

一种泥页岩层系岩相划分方法

董春梅^{1,2}, 马存飞¹, 林承焰^{1,2}, 孙雪¹, 袁梦影¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 山东省油藏地质重点实验室, 山东青岛 266580)

摘要:泥页岩层系中成分复杂,岩相划分方案不统一。通过岩心观察、显微镜下鉴定、全岩分析及有机地化数据分析,采用岩心宏观构造、有机质含量和岩石类型相结合的方法,以“四组分三端元”分类为原则,建立一种泥页岩层系岩相综合划分方案。结果表明:该分类方案引入有机质组分的含量,体现了泥页岩层系的构造特征、混积特征及其实用性,在苏北盆地阜二段泥页岩层系岩相划分研究中得以有效应用,可以为后续泥页岩储集空间研究、测井岩相识别和储层可改造性评价奠定基础。

关键词:泥页岩; 四组分三端元; 有机质体积分数; 三级命名; 阜二段

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A

引用格式:董春梅,马存飞,林承焰,等. 一种泥页岩层系岩相划分方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):1-7.

DONG Chunmei, MA Cunfei, LIN Chengyan, et al. A method of classification of shale set [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(3):1-7.

A method of classification of shale set

DONG Chunmei^{1,2}, MA Cunfei¹, LIN Chengyan^{1,2}, SUN Xue¹, YUAN Mengying¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Reservoir Geology Key Laboratory of Shandong Province, Qingdao 266580, China)

Abstract: The composition of shale formation is complicated, and the lithofacies classification schemes are not unified. Using core observation, microscopic identification, whole rock analysis and organic geochemical data analysis, a comprehensive shale set lithofacies classification scheme, which is based on the principle of “four-component and three-terminal element”, was established by adopting a method of combining macro structures of cores, organic content with rock types. The classification scheme introduces the organic matter content, and reflects the structural characteristics, mixed sedimentary characteristics of shale formations as well as its practicability. This classification scheme has been effectively applied to the study of lithofacies classification of shale set in the second Member of Funing Formation, Subei Basin, and may form a solid basis for the future shale reservoir space research, logging lithofacies identification and reservoir reconstruction evaluation.

Keywords: shale; four-component and three-terminal element; the volume fraction of organic matter; three-level named; the second Member of Funing Formation

非常规油气资源泥页岩油气勘探和开发在美国取得了巨大成功^[1], 目前已成为全球研究的热点方向和实现领域^[2]。对泥页岩层系观察时发现其颜色、成分、结构、构造、储集空间特征及含油性都表现出极强的非均质性, 主要归结于其矿物成分复杂、岩相类型变化快、纹层发育等特征。国内外学者主要对泥页岩

储集空间类型开展了大量研究并取得了丰硕成果^[3-7], 但对泥页岩岩相分类研究相对较少^[8], 缺乏统一的分类标准和认识。目前应用比较广泛的是基于主要矿物成分的泥页岩分类方法^[9-11], 以碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物为三端元的图解法^[12], 内部细分命名采用三级命名原则, 该分类方案主要存在

收稿日期:2015-02-25

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-003)

作者简介:董春梅(1963-),女,教授,博士,主要从事矿物岩石、储层地质的教学及科研工作。E-mail:lcydm@upc.edu.cn。

以下几个问题:①泥页岩既是生油岩、盖层,也可以是储层,作为生油岩和油气储层的泥页岩中有机质含量占有重要的比例,以往的分类往往忽略了有机质组分在划分泥页岩岩相中的作用;②泥页岩的含义和使用在沉积学界尚未有统一的认识,泥岩、页岩、黏土岩等概念存在重叠混淆或经常被混用^[13-14],中国多数学者认为黏土岩是指含有大量黏土矿物(含量大于50%),且粒径小于0.003 9 mm的碎屑组成的沉积岩^[15],它包括泥岩和页岩,英美学者倾向于把粒级范围小于1/256 mm、含量大于2/3的岩石称为黏土岩,粒级为1/16~1/256 mm、含量大于2/3的岩石称为粉砂岩,两者之间的过渡类型称为泥岩,所有这些岩石总称为泥状岩或泥质岩^[15];③通过泥页岩宏观及微观观察发现,其纹层和定向性特征异常发育,单层厚度从小于1 mm到大于50 cm均有,所以岩相分类时需考虑岩石构造特征;④有些术语由于频繁的使用及区域性约定俗成,不能轻易废除^[16],如油页岩;⑤泥页岩系中存在混积岩^[17],其中构成泥页岩的每一种组分含量(如黏土矿物、粉砂、钙质)均不超过50%,这给通常以50%为边界确定岩石主名的方法带来困难。笔者通过大量文献调研和实验观察研究,把有机质含量纳入泥页岩分类依据中,采用“四组分三端元”分类方法,同时考虑宏观构造和混积特征,容纳传统岩石术语,依据X衍射全岩分析数据寻找到确定泥页岩岩相主名的组分边界值,解决泥页岩岩相划分中的问题。

1 定名方案

本着科学性和实用性的原则,本文中采用宏观构造和岩石类型相结合的方法进行泥页岩岩相划分。将有机质组分的含量引入泥页岩的分类命名中,采用了“四组分三端元”的划分原则。四组分指灰(云)质矿物组分、黏土矿物组分、长英质(粉砂质)矿物组分和有机质组分;三端元为灰(云)质、黏土质和长英质(粉砂质)。

1.1 宏观构造确定

通过岩心观察和显微镜鉴定确定层理的厚度,划分泥页岩的宏观构造类型。纹层间距大于50 cm者为块状,10~50 cm者为层状,1~10 cm者为薄层状,1 mm~1 cm者为纹层状,小于1 mm者为页状。

1.2 岩石组分确定

1.2.1 有机质组分确定

(1)通过干酪根分析确定泥页岩中有机质的类型,分为腐泥型和腐殖型两类。

(2)通过有机碳分析确定泥页岩的总有机碳含量,利用总有机碳含量、转换系数、有机质密度和岩石密度,得到有机质组分体积分数,计算公式如下:

$$V_o = W_o K \rho_m / \rho_o \quad (1)$$

式中, V_o 为有机质体积分数; W_o 为总有机碳含量; K 为有机质转化系数^[18],是将有机碳含量转换为有机质含量的系数,为1.1~1.5,是根据泥页岩中有机质类型和成岩演化阶段确定的^[18](表1); ρ_m 为泥页岩密度,一般取2.5 g/cm³; ρ_o 为有机质密度,一般取1.0 g/cm³。

将总有机碳含量代入上式,得到有机质体积分数。

表1 有机质转化系数K

Table 1 Organic transformation coefficient of K

演化阶段	干酪根类型			煤
	I	II	III	
成岩阶段	1.25	1.34	1.48	1.57
深成阶段末期	1.20	1.19	1.18	1.12

1.2.2 无机矿物组分确定

通过镜下薄片鉴定和全岩矿物分析确定泥页岩的矿物组成,得到灰(云)质矿物组分、长英质(粉砂质)矿物组分和黏土矿物组分的体积分数。

1.3 岩石类型划分

1.3.1 泥页岩大类划分

国内对抚顺、茂名、羌塘等地油页岩中有机质含量研究表明,油页岩有机质体积分数大于15%^[19-20],统计苏北盆地阜二段有机质体积分数分布发现,15%同样是泥页岩有机质含量变化明显的界限(图1)。据此将泥页岩划分为两大类,超过15%者为富有机质大类,反之为贫有机质大类(图2)。

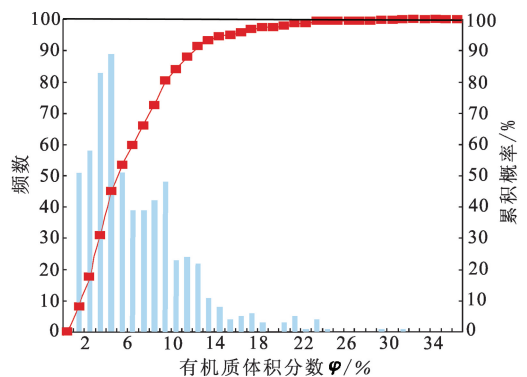


图1 阜二段有机质体积分分布频率直方图

Fig. 1 Organic volume distribution frequency histogram of the second Member of Fulin Formation

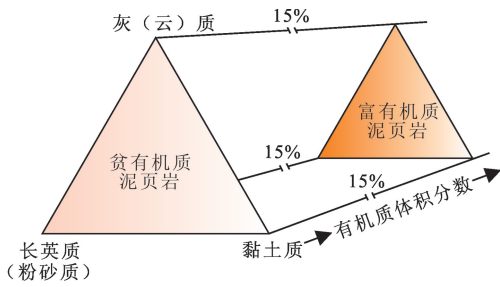


图 2 泥页岩大类划分示意图

Fig. 2 Major class division schematic diagram of shale

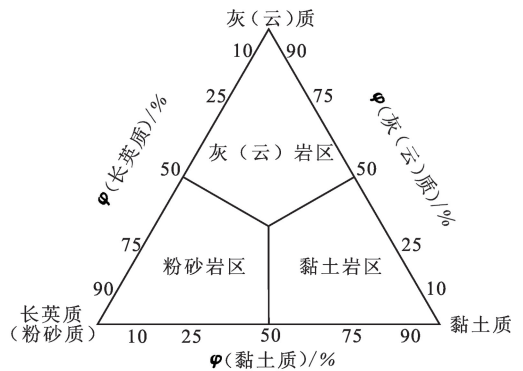
1.3.2 泥页岩小类划分

(1)富有机质泥页岩大类中根据有机质类型进一步划分小类,以腐泥型为主的称为油泥页岩,以腐殖型为主的称为炭泥页岩。

(2)贫有机质泥页岩大类中,取灰(云)质矿物组分、长英质(粉砂质)矿物组分和黏土矿物组分为三端元的三角图中心处,结合粒径分析,划分为灰(云)岩区、粉砂岩区和黏土岩区等3个区(图3、表2)。

每个区中采用三级命名的方法进行进一步划分小类。三级命名指三端元中相对含量最多的定为主

名;相对含量介于 25% ~ 50% 的定为“××质”,写在主名之前;相对含量介于 10% ~ 25% 的定为“含××”,写在名称的最前面;相对含量小于 10% 的不参与命名(图4、表2)。



注:薄片和粒度分析表明泥页岩中粉砂几乎全是长英质矿物,而绝大部分的长英质矿物处于粉砂级

图 3 贫有机质泥页岩分区

Fig. 3 Subarea of organic-poor shale

灰(云)岩区中岩石小类的主名根据灰质和云质的相对含量确定,如方解石含量大于白云石含量,则主名为灰岩,相反为云岩(图4)。

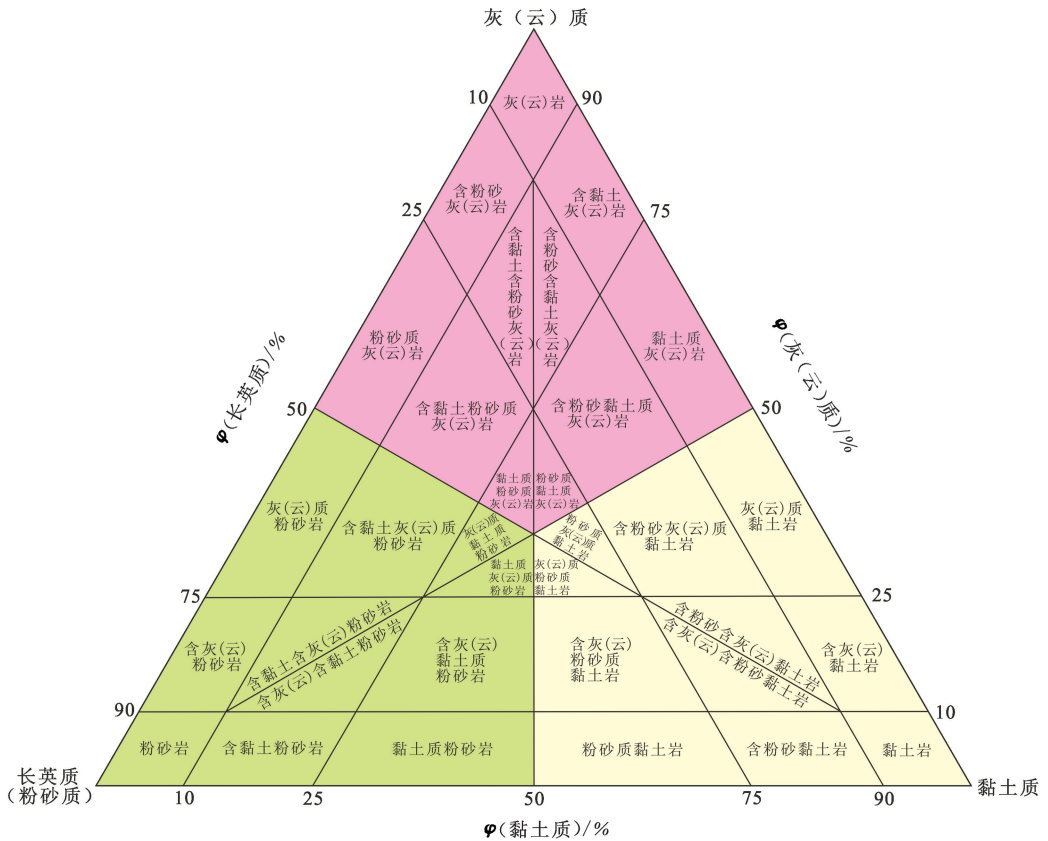


图 4 贫有机质泥页岩小类划分方案

Fig. 4 Scheme of subclass classification of organic-poor shale

表2 贫有机质泥页岩分区及小类划分

Table 2 Classification of subarea and subclass of organic-poor shale

区	小类	灰云质矿物含量/%	长英质(粉砂质)矿物含量/%	黏土矿物含量/%	相对含量
灰(云)质区	灰(云)岩	80~100	0~10	0~10	灰(云)质>长英质,灰(云)质>黏土质
	含粉砂灰(云)岩	65~90	10~25	0~10	灰(云)质>长英质>黏土质
	含黏土含粉砂灰(云)岩	50~80	10~25	10~25	灰(云)质>长英质>黏土质
	含黏土灰(云)岩	65~90	0~10	10~25	灰(云)质>黏土质>长英质
	含粉砂含黏土灰(云)岩	50~80	10~25	10~25	灰(云)质>黏土质>长英质
	粉砂质灰(云)岩	45~75	25~50	0~10	灰(云)质>长英质>黏土质
	含黏土粉砂质灰(云)岩	37.5~65	25~45	10~25	灰(云)质>长英质>黏土质
	黏土质粉砂质灰(云)岩	33.33~50	25~37.5	25~33.33	灰(云)质>长英质>黏土质
	黏土质灰(云)岩	45~75	0~10	25~50	灰(云)质>黏土质>长英质
	含粉砂黏土质灰(云)岩	37.5~65	10~25	25~45	灰(云)质>黏土质>长英质
	粉砂质黏土质灰(云)岩	33.33~50	25~33.33	25~37.5	灰(云)质>黏土质>长英质
	粉砂岩	0~10	80~100	0~10	长英质>灰(云)质,长英质>黏土质
	含黏土粉砂岩	0~10	65~90	10~25	长英质>黏土质>灰(云)质
	含灰(云)含黏土粉砂岩	10~25	50~80	10~25	长英质>黏土质>灰(云)质
	含灰(云)粉砂岩	10~25	65~90	0~10	长英质>灰(云)质>黏土质
含黏土含灰(云)粉砂岩	10~25	50~80	10~25	长英质>灰(云)质>黏土质	
粉砂质区	黏土质粉砂岩	0~10	45~75	25~50	长英质>黏土质>灰(云)质
	含灰(云)黏土质粉砂岩	10~25	37.5~65	25~45	长英质>黏土质>灰(云)质
	灰(云)质黏土质粉砂岩	25~33.33	33.33~50	25~37.5	长英质>黏土质>灰(云)质
	灰(云)质粉砂岩	25~50	45~75	0~10	长英质>灰(云)质>黏土质
	含黏土灰(云)质粉砂岩	25~45	37.5~65	10~25	长英质>灰(云)质>黏土质
	黏土质灰(云)质粉砂岩	25~37.5	33.33~50	25~33.33	长英质>灰(云)质>黏土质
	黏土岩	0~10	0~10	80~100	黏土质>灰(云)质,黏土质>长英质
	含粉砂黏土岩	0~10	10~25	65~90	黏土质>长英质>灰(云)质
	含灰(云)含粉砂黏土岩	10~25	10~25	50~80	黏土质>长英质>灰(云)质
	含灰(云)黏土岩	10~25	0~10	65~90	黏土质>灰(云)质>长英质
	含粉砂含灰(云)黏土岩	10~25	10~25	50~80	黏土质>灰(云)质>长英质
	粉砂质黏土岩	0~10	25~50	45~75	黏土质>长英质>灰(云)质
	含灰(云)粉砂质黏土岩	10~25	25~45	37.5~65	黏土质>长英质>灰(云)质
	灰(云)质粉砂质黏土岩	25~33.33	25~37.5	33.33~50	黏土质>长英质>灰(云)质
	灰(云)质黏土岩	25~50	0~10	45~75	黏土质>灰(云)质>长英质
含粉砂灰(云)质黏土岩	25~45	10~25	37.5~65	黏土质>灰(云)质>长英质	
粉砂质灰(云)质黏土岩	25~37.5	25~33.33	33.33~50	黏土质>灰(云)质>长英质	

1.4 岩相命名原则及简化

(1)采用岩心宏观构造和岩石类型相结合的方法命名泥页岩岩相。

(2)考虑实用性原则,解决名字冗长的问题,保留传统名称,对命名进行简化处理。

富有机质泥页岩大类中,油页岩的宏观构造若为纹层状或页状,定名为油页岩,其他宏观构造的定名为油泥岩;炭泥页岩的宏观构造若为纹层状或页状,定名为炭(质)页岩,其他宏观构造则定名为炭(质)泥岩。

贫有机质泥页岩大类中,三级名称的同一级别中只保留含量相对多的组分,如纹层状粉砂质灰质黏土岩简化为纹层状灰质黏土岩(图5)。

2 苏北盆地阜二段泥页岩岩相划分

2.1 划分依据

苏北盆地阜二段主要为浅湖和半深湖沉积环

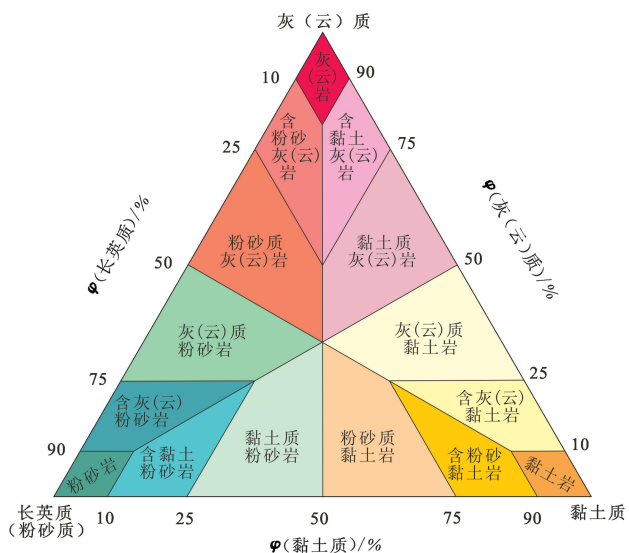


图5 贫有机质泥页岩小类简化方案

Fig.5 Subclasses simplified scheme of organic-poor shale

境,发育大套泥页岩。根据岩石构造划分标准,阜二段岩石构造类型丰富,从页状到块状都存在,以薄层状和层状为主,块状、纹层状和页状次之。

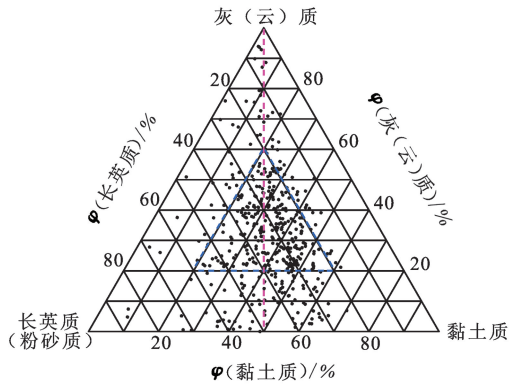
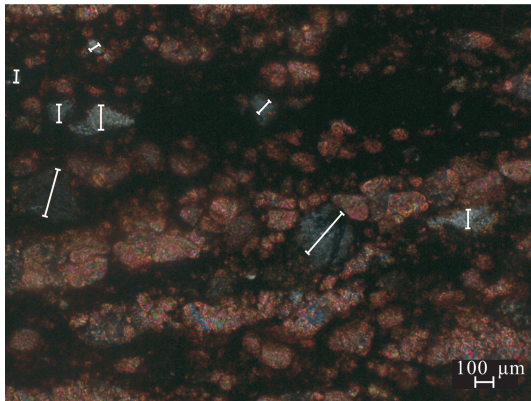


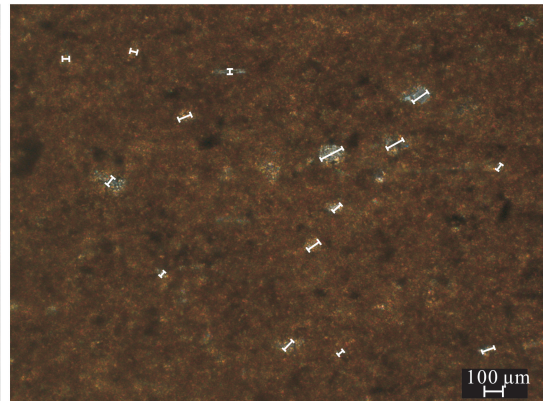
图 6 阜二段全岩矿物三角图

Fig. 6 Triangular diagram of whole rock-mineral of the second Member of Funing Formation

阜二段泥页岩中有机质的类型主要为腐泥型,泥页岩成岩阶段处于中成岩 A 期,故有机质转化系数 K 选取 1.25。泥页岩密度平均为 2.5 g/cm^3 ,有机质密度取 1.0 g/cm^3 。将上述参数代入式(1),得到阜二段泥页岩的有机质体积分数,该值分布在 $1\% \sim 32\%$ 。这表明阜二段泥页岩有机质组分含量高,反映生物沉积作用显著,不能被忽略,应参与岩相定名。



(a) 沾化凹陷, 罗69, 沙三段, 3059.35 m



(b) 苏北盆地, 花2, 阜二段, 3390.88 m

图 8 正交偏光镜下长英质矿物粒径测量

Fig. 8 Particle diameter measurement of felsic minerals in orthogonal light of microscope

2.2 岩相类型

阜二段泥页岩有机质体积分数分布在 $1\% \sim 32\%$,以 15% 为界,发育富有机质泥页岩和贫有机质泥页岩两大类。由于有机质类型主要为腐泥型,所以富有机质泥页岩大类中主要发育油页岩类。贫有机质泥页岩大类中采用“四组分三端元”分类和“三级命名”之后,发育灰(云)岩、粉砂岩和黏土

阜二段泥页岩主要由灰(云)质矿物、长英质(粉砂质)矿物和黏土矿物组成。将 438 个 X 衍射全岩数据投入三角图(图 6)中发现两个特点:矿物组分以灰(云)质为轴线,长英质(粉砂质)和黏土含量对称分布于轴线两端;矿物组分集中于三角图的中部,三种组分各约占 $1/3$,而纯黏土岩很少。美国 Barnett 页岩粒度分析以及沾化凹陷沙三段和苏北盆地阜二段等大量薄片观察统计表明绝大部分长英质矿物粒径大于 $3.9 \mu\text{m}$,且普遍小于 $62.5 \mu\text{m}$,处于粉砂级别^[21],因此可以将研究区长英质矿物视作粉砂(图 7(据文献[21]修改)、8)。

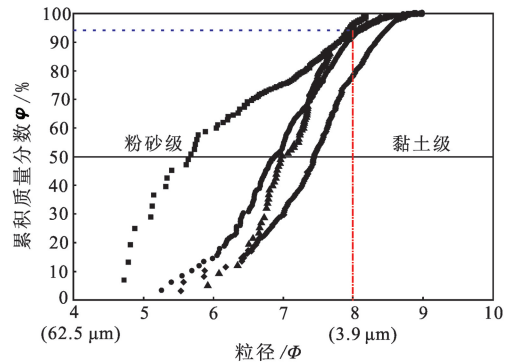


图 7 Barnett 页岩中粒度分布

Fig. 7 Particle-size distribution within Barnett shale

岩三个系列,各系列中的具体岩石类型如图 4 所示。考虑到实用性、突出优势组分和保留传统名称而进行简化,结合岩石构造特征得出苏北盆地阜二段主要发育油页岩、油泥岩、页状云质黏土岩、纹层状黏土质云岩、薄层状粉砂质黏土岩和层状黏土质粉砂岩等 18 种岩相(表 3)。

表3 研究区主要岩相类型

Table 3 Main lithofacies types within study area

序号	岩相名称	宏观构造	有机质含量/%	长英质(粉砂质)矿物含量/%	黏土矿物含量/%	灰(云)质矿物含量/%
1	油页岩	纹层状、页状	>15	0~100	0~100	0~100
2	油泥岩	薄层状、层状	>15	0~100	0~100	0~100
3	页状黏土质云岩	页状	<15	0~33.33,<黏土质	25~50	33.33~75,>黏土质,云质>灰质
4	页状云质黏土岩	页状	<15	0~33.33,<灰(云)质	33.33~75,>灰(云)质	25~50,云质>灰质
5	页状粉砂质黏土岩	页状	<15	25~50	33.33~75,>长英质	0~33.33,<长英质
6	纹层状黏土质云岩	纹层状	<15	0~33.33,<黏土质	25~50	33.33~75,>黏土质,云质>灰质
7	纹层状云质黏土岩	纹层状	<15	0~33.33,<灰(云)质	33.33~75,>灰(云)质	25~50,云质>灰质
8	纹层状粉砂质黏土岩	纹层状	<15	25~50	33.33~75,>长英质	0~33.33,<长英质
9	薄层状云质黏土岩	薄层状	<15	0~33.33,<灰(云)质	33.33~75,>灰(云)质	25~50,云质>灰质
10	薄层状粉砂质黏土岩	薄层状	<15	25~50	33.33~75,>长英质	0~33.33,<长英质
11	薄层状粉砂质云岩	薄层状	<15	25~50	0~33.33,<长英质	33.33~75,>长英质,云质>灰质
12	薄层状黏土质云岩	薄层状	<15	0~33.33,<黏土质	25~50	33.33~75,>黏土质,云质>灰质
13	薄层状黏土质粉砂岩	薄层状	<15	33.33~75,>黏土质	25~50	0~33.33,<黏土质
14	层状云质黏土岩	层状	<15	0~33.33,<灰(云)质	33.33~75,>灰(云)质	25~50,云质>灰质
15	层状粉砂质黏土岩	层状	<15	25~50	33.33~75,>长英质	0~33.33,<长英质
16	层状黏土质粉砂岩	层状	<15	33.33~75,>黏土质	25~50	0~33.33,<黏土质
17	层状粉砂质云岩	层状	<15	25~50	0~33.33,<长英质	33.33~75,>长英质,云质>灰质
18	层状黏土质云岩	层状	<15	0~33.33,<黏土质	25~50	33.33~75,>黏土质,云质>灰质

3 结论

(1)采用岩心宏观构造、有机质含量和岩石类型相结合的方法,以“四组分三端元”为分类原则,建立一种泥页岩层系岩相综合划分方案。

(2)有机质、灰(云)质、长英质(粉砂质)和黏土质组分分别代表了泥页岩形成过程中的生物沉积作用、化学沉积作用和机械沉积作用,用“四组分三端元”分类方法命名泥页岩具有成因意义,也体现了泥页岩中复杂的主要成分特点。

(3)利用该方案实现了苏北盆地阜二段泥页岩岩相划分,主要发育油页岩、油泥岩和页状云质黏土岩等18种岩相。

参考文献:

- [1] 吴林钢,李秀生,郭小波,等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演化与溶蚀孔隙形成机制[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(3):38-43.
- WU Lingang, LI Xiusheng, GUO Xiaobo, et al. Diagenetic evolution and formation mechanism of dissolved pore of shale oil reservoirs of Lucaogou formation in Malang sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(3): 38-43.
- [2] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):129-145.
- ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional

petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.

- [3] MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWILLER D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177-200.
- [4] SLATT R M, O'BRIEN N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2012, 95(12): 2017-2030.
- [5] 杨元,张磊,冯庆来. 浙西志棠剖面下寒武统荷塘组黑色岩系孔隙特征[J]. 地质科技情报,2012,31(6):110-117.
- YANG Yuan, ZHANG Lei, FENG Qinglai. Black rock series from the Early Cambrian Hetang Formation in Zhitang section, West Zhejiang Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(6): 110-117.
- [6] 吴伟,刘惟庆,唐玄,等. 川西坳陷富有机质页岩孔隙特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):1-8.
- WU Wei, LIU Weiqing, TANG Xuan, et al. Organic rich shale pore characteristics of Western Sichuan Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 1-8.
- [7] 刘圣鑫,钟建华,马寅生,等. 柴东石炭系页岩微观孔隙结构与页岩气等温吸附研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):33-42.

- LIU Shengxin, ZHONG Jianhua, MA Yinsheng, et al. Study of microscopic pore structure and adsorption isothermal of carboniferous shale, Eastern Qaidam Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 33-42.
- [8] ROBERT G L, STEPHEN C R. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [9] 王冠民. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(3): 666-671.
- WANG Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666-671.
- [10] JAMES J, BO H. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437-443.
- [11] MOHAMED O, ROGER M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [12] WANG Guochang, TIMOTHY R C. Organic-rich Marcellus Shale lithofacies modeling and distribution pattern analysis in the Appalachian Basin [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(12): 2173-2205.
- [13] KATHLEEN C, ROBERT H. Sedimentology of ancient saline pans: an example from the permian opeche shale, williston basin, north dakota, USA [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(1): 159-169.
- [14] 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 等. 非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 16-19.
- HAO Yunqing, XIE Zhonghuai, ZHOU Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 16-19.
- [15] 姜在兴. 沉积学 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2010: 133-134.
- [16] ALLAN M. Lithofacies and formation nomenclature in upper Ordovician stratigraphy, central Appalachians [J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(4): 1255-1260.
- [17] 张雄华. 混积岩的分类和成因 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
- ZHANG Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4): 31-34.
- [18] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 80-81.
- [19] 秦匡宗. 抚顺和茂名油页岩的有机质含量及其元素组成 [J]. 华东石油学院学报, 1982(2): 71-79.
- QIN Kuangzong. Organic mass content and its ultimate analysis of Fushun and Maoming oil shales [J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1982(2): 71-79.
- [20] 曾胜强, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地白垩系海相油页岩特征及其形成条件分析 [J]. 地质论评, 2014, 60(2): 449-463.
- ZENG Shengqiang, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Characteristic and formation condition of the Cretaceous marine oil shale in the Qiangtang Basin [J]. Geological Review, 2014, 60(2): 449-463.
- [21] MILLIKEN K L, ESCH W L, REED R M, et al. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas, USA [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1553-1578.

(编辑 徐会永)