

准噶尔盆地南缘坡缕石矿物学特征 及古气候指示意义

王明振¹, 吴朝东^{1,2}, 房亚男¹, 王陆新¹, 李林林¹, 陈 榕¹, 王 军^{1,2}

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871)

摘 要: 为深入研究准噶尔盆地南缘新生界古气候演化过程, 采用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)等手段对准噶尔盆地南缘(淮南)新生界地层泥岩、砂岩中粘土矿物成分、坡缕石矿物学特征进行了系统分析。分析结果表明, 新生界泥岩中粘土矿物组成主要有蒙脱石、伊利石、坡缕石和绿泥石等, 坡缕石是指示干旱-半干旱气候条件的特征矿物, 呈纤维状、束状等形态, 其形态及与周围矿物的接触关系说明坡缕石为典型自生成因, 坡缕石、伊利石、绿泥石构成的粘土矿物组合所反映的干旱气候与地层颜色变化相吻合。

关键词: 坡缕石; 矿物学特征; 古气候; 准噶尔盆地

中图分类号: P588.2; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-0833-09

Mineralogical characteristics of palygorskite in the southern margin of Junggar Basin and their implications for paleoclimate

WANG Ming-zhen¹, WU Chao-dong^{1,2}, FANG Ya-nan¹, WANG Lu-xin¹, LI Lin-lin¹,
CHEN Rong¹ and WANG Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Peking University, Beijing, 100871, China;

2. Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to further investigate paleoclimate evolution of Cenozoic period in the southern margin of Junggar Basin, the authors systematically analyzed mineral compositions and mineralogical characteristics of palygorskite of mudstones and sandstones in the southern margin of Junggar Basin by using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that mineral compositions of Cenozoic mudstones are smectite, illite, palygorskite, kaolinite and chlorite. Palygorskite is indicative of an arid, semi-arid and strong evaporation environment. Fibrous or beam palygorskites identified by mineral contact relation are typically authigenic. The arid paleoclimate is consistent with the color change of strata reflected by illite and chlorite mineral assemblages.

Key words: palygorskite; mineralogical characteristics; paleoclimate; Junggar Basin

收稿日期: 2013-01-28; 修订日期: 2013-04-17

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05009-001)

作者简介: 王明振(1983-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事粘土矿物学方面的研究, E-mail: wangmz0630@pku.edu.cn; 通讯作者: 吴朝东(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与石油地质学的研究, E-mail: cdwu@pku.edu.cn。

网络出版时间: 2013-07-19; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20130719.1103.004.html>

坡缕石,又称凹凸棒石,英文名称分别为 palygorskite 和 attapulgite,是一种含水的层链状镁铝硅酸盐粘土矿物,在自然界中,常形成于干旱-半干旱地区的沉积物(岩)及海洋、泻湖及内陆湖盆沉积物中,也可形成于玄武岩风化壳中(Singer and Galan, 1984; Weaver, 1990; Hong *et al.*, 2007)。坡缕石的伴/共生矿物有蒙脱石、伊利石-蒙脱石无序混层矿物、伊利石、绿泥石等。坡缕石形成的水介质条件一般为富 Mg、Si 且有一定量 Al 参与的碱性环境。国外多数学者认为坡缕石的成因可能与蒙脱石、伊利石-蒙脱石混层矿物、富 Mg 的基性岩蚀变有关(Weaver and Beck, 1977; Hutton & Dixon, 1981; Hong *et al.*, 2007)。

目前,国内外学者对坡缕石的研究主要集中在结晶学与矿物学特征、形成原因及开发应用等领域,尤其在晶体结构及化学成分、矿床成因、沉积环境及表征方法等方面进行了较为详细的研究(翟淑芬等, 1990; 易发成等, 1995; 郑自立等, 1996; 蔡元峰等, 2001; 郑自立, 2001; 赵杏媛, 2003; Newton, 2007; Tlili 2010; Álvarez *et al.*, 2011)。而随着世界各国对全球气候变化研究的重视,沉积岩(物)中坡缕石与古气候重建也渐渐引起关注,科研工作者结合多种实验资料尝试分析坡缕石与古气候之间的关系,并取得了初步的研究成果(谢巧勤, 2005; 洪汉烈等, 2007; 岳统波, 2010; Thiry and Plestch, 2011)。自生坡缕石的出现常与物源、沉积环境及古气候关系密切(张立强, 2005; 洪汉烈等, 2007; 殷科, 2010),可用来指示干旱-半干旱的古气候或碱性-半碱性富镁的水介质条件,并且坡缕石的成因及特征可能会对新生界储层岩石物性产生一定的影响。准噶尔盆地南缘有着近 110 年的油气勘探历史(新疆油气区石油地质志编写组, 1995; 邱楠生等, 2002; 李铁军, 2004; 何登发等, 2005; 张立强等, 2005),之前的大部分工作主要集中在构造以及地球化学研究方面,而借助粘土矿物组合特征,尤其是单矿物去探讨新生界地层沉积相、古环境的研究还处在初级阶段,而且局限于个别井段的零星分析,缺乏粘土矿物学的系统探讨。

为了较为系统地研究准噶尔盆地南缘新生界地层中的坡缕石特征及环境指示意义,作者采用 X 射线衍射和扫描电镜等手段对准噶尔盆地南缘石场剖面新生界地层泥岩中坡缕石的成分、形貌等特征进

行了分析,在此基础上对准噶尔盆地南缘新生代气候展开展开深入性研究,希望能对准噶尔盆地南缘沉积相的划分及储层评价起到促进作用。

1 地质背景

准噶尔盆地南缘地处北天山与准噶尔盆地耦合地带,因受燕山、喜马拉雅构造运动的影响,北天山向北方向挤压,在平面上自南向北形成了三排构造冲断带(郭召杰等, 2011)。准噶尔盆地南缘在新生界时期接受了巨厚的沉积,地层自下而上分为古近系的紫泥泉子组(E_{1-2z})、安集海河组(E_{2-3a})和沙湾组(E_3-N_1)及新近系的塔西河组(N_{1t})、独山子组(N_{1-2d})和西域组(N_{2x})。其中,紫泥泉子组以红色泥岩、砂岩为主(图 1a),安集海河组较为发育杂色泥岩、砂岩泥岩夹泥岩(图 1b),沙湾组以褐红色泥质粉砂岩、泥岩为主(图 1c),塔西河组岩性则以褐红色砂质砾岩、泥质砂岩为主(图 1d),独山子组以褐黄色砂质泥岩、砾岩与砂岩互层较为常见(图 1e),西域组西域砾岩较为发育,夹灰色中粒岩屑砂岩、砂质泥岩透镜体等(图 1f)。

准噶尔盆地南缘自白垩纪时期开始经历沉积水体变浅、湖盆范围缩小的过程,至古近系紫泥泉子组(E_{1z})沉积早期,气候变得温暖湿润,湖盆范围逐渐扩大(庄新明, 2006; 高志勇等, 2009)。紫泥泉子组沉积中晚期,气候转为干旱,湖水趋于变浅,湖盆开始缩小,以冲积扇、河流及滨-浅湖相沉积为主;安集海河组沉积时期,湖平面快速上升,水体变深,湖盆范围扩大,发育滨浅湖沉积。沙湾组中下部以河流、冲积相沉积为主,沙湾组上部及塔西河组则以滨-浅湖相沉积为主(张立强等, 2005)。沙湾组-塔西河组气候特征呈现干湿交替,在整体上朝着干旱气候方向发展(潘春孚等, 2011)。独山子组沉积时期以冲积体系为主。古气候及沉积环境的变化,对坡缕石的形成与保存产生了较大的影响。

2 样品采集和实验方法

2.1 样品采集

样品主要采自准噶尔盆地南缘新生界地层,自下而上包括紫泥泉子组、安集海河组、沙湾-塔西河组、独山子组。每组采集 3~5 块样品,共 25 块样品。

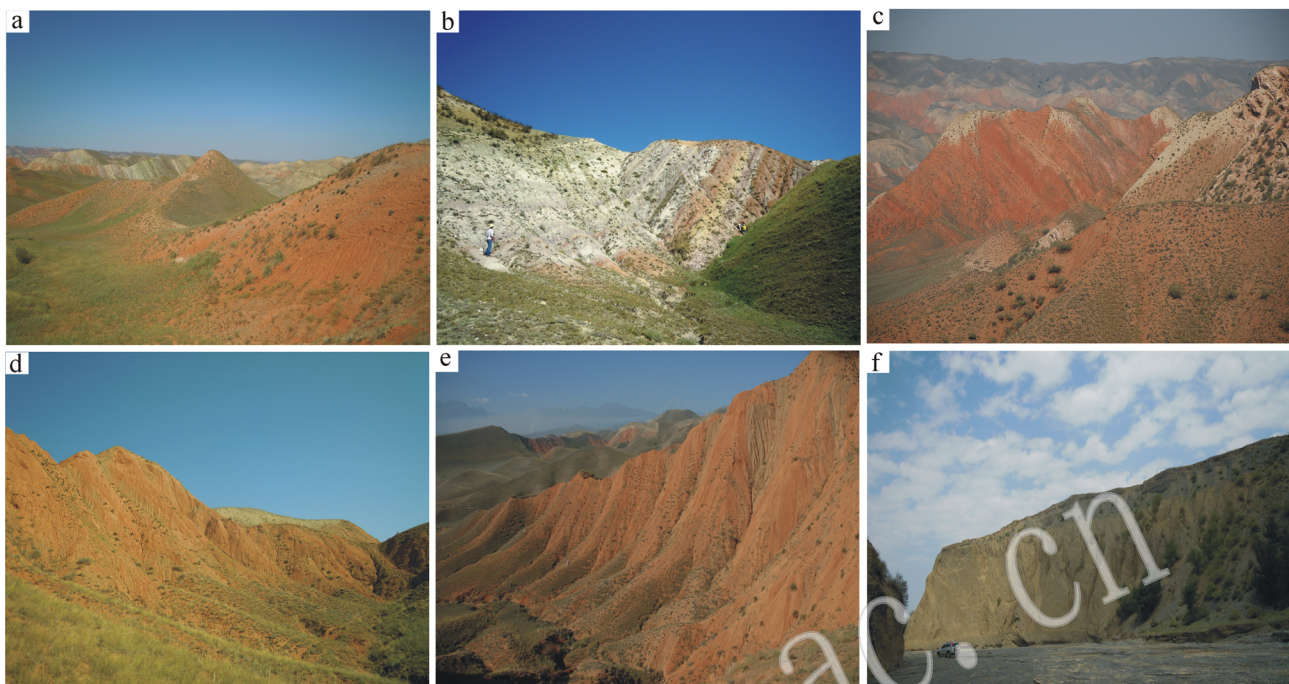


图1 准噶尔盆地南缘新生界地层野外照片

Fig. 1 Outcrop photographs of Cenozoic strata in the southern margin of Junggar Basin

a—紫泥泉子组(E_1z); b—安集海河组(E_{2-3a}); c—沙湾组(N_{1s}); d—塔西河组(N_{1t}); e—独山子组(N_{2d}); f—西域组(N_{2x})
a—Ziniquanzi Formation(E_1z); b—Anjihaihe Formation(E_{2-3a}); c—Shawan Formation(N_{1s}); d—Taxihe Formation(N_{1t});
e—Dushanzi(N_{2d}); f—Xiyu Formation(N_{2x})

2.2 泥岩样品的矿物类型及相对含量分析

泥岩样品的粘土矿物测试分析工作在北京大学孵化器微构分析测试中心进行。

(1) 泥岩中的矿物类型鉴定

利用X射线衍射获得样品的全岩分析结果,以鉴定泥岩中不同的矿物类型及相对含量。先将样品粗碎至1 mm左右,然后用破碎机粉碎至<1 mm粒径,在玛瑙研钵中研磨至样品无颗粒感,再置于样品架的凹槽中,采用背压法制备样品待上机测试。实验条件为Cu靶,X光管工作电压为40 kV,电流为100 mA;光阑系统为DS=SS=1°,RS=0.3 mm;连续扫描8°/min,步宽0.01°,扫描范围为2.6~75°。非粘土矿物中,石英衍射特征峰位于 $d=3.34 \text{ \AA}$ 和 $d=4.27 \text{ \AA}$ 附近,方解石衍射峰出现在 $d=3.03 \text{ \AA}$ 和 $d=2.49 \text{ \AA}$ 处,正长石衍射特征峰在 $d=3.24 \text{ \AA}$,斜长石和坡缕石的特征峰在 $d=3.19 \text{ \AA}$ 和 $d=3.66 \text{ \AA}$ 处出现重叠(图2a)。

(2) 泥岩中粘土矿物类型及相对含量分析与鉴定

首先进行粘土矿物的富集,具体步骤为:将样品粗碎至<1 mm(全部过1 mm标准筛),然后把粉碎后的样品加入蒸馏水中浸泡,利用超声波细胞粉碎

机超声1~2 min,粘土悬浮后静置8 h,提取<2 μm 的部分;将吸取的悬浮液再利用高速离心机离心,使粘粒沉降富集。最后制作粘土矿物定向片:自然片(N)、乙二醇饱和片(EG片)、高温片(450℃)。实验所用仪器为日本理学Rigaku公司生产的D/max-RA型X射线衍射仪,实验条件为Cu靶,电压40 kV,电流100 mA,采样步宽0.02°(2 θ),扫描速度4°(2 θ)/min,扫描范围2.6~30°。文中坡缕石等粘土矿物含量的测定采用绝热方程(刘粤惠等,2003)计算,公式如下:

$$X_i = \left[\frac{I_i}{K_i} / \left(\sum_{i=1} K_i \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

其中, X_i 为样品中矿物*i*的百分含量(%), K_i 为矿物*i*的参比强度, I_i 为矿物*i*某衍射峰的强度。

伊利石/蒙脱石混层矿物的判别与鉴定主要采用Reynolds和Hower(1970)方法,矿物组合为S、I/S、I、K和C时的百分含量计算公式(SY/T 5163-2010)分别为:

$$K + C = \frac{I_{0.7 \text{ nm}}(\text{N})/1.5}{I_{0.7 \text{ nm}}(\text{N})/1.5 + I_{1.0 \text{ nm}}(\text{H})} \times 100 \quad (2)$$

$$K = \frac{h_{0.358 \text{ nm}}(\text{EG})}{h_{0.358 \text{ nm}}(\text{EG}) + h_{0.353 \text{ nm}}(\text{EG})} \times (K + C) \quad (3)$$

$$C = (K + C) - K \quad (4)$$

$$S = \frac{I_{1.7\text{ nm}}(\text{EG})/4}{I_{1.0\text{ nm}}(\text{H})} \times [100 - (K + C)] \quad (5)$$

$$I = \frac{I_{1.0\text{ nm}}(\text{EG}) \times [h_{0.7\text{ nm}}(\text{N})/h_{0.7\text{ nm}}(\text{EG})]}{I_{1.0\text{ nm}}(\text{H})} \times [100 - (K + C)] \quad (6)$$

$$I/S = 100 - (S + I + K + C) \quad (7)$$

式中, $I_{0.7\text{ nm}}(\text{N})$ 为谱图上 0.700 nm 衍射峰强度, $I_{1.0\text{ nm}}(\text{H})$ 为 450~550℃ 谱图上 1.000 nm 衍射峰强度, $h_{0.358\text{ nm}}(\text{EG})$ 为 EG 谱图上 0.358 nm 衍射峰高度, $h_{0.353\text{ nm}}(\text{EG})$ 为 EG 谱图上 0.353 nm 衍射峰高度, $I_{1.7\text{ nm}}(\text{EG})$ 为 EG 谱图上蒙皂石 1.700 nm 衍射峰强度, $I_{1.0\text{ nm}}(\text{EG})$ 为 EG 谱图上 1.000 nm 衍射峰强度, $h_{0.7\text{ nm}}(\text{N})$ 为 N 谱图上 0.700 nm 衍射峰高度, $h_{0.7\text{ nm}}(\text{EG})$ 为 EG 谱图上 0.700 nm 衍射峰高度, K 为高岭石含量(%), C 为绿泥石含量(%), S 为蒙皂石含量(%), I 为伊利石含量(%), I/S 为伊利石/蒙皂石间层矿物含量(%)。

当只有高岭石而无绿泥石或只有绿泥石而无高岭石时,按下式计算:

$$K \text{ 或 } C = \frac{I_{0.7\text{ nm}}(\text{N})/1.5}{I_{0.7\text{ nm}}(\text{N})/1.5 + I_{1.0\text{ nm}}(\text{H})} \times 100 \quad (8)$$

当只有 S 而无 I/S 或只有 I/S 而无 S 时,必须按下式计算:

$$S \text{ 或 } I/S = 100 - (I + K + C) \quad (9)$$

蒙脱石、伊利石、坡缕石和绿泥石的 d_{001} 特征峰出现在 $d = 15.23 \text{ \AA}$ (12.44 \AA) $d = 10 \text{ \AA}$, $d = 10.5 \text{ \AA}$, $d = 14.2 \text{ \AA}$ 附近。在 N 片衍射谱图上可以看出, $d = 14.75 \text{ \AA}$ 左右出现较强衍射峰,在 50℃ 下经饱和乙二醇熏蒸 7 h 左右,此衍射峰移至 $d = 17.15 \text{ \AA}$ 处,表明样品中有蒙脱石矿物的存在; $d = 10.05 \text{ \AA}$, $d = 5.01 \text{ \AA}$, $d = 3.33 \text{ \AA}$ 处均出现较强的衍射峰,经饱和乙二醇熏蒸和高温加热处理后峰位置及形态基本保持不变,可鉴定此矿物为伊利石。 $d = 14.2 \text{ \AA}$, $d = 7.1 \text{ \AA}$, $d = 4.8 \text{ \AA}$, $d = 3.53 \text{ \AA}$ 处均出现较强的衍射峰,其中 $d = 7.15 \text{ \AA}$ 峰最强, $d = 3.53 \text{ \AA}$ 峰次之,经过乙二醇处理后 4 个峰基本上不发生变化。450℃ 高温处理后 $d = 14.26 \text{ \AA}$ 衍射峰向高角度一侧移动至 $d = 13.82 \text{ \AA}$,其余各峰出现减弱甚至消失,可鉴定样品中含有绿泥石。 $d = 10.55 \text{ \AA}$ 处出现较强的衍射峰,饱和乙二醇处理后衍射峰强度及位置均

保持不变,经过 450℃ 高温加热处理后, $d = 10.55 \text{ \AA}$ 处衍射峰趋于消失,表明样品中含有坡缕石。其余衍射峰在 $d = 6.34 \text{ \AA}$, $d = 4.5 \text{ \AA}$, $d = 4.25 \text{ \AA}$, $d = 3.18 \text{ \AA}$ 处均出现减弱。另外, $d = 7.21 \text{ \AA}$ 处衍射峰经 450℃ 高温加热处理后,衍射峰位及强度未发生明显变化,且自然干燥片出现 $d = 3.58 \text{ \AA}$ 衍射峰,表明样品中含有少量的高岭石。

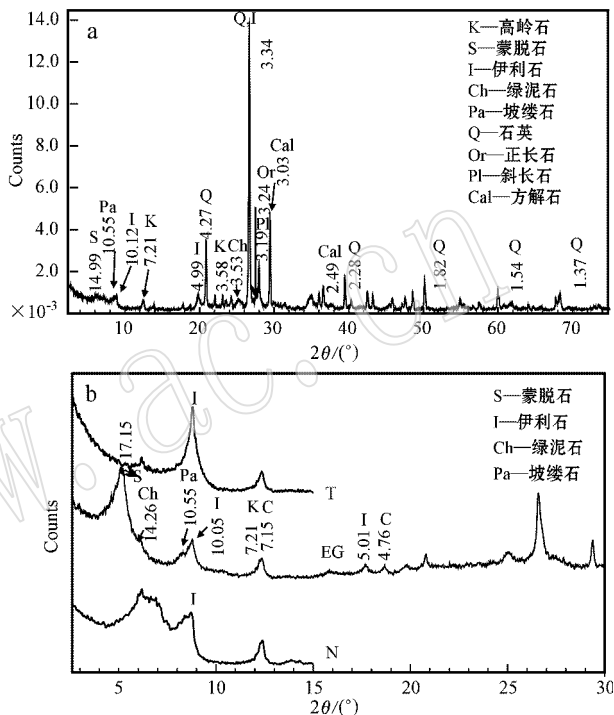


图 2 准噶尔盆地南缘典型泥岩样品 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of typical mudstone samples in the southern margin of Junggar Basin

a—全岩分析; b—粘土定向片: 自然片(N), 饱和乙二醇片(EG), 450℃ 高温片(T)

a—bulk sample; b—clay mineral samples: N—air dried specimens; EG—saturated ethylene glycolated specimens; T—heated specimens at 450℃ for 2.5 h

2.3 泥岩中粘土矿物形貌鉴定分析

粘土矿物形貌鉴定分析实验在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室-扫描电镜室完成。制样方法:把具有新鲜断面的泥岩颗粒样品(约 1 cm)用导电胶或胶水粘在电镜样品靶台上,然后对样品新鲜断面进行喷金导电处理,最后将制好的样品上机测试。观察过程中结合能谱(EDS)进行矿物成分及形态分布特征鉴定。

3 结果与讨论

样品的 X 射线衍射分析数据表明 ,准噶尔盆地新生界沉积岩样品中矿物类型主要为石英、正长石、斜长石、方解石等以及粘土矿物 ,粘土矿物主要为蒙脱石、伊利石、坡缕石和绿泥石、高岭石等。坡缕石、高岭石、伊利石和蒙脱石特征及相对含量见图 2、表 1 ,其中蒙脱石主要分布在沙湾组-塔西河组与独山子组 ,伊利石、绿泥石、高岭石在整个新生界均有分布。

一般情况下 ,绿泥石只能在化学风化作用受到

抑制的地区得到保存 ,伊利石形成于干冷的气候环境下 ,伊利石和绿泥石矿物组合代表干旱的气候条件(洪汉烈等 2007) ,而在季节性的温暖或潮湿的条件 ,更有利于蒙脱石的形成。因此 ,粘土矿物组合可以有效地反映其沉积时期的介质条件或古气候信息。准噶尔盆地南缘古近系紫泥泉子组、安集海河组粘土矿物基本上以伊利石、绿泥石、高岭石矿物组合为主 ,气候由干旱转为相对潮湿 ,沙湾组及塔西河组沉积时期 ,只有部分样品中含有蒙脱石 ,含量较高 ,超过 70 %。塔西河组至东沟组蒙脱石含量增加 ,反映了沉积环境为富盐基的碱性环境 ,有利于坡缕石的形成。

表 1 准噶尔盆地南缘沉积岩中粘土矿物类型及坡缕石相对含量 w_B/ %

Table 1 Clay mineral types and palygorskite relative content for sedimentary rocks in southern margin of Junggar Basin								
层位	岩性	S	I/S	I	K	C	Pa	Σ I/S)
N _{1-2d}	含砾泥岩	60		16	5	9	10	
	黄色细砂岩 ,含石膏及钙质结核	60		11	5	9	15	
(E ₃ -N ₁)s + N ₁ t	暗红色泥岩	65		15	4	6	10	
	砖红色细砂岩	45		14	1	1	39	
	砖红色泥岩	84		13	1	2		
	砖红色泥岩		73	16	4	7		55
	灰褐色泥岩		67	18	5	10		45
	砖红色泥岩		43	12	2	3	40	75
	砖红色粉砂岩	85		8	3	4		
	砖红色含砂泥岩	93		5	1	1		
	砖红色粉砂质泥岩		58	12	3	3	24	65
	灰绿色粉砂质泥岩		65	18	10	7		55
	灰白色粗砂岩		63	20	4	4	9	90
	砖红色泥岩		66	8	4	4	18	40
E _{2-3a}	黄绿色粉砂质泥岩	70		20	6	4		
	紫红色泥岩		62	8	3	3	24	55
	绿色泥岩		85	13		2		60
	灰绿灰白色细砂岩		71	8		3	18	85
	暗紫色泥岩		71	5		1	23	40
	紫红色泥岩		81	4	1	1	13	40
	灰绿含砾砂岩		55	7	2	2	34	85
	紫红色泥岩		67	7	2	3	21	55
	紫红色泥岩		41	5	2	2	50	70
	紫红色泥岩		74	8	2	2	14	80
	含砾泥岩		70	3	2	5	20	85

注 : S—蒙脱石 ; I/S—伊利石/蒙脱石混层 ; I—伊利石 ; K—高岭石 ; C—绿泥石 ; Pa—坡缕石 ; Σ I/S)—伊利石/蒙脱石混层矿物中蒙脱石与伊利石的相对含量比值。

在扫描电镜下 ,石英、长石等非粘土矿物边缘一般具有棱角状(图 3d) ,反映沉积时距离物源区较近。坡缕石成纤维状或弯曲状充在颗粒之间 ,蒙脱石、伊利石、绿泥石等片状粘土矿物也多发育不规则、残缺的边缘或呈卷曲状 ,具有典型的碎屑成因特点(图

3e、3g)。坡缕石晶体呈现两种形貌特征 :纤维状和束状、细棒状和针状。纤维状和束状高岭石有时可见沿片状粘土矿物颗粒的边缘交代生长 ,不同颗粒之间相互缠绕 ,呈现交织状交结特征(图 3b、3f、3g) ,晶粒长、宽分别为 1~5 μm、0.03~0.2 μm。细棒状

和针状坡缕石常附着在粘土矿物表面以单颗粒形式出现,晶粒长、宽分别为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.02\sim 0.1\ \mu\text{m}$ (图 3a、3c、3e、3h)。其中,分布在粘土矿物表面(图 3i)或其它颗粒间隙中的坡缕石晶体一般发育较好。电子能谱分析结果(图 4)表明,坡缕石矿物富含 Si、Mg、

Al、Fe,与坡缕石化学组分一致。从坡缕石晶体交代粘土矿物的现象、晶体的形貌以及化学成分特征,可以断定此类坡缕石为自生成因,这与前人研究结果较为一致(陈天虎等,2004),即此类坡缕石是在沉积区形成的。

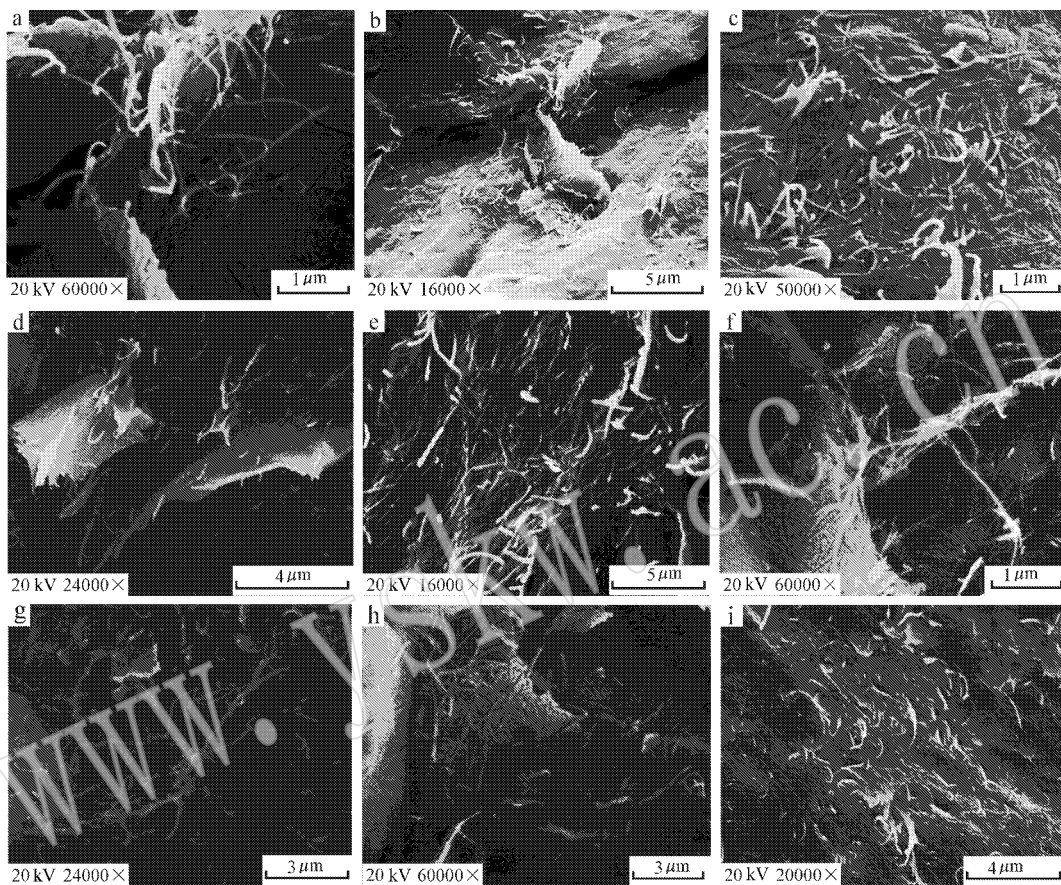


图 3 准噶尔盆地南缘典型泥岩样品中坡缕石 SEM 图像

Fig. 3 Palygorskite SEM images of typical samples in southern margin of Junggar Basin

a—细棒状坡缕石呈交织状;b—针状坡缕石附着在粘土矿物表面;c—细棒状坡缕石附在粘土矿物表面或充填空隙;d—丝状坡缕石充填在石英等矿物孔隙间;e—细棒状、卷曲状坡缕石附在粘土矿物表面;f—纤维状坡缕石呈交织状;g—纤维状、束状粘土矿物呈交织状;h—细棒状坡缕石分布在碳酸盐矿物表面;i—毛发状坡缕石分布在矿物表面或空隙

a—rod palygorskite in mixed state;b—needle-like palygorskite on the surface of clays;c—rod palygorskite in pores or on the surface of clay minerals;d—filamentous palygorskite filled in pores between quartz and other minerals;e—rod and crimp shaped palygorskite on the surface of flake clay minerals;f—filamentous palygorskite in mixed state;g—filamentous and beam shaped clay minerals in mixed state;h—rod palygorskite on the surface of carbonate minerals;i—hair-like palygorskite in pores or on the surface of clays

坡缕石矿物理论化学结构式为 $\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,理论化学成分为 SiO_2 占 56.96%, MgO 占 23.83%, H_2O 占 19.11%(赵杏媛,2003)。实验数据表明准噶尔盆地南缘坡缕石的化学成分与塔里木盆地北部轮南 3 井下第三系紫红色含砾细砂岩在碱性-半碱性的介质条件下所形成的坡缕石矿物近似(表 2)。坡缕石在自然界中多以二八面体或

三八面体矿物出现,其化学成分会受到伊利石、绿泥石、蒙脱石等矿物的影响。若有大量伊利石的存在,坡缕石矿物中 K 的含量就会增加。而据扫描电镜能谱分析(图 4)可知准噶尔盆地南缘坡缕石矿物含有 Al、Mg、Si、Fe,其中 Ca 含量较高可能与样品中存在碳酸盐有关。

表 2 准噶尔盆地南缘沉积岩中坡缕石的化学成分

$\omega_B/\%$

Table 2 Chemical components of palygorskite in mudstone of southern margin of Junggar Basin

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	MnO	LOI	Total
1	52.16	18.03	6.28	3.34	5.41	0.72	0.72	3.1	0.2	0.07	9.81	90.02
2	51.07	13.07	4.81	2.24	8.57	0.13	0.43	0.67	0.11	0.041	18.24	99.38

注：样品 1 取自准噶尔盆地南缘新生界地层砖红色泥岩，样品 2 引自赵杏媛(2003)。

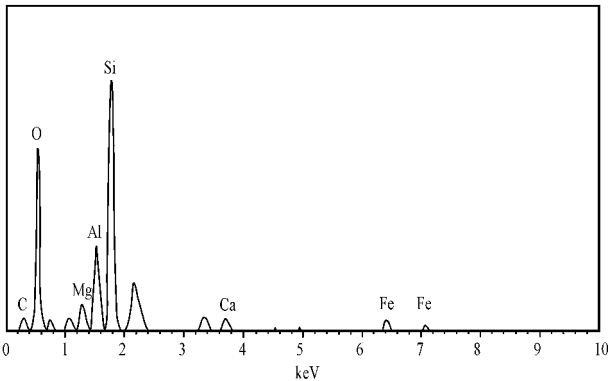


图 4 准噶尔盆地南缘典型泥岩样品中坡缕石能谱图

Fig. 4 EDS of palygorskite for typical mudstone samples in southern margin of Junggar Basin

坡缕石一般形成于干旱-半干旱的古气候条件或强蒸发环境，在相对富 Mg、碱性-半碱性的介质条件下更容易形成与保存。从全球分布来看，坡缕石主要分布在北半球 30~40° 之间的白垩纪与第三纪地层中。我国青海西宁、甘肃天水、内蒙兴和等地新近纪或早白垩世湖相地层中均发现有坡缕石发育(杨雅秀等,1994)。在年均降雨量超过 300 mm 时，坡缕石会蚀变成为其它粘土矿物，如蒙脱石(Merri-nan,2002;Hojati *et al.*,2012)。因此，可以推断坡缕石发育地区年均降雨量应该在 300 mm 以下，整体处于干旱气候环境。

坡缕石的形成很可能是由于湖水中方解石或者石膏沉淀带来 Ca²⁺、Mg²⁺ 或者绿泥石、伊利石的溶融。紫泥泉子组、安集海河组沉积时期，湖盆范围扩大，水体盐度及 pH 值增大，Mg²⁺ 浓度增加，则更有利于坡缕石的形成(Hong *et al.*,2007)。沙湾组-塔西河组时期气候特征呈现干湿交替，在整体上朝着干旱气候方向发展(潘春孚等,2011)，干湿交替的滨-浅湖相沉积体系使得蒙脱石等粘土矿物得以发育，沉积环境为富 Ca、Mg 的碱性介质条件，比较有利于坡缕石的形成与稳定。孢粉资料分析也表明准噶尔盆地南缘在古新世时期为干旱的亚热带气候，始新世时期为亚热带-温带气候。受阿尔卑斯运动的影

响，天山山系、帕米尔-昆仑山系的不断隆升，渐新世以后气候又开始转变为干旱，同时渐渐变冷(魏景明,1982)。因此，坡缕石在准噶尔盆地南缘的富集与当时的气候条件变化有关。

粘土矿物组合在一定程度上对古气候变化具有指示意义。准噶尔盆地南缘新生界沉积岩中伊利石、绿泥石粘土矿物组合类型呈同步增加或减少的趋势，与坡缕石所反映的干旱气候环境信息相吻合。

4 结论

(1)由 X 射线衍射分析、扫描电镜等分析资料可知，准噶尔盆地南缘新生界坡缕石 *d*₀₀₁ 特征峰在 10.55 Å 附近，化学组成主要以 Si、Al、Fe、Mg 为主，含有一定量的 Ca。在扫描电镜下，坡缕石晶体形貌呈纤维状和束状、丝状或细棒状两种形态类型。坡缕石的晶体形貌、化学组成及与周围矿物的接触关系说明坡缕石为典型的自生成因。

(2)准噶尔盆地南缘新生界沉积岩中粘土矿物组合类型为蒙脱石、伊利石、坡缕石和绿泥石、高岭石。坡缕石矿物的出现指示一种干旱的古气候环境，且介质条件为富含 Ca²⁺、Mg²⁺ 的碱性环境。地层颜色以杂色为主，亦反映了气候相对较为干旱的特征。

致谢 在扫描电镜样品制备、实验操作过程中得到了中国石油勘探开发研究院朱德升工程师、北京大学地球与空间科学学院王晓先博士的帮助和支持，同时 X 射线衍射图谱鉴定与解释得到了中国石油勘探开发研究院林西生研究员的悉心指导，在此一并表示感谢。

References

Álvarez A, Santarén J, Esteban-Cubillo A, *et al.* 2011. Chapter 12- Current industrial applications of palygorskite and sepiolite[J]. De-

- velopments in Clay Science, 3: 281~298.
- Cai Yuanfeng and Xue Jiyue. 2001. Compositions and infrared spectra of two kinds of Guanshan palygorskite clay[J]. Acta Mineralogica Sinica, 21(3): 323~329(in Chinese).
- Chen Tianhu, Xu Huifang, Peng Shuchuan, *et al.* 2004. Direct evidence of montmorillonite translation to Attapulgite-Transmission electron microscope observation[J]. Science in China(D), 34(3): 248~255(in Chinese).
- Gao Zhiyong, Han Guomeng, Zhu Rukai, *et al.* 2009. Depositional setting and evolution of the Paleogene-Neogene foreland basin of southern margin of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, (5): 491~502(in Chinese).
- Guo Zhaojie, Wu Chaodong, Zhang Zhicheng, *et al.* 2011. Tectonic control on hydrocarbon accumulation and prospect for large oil-gas field exploration in the southern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, (2): 185~195(in Chinese).
- He Dengfa, Zhai Guangming, Kuang Jun, *et al.* 2005. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 40 (2): 248~262(in Chinese with English abstract).
- Hojati S, Khademi H, Arocena, J. M. *et al.* 2012. Chronostratigraphic distribution and genesis of palygorskite in Tertiary sediments of the Isfahan region, central Iran[J]. Clay Minerals, 47: 11~29.
- Hong Hanlie, Yu Na, Xiao Ping, *et al.* 2007. Authigenic palygorskite in Miocene sediments in Linxia Basin, Gansu, northwestern China [J]. Clay Minerals, 42(1): 45~58.
- Hong Hanlie, Yu Na, Xue Huijuan, *et al.* 2007. Clay mineralogy and its paleoclimatic indicator of the Late Pleistocene in Linxia Basin[J]. Geoscience, 21(2): 406~414(in Chinese with English abstract).
- Hutton J T & Dixon J C. 1981. The chemistry and mineralogy of some South Australia calcretes and associated soft carbonates and their dolomitization[J]. Journal of Geological Society of Australia, 28: 71~79.
- Ji Junliang, Zhu Min, Wang Xu, *et al.* 2007. Ages of the Cenozoic strata on the southern margin of Junggar Basin, Northwestern China [J]. Journal of Stratigraphy, 34(1): 43~50.
- Li Tiejun. 2004. Overp ressure and its generation in south edge of the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 39 (2): 234~244 (in Chinese).
- Liu Yuehui and Liu Ping'an. 2003. Principle and Analysis of X-ray Diffraction[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1~258(in Chinese).
- 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.
- Newton A. 2007. Oceanography: Atlas sheds? The iron-rich dust entering the subtropical northeast Atlantic Ocean comes from the Anti-Atlas Mountain belt in Morocco[J]. Nature Geoscience, doi: 10.1038/ngeo. 2007. 49.
- Pan Chunfu, Ji Youliang, Gao Zhiyong, *et al.* 2011. Research on types and development models of Neocene sequences at southern margin of Junggar Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, (1): 34~37(in Chinese).
- Qiu Nansheng, Yang Haibo and Wang Xulong. 2002. Tectono-thermal evolution in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 37 (4): 423~429(in Chinese).
- Reynolds R C and Hower J. 1970. The nature of interlayering in mixed-layer illite-montmorillonites[J]. Clays and Clay Minerals, 18: 25~36.
- Singer A and Galan E. 1984. Palygorskite-serpionite: Occurrence, Genesis and Uses: Developments in Sedimentary[M]. Amsterdam: Elsevier, 87~124.
- SY/T 5163-2010. Analysis Method for Clay Minerals and Ordinary Non-clay Minerals in Sedimentary Rocks by the X-ray Diffraction [R]. 1~46(in Chinese).
- Thiry M & Pletsch T. 2011. Palygorskite Clays in Marine Sediments: Records of extreme Climate[A]. Galán E and Singer A. Developments in Palygorskite-Serpionite Research. Developments in Clay Science, 3[C]. Amsterdam: Elsevier, 101~124.
- Tlili A, Felhi M and Montacer M. 2010. Origin and Depositional environment of palygorskite and sepiolite from the Ypresian Phosphatic Series, Southwestern Tunisia[J]. Clays and Clay Minerals, 58(4): 573~584.
- Weaver C E. 1990. Clays, Muds and Shales[M]. Amsterdam: Elsevier, 1~819.
- Weaver C E & Beck K C. 1977. Miocene of the SE United States: a Model for Chemical Sedimentation in a perimarine Environment[A]. Developments in Sedimentology, 22[C]. Amsterdam: Elsevier, 1~234.
- Wei Jingming. 1982. Significance of stratigraphic age division, contrast and ancient climate of stratigraphy correlation of Late Permian to Meso-Cenozoic bivalve fauna in Xinjiang[J]. Xinjiang Petroleum Geology, (1): 1~7(in Chinese).
- Xie Qiaoqin, Chen Tianhu, Ji Junfeng, *et al.* 2005. The distribution of palygorskite in Lingtai section of Chinese Loess Plateau and its paleoclimate significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24 (6): 653~658(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaxiu, Zhang Naixian, Su Zhaobing, *et al.* 1994. China Clay Mineral[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~174(in Chinese).
- Yi Facheng, Li Hujie, Tian Xu, *et al.* 1995. Stable isotopic characteristics of attapulgite clay deposits in the border area between Jiangsu and Anhui provinces and their geological implication[J]. Acta Mineralogica Sinica, 15(2): 242~248 (in Chinese with English ab-

stracts).

Yin Ke, Hong Hanlie, Li Rongbiao, *et al.* 2010. 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).

Yue Tongbo, Chen Tianhu and Xie Qiaolin. 2010. Distribution of palygorskite in the Zhaojiachuan section of Chinese Loess Plateau and its paleoclimate significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(3): 383~387(in Chinese).

Zhai Shufen, Nie Wei and Yao Lijun. 1990. Genesis of palygorskite[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, (3): 239(in Chinese).

Zhang Liqiang, Luo Xiaorong, Liu Loujun, *et al.* 2005. Controls on clay mineral distribution in the cenozoic sediments of the southern Junggar Basin, NW China[J]. *Chinese Journal of Geology*, (3): 363~375(in Chinese).

Zhao Xingyuan. 2003. Characteristics and Formation of Attapulgite in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 24(3): 214~217(in Chinese).

Zheng Zili. 2001. Mineralization analysis of fibrous-type palygorskite[J]. *China Non-metallic Mining Industry Herald*, (6): 28~31(in Chinese with English abstract).

Zheng Zili, Tian Xu and Wang Pu. 1996. Study on powder crystal x-ray diffraction of palygorskite in China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (6): 3~8(in Chinese).

Zhuang Xinming. 2006. Petroleum geology features and prospecting targets of Sikeshu sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, (3): 429~434(in Chinese).

附中文参考文献

蔡元峰, 薛纪越. 2001. 安徽官山两种坡缕石粘土的成分与红外吸收谱[J]. *矿物学报*, 21(3): 323~328.

陈天虎, Xu H F, 彭书传, 等. 2004. 蒙脱石向凹凸棒石转化的直接证据——透射电子显微镜观察[J]. *中国科学D辑*, 34(3): 248~255.

高志勇, 韩国猛, 朱如凯, 等. 2009. 准噶尔盆地南缘古近纪-新近纪前陆盆地沉积格局与演变[J]. *古地理学报*, (5): 491~502.

郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 等. 2011. 准噶尔盆地南缘构造控藏作用及大型油气藏勘探方向浅析[J]. *高校地质学报*, (2): 185~195.

何登发, 翟光明, 况军, 等. 2005. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. *地质科学*, 40(2): 248~262.

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[J]. *现代地质*, 21(2): 406~414.

李铁军. 2004. 准噶尔盆地南缘异常高压及其成因机制初探[J]. *地质科学*, 39(2): 234~244.

刘粤惠, 刘平安. 2003. X射线衍射分析原理与分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1~258.

潘春孚, 纪友亮, 高志勇, 等. 2011. 准噶尔盆地南缘新近系层序类型与发育模式研究[J]. *断块油气田*, (1): 34~37.

邱楠生, 杨海波, 王绪龙. 2002. 准噶尔盆地构造-热演化特征[J]. *地质科学*, 37(4): 423~429.

SY/T 5163-2010. 沉积岩中粘土矿物和常见非粘土矿物X射线衍射分析方法[R]. 1~46.

魏景明. 1982. 新疆晚二叠世—中、新生代软体双壳类动物群化石组合序列及其对地层时代划分、对比和古气候的意义[J]. *新疆石油地质*, (1): 1~7.

谢巧勤, 陈天虎, 季峻峰, 等. 2005. 甘肃灵台黄土-红粘土序列中坡缕石的分布及其古气候意义[J]. *岩石矿物学杂志*, (6): 653~658.

新疆油气区石油地质编写组. 1995. 中国石油地质志(卷十五)-新疆油气区准噶尔盆地[M]. 北京: 石油工业出版社, 15~120.

杨雅秀, 张乃娴, 苏昭冰, 等. 1994. 中国粘土矿物[M]. 北京: 地质出版社, 1~174.

易发成, 李虎杰, 田煦, 等. 1995. 苏皖地区凹凸棒石粘土矿床稳定同位素特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 15(2): 242~247.

殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 等. 2010. 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.

岳统波, 陈天虎, 谢巧勤. 2010. 甘肃西峰赵家川黄土-红粘土剖面坡缕石分布及其古气候意义[J]. *高校地质学报*, 16(3): 383~387.

翟淑芬, 聂伟, 姚立军. 1990. 坡缕石的成因[J]. *电子显微学报*, (3): 239.

张立强, 罗晓容, 刘楼军, 等. 2005. 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*, (3): 363~375.

赵杏媛. 2003. 塔里木盆地坡缕石特征及成因[J]. *新疆石油地质*, 24(3): 214~217.

郑自立. 2001. 纤维状坡缕石的成矿作用分析[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (6): 28~31.

郑自立, 田煦, 王濮. 1996. 中国坡缕石粉晶X射线衍射特征研究[J]. *矿产综合利用*, (6): 3~8.

庄新明. 2006. 准噶尔盆地四棵树凹陷石油地质特征及勘探方向[J]. *新疆地质*, (3): 429~434.