

文章编号 :1000-0550(2001)02-0293-06

# 济阳拗陷下第三系湖相生油岩的微观特征

刘传联 舒小辛 刘志伟

(同济大学海洋地质教育部重点实验室 上海 200092)

**摘要** 利用背散射电子成像技术、扫描电镜和能谱分析对山东济阳拗陷下第三系主要湖相生油岩的微观结构、成分特征进行了高分辨率的观察和分析,同时对其中藻类化石丰度进行了定量统计。结果显示,这些生油岩既有共性又有显著的差异。共性表现在它们都具有纹层状构造,而且有机质都特别丰富,呈纹层分布。差异性表现在纹层单元的成分明显不同:富有机质纹层页岩由有机质纹层和粘土矿物纹层组成,钙质纹层页岩则有两种情况:一类由有机质纹层和钙质超微化石纹层组成,另一类由有机质纹层和粗粒方解石纹层组成,粗粒方解石中含有钙质超微化石,钙质纹层泥岩由细粒方解石纹层和含有机质的粘土矿物纹层组成。生油岩中有机质的分布也有两种形式:一类是有机质纹层,另一类则是藻类化石层,如沟鞭藻化石层和钙质超微化石(颗石藻)层。

**关键词** 微观特征 生油岩 下第三系 济阳拗陷

**第一作者简介** 刘传联 男 1963 年出生 副教授、博士 古湖泊学

**中图分类号** TE122.1+13 **文献标识码** A

济阳拗陷位于山东省东营市和滨州市境内,是我国东部重要的含油盆地。多年的研究和勘探实践证明,其生油岩主要是下第三系沙河街组的湖相纹层状泥页岩<sup>[1]</sup>。对这些生油岩,许多研究者已经从沉积学<sup>[2]</sup>、地球化学<sup>[3-4]</sup>和古生物学<sup>[5]</sup>等方面进行过详细的工作。但限于方法,对这类生油岩微观的组构和成分特征还缺少高分辨率的观察和描述,从而影响了进一步对其沉积和生油机制的探索和解释。近年来,随着现代测试技术的发展,纹层状泥页岩的研究方法取得了很大进展<sup>[6-7]</sup>,最突出的就是扫描电镜特别是背散射电子成像(Backscattered electron imagery,简称 BSEI)技术的引进和应用<sup>[8]</sup>。笔者近年来利用这些方法,对济阳拗陷下第三系湖相生油岩进行了高分辨率的研究,限于篇幅,本文只对其微观特征进行描述,而其沉积和生油机制则另文讨论。

## 1 生油岩类型

济阳拗陷下第三系湖相生油岩类型多种多样,但不同研究者对这些生油岩的命名则不甚统一。如邓宏文、钱凯<sup>[2,3]</sup>划分为 9 类,而胜利石油管理局地质科学研究所地层古生物室<sup>①</sup>则分成四类(表 1)。实际上,若根据是否有纹层构造发育,则可以分成纹层状泥质岩和非纹层状泥质岩两大类(表 1),而主要生油岩均是纹层状泥质岩。根据下述微观特征的观察,本文进一步划分为富有机质纹层页岩、钙质纹层泥岩和钙质纹

层页岩三类,各类生油岩与其它分类方案的对比见表 1。这些主要生油岩的宏观特征如下:富有机质纹层页岩通常呈深灰色或棕褐色,肉眼观察,页理清晰,油田习称“油页岩”;钙质纹层泥岩为灰到深灰色,肉眼观察看不到页理或仅隐约可见;钙质纹层页岩为浅灰到灰白色,页理清晰,油田习称“油页岩”或“钙片页岩”。

## 2 研究方法概述

背散射电子成像(BSEI)是在扫描电镜中内置背散射电子探头和图像分析装置,对样品进行高分辨率观察、分析和照相的一项技术。其基本原理是:当入射电子束与靶区原子接触时,发生弹性碰撞,产生背散射电子,背散射电子的数量(称为背散射系数 $\eta$ )主要与靶区的原子序数有关,原子序数高时, $\eta$ 值就大,图像就亮,原子序数低时, $\eta$ 值就小,图像就暗<sup>[8]</sup>。具体到泥页岩,由于其中各种矿物颗粒(如黄铁矿、石英、长石、粘土矿物、碳酸盐矿物等)之间以及矿物颗粒与有机质颗粒之间原子序数均存在差异,所以背散射电镜图像能清晰地揭示它们之间的关系。如矿物颗粒原子序数较高,在图像中矿物层亮,而有机质层色则暗。

与其它泥页岩研究方法相比,BSEI 技术最大的优点就是空间分辨率高。X 光照相主要研究泥页岩的纹层构造,当纹层厚度小于 200  $\mu\text{m}$  时,X 光下就不能清晰显示出来。光学显微镜的最大分辨率为 1  $\mu\text{m}$ ,当泥

① 胜利石油管理局地质科学研究所地层古生物室. 山东济阳—昌潍拗陷第三系. 1990.

表 1 济阳坳陷下第三系湖相生油岩分类对照表

Table 1 Comparison of classification on Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang depression

本 文		地层古生物室 <sup>(1)</sup>	邓宏文、钱凯 <sup>(2,3)</sup>
纹层状泥质岩	钙质纹层泥岩	暗色泥岩	黑页岩
			水平纹层粉砂质泥岩
			递变纹层理粉砂质泥岩
	富有机质纹层页岩	油页岩	钙片黑页岩
	钙质纹层页岩		钙质纹层页岩
非纹层状泥质岩			均匀块状含粉砂质泥岩
			不均匀块状粉砂质泥岩
		炭质泥岩	炭质泥岩
		含膏泥岩	含膏泥岩

页岩的组成颗粒小于  $1\ \mu\text{m}$  时,就不能分辨率出来。而背散射电镜的分辨率可达  $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。另外, BSEI 作为在扫描电镜基础上发展起来的一种技术,不但能突出泥页岩不同组成部分之间的对比度,而且还能在高放大倍数下清晰识别出矿物颗粒、有机质和古生物化石的形状。最后, BSEI 技术通过与能谱分析仪 (EDS) 配合使用,还能定性或半定量分析矿物成分。

### 3 生油岩微观特征

#### 3.1 富有机质纹层页岩

背散射电镜图像显示该类生油岩由浅、暗两色构成的纹层对所组成,纹层连续、平直或略呈微波状,两者之间密集排列,某些纹层之间夹有白色方解石脉或透镜体(图 1)。经测量,浅色纹层厚度为  $15\sim 50\ \mu\text{m}$ ,暗色纹层较浅色纹层薄,一般为  $6\sim 35\ \mu\text{m}$ 。

能谱分析结果表明,浅色纹层以粘土矿物为主,主要为伊利石(占 80%),其它还有铁白云石(占 5%~10%)、黄铁矿(占 1%~3%)、石英(占 1%~2%)、长石(占 1%~2%)和微量的磷灰石(占 0.03%)。暗色纹层则为有机质纹层,有机质呈伸长、压扁状或片状。同时显示有机质纹层中也含有矿物颗粒成分,经能谱测试,主要为碎屑粘土(主要为伊利石)、粉砂级的石英和长石(1%~2%)、黄铁矿(1%~3%)和少量铁白云石(1%~5%)。在该类页岩中未发现显微生物扰动构造。

对暗色有机质纹层和浅色粘土矿物纹层分别刻取样品,用前述“面积法”和“重量法”进行藻类化石丰度统计,发现两层沟鞭藻化石丰度均很低,每平方厘米仅有 2~4 个,100 mg 中有 3~5 个,有机质纹层中稍多于粘土矿物纹层(表 2,3)。

#### 3.2 钙质纹层页岩

该类生油岩肉眼观察即可显示浅色层和暗色层相

间的特征,在扫描电镜下观察则显示出与富有机质纹层页岩明显不同的成分特征,并且可以分为两种不同的情况:

一类由钙质超微化石纹层和有机质纹层构成的纹层对组成(图 2)。钙质超微化石纹层即是肉眼观察到的浅色纹层,有机质纹层则是暗色纹层。两者之间界限明显,且呈平行关系,钙质超微化石纹层厚度为  $40\sim 130\ \mu\text{m}$ ,有机质纹层厚度为  $15\sim 50\ \mu\text{m}$ 。进一步放大观察倍数,更清晰地展示在钙质超微化石纹层中,钙

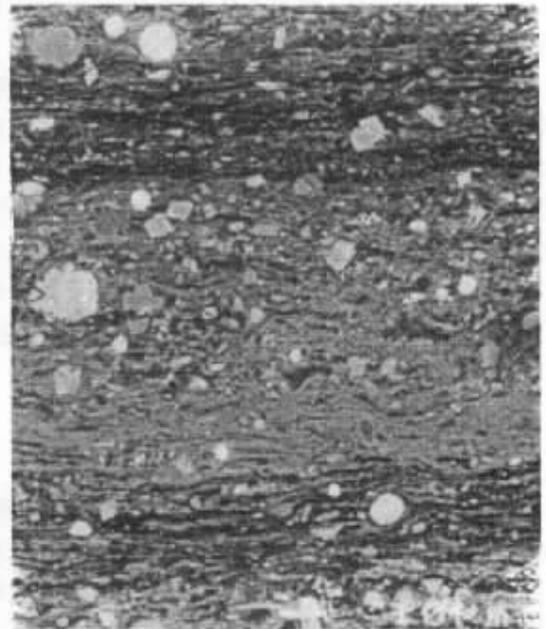


图 1 富有机质纹层页岩散射电子图像  
(浅色层为粘土矿物纹层,暗色层为有机质纹层)

Fig. 1 Backscattered electron image of the organic rich laminated shale. The light layers are clay-rich laminae and the dark ones are organic laminae

表 2 各类生油岩不同纹层单元沟鞭藻化石丰度统计表(面积法)

Table 2 The abundance of dinoflagellates in different lamination of petroleum source rocks (dinoflagellates/cm<sup>2</sup>)

井号	层位	深度/m	岩性	纹层类别	沟鞭藻类
孤南 27	沙一下	2159.6	钙质纹层页岩	有机质纹层	500
				钙质超微化石纹层	21
		2159.3	钙质纹层页岩	有机质纹层	87
				钙质超微化石纹层	9
		2160.9	钙质纹层页岩	有机质纹层	27
				钙质超微化石纹层	9
牛 38	沙三中下	3290.2	富有机质纹层页岩	有机质纹层	4
				粘土矿物纹层	2
		3312.2	钙质纹层泥岩	粘土矿物纹层	12
				细粒方解石纹层	7
纯 11	沙四上	1793.3	钙质纹层页岩	有机质纹层	90
				粗粒方解石纹层	72

表 3 各类生油岩不同纹层单元沟鞭藻化石丰度统计表(重量法)

Table 3 The abundance of dinoflagellates in different lamination of petroleum source rocks (dinoflagellates/100 mg)

井号	层位	深度/m	岩性	纹层类别	沟鞭藻类
孤南 27	沙一下	2156.0	钙质纹层页岩	有机质纹层	500
				钙质超微化石纹层	350
牛 38	沙三井中、下	3331.0	富有机质纹层页岩	有机质纹层	5
				粘土矿物纹层	3
		3325.6	钙质块状纹层泥岩	粘土矿物纹层	250
				细粒方解石纹层	67
纯 11	沙四上	2210.7	钙质纹层页岩	有机质纹层	400
				粗粒方解石纹层	50

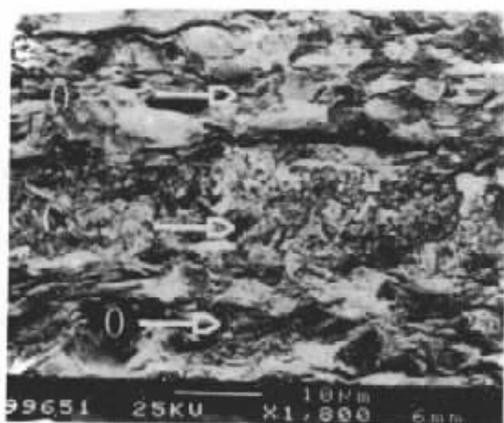


图 2 钙质纹层页岩扫描电镜图像  
(O 示有机质纹层,C 示钙质超微化石纹层)  
Fig.2 SEM micrograph shows alternating  
organic matter lamina(O) and coccolith  
lamina(C) in calcareous shale

质超微化石密密麻麻迭加在一起,化石个体小,属种单一,形状清晰(图 3)。对两层分别进行沟鞭藻化石丰度统计,发现暗色有机质纹层中丰度明显高于浅色钙质超微化石纹层,在有机质纹层中,沟鞭藻化石每平方米最高可达 132 个,100 mg 样品中可达 500 个(表 2, 3)。考虑到由于纹层太薄,取样时可能存在混样的情况,这种差异还应该更大。

另一类则由粗粒方解石纹层/有机质纹层纹层对组成(图 4)。两层之间界限也较为清晰,粗粒方解石粒径一般为 10~20 μm,粗粒方解石纹层厚度为 50~140 μm,有机质纹层厚度为 10~40 μm。与上述一类钙质纹层页岩的最大区别是钙质超微化石含量少,钙质超微化石只是零星散布在粗粒方解石纹层中,而且保存不好,有溶蚀现象(图 5)。沟鞭藻化石的丰度也是有机质纹层高于粗粒方解石纹层(表 2, 3)。但在对纹层样品处理涂片后,在生物显微镜下观察,可发现有有机质纹层中有沟鞭藻化石纹层存在(图 6)。这种保

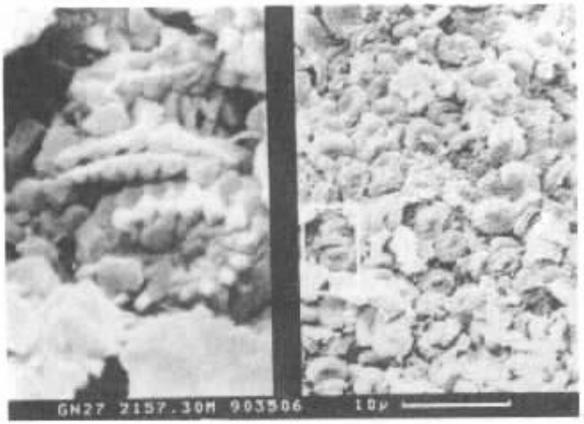


图 3 钙质超微化石纹层的扫描电镜大图像  
Fig.3 Close-up SEM micrographs of coccolith laminae in calcareous shale

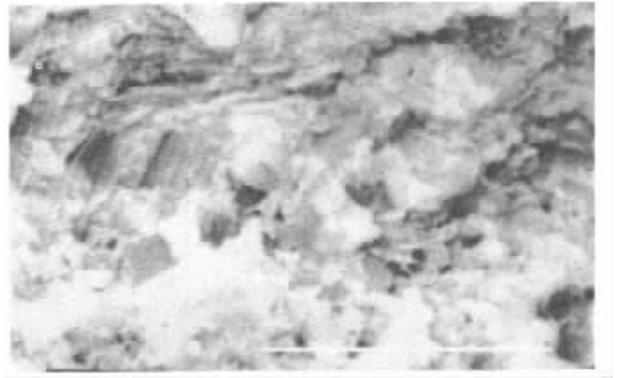


图 5 扫描电镜图像示粗方解石纹层中有钙质超微化石分布(比例尺等于 10 μm)  
Fig.5 Close-up SEM micrograph of coccoliths in coarse calcite laminae. Scale bar = 10 μm



图 4 粗粒方解石纹层和有机质组成的钙质纹层页岩 (扫描电镜图像,比例尺等于 10 μm)  
Fig.4 SME micrograph of calcareous laminated shales which are composed of organic lamination and coarse calcite lamination. Scale bar = 10 μm

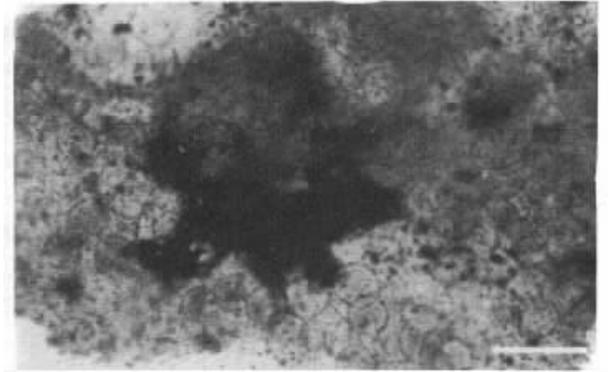


图 6 钙质纹层页岩中沟鞭藻化石层 (*Feramo* 藻单种分布,比例尺等于 0.005mm)  
Fig.6 *Feramo* lamina in the organic-rich laminae of calcareous shale. Scale bar = 0.05mm

存形式,不可能是样品处理所造成。因为一系列的处理过程只能使化石散开,不可能使其聚集。所以,它反映了沟鞭藻化石的一种原始保存状态,说明沟鞭藻化石该类生油岩中是呈层分布的。

### 3.3 钙质纹层泥岩

虽然肉眼观察,钙质纹层泥岩中看不到页理或不清晰,但在背散射电镜图象中则显示明显的纹层状构造。如图 7 所示,该类生油岩也由浅、暗两色纹层对组成,浅色层厚度为 30 ~ 100 μm,暗色层厚度为 50 ~ 250 μm,两者之间平行、连续、接触关系清晰。

能谱分析揭示浅色层为细粒方解石纹层,暗色层

为含有有机质的粘土矿物纹层。细粒方解石纹层主要成分为细粒方解石(1 ~ 4 μm),混有粗粒方解石(10 ~ 20 μm)及少量铁白云石。粘土矿物纹层主要矿物成分为伊利石(70%),其次为铁白云石,含量高时可达 20%,其它有微量的黄铁矿、细粒方解石(5%)和粉砂级石英(3%)。粘土矿物纹层中含有较为丰富的有机质,有时可在其中可以形成次级纹层,也可以分散在粘土矿物颗粒之间。

该类生油岩中同样含有丰富的沟鞭藻化石,而且粘土矿物纹层中明显高于细粒方解石纹层,最高可达 100 mg 样品中有 250 个沟鞭藻化石。在粘土矿物纹层中也有沟鞭藻化石层出现(图 8)。

## 4 结语

扫描电镜和背散射电子成像技术结合能谱分析为

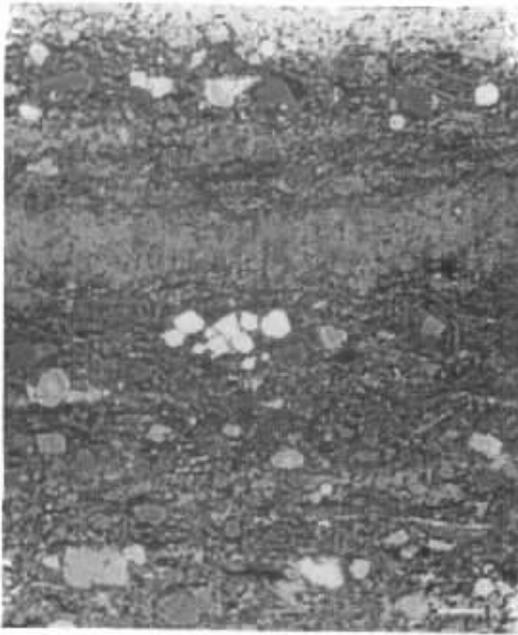


图 7 钙质纹层泥岩的背散射电子图像  
(浅色层为细粒方解石纹层, 暗色层为含  
有机质的粘土矿物纹层, 比例尺等于 10  $\mu\text{m}$ )

Fig.7 Backscattered electron image of Calcareous  
laminated mudstone  
(Light colored layers are fine-grained calcite laminae,  
and dark ones are organism-containing clay laminae.  
Scale bar = 10  $\mu\text{m}$ )

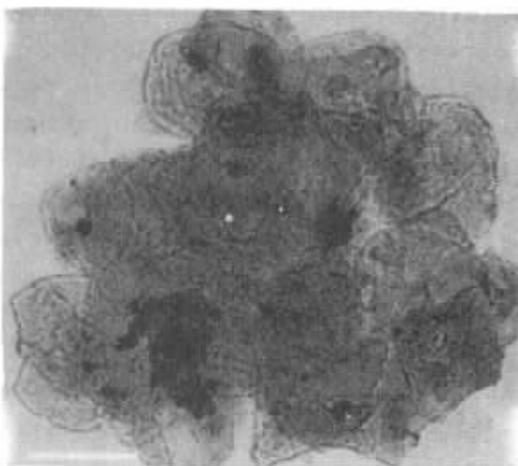


图 8 钙质纹层泥岩中的沟鞭藻化石  
(*Bohaidina*)层(比例尺等于 0.05 mm)

Fig.8 *Bohaidina* lamina in the organic-bearing clay  
laminae of calcareous laminated mudstone.  
(Scale bar = 0.05 mm)

段。通过这种手段,可以清晰地观察生油岩的显微结构、矿物成分、生物组成特别是有机质的分布特征,这些特征对于进一步理解生油岩的沉积机制和生油机制、评价生油岩的生油潜力具有重要的意义。

济阳坳陷下第三系三类主要生油岩具有共同的特征,即都具有纹层状构造,都是由纹层对组成的韵律沉积,有机质都特别丰富,呈纹层分布;它们又有明显不同的微观特征,突出表现在纹层单元的成分上。富有机质纹层页岩由有机质纹层和粘土矿物纹层组成,钙质纹层页岩则有两种情况:一类由有机质纹层和钙质超微化石纹层组成,另一类由有机质纹层和粗粒方解石纹层组成,粗粒方解石中含有钙质超微化石,钙质纹层泥岩由细粒方解石纹层和含有机质的粘土矿物纹层组成。生油岩中有机质的分布也有两种形式:一类是有机质纹层,它们多呈伸长、压扁或片状;另一类则以藻类化石层的形式分布,如沟鞭藻化石层和钙质超微化石(颗石藻)层。

致谢 汪品先院士对本文提出了修改意见,英国曼彻斯特大学地质系 Curtis 教授和 Macquaker 博士,协助完成了样品背散射电镜分析工作,胜利油田地质研究院徐金鲤高级工程师为本文提供了许多帮助,在此一并致以谢意。

#### 参 考 文 献

- 1 王秉海,钱凯.胜利油区地质研究与勘探实践[M].山东东营:石油大学出版社,1992.357
- 2 邓宏文,钱凯.深湖相泥岩的成因类型及其组合演化[J].沉积学报,1990,8(3):1~19
- 3 邓宏文,钱凯.沉积地球化学与环境分析[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.154
- 4 洪志华,陈致林,殷沫,张春荣.东营凹陷牛38井沙三段中下部有机质分布特征[J].石油与天然气地质,1991,12(3):292~299
- 5 姚益民,梁鸿德,蔡治国等.中国油气区第三系(IV)渤海湾盆地油气区分册[M].北京:石油工业出版社,1994.240
- 6 Kemp A E S. Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments[A]. Geological Society Special Publication No. 116[C]. London, 1996. 252
- 7 Pike J. Kemp A E S. Preparation and analysis techniques for studies of laminated sediments[A]. In: Kemp A E S, eds. Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments. Geological Society Special Publication No. 116[C]. London, 1996. 37~48
- 8 Belin S, 赵林译.背散射电子成像在烃源岩微结构研究中的应用[J].地质地球化学,1994,5:60~65

## Micro-characteristics of Paleogene Lacustrine Petroleum Source Rocks in Jiyang Depression

LIU Chuan-lian SHU Xiao-xin LIU Zhi-wei

(Laboratory of Marine Geology of Tongji University, Shanghai 200092)

### Abstract

The Jiyang depression is one of the subbasins of the Bohai Gulf Rift Basin in the eastern China. About 65 oil fields have been discovered in this depression over the past 30 years and the oil mainly derived from three types of finely laminated lacustrine rocks of Shahejie Formation (Eocene – Oligocene). These source rocks are organic-rich laminated shale, calcareous laminated shale and calcareous laminated mudstone. High resolution studies have been carried out on these petroleum source rocks by scanning electron microscope (SEM), backscattered electron imagery (BSEI) and energy dispersive spectrometry (EDS). The results show that these source rocks are all laminated sedimentary rocks, and organic matters are very abundant in it, but they have the different sediment composition.

Organic-rich laminated shale is composed of organic matter lamination and clay mineral lamination; The clay-rich laminae range in thickness from 15 to 100  $\mu\text{m}$  and are predominantly composed of illite (80%). In addition, they have subsidiary components which comprise ankerite (5 ~ 10%), pyrite (1 ~ 3%), quartz (1 ~ 2%) and feldspar (1% ~ 2%) along with trace amounts of apatite (0.03%). In contrast, the organic-rich laminae are thinner than the clay-rich laminae, ranging from 6 ~ 50  $\mu\text{m}$  and are predominantly composed of amorphous organic matter (20% ~ 70%), as well as organic matter, these laminae also contain detrital clay (predominantly illite), silt-sized quartz, feldspar (1% ~ 2%), and pyrite (1% ~ 3%). Displacive calcite layers were also present. The calcite in these layers consists of low-Mg, non-ferroan calcite. In addition to the characteristic "beef" texture of this calcite, these layers also contain pyrite framboids, detrital quartz and ankerite. Calcareous laminated shale is composed of organic matter lamination and coccolith or coarse calcite lamination; The coccolith laminae is composed almost wholly of one species, *Reticulofenestra bohaiensis* and the coarse grained calcite laminae are composed of coarse calcite (10 ~ 20  $\mu\text{m}$ ) and also contain coccoliths. Within the coccolith laminae, the size of coccolith ranges from 2 to 5  $\mu\text{m}$ , and it has a good preservation. Within the coarse calcite laminae, the coarse calcite are sparry calcite characteristically by its overgrowth, and the coccoliths have a poor preservation characteristics such as dissolution. This indicated that the coccolith-bearing coarse calcite laminae may be recrystallized from the dissolution of coccolith laminae. Organic matter laminae is mainly composed of the lath of amorphous organic matter and contain trace amounts of detrital clay. The thickness of organic-rich laminae range from 15 to 50  $\mu\text{m}$  and the thickness of the calcite laminae range from 40 to 130  $\mu\text{m}$ . Another important phenomenon is that there are dinoflagellates laminae in the organic-rich laminae. These dinoflagellates laminae are also composed of one species, *Feram* (Fig.3).

Calcareous laminated mudstone is composed of finely grain calcite lamination and organic-rich clay mineral lamination. The clay-rich laminae range in thickness from 50 ~ 250  $\mu\text{m}$  and are predominantly composed of illite (70%) and organic matter (organic matter may be formed by sublaminae in clay-rich laminae). They also contain fine grained calcite (5%) and silt-sized detrital quartz (3%). In contrast, the carbonate-rich laminae are predominantly composed of microm sized and fine grained calcite which form layers 30 ~ 100  $\mu\text{m}$  in thickness. The dinoflagellates laminae is also discovered in the organic-bearing clay-rich laminae (Fig.6).

**Key words** micro-characteristics petroleum source rocks Paleogene Jiyang depression