

文章编号: 1000-0550(2004)01-0029-07

# 苏北盆地粘土矿物转化模式与古地温

姚合法<sup>1,2</sup> 林承焰<sup>1</sup> 侯建国<sup>1,3</sup> 董春梅<sup>1</sup> 刘玉瑞<sup>3</sup> 任丽华<sup>1</sup>

1(石油大学 山东东营 257061)

2(中原油田分公司勘探开发研究院 河南濮阳 457001)

3(江苏油田分公司 江苏扬州 225009)

**摘要** 以苏北盆地为例,系统研究了火成岩发育区粘土矿物组合特征及其控制因素;建立了粘土矿物转化模式;根据粘土矿物成岩演化特点,进行古地温分析。研究表明,苏北地区粘土矿物的分布主要受埋藏成岩作用、岩浆侵入、母质来源三种因素的影响,发育四种类型的粘土矿物组合和三种粘土矿物转化模式;火山碎屑岩母岩区和基性岩浆侵入区具有特殊的粘土矿物组合和成岩演化模式,前者以富含蒙皂石矿物为特点;后者出现高岭石与伊/蒙有序间层矿物共生组合,并具有不连续的演化序列;苏北盆地短有序 I/S 矿物出现于镜质组反射率 0.5%~0.55% 的深度,伊/蒙间层矿物转变成伊利石在镜质组反射率 0.75%~0.8%,可以用于热成熟度和古地温的估算;而蒙皂石消失的界面则不具有指标意义。

**关键词** 火成岩 粘土矿物 成岩演化 岩浆侵入 母质来源 古地温

**第一作者简介** 姚合法 男 1967 年出生 高级工程师 博士研究生 储层沉积学

**中图分类号** P588.2 **文献标识码** A

粘土矿物在沉积岩中分布非常广泛,在沉积岩石学、石油地质学以及油气勘探开发中的应用越来越广,主要应用于成岩作用及古地温研究、地层划分对比、沉积环境分析<sup>[1]</sup>、储层损害评价<sup>[2]</sup>、剩余油分布研究<sup>[3]</sup>、油田注水开发、三次采油<sup>[4]</sup>等领域,因此,粘土矿物分布规律及控制因素研究具有十分重要的意义。

研究表明,蒙脱石转变成伊利石具有一定的埋藏深度和范围,蒙脱石-伊利石系列矿物可用作标定沉积岩成岩作用程度和古地温的指标。日本学者通过对日本新生代盆地粘土矿物和沸石类矿物成岩分带的研究,标定了自生矿物分带的温度,并据此推测盆地的古地温和地层剥蚀厚度。我国也广泛开展了自生矿物成岩变化的研究,王行信等着重研究了松辽、渤海湾等含油气盆地生油岩中自生矿物的组合特征、成岩变化规律及其与油气的关系。

研究表明,自生矿物的形成和成岩转变除温度外,还受孔隙流体性质、受热时间、地温梯度、物源母质类型等其它因素的影响。

苏北盆地是中国东部火成岩发育的主要地区之一,火成岩的喷发和侵入造成地温梯度的显著增高,流体介质和受热机制发生变化,以及特殊的母质物源类型必然造成特定的粘土矿物组成和演化模式。本文通

过对 864 块泥岩样品的粘土矿物特征及其地质条件进行系统分析,研究了控制粘土矿物分布的主要地质因素,总结了火成岩发育区粘土矿物组合类型、成岩演化模式,在埋藏史和热事件研究的基础上,分析了苏北盆地粘土矿物转化与古地温的关系。

## 1 区域地质特征

苏北盆地位于中国东部,是苏北-南黄海盆地的陆上部分,横跨江苏、安徽两省,盆地西邻郯庐断裂、北邻鲁苏隆起、南接苏南隆起、东至黄海海岸,面积约  $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。新生代盆地呈近 EW 走向,由金湖凹陷、高邮凹陷、溱潼凹陷、海安凹陷、盐城凹陷、洪泽凹陷等 11 个箕状断陷及柳堡、菱塘桥、柘垛、吴堡、泰州、梁垛、小海等凸起、低凸起组成(图 1)。盆地基底为中生界和古生界,沉积盖层主要有上白垩统泰州组( $K_2 t$ )、古新统阜宁组( $E_1 f$ )、始新统戴南组( $E_2 d$ )、三垛组( $E_2 s$ )、上第三系盐城组( $N y$ )和第四系东台组( $Q d$ ),缺失渐新统( $E_3$ )。粘土矿物样品层位主要为阜宁组及戴南组、三垛组。

苏北盆地是中国东部火成岩发育的主要地区,岩浆活动时代长,范围广,平面上时代最早的为晚元古代,同位素年龄为 2 500 Ma,最新的为新生代晚第三

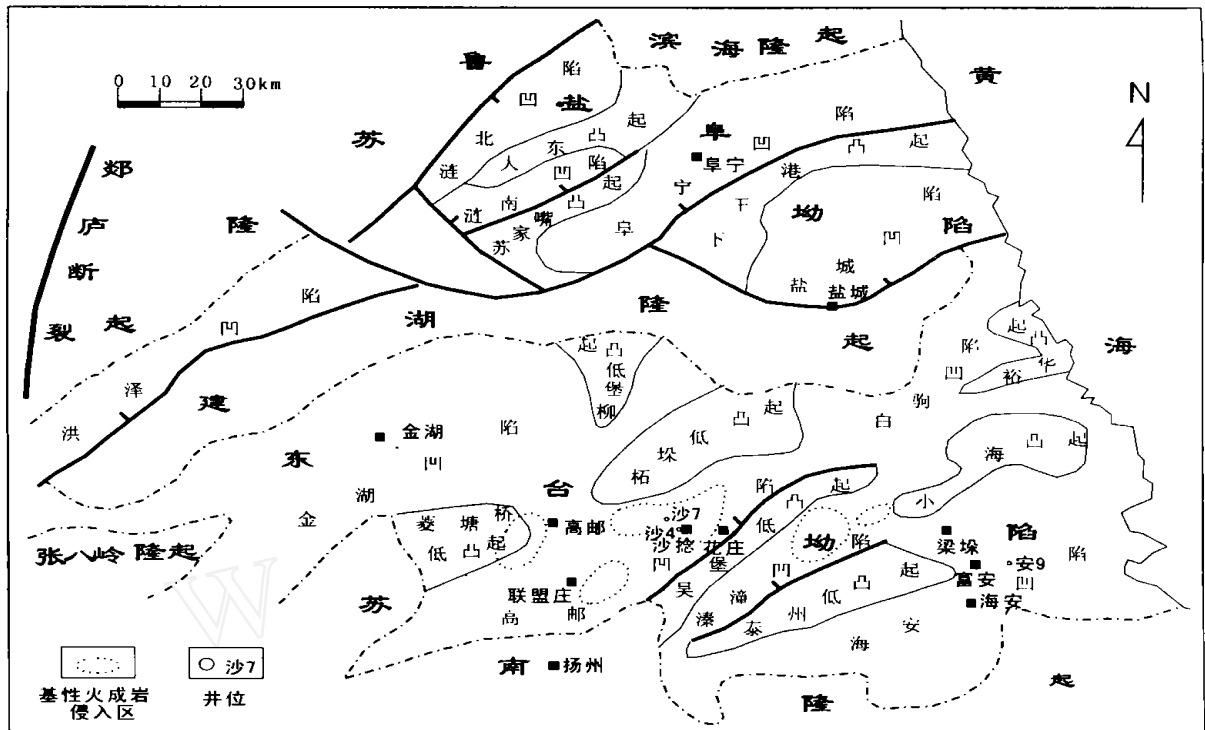


图1 苏北盆地构造区划图

Fig. 1 The structural map of North Jiangsu Basin

纪玄武岩体。其中,新生代火山作用主要表现为基性玄武岩喷发和浅层的辉绿岩侵入。本区玄武岩表现为分期分阶段喷发。根据玄武岩喷发活动强弱与构造活动的关系,分为  $K_2t - E_1f$ 、 $E_2d - E_2s$ 、 $N_y$  三个阶段<sup>[5]</sup>。其中,以  $E_1f_1$ 、 $E_2s_2$ 及  $N_{y1}$ 三期活动最强烈。

## 2 粘土矿物的分布特征

为了尽量消除沉积环境等因素对粘土矿物分布的影响,所用样品均为泥岩样品,分析方法以 X 衍射定量分析为主。由于本区的部分样品蒙皂石含量较高,蒙皂石具有较低的层电荷( $x = 0.2 \sim 0.6$ ),不同水化能的层间可交换阳离子,使得层与层之间结合力较弱,水分子很容易进入层间形成水分子层,故晶面间距具有胀缩性。因此,样品在 X 衍射分析前经过乙二醇饱和处理。

苏北盆地粘土矿物包括二八面体蒙皂石(S)、伊利石/蒙皂石(I/S)无序间层、伊利石/蒙皂石有序间层、伊利石(I)、高岭石(K)、绿泥石(C)。少数样品见有绿泥石/蒙皂石(C/S)不规则间层,个别样品见柯绿泥石。粘土矿物组合主要有四类(表1),其中:

类:蒙皂石 - 伊/蒙无序间层组合,粘土矿物以蒙皂石、伊/蒙无序间层、伊利石为主,以蒙皂石含量高、伊/蒙间层比(伊蒙间层矿物中蒙脱石层含量 S%)

高,大于 50% 为特征,有时出现绿/蒙间层矿物。洪泽凹陷 823 m、高邮凹陷联盟庄地区的 1 840 ~ 2 140 m、海安凹陷富安地区 750 ~ 1 250 m、2 741 ~ 2 925 m、梁垛地区 913 ~ 2 588 m、盐城凹陷盐参 1 井 2 082 ~ 2 791 m 为该组合类型。

类:伊/蒙无序间层 - 伊利石组合,粘土矿物以伊/蒙无序间层和伊利石为主,蒙皂石消失,高岭石、绿泥石含量一般在 10% 以下,伊/蒙间层比(S%) 大于 50%,分布在洪泽凹陷 893 ~ 1 813 m、高邮凹陷联盟庄地区 2 160 ~ 2 500 m、花庄地区 2 000 ~ 2 560 m、沙埝地区 1 958 ~ 2 197 m、盐参 1 井 2 866 ~ 2 945 m、海安凹陷梁垛地区 2 593 ~ 3 108 m 和富安地区 3 090 m。

类:伊利石 - 伊/蒙有序间层组合,以伊利石含量高、伊/蒙间层比低(S% < 50%) 为特点,出现于洪泽凹陷 1 850 ~ 2 644 m、高邮凹陷联盟庄地区 2 500 ~ 3 412 m、花庄地区 2 628 ~ 3 517 m、盐城凹陷 3 004 ~ 3 401 m、海安凹陷梁垛地区 3 172 ~ 3 273 m、富安凹陷 3 150 ~ 3 218 m。

类:高岭石 - 伊/蒙有序间层组合,粘土矿物主要为高岭石、伊/蒙有序间层、伊利石、绿泥石等,其特点是高岭石含量高、伊/蒙间层比低(S% < 40%),出现于高邮凹陷北斜坡的沙埝地区 2 307 ~ 2 726 m。

表 1 苏北盆地粘土矿物分析成果表

Table 1 The analytical data of clay minerals in North Jiangsu Basin

凹陷	地区或单井	埋藏深度 / m	粘土矿物含量/ %						S/ %	粘土矿物组合类型
			S	K	I	C	I/S	C/S		
洪泽		823	0~87	2~6	8~44	2~7	0~59	60~70	类	
		893~1 813		3~7	19~53	2~8	38~75	40~65	类	
		1 850~2 644		0~7	36~84	2~35	7~37	15~45	类	
		1 840~2 140	32~60	2~11	15~55	2~9	30~74	49~60	类	
高邮	联盟庄	2 160~2 500		4~10	19~46	5~10	38~91	50	类	
		2 500~3 412		5~11	40~58	6~21	19~36	15~40	类	
	花庄	2 000~2 560		3~7	15~38	4~7	48~78	47~67	类	
		2 628~3 517		0~10	31~81	1~13	3~75	15~53	类	
盐城	沙埕	1 958~2 197		2	11~13	85~87		65~70	类	
		2 307~2 726		11~61	1~31	0~40	0~65	15~40	类	
		2 082~2 791	0~95	0~8	0~23	0~9	0~91	55~87	类	
	盐参 1	2 866~2 945		6	15~18	4	72~75	52~58	类	
海安		3 004~3 401		0~10	13~77	2~10	14~71	0~10	类	
		913~2 588	0~89	0~33	4~63	3~8	0~92	0~66	类	
	梁垛	2 593~3 108		0~12	26~75	2~15	15~67	0~25	类	
		3 172~3 273		0~9	58~71	4~10	20~23	0~5	类	
富安		750~1 250	38~62	5~18	29~44	5~10	0	40~55	类	
		1 300~2 702		0~16	26~58	4~10	16~56	40~65	类	
	富安	2 741~2 925	87~96	0~8	0~3	0~4		100	类	
		3 090			29	5	66	55	类	
	3 150~3 218		0~10	47~69	0~14	22~50	20~26	类		

### 3 粘土矿物控制因素及成岩演化模式

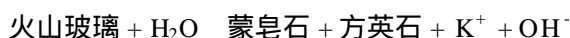
#### 3.1 影响本区粘土矿物分布的三大因素

##### 3.1.1 埋藏成岩作用

苏北盆地粘土矿物分析结果(表 1)表明,随着埋藏深度的增大,成岩作用加强,泥岩中蒙皂石含量降低,转化为间层矿物;间层矿物先增加而后减少,伊/蒙间层矿物中蒙脱石层含量(S%)降低,并由无序转变为有序,最后转变为端元矿物;伊利石含量增加;粘土矿物组合由类 类 类转化。

##### 3.1.2 火山碎屑物源

苏北盆地洪泽凹陷、高邮凹陷联盟庄地区蒙皂石分别在 893m、2 160 m 深度消失,海安凹陷的梁垛地区也在 2 593 m 以下转变为间层矿物。而富安地区则在 1 300 m 蒙皂石消失后,在阜二段 2 741~2 925 m 出现富含蒙皂石矿物的组合,蒙皂石含量高达 96%,这是由于富安地区阜二段存在火山喷发岩,泥岩中存在火山灰等物质(个别样品中可以观察到火山碎屑岩石学特征,大部分样品已完全泥化,观察不到火山碎屑岩的标志)。安 9 井薄片分析结果表明,在玄武岩附近泥岩样品的蒙皂石含量明显增高(表 2)。非晶质火山灰和玻璃质凝灰岩会在一定条件下发生脱玻化(晶化)作用,形成以蒙皂石为主的粘土矿物,反应式如下:



蒙皂石属 2<sub>3</sub>1 层型粘土矿物,包括二八面体和三八面体两个亚族,二八面体亚族(蒙脱石亚族)包括两个种,由云母矿物风化而成的多为贝得石,由火山灰和玻璃质凝灰岩蚀变而成的多为蒙脱石(种)。与蒙脱石相比,贝得石具有较高的层电荷,容易把 K<sup>+</sup> 固定在层间,使其晶间距收缩为 10 × 10<sup>-1</sup> nm,即随埋深的增加,向伊利石转化;而蒙脱石由于其层电荷偏低,不易固定 K<sup>+</sup>,因而随着埋深增加,不易向伊利石转化<sup>[6]</sup>。因此,这种由火山灰和玻璃质凝灰岩蚀变而成的蒙脱石,不易向伊利石转化,能够在深层得到保存,富安地区 2 741~2 925 m 的高蒙脱石含量组合可能与火山碎屑岩有关。

表 2 富安地区安 9 井粘土矿物含量与火山岩的关系

Table 2 The relationship between content of clay minerals and volcanic rocks

深度/ m	层位	岩性	粘土矿物含量/ %						
			S	I	K	C	I/S	C/S	
2 520	E <sub>1f2</sub>	泥岩		70		12			18
2 705	E <sub>1f2</sub>	泥岩	95		3	2			
2 745	E <sub>1f2</sub>	泥岩	91		9				
2 746.74	E <sub>1f2</sub>	薄片分析为黑绿色沸石化橄榄玄武岩							
2 760.86	E <sub>1f2</sub>	薄片分析为黑绿色橄榄玄武岩							
2 828.44	E <sub>1f2</sub>	泥岩		71		14			15

### 3.1.3 基性岩浆侵入

一般在早成岩阶段早期,高岭石含量高,随埋深的加大,高岭石向绿泥石转化。而高邮凹陷沙埕地区却在镜质组反射率为1.0%~3.1%的2307~2726 m井段出现富含高岭石矿物的类组合,高岭石矿物含量高达61%,而伊/蒙无序间层已经转化为有序间层。分析认为这种伊/蒙有序间层与高含量的高岭石共存的现象是基性岩浆侵入的结果,主要有两方面的依据:

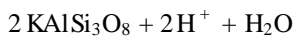
基性岩浆侵入有利于高岭石的形成和富集。沙埕地区是高邮凹陷岩浆活动最强烈的地区之一,岩浆侵入比较普遍,沙4井阜二段2776~2852 m、阜四段2426~2456 m、沙7井2682~2811 m分别钻遇辉绿岩76 m、32 m、131 m。岩浆侵入造成侵入岩周围泥岩异常升温,镜质组反射率达到1.0%以上(表3),达到中成岩阶段至晚成岩阶段,因此粘土矿物组合中伊/蒙间层已经转化为有序间层。

表3 沙埕地区火成岩侵入及其与成熟度的关系

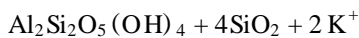
Table 3 The relationship between magma intrusion and maturation

井号	层位	侵入岩深度/m	辉绿岩厚度/m	$R_o$ /%
沙4	$E_1f_4$	2426 - 2456	32	1.01
沙4	$E_1f_2$	2776 - 2852	76	3.13
沙7	$E_1f_2$	2682 - 2811	131	

生油岩中的有机质主要在50~200℃温度区间形成有机酸<sup>[7]</sup>。岩浆侵入可以使未成熟的高有机质丰度的烃源岩温度升高,产生有机酸,使水介质呈酸性;在酸性介质条件下,长石、石英等碎屑矿物可直接蚀变为高岭石,或者长石受酸性水淋滤,在铝、硅富集到一定程度时,从水介质中可以析出高岭石,反应式如下:



(钾长石)



(高岭石)

另一方面,基性火山矿物包裹体破裂<sup>[8]</sup>、橄榄石的蛇纹石化<sup>[9]</sup>等作用可产生氢气,加速钾长石向高岭石的转化。

酸性水介质条件有利于高岭石的保存。模拟实验结果表明,随着加热温度的增加,泥岩镜质体反射率( $R_o$ )不断升高,泥岩热模拟过程中水介质的酸碱度(pH)随温度和 $R_o$ 值升高而增加,即由酸性变为碱性,并且一直稳定为碱性。因此,随埋深增加高岭石有减少并在一定深度以下消失和绿泥石相应增加的趋势,高岭石向绿泥石转化主要是由于水介质为碱性的原因。而由岩浆侵入造成的酸性水介质,可以使高岭石

得到有效保存。

### 3.2 成岩演化模式

根据粘土矿物转化特征,参考 Foscolos 等<sup>[10]</sup>的成岩阶段划分方案,苏北盆地粘土矿物演化具有三种模式。

#### 3.2.1 联盟庄地区演化模式

高邮凹陷的联盟庄地区粘土矿物分布主要受埋藏成岩作用的控制,纵向上具有三段式(图2),粘土矿物转化模式为类组合—类组合—类组合,其中,类、类组合为早成岩阶段,相当于镜质体反射率小于0.55%;类组合为中成岩阶段,镜质体反射率大于0.55%。另外,洪泽凹陷、高邮凹陷花庄地区、盐城凹陷盐参1井、海安凹陷梁垛地区粘土矿物的演化也属该模式。

#### 3.2.2 沙埕地区(辉绿岩侵入区)演化模式

高邮凹陷北部斜坡带的沙埕地区存在基性火成岩侵入,岩浆的异常增温是成岩演化的关键因素,粘土矿物转化具有(类组合)—类组合—类组合模式,是一种特殊的不连续的演化模式(图3)。其中,类组合为早成岩阶段,镜质组反射率小于0.55%,而类组合则为中成岩阶段晚期及晚成岩阶段,镜质体反射率达到1.0%以上。

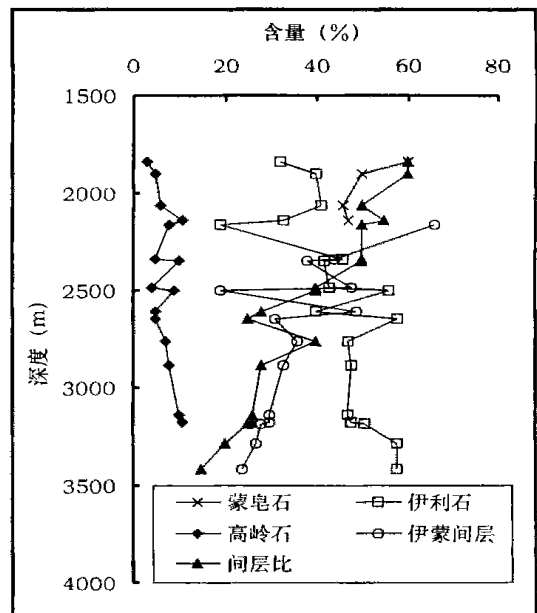


图2 联盟庄地区粘土矿物分布图

Fig. 2 Distribution of clay minerals in Lianmengzhuang area

#### 3.2.3 富安地区(火山碎屑岩区)演化模式:

海安凹陷富安地区粘土矿物转化受埋藏成岩作用和火山碎屑物质的双重控制,粘土矿物转化模式为类组合—类组合—类组合—类组合—类组合(图4)。蒙皂石在1300 m转化为伊/蒙间层矿物,但

在 2 741 ~ 2 925 m 又出现富含蒙皂石矿物组合,其中, 类组合、 类组合为早成岩阶段, 类组合为中成岩阶段。

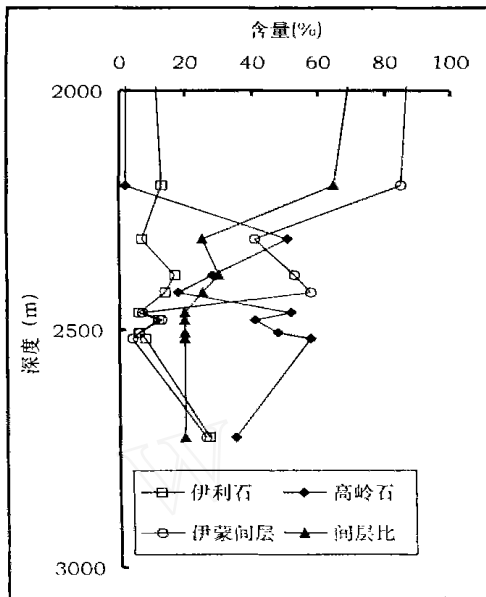


图 3 沙埝地区粘土矿物分布图

Fig. 3 Distribution of clay minerals in Sha'nian area

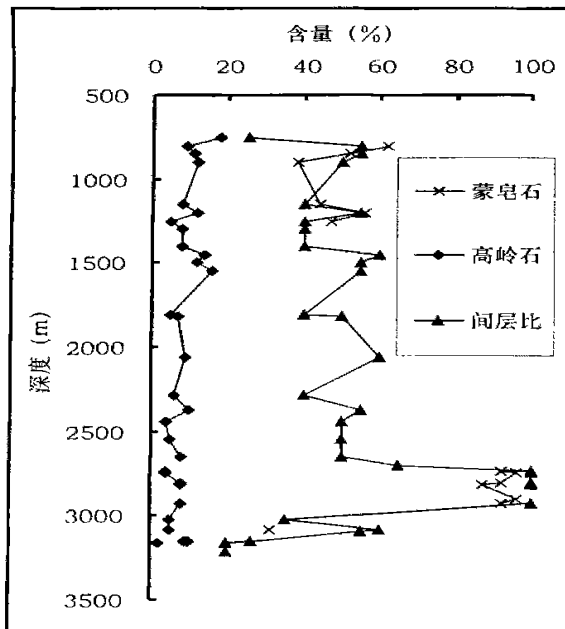


图 4 富安地区粘土矿物分布图

Fig. 4 Distribution of clay minerals in Fu'an area

#### 4 粘土矿物转化与古地温

粘土矿物分析资料被大量应用于泥岩热成熟度的评价,其中,主要有粘土矿物组合、蒙皂石(001)反射位置、伊/蒙间层矿物中伊利石层比例、伊利石结晶度(衍射图上伊利石波峰高度一半处的宽度)等<sup>[11]</sup>。

温度是控制蒙皂石向伊利石转化的一个最主要因素。随埋藏深度的增加和温度升高,蒙皂石开始转化

为伊/蒙间层矿物。而且随着伊利石层含量的逐渐增多,伊/蒙间层粘土矿物的结构也由无序的 I/S 层( $R=0$ ,蒙皂石晶层和伊利石晶层混杂堆积,蒙皂石晶层含量  $> 50\%$ )、短有序的 I/S 层( $R=1$ ,呈 IS 构型,蒙皂石晶层含量  $50\% \sim 15\%$ )和长有序的 I/S 层( $R=3$ ,呈 ISI 构型,蒙皂石晶层含量  $< 15\%$ )最终向伊利石转化<sup>[12]</sup>。通过 X 射线衍射方法,可以确定 I/S 层的类型和蒙皂石层及伊利石层的相对含量,因而为我们提供了一种有效的地温计。Perry 和 Hower(1972)第一次证明了蒙皂石的伊利石化与温度间的关系;Hoffman 和 Hower(1979)第一次利用这种关系建立了一个适于时间在  $5 \sim 300\text{Ma}$  间的地质温度计模型;Jenning 和 Thompson(1986)建立了适于时间  $< 3\text{Ma}$  的地质温度计模型;而 Kirsten Price 等(1993)则研究了在 1 亿年前的岩石中,利用这种关系来估计最大埋藏深度、温度及古地温梯度。

蒙皂石转变成伊/蒙间层矿物和该间层矿物转变成伊利石这两个界面的温度,在美国墨西哥湾沿岸高地温梯度区( $31^\circ\text{C}/\text{km}$ )分别为  $90^\circ\text{C}$  和  $130^\circ\text{C}$ ,低地温梯度区( $24^\circ\text{C}/\text{km}$ )分别为  $90^\circ\text{C}$  和  $145^\circ\text{C}$ ;日本新生代盆地分别为  $104^\circ\text{C}$  和  $137^\circ\text{C}$ ;渤海湾盆地歧口凹陷分别为  $95^\circ\text{C}$  和  $130^\circ\text{C}$ ;东营凹陷分别为  $90^\circ\text{C}$  和  $125^\circ\text{C}$ ;下辽河凹陷分别为  $90^\circ\text{C}$  和  $138^\circ\text{C}$ 。纵观不同研究者对不同新生代盆地(或同一盆地)第三系自生矿物的研究,可以发现,他们提出的自生矿物的形成温度和成岩转变温度比较接近,这说明用自生矿物推断的古地温是比较可靠的。由于自生矿物在沉积岩中分布非常普遍,因而相对于有机质指标之外的重要的矿物热成熟度和古地温指标,具有广泛的实用价值<sup>[13]</sup>。

对有机质演化与粘土矿物中 I/S 矿物的关系的研究结果表明,蒙皂石矿物消失和短有序伊/蒙间层矿物出现的界面可以识别,蒙皂石矿物消失和短有序 I/S 矿物一般出现于镜质组反射率  $0.4\% \sim 0.7\%$ ,马来群岛加里曼丹岛东部马哈卡姆(Mahakam)晚第三纪三角洲盆地短有序 I/S 矿物出现于镜质体反射率  $0.42\% \sim 0.47\%$  的深度<sup>[14]</sup>。

苏北盆地蒙皂石消失界面早于短有序 I/S 出现的深度,而且大部分地区短有序 I/S 矿物出现于镜质组反射率  $0.5\% \sim 0.55\%$  的深度,可作为古地温估计的指标,而蒙皂石消失的界面则相差甚远(表 4),不能用于本区古地温和热成熟度的分析。

高邮凹陷联盟庄和花庄地区  $3\ 280 \sim 3\ 390\text{m}$ (阜宁组)泥岩镜质组反射率为  $0.75\% \sim 0.8\%$ ,伊/蒙间层大幅度降低,而伊利石含量急剧升高,该深度即为伊/蒙间层矿物转变成伊利石的界面,根据 Aoyagi 和

Kazama(1980)的研究,伊/蒙间层矿物转变成伊利石需要的温度为 $137^{\circ}\text{C}$ ,而高邮凹陷井温测井表明 $3\ 280\sim 3\ 390\text{ m}$ 深度的现今地温为 $110\sim 114^{\circ}\text{C}$ ,表明,高邮凹陷阜宁组烃源岩经历的古地温高于现今地温。

温,说明高邮凹陷阜宁组经历的古地温高于现今地温。

本文的完成得到江苏油田有关人员的大力帮助,并提供了基础资料,在此一并致谢。

#### 参考文献(References)

表4 苏北盆地蒙皂石消失和短有序 I/S 出现深度

Table 4 The disappearance of smectite and occurrence of short-distance ordering I/S

凹陷	地区或单井	蒙皂石消失		短有序 I/S 出现	
		深度/m	深度/m	深度/m	$R_{\phi}/\%$
洪泽		823	1 850		0.55
高邮	联盟庄	2 140	2 500		0.5
	花庄	<2 000	2 560		0.53
盐城	盐参1	2 791	2 945		0.75
海安	梁垛	2 588	3 108		0.56
	富安	3 080	3 091		0.56

## 5 结果与讨论

(1) 火成岩发育区粘土矿物分布不仅受埋藏成岩作用的控制,同时也受火山碎屑母质和基性岩浆侵入的影响,发育四种粘土矿物组合和三种类型的成岩演化序列。

(2) 在火山碎屑岩沉积区,非晶质火山灰和玻璃质凝灰岩会在一定条件下发生脱玻化(晶化)作用,蚀变为蒙脱石(种),且不易向伊利石转化,因此火山碎屑岩沉积区蒙皂石消失较晚。

(3) 基性岩浆侵入一方面使温度异常升高,泥岩达到晚成岩阶段,同时,流体介质环境加速钾长石向高岭石的转化并有利于高岭石的保存。因此,基性岩浆侵入区出现高岭石与有序 I/S 矿物共存的粘土矿物组合。

(4) 苏北盆地联盟庄、富安、沙埕地区粘土矿物转化序列分别为 类组合 类组合 类组合、类组合 类组合 类组合 类组合 类组合、类组合 类组合 类组合,分别代表一般地区正常转化、火山碎屑岩沉积区、基性火成岩侵入区粘土矿物演化模式。其中,类组合、类组合为早成岩阶段,镜质组反射率小于 $0.55\%$ ;类组合为中成岩阶段,镜质组反射率大于 $0.55\%$ ;类组合属中成岩阶段晚期及晚成岩阶段,镜质组反射率大于 $1.0\%$ 。

(5) 苏北盆地短有序 I/S 矿物出现于镜质组反射率 $0.5\%\sim 0.55\%$ ,高邮凹陷东部深凹带伊/蒙间层矿物转变成伊利石的界面在 $3\ 280\sim 3\ 390\text{ m}$ ,温度在 $137^{\circ}\text{C}$ 左右,可以用于热成熟度和古地温的估算;而蒙皂石消失的界面则不具有指标意义。

(6) 由粘土矿物转化而估算的温度高于现今地

1 王随继,曾凡刚,黄杏珍,等.含油气盆地中粘土矿物的穆斯堡尔效应及应用——以柴达木盆地第三系为例.沉积学报,1998,16(2):109~112[Wang Suiji, Zeng Fangang, Huang Xingzhen, et al. The mossbauer effect of clay minerals in oil basin and its application——Taking Tertiary system of Qaidam basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 109~112]

2 靳秀菊,姚合法,刘振兴,等.低渗致密砂岩气田储层损害评价及保护措施.现代地质,2002,16(4):408~413[Jin Xiujun, Yao Hefa, Liu Zhenxing, et al. Damage evaluation and safeguard of reservoirs in tight sand gas field with low permeability. Geoscience, 2002, 16(4): 408~413]

3 唐洪明,曾凡刚,陈忠.莲花油层中粘土矿物分布规律研究.沉积学报,2001,19(2):233~238[Tang Hongming, Zeng Fangang, Chen Zhong, et al. The study of clay mineral distribution in Lianhua reservoir. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 233~238]

4 王行信.我国油气勘探开发中粘土矿物研究的现状及建议.石油勘探与开发,1997,24(6):99~102[Wang Hangxin. Present situation and proposal for clay mineral research in petroleum exploration and development of China. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 99~102]

5 杨方之,周荔青,郭念发,等.江苏黄桥二氧化碳气田.北京:石油工业出版社,2001.46~54[Yang Fangzhi, Zhou Liqing, Guo Nianfa, et al. Huangqiao CO<sub>2</sub> gas field in Jiangsu. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 46~54]

6 赵杏媛,王行信,张有瑜.中国含油气盆地粘土矿物.武汉:中国地质大学出版社,1995.47~49[Zhao Xingyuan, Wang Hangxin, Zhang Youyu. Clay mineral in petroliferous basin. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995. 47~49]

7 傅家谟,王铸青,史继扬,等.有机地球化学.北京:科学出版社,1982.150~161[Fu Jiamou, Wang Zuqing, Shi Jiyang, et al. Organic geochemistry. Beijing: Science Press, 1982. 150~161]

8 李方武,王先彬.橄榄石热解氢释放过程的分析.地球化学,1998,27(5):514~515[Li Fangwu, Wang Xianbin. Analysis of hydrogen released by heating olivine. Geochimica, 1998, 27(5): 514~515]

9 Raymond M, Covenney J R., Edwin D, et al. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas. AAPG Bulletin, 1987, 71(1): 39~48

10 Foscolos A E. The use of clay minerals and inorganic and organic geochemical indicators for evaluating the degree of diagenesis and oil generating potential of shales. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1976, 40(8): 953~966

11 Allen P A, Allen J R. Basin analysis: Principles and applications. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 1990. 290~291.

12 任战利.中国北方沉积盆地构造热演化史研究.北京:石油工业出版社,1999.12~13[Ren Zhanli. The tectonic and thermal evolution history in sedimentary basins of North China. Beijing: Petroleum Industry press, 1999. 12~13]

13 周中毅,潘长春.沉积盆地古地温测定方法及其应用.广东科技出

版社, 1992 [Zhou Zhongyi, Pan Changchun. Paleotemperature analysis methods and their application in sedimentary basins. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1992]

14 Norbert Clauer, Thierry Rinckenbach, Francis Weber, *et al.* Diagenetic

ic evolution of clay mineals in oil-bearing Neogene sandstones and associated shales, Mahakam delta basin, Kalimantan, Indonesia. AAPG Bulletin, 1999, 83(1): 62 ~ 87

## The Pattern of Clay Mineral Transformation and Palaeo-temperature in North Jiangsu Basin

YAO He-fa<sup>1,2</sup> LIN Cheng-yan<sup>1</sup> HOU Jian-guo<sup>1,3</sup> DONG Chun-mei<sup>1</sup>  
LIU Yu-rui<sup>3</sup> REN Li-hua<sup>1</sup>

1(University of Petroleum, Dongying Shandong 257061)

2(Institute of Petroleum Exploration and Development in Zhongyuan Oil field, Puyang Henan 457001)

3(Jiangsu Oilfield, Yangzhou Jiangsu 225009)

**Abstract** Taking North Jiangsu basin as an example, this paper demonstrates the characteristics of clay minerals assemblages and the controlling factors in igneous regions systemically, establishes the patterns of diagenetic transformation, analyses palaeo-temperature according to the evolutionary features of the clay minerals. The distribution of clay minerals is mainly influenced by burial diagenesis, magma intrusion, volcanic clastic rocks and there are four types of clay mineral assemblages in North Jiangsu basin. The clay mineral assemblages of smectite-random I/S and random I/S illite occur in early diagenetic stage with a vitrinite reflectance value of less than 0.55%, the assemblage of illite-ordered I/S occurs in middle diagenetic stage with a vitrinite reflectance value of more than 0.55%, the assemblage of kaolinite-ordered I/S occurs in middle and late diagenetic stage with a vitrinite reflectance value of more than 1.0%.

There are special clay minerals assemblages and diagenetic evolution models in regions of volcanic clastic rocks and magma intrusion. As the present of volcanogenic detrital material regions, the assemblage of smectite-random I/S occurs repeatedly in vertical with the content of smectite of more than 90% in Fu'an region of Hai'an depression. Its evolution model is the assemblages from smectite-random I/S, to random I/S-illite, to Smectite-random I/S, to random I/S-illite, and illite-ordered I/S. Gaoyou depression, being a representative of magma intrusion regions, has a discontinuous evolving sequence of the assemblages from smectite-random I/S, to random I/S-illite, and kaolinite-ordered I/S, where kaolinite and ordered I/S are observed coexisting. The evolution model of clay mineral in other regions is the assemblages from smectite-random I/S, to random I/S-illite, to illite-ordered I/S.

Short-distance ordered I/S occurs at a vitrinite reflectance value of 0.5% ~ 0.55%, the transformation from ordered I/S to illite occurs at 3280 ~ 3390m in depth and 137 °C in temperature. The transforming surface can be used to estimate maturity and palaeo-temperature while the disappearing surface of smectite can not be thermal indicator.

**Key words** clay minerals, diagenetic evolution, magma intrusion, parent materials, paleo-temperature