区洛河组砂岩的粘土矿物组合类型也大体一致,但各组分含量略有变化。盆地北部58件洛河组砂岩样品均含伊利石,平均含量为42%;91%的样品含绿泥石,平均含量为23%;74%的样品含伊/蒙混层矿物,平均含量为29%,其中S混层含量为45%;在22%的样品(13件)中见少量高岭石,平均含量4%;仅1件样品含100%的蒙脱石矿物。盆地中部7件洛河组砂岩除了1件样品含100%的蒙脱石矿物外,其他6件样品不含蒙脱石,而都含有伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物,含量分别为33%、12%、40%,伊/蒙混层矿物含量明显增高,且其中S混层

含量高达63%;仅1件样品含10%的高岭石组分。盆地南部26件洛河组砂岩样品均不含蒙脱石矿物,几乎都含较多的伊利石,平均含量为42%;85%的样品含有绿泥石,含量为22%;73%的样品含伊/蒙混层矿物,含量为27%,其中S混层含量为43%;有7件样品(占总数的27%)含9%的高岭石。

对环河组砂岩粘土矿物组成的统计(表8)表明,不同地区环河组砂岩均无蒙脱石、绿/蒙混层矿物,仍主要由伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物组成,但含量存在地区性的差别。盆地北部45件环河组砂岩样品几乎都含伊利石、绿泥石粘土矿物,平均含量分别为41%、27%;82%的样品含伊/蒙混层矿物,平均含量较高,为30%,其中S混层含量高达53%;仅2件样品(占总数的4%)中见少量高岭石,平均含量仅2%。盆地中部13件砂岩样品都分布有伊利石、绿泥石粘土矿物,含量分别为40%、22%,85%的样品含

表6 不同地区白垩系含水砂岩粘土矿物平均含量

Table 6 Relative abundance of clay minerals in the Cretaceous water-bearing sandstones in different areas of Ordos basin

地 区	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
全盆 (186 件)	1	4	43	23	29		47
北部 (114 件)	1	3	41	24	31		49
中部 (21 件)	5	3	40	18	34		51
南部 (51 件)		5	46	25	24		40

表7 不同地区洛河组含水砂岩粘土矿物平均相对含量

Table 7 Relative abundance of clay minerals in the water-bearing sandstones from the Cretaceous Luohe Formation in different areas of Ordos basin

地 区	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
全盆 (91 件)	2	5	41	22	30		46
北部 (58 件)	2	4	42	23	29		45
中部 (7 件)	14	1	33	12	40		63
南部 (26 件)		9	42	22	27		43

表8 不同地区环河组含水砂岩粘土矿物平均含量

Table 8 Relative abundance of clay minerals in the water-bearing sandstones from the Cretaceous Huanhe Formation in different areas of Ordos basin

地 区	S/%	K/%	I/%	C/%	I/S/%	C/S/%	I/S 中 S 含量/%
全盆 (79 件)		2	43	27	28		47
北部 (45 件)		2	41	27	30		53
中部 (13 件)		4	40	22	32		49
南部 (21 件)			52	28	20		34

伊/蒙混层矿物,含量较高,平均为 32%,其中 S 混层含量为 49%;仅 2 件样品(占总数的 15%)见少量高岭石,含量为 4%。盆地南部 21 件环河组砂岩样品都不含蒙脱石和高岭石,都含有伊利石、绿泥石,二者的含量都较盆地中部有所增加,分别为 52%、28%;85%的样品见伊/蒙混层矿物,平均含量降低到 20%,且其中 S 混层含量降低到 34%。

上述分析表明,无论是不同地区还是不同地层,白垩系砂岩的粘土矿物组合类型与泥质岩石类似,仍以 I+C+I/S 型为主,次为 I+C 型,均普遍含有伊利石、绿泥石,70%以上的样品都含伊/蒙混层矿物,均未见有绿/蒙混层矿物,只有少量样品见少量高岭石,蒙脱石分布极为稀少。

### 3 白垩系粘土矿物的沉积-成岩环境响应

#### 3.1 白垩系粘土矿物的成因

一般地,沉积岩(物)中的粘土矿物按成因可分为陆源碎屑粘土矿物与沉积成岩过程中新形成的自生粘土矿物 2 类<sup>[27-28,36]</sup>,武羨慧等<sup>[51]</sup>把沉积成岩过程中形成的粘土矿物进一步细分为原生(自生)、次生(后生)粘土矿物 2 类,认为前者是沉积期及成岩早期所形成的粘土矿物,后者是成岩晚期及以后在次生作用下新形成的粘土矿物。人们普遍认为,陆源碎屑粘土矿物主要取决于古气候、物源和沉积环境,而沉积成岩过程中新形成的自生粘土矿物主要受包括酸碱度在内的成岩流体物理化学性质的控制<sup>[36]</sup>。因此,利用粘土矿物分析古气候、物源、沉积环境、成岩环境及其水介质条件,必须首先区分粘土矿物的成因和形成时期。

##### (1) 白垩系泥质岩粘土矿物的成因

根据大量岩石薄片、扫描电镜观察,鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩中伊利石多呈碎屑板片状或弯曲片状,晶形不完整,轮廓圆滑清晰,略具定向性;绿泥石主要呈片状或薄板状,厚度较大,晶体边缘不平直;伊/蒙混层表现为边缘模糊的半透明叶片或鳞片状。

一般而言,伊利石是粘土矿物中最稳定的物相,可在不同气候条件和不同碱性环境中形成,属于典型的风化产物,目前比较普遍地认为伊利石主要来自陆地,形成于物理风化较强的气候环境,风的吹扬为其主要输送方式<sup>[12]</sup>。

从鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩伊利石含量并未随地层变老而增加(表 1)的事实,以及白垩系泥质

岩中伊利石的含量(52%)高于砂岩中伊利石的含量(42%)的统计资料(表 1、表 5)和伊利石的微观特征来看,白垩系泥质岩伊利石等粘土矿物的形成并非主要受成岩作用的控制,主要为陆源碎屑成因的,其组合及分布主要反映了当时的气候、物源和沉积环境的特征。

##### (2) 白垩系砂岩粘土矿物的成因

白垩系砂岩中伊利石有的呈弯曲片状和条状、晶形不完整、轮廓圆滑、略具定向性,以薄膜、衬边形式分布于颗粒表面,可见与毛刺状埃洛石相伴(图版 I-1、3、6、8、10、11);有的呈毛发状、细丝状、蜂窝状(图版 I-4、7、9、12),以孔隙充填形式存在,偶见与蒙脱石相伴,表明砂岩中伊利石粘土矿物既有陆源碎屑成因的,也有沉积成岩过程中自生成因的,后者可能为主。砂岩中绿泥石有的呈片状或薄板状,晶体边缘不平直;有的呈花朵状(图版 I-2、5),可见长石溶蚀残余,表明砂岩中绿泥石粘土矿物的成因与伊利石大致相似,即既有陆源碎屑成因,也有沉积成岩过程中的自生成因,后者可能为主。结合砂岩中伊利石的含量并未随地层变老而增加、伊/蒙混层中蒙脱石层的含量又随地层变老而减少的(表 5)的事实,白垩系砂岩中的粘土矿物既有陆源碎屑成因的,也有沉积成岩过程中自生成因的,其组合及分布是沉积时的气候、物源、沉积环境及成岩环境水介质等条件综合影响的结果。

#### 3.2 粘土矿物与沉积期古气候的关系

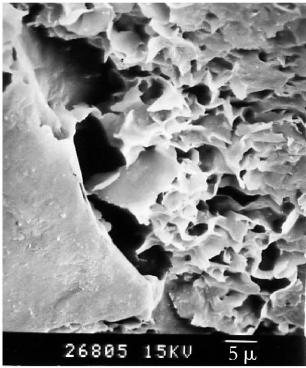
前述分析得出白垩系泥质岩的粘土矿物主要为陆源沉积成因的,砂岩的粘土矿物既有陆源碎屑成因的又有沉积成岩成因的,因此粘土矿物的组合类型,尤其是泥质岩的粘土矿物组成能够较好地反映沉积当时的气候条件。

##### (1) 粘土矿物与古气候的关系

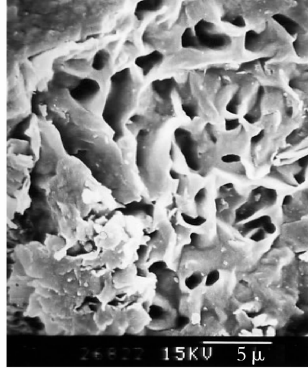
一般认为,高岭石多分布于潮湿的热带和亚热带<sup>[28,40,52]</sup>地区,多由长石淋滤风化而成<sup>[12]</sup>,也可经风化和低温热液交代变化形成<sup>[10]</sup>,刘东生等<sup>[25]</sup>研究证实了中国洛川塬低含量高岭石的黄土层形成于化学风化和淋滤作用都较弱的干冷气候环境。沉积地层中高含量的蒙脱石常与温湿-寒冷气候相联系,在温带半湿润区沉积物中含量比较高,其形成与水解强度有关,只要有充足的水分,火山物质就可以分化成蒙脱石<sup>[52]</sup>,且其含量随气候变热而减少<sup>[53]</sup>。绿泥石一般只能在化学风化作用较弱的地区(如干旱的地表



图版 I Plate I



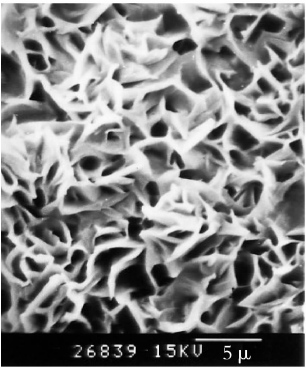
1. B1孔洛河组砂岩(B1-b73)  
伊利石及其晶间孔(2000×)



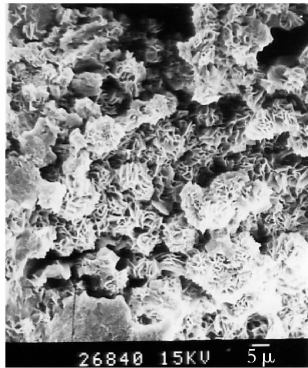
2. B2孔洛河组砂岩(B2-b8)  
长石溶蚀形成绿泥石(1000×)



3. B2孔洛河组砂岩(B7-b15)  
粒表伊利石衬边(1500×)



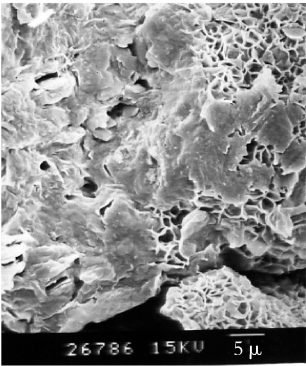
4. ZX2孔洛河组砂岩(ZX2-b11)  
蜂窝状伊利石(4200×)



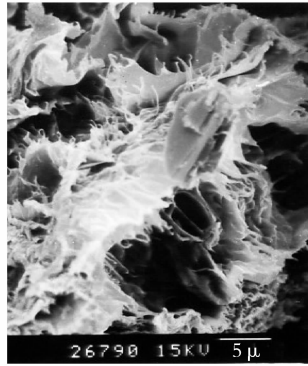
5. ZX2孔洛河组砂岩(ZX2-b11)  
花朵状绿泥石(1000×)



6. B1孔环河组砂岩(B1-b23)  
粒表伊利石及晶间孔(4300×)



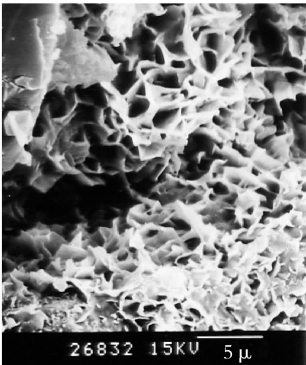
7. B1孔环河组砂岩(B1-b34)  
粒表伊利石和蒙脱石(2000×)



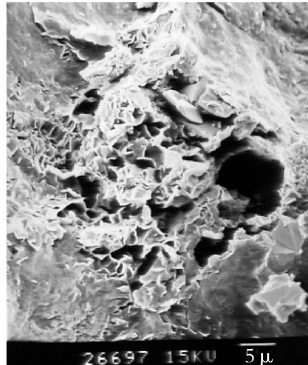
8. B1孔环河组砂岩(B1-b53)  
伊利石、埃洛石及晶间孔(3000×)



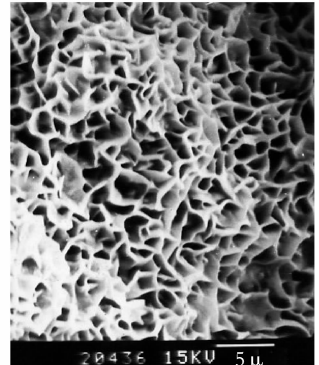
9. B7孔环河组砂岩(B7-b1)  
细丝状伊利水云母(1200×)



10. ZX2孔环河组砂岩(ZX2-b2)  
伊利石及其晶间孔(4000×)



11. B1孔罗汉洞组砂岩(B1-b9)  
伊利石充填粒内孔(2200×)



12. B3孔罗汉洞组砂岩(B3-b12)  
粒表伊利石及微孔(3500×)



或冰川)保存下来,与高岭石含量多呈互为消长的变化关系,二者分别代表 2 种截然相反的气候环境。伊利石则主要形成于干冷气候环境<sup>[5,15]</sup>,以伊利石占优势的粘土矿物组合反映了干旱—半干旱气候环境<sup>[2]</sup>。因此,绿泥石和伊利石含量增加代表逐渐变干旱的气候条件<sup>[4,17,22]</sup>,可以认为粘土矿物中绿泥石占一定的比例反映当时气温较高、相对干旱的古气候环境<sup>[23]</sup>。袁鹤然等<sup>[23]</sup>认为,一般地,K+I 型粘土矿物组合代表湿润型气候,I+K+S 型粘土矿物组合代表半干旱型气候,而 I+C+K(极少)型粘土矿物组合往往代表干旱型气候<sup>[23]</sup>。

人们研究还发现,现代土壤中粘土矿物的含量与气候带之间存在明显的关系,高岭石主要分布在低纬地区,蒙脱石在南半球的含量高于北半球,绿泥石主要分布在高纬度和沙漠地区,伊利石主要分布在中纬度干旱—半干旱地区。

### (2) 白垩纪古气候的恢复

鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩和砂岩的粘土矿物组合类型均以 I+C+I/S 型、I+C 型为主,粘土矿物组成呈现高伊利石含量、较高绿泥石和伊/蒙混层矿物含量、缺少高岭石、极少见蒙脱石的分布特点,反映出白垩纪沉积盆地总体处于干旱—半干旱气候环境,淋滤作用和化学风化作用较弱,而物理风化作用较强;局部存在高岭石,说明在总体干旱的气候条件下仍有局部时段发生气候波动,出现短暂的湿热气候。

### 3.3 粘土矿物与沉积物源的关系

沉积物源是影响沉积岩(物)粘土矿物组成的重要地质因素之一,无论是陆源碎屑粘土矿物,还是沉积成岩自生粘土矿物,其粘土矿物的组分含量和组合类型都直接或间接地受到沉积物源的影响,因此分析粘土矿物的特征可以追溯沉积物源条件及物质沉积搬运的情况。

#### (1) 粘土矿物与物源和沉积搬运的关系

一般来说,蒙脱石与火山物质有着极为密切的关系,通常是暖湿气候条件下火山岩、岩浆岩、变质岩中的辉石、角闪石、黑云母矿物及其风化产物的低温自生成岩矿物<sup>[2,4,53]</sup>。高岭石是富含硅酸盐的火成岩、变质岩风化的产物,主要是由长石、云母和辉石<sup>[40]</sup>在暖湿气候条件下酸性介质中经强烈风化淋滤或低温热液交代变化形成的<sup>[10,24]</sup>。伊利石通常为较稳定的继承性矿物,是典型的物理风化的产物,不易

溶解<sup>[12-13]</sup>,大多为干冷气候弱碱性条件下由陆相钾长石、云母等铝硅酸盐矿物经风化脱钾而成<sup>[24,40,54]</sup>。富铁绿泥石矿物与伊利石一样,主要来自于陆源,碎屑绿泥石往往不稳定,经长期搬运常发生分解,因此其含量变化可反映蚀源区的远近<sup>[13]</sup>。

#### (2) 白垩系沉积物源和沉积搬运追溯

鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩和砂岩高伊利石含量、较高绿泥石和伊/蒙混层矿物含量、缺少高岭石、极少见蒙脱石的粘土矿物组成特点,表明白垩纪沉积物源富含长石等硅酸盐矿物。从鄂尔多斯盆地各地区白垩系及各组中绿泥石含量的分布特征(表 2、3、6、7、8)来看,盆地北部和南部泥质岩和砂岩的绿泥石含量总体上略高于盆地中部 1%~12%,表明盆地中部离物源远,沉积物质自北、自南向盆地中部搬运的过程中,绿泥石经历长距离搬运发生一定程度的分解含量逐渐减少。局部存在的高岭石粘土矿物主要分布于盆地北缘的 B1、B16 和盆地西缘中段的 B4、B9 等钻孔岩样中,盆地内部各钻孔的泥质岩和砂岩基本不见高岭石,表现了沉积物源搬运和机械分异作用的差异,靠近盆地内部高岭石消失。

### 3.4 粘土矿物与沉积、成岩环境水介质化学性质的关系

除了气候和沉积物源因素外,沉积岩(物)的粘土矿物组成与沉积、成岩环境水介质的物理化学性质关系极为密切,尤其是对自生粘土矿物而言,水介质环境的酸碱度(pH 值)、Eh 值、盐度、主要阳离子的含量、温度等条件成为主要的控制因素<sup>[36,52]</sup>。因此,分析粘土矿物的特征可以追溯沉积、成岩环境中水介质的物理化学性质,探讨地下水水化学形成演化的过程。

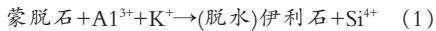
#### (1) 粘土矿物与沉积、成岩环境水介质化学性质的关系

自生蒙脱石 $[Al_4Si_8O_{20}(OH)_4]$ 常是在碱性介质(pH=7~8.5)条件下蚀变而成的,其形成与水解强度有关<sup>[51]</sup>,也与沉积环境一定盐度的水介质关系密切<sup>[13,51]</sup>,尤其在贫 K<sup>+</sup>而富 Na<sup>+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>的碱性介质中容易形成<sup>[40]</sup>。

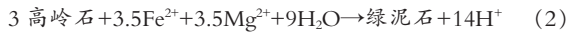
自生高岭石 $[Al(Si_4O_{10})(OH)_4]$ 主要由长石在酸性介质(pH=5~6)作用下经过淋滤作用脱去碱性离子富集硅铝晶化形成,为风化程度极高的矿物<sup>[52]</sup>,此外也可在成岩期从孔隙溶液中直接沉淀形成书页或蠕虫状的高岭石集合体<sup>[36,50]</sup>。因此高岭石是弱酸性和淋

滤作用、化学风化作用强烈的环境的指示矿物<sup>[10,53]</sup>。

伊利石 $[K_{2-x}Al_4(Al_{2-x}Si_{6+x}O_{20}(OH)_4)]$ 大多是在 $K^+/H^+$ 比率高的弱碱性( $pH=8$ )环境中由钾长石、云母等铝硅酸盐矿物弱淋滤作用下风化而成的<sup>[23,40,52,55]</sup>; 自生伊利石常与富钾离子的碱性介质有关<sup>[13]</sup>; 而大量的伊利石是由蒙脱石在富钾碱性水介质中 $Al^{3+}$ 、 $K^+$ 置换 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 并脱水转化形成的(反应式(1))<sup>[36]</sup>; Boles等(1979)认为质纯的伊利石可能是从孔隙水偏碱性介质条件下直接沉淀而来的。因此可将伊利石作为陆相中性或弱碱性环境的指示矿物<sup>[54]</sup>。



绿泥石 $[(Mg, Al, Fe)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8]$ 的形成需要相对较高的温度、较强碱性的环境( $pH=9\sim 10$ )<sup>[23]</sup>, 尤其是在富 $Mg^{2+}$ 的孔隙水中容易沉淀出来<sup>[52]</sup>。蒙脱石等矿物在富镁的水介质下形成, 随水介质含盐度、碱性、还原性增强形成的绿泥石也越趋稳定(Nemecz, 1981)。钾长石在富 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 流体中也可发生绿泥石化<sup>[38]</sup>。高岭石也可由富 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的碱性环境中转化而来(反应式(2))<sup>[36]</sup>。



总体而言, 在 $K^+/H^+$ 比率低的酸性环境中高岭石很稳定,  $K^+/H^+$ 比率高的水环境中伊利石是稳定的, 蒙脱石的存在反映了贫 $K^+$ 的弱碱性环境, 绿泥石形成于富 $Mg^{2+}$ 的碱性环境<sup>[36,52]</sup>。

汤艳杰等<sup>[40]</sup>对中国盐湖粘土矿物组成研究后认为, 盐湖盆地的粘土矿物以伊利石、绿泥石为主, 含少量蒙脱石和高岭石, 这主要受干旱气候和卤水化学成分的控制。王少依等<sup>[37]</sup>对中国18个陆相盆地油田碎屑岩研究后认为, 影响碎屑岩储层粘土矿物组合特征及分布的重要因素之一就是沉积环境水介质的性质和地层水的性质, 膏盐地层砂岩不含自生高

岭石, 富镁环境沉积砂岩富含绿泥石, 而富钾环境沉积的砂岩往往富含伊利石。

赵杏媛等<sup>[30-32]</sup>对中国多个含油气盆地大量样品的粘土矿物分析研究后发现, 沉积盆地粘土矿物的分布受水介质条件、成岩作用和母质来源3个基本因素的控制, 不同盐度水介质沉积盆地粘土矿物的组成受控的主要因素不同。淡水沉积盆地(一般古盐度低于10‰)通常有蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石及伊利石蒙脱石混层矿物, 成岩作用对粘土矿物的转化起主要的控制作用, 表现出蒙脱石和高岭石2个正常的转化序列。而盐碱沉积盆地(水介质层咸化或碱化型盆地, 古盐度一般高于10‰, 或酸碱度较高)粘土矿物的特征是伊利石和绿泥石含最高, 缺乏高岭石, 主要受水介质条件的制约, 其中较高古盐度富铁镁沉积盆地(古盐度初步测定为16‰~40‰)的粘土矿物基本上只有绿泥石和伊利石, 少数样品含少量伊利石和蒙脱石混层, 整个剖面从上到下几乎没有高岭石和蒙脱石, 如鄂尔多斯盆地延长组等。综上所述, 无论是沉积期, 还是成岩早期、成岩中后期形成的粘土矿物, 都直接或间接、或强或弱地与沉积环境、成岩环境水介质的酸碱度、含盐度等化学性质关系密切。

## (2) 白垩系沉积、成岩环境水介质化学性质的恢复

鄂尔多斯盆地白垩系泥质岩和砂岩发育以I+C+I/S型、I+C型为主的粘土矿物组合类型, 伊利石高含量、较高绿泥石和伊/蒙混层矿物含量、缺少高岭石、极少见蒙脱石, 伊利石富含 $K^+$ , 绿泥石富 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ (表9)的粘土矿物组成特点, 表明白垩系沉积时期及埋藏成岩过程中水介质具有盐度较高, 偏碱性, 富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的特点。

从洛河组泥质岩和砂岩的伊利石、绿泥石含量

表9 ZX2-b13 环河组岩屑长石砂岩单颗粒粘土矿物氧化物组成测试结果

Table 9 Oxide components of clay minerals in the debris-arkosic sandstones from the Cretaceous Huanhe Formation in ZX2-b13

矿物	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	NiO	总量
高岭石	1.10	0.16	10.37	27.21	1.61	0.70		1.47		0.45	0.004	43.06
伊利石	1.49	0.38	22.60	37.28	5.10	0.55		5.12	0.74	0.58	0	73.83
伊利石	0.17	4.07	22.77	51.99	5.14	0.68	0.16	8.37		2.82	0.004	96.18
绿泥石	0.01	4.40	22.97	52.56	3.94	0.63	0.13	9.24		2.77	0.017	96.67
绿泥石	0.27	11.70	20.99	55.43	1.23	1.27	0.37	1.56		4.40	0.662	97.88

注: 氧化物含量%

均以1%~5%的差量低于环河组泥质岩和砂岩的伊利石、绿泥石含量的情况来看,环河组沉积及埋藏环境水介质比洛河组沉积及埋藏环境水介质的盐度相对高,并更趋偏碱性,更富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。

此外,盆地北部泥质岩和砂岩的伊利石、绿泥石粘土矿物含量总体上低于盆地南部泥质岩和砂岩的伊利石、绿泥石粘土矿物含量,反映出盆地南部白垩系沉积及埋藏环境水介质比北部沉积及埋藏环境水介质的盐度高,并更趋碱性,更富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。

总体上,粘土矿物组成所反映的上述白垩系沉积时期及埋藏成岩过程中水介质总体盐度较高,偏碱性,富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的化学特点,与白垩纪沉积岩相古地理研究,白垩系岩石常量元素、微量元素地球化学分析和白垩系石膏矿物特征分析所得出的认识基本一致<sup>[44-48]</sup>,也与白垩系水文地球化学分析结果<sup>[41-50]</sup>相符合。

#### 4 结 论

通过系统地分析白垩系砂岩和泥质岩粘土矿物的组合类型及其地区性、地层性的分布特点,获取了有关鄂尔多斯盆地白垩系沉积、成岩环境的重要信息。

(1)白垩系砂岩、泥质岩的粘土矿物组合类型以I+C+I/S型、I+C型为主,具有高伊利石含量、较高绿泥石和伊/蒙混层矿物含量、缺少高岭石、极少见蒙脱石的粘土矿物组成特点。

(2)白垩系泥质岩的粘土矿物主要为陆源碎屑成因,次为沉积成岩过程中形成的自生粘土矿物;而白垩系砂岩的粘土矿物兼有陆源碎屑成因和沉积成岩过程的自生成因。

(3)白垩系沉积时总体为干旱—半干旱气候条件,物理风化作用强烈,化学风化淋滤作用较弱,但局部时段发生气候波动,出现短暂的湿热气候环境。

(4)白垩系沉积物源富含长石等硅酸盐矿物,沉积物质主要自北、南、西方向向盆地内部搬运沉积。

(5)白垩系沉积时期及埋藏成岩过程中水介质整体上具有盐度较高,偏碱性,富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的化学特点,且总体上盆地南部白垩系沉积及埋藏环境水介质比北部盐度高,并更趋碱性,更富 $K^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。

沉积岩(物)中的粘土矿物是一定气候条件、水介质条件、物源条件下受沉积作用、成岩作用影响的

产物,尽管它能够提供有关古气候、物源、沉积及成岩环境水介质特征等重要信息,但由于环境演化的复杂性、影响因素的多样性,在利用粘土矿物进行相关研究时,除了要细分粘土矿物的具体成因,还应综合利用孢粉分析、常量元素、微量元素、古生物、沉积学、岩石学等多种研究方法和分析手段才能获得较准确的结果。

致谢:西安地质矿产研究所谢从瑞副研究员,陕西省地矿局曹建科高级工程师,内蒙古地调院王揆顺、吕英高级工程师,宁夏地调院薛忠岐、王新贺高级工程师,陕西省地调院刘方教授级高级工程师、李益朝高级工程师,甘肃省地调院侗成利教授级高级工程师、李生永高级工程师等对钻孔样品采集工作给予了极大的帮助,成都地质矿产研究所闵际坤副研究员承担了部分样品的薄片鉴定,四川石油管理局测试中心完成了样品的X衍射分析测试,在此特致深深的谢意!

#### 参考文献

- [1]Pinsak A P, Murray H H. Regional clay mineral patterns in the Gulf of Mexico[C]//Proc. 7th Natl. Conf., Clay and Clay Minerals. 1960: 162-178.
- [2]Griffi J J. The distribution of clay minerals in the world ocean[J]. Deep-Sea Res., 1968, 15: 433-459.
- [3]Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment[J]. Sediment. Petrol., 1977, 47: 237-243.
- [4]Chamley H. Clay sedimentology[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1989.
- [5]何良彪. 海洋沉积岩芯中粘土矿物变化与古气候变迁的关系[J]. 科学通报, 1982, 27(13): 809-812.
- [6]何良彪, 刘秦玉. 黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学特征[J]. 科学通报, 1997, 42(7): 730-733.
- [7]Singer A. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments—a review[J]. Earth Science Reviews, 1984, 21: 251-293.
- [8]Robert C, Kennet T J. Paleocene and Eocene kaolinite distribution in the South Atlantic and Southern Ocean: Antarctic climatic and paleoceanographic implications[J]. Mar. Geol., 1992, 103: 99-110.
- [9]Gibson T G, Bybell L M, Owens J P. Latest Paleocene lithologic and biotic events in neritic deposits of southwestern New Jersey[J]. Paleocceanography, 1993, 8(4): 495-514.
- [10]吴必豪, 杨惠宁, 李松筠. 太平洋中部沉积物的矿物组成与沉积作用的研究[C]. 北京: 地质出版社, 1993: 44-45.
- [11]唐松, 邵磊, 赵泉鸿. 南海渐新世以来粘土矿物的演变特征及意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 337-341.
- [12]靳宁, 李安春, 刘海志, 等. 帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中粘土矿物的分布特征及物源分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 504-511.



- [13]刘云. 松辽盆地晚白至世粘土矿物特征及沉积环境分析[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 131-137.
- [14]徐昶. 中国一些盐湖粘土矿物的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(3): 278-285.
- [15]杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源气候环境的关系[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346.
- [16]Inglès M, Salvany J M, Muoz A, et al. Relationship of mineralogy to depositional environments in the non-marine Tertiary mudstones of the southwestern Ebro Basin (Spain) [J]. Sedimentary Geology, 1998, 116(3/4): 159-176.
- [17]Perederij V I. Clay mineral composition and palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits of Ukraine[J]. Quaternary International, 2001, 76/77: 113-121.
- [18]Manalt F, Beck C, Disnar J R, et al. Evolution of clay mineral assemblages and organic matter in the late glacial-Holocene sedimentary infill of Lake Annecy (northwestern Alps): palaeoenvironmental implications[J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25(2): 179-192.
- [19]Merriman R J. Contrasting clay mineral assemblages in British lower Palaeozoic slate belts; the influence of geotectonic setting[J]. Clay Minerals, 2002, 37(1): 207-219.
- [20]姚合法, 林承焰, 侯建国, 等. 苏北盆地粘土矿物转化模式与古温度[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 29-34.
- [21]张立强, 罗晓容, 刘楼军, 等. 准噶尔盆地南缘新生界粘土矿物分布及影响因素[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 363-375.
- [22]史兴民, 李有利, 钱蟒. 新疆玛纳斯河兴南湖沉积物特征反映的古环境探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 62-67.
- [23]袁鹤然, 乜贞, 刘俊英, 等. 广西百色盆地古近系沉积特征及其古气候意义[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1692-1697.
- [24]曹珂, 李祥辉, 王成善. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 115-123.
- [25]刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [26]师育新, 戴雪荣, 李节通. 末次间冰期兰州黄土记录中的粘土矿物及其环境意义探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 7(1): 87-93.
- [27]刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [28]曾允乎, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 125-142.
- [29]朱国华. 粘土矿物对陕甘宁盆地中生界砂岩储层性质的影响及其意义[J]. 石油勘探与开发, 1988, (4): 20-28.
- [30]赵杏媛, 张有瑜, 宋健. 中国含油气盆地粘土矿物的某些矿物学特征[J]. 现代地质, 1994, 8(3): 264-272.
- [31]赵杏媛, 陈洪起. 我国含油盆地粘土矿物分布特征及控制因素[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1692-1697.
- [32]赵杏媛, 何东博. 粘土矿物分析及其在石油地质应用中的几个问题[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 756-757.
- [33]王行信. 盆地形成演化对粘土矿物组成和分布的影响[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(3): 154-158.
- [34]王行信, 韩守华. 中国含油气盆地砂泥岩粘土矿物的组合类型[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 123.
- [35]Deconinck J F, Blanc-Valleron M M, Rouchy J M, et al. Palaeoenvironmental and diagenetic control of the mineralogy of Upper Cretaceous-Lower Tertiary deposits of the Central Palaeo-Andean basin of Bolivia (Potosiarea) [J]. Sedimentary Geology, 2000, 132(3/4): 263-278.
- [36]伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. 古地理学报, 2000, 2(3): 59-67.
- [37]王少依, 王行信, 韩守华. 影响我国陆相碎屑岩储集层粘土矿物组合和分布的因素[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 19-21.
- [38]杨仁超, 韩作振, 柳益群, 等. 镇原地区下白垩统成岩作用与铀成矿前景预测[J]. 铀矿地质, 2007, 23(4): 207-213.
- [39]滕洪达, 姜洪启, 王平. 海拉尔盆地地层水特征与粘土矿物转化和赋存的关系[J]. 大庆高等专科学校学报, 2004, 24(4): 83-85.
- [40]汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 337-341.
- [41]侯光才, 张茂省. 鄂尔多斯地下水资源与可持续利用[C]. 西安: 陕西科学出版社, 2004.
- [42]侯光才, 张茂省. 鄂尔多斯地下水勘查研究[C]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [43]侯光才, 林学钰, 苏小四, 等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 391-398.
- [44]谢渊, 王剑, 殷跃平, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学初探[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 818-828.
- [45]谢渊, 王剑, 江新胜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 73-83.
- [46]谢渊, 王剑, 江新胜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层储层岩石特征与介质结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 11-18.
- [47]谢渊, 李令喜, 谢正温, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系石膏类矿物分布特征及其对地下水水化学类型和水质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2008, (增刊): 55-62.
- [48]杨友运, 常文静, 侯光才. 鄂尔多斯白垩系自流水盆地水文地质特征与岩相古地理[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 387-393.
- [49]董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 288-292.
- [50]董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水矿化度和主要离子浓度的分布规律[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 11-16.
- [51]武羨慧, 刘成武, 巨军昌. 他生、原生及次生粘土矿物的鉴别方法研究[J]. 咸宁师专学报, 1997, 17(3): 74-76.
- [52]隆浩, 王晨华, 刘勇平, 等. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究, 2007, 15(2): 21-25.
- [53]鲁春霞. 粘土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 456-459.
- [54]C. E. 威维尔, L. D. 普拉德. 粘土矿物化学[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 4-100.
- [55]Hower J, Eslinger E V, Hower M E, et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments; I. Mineralogical and chemical evidence[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 1976, 87(5): 725-737.