

文章编号:0253-9985(2012)05-0743-08

苏里格气田上古生界主要含气层系 粘土矿物分布及其主控因素

李明瑞¹, 张清², 段宏臻³, 邓杰⁴

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探部, 陕西西安 710018;

2. 中国石油长庆油田分公司苏里格气田研究中心, 陕西西安 710018;

3. 中国石油测井有限公司青海事业部, 甘肃敦煌 736202;

4. 中国石油渤海钻探工程有限公司第二录井分公司, 河北任丘 062552)

摘要:鄂尔多斯盆地苏里格气田上古生界主要含气层下石盒子组盒8段及山西组山1段储层中广泛分布粘土矿物, 研究不同类型粘土矿物的含量变化及其主控因素对于低渗透储层的改造与保护具有重要作用。利用粘土矿物X-射线衍射、砂岩薄片、铸体薄片等资料综合研究, 认为山1段、盒8^下亚段、盒8^上亚段的粘土矿物类型主要有绿泥石、伊利石、高岭石及伊蒙混层, 并利用单因素分析法研究了主要粘土矿物的纵向及平面分布特征, 同时对粘土矿物分布差异的主控因素进行了综合分析。研究表明, 3个不同物源区的母岩类型决定了粘土矿物的原始成分, 温暖潮湿到干旱气候条件的转化影响粘土矿物的风化或蚀变程度, 河流沉积环境的强水动力条件、pH值及弱还原环境等为粘土矿物的沉积、转换及保存提供了条件; 经历晚成岩阶段B期后长石蚀变导致伊利石增加, 储层物性变得更差。

关键词:粘土矿物; 含气层; 上古生界; 苏里格气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Clay mineral distribution and its controlling factors in the Upper Paleozoic gas reservoirs of Sulige gas field

Li Mingrui¹, Zhang Qing², Duan Hongzhen³ and Deng Jie⁴

(1. Exploration Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2. Research Center of Sulige Gas Field, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

3. Qinhai Department, PetroChina Logging Company, Dunhuang, Gansu 736202, China;

4. No. 2 Mudlogging Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: Clay minerals distribute widely in the gas reservoirs of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Upper Paleozoic of the Sulige gas field in Ordos Basin. The study of clay mineral content changes and main controlling factors plays a very important role in the low-permeability reservoir stimulation and protection. Based on a comprehensive study of data such as X-ray diffraction, thin sections and cast thin sections of clay minerals, and so on, we proved that the clay minerals in the 1st member of Shanxi Formation and the upper and lower 8th member of the Shihezi Formation are mostly chlorite, illite, kaolinite and illite-smectite mixed-layer. The horizontal and vertical distributions of these minerals are studied with the single factor analysis method and the main controlling factors for their distribution difference are also analyzed. The results show that the mother rocks in different provenance regions determined their original composition, climate condition changes from relatively warm and wet to dry controlled their weathering and alteration degrees, and strong hydrodynamics, proper pH value and weak reductive environment of fluvial sedimentary environment provided favorable conditions for their deposition, transformation as well as preservation. However, the increase of illite content from alteration of feldspar during the late diagenetic stage B caused the lowering of reservoir quality.

Key words: clay mineral, gas-bearing layer, Upper Paleozoic, Sulige gas field, Ordos Basin

收稿日期: 2011-08-16 修订日期: 2012-06-13。

第一作者简介: 李明瑞(1975—), 男, 博士研究生、高级工程师, 天然气地质。

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地的西北部,区域上横跨伊陕斜坡、伊盟隆起及天环坳陷3个构造单元(图1),勘探面积约40 000 km²,探明天然气地质储量 1.27×10^{12} m³。自2000年6月苏6井经压裂改造获试气日产无阻流量 120.6×10^4 m³的高产气流后,经过十余年的勘探开发,目前苏里格气田是我国现阶段规模最大的天然气田,也是我国第一个世界级储量的大气田^[1]。苏里格气田主要含气层为上古生界二叠系下石盒子组盒8段(分为盒8^下与盒8^上两个亚段)及山西组山1段。整体上,苏里格气田属于典型的岩性圈闭气藏,气层由多个单砂体复合叠置而成,以典型的大面积含气、低孔、低渗致密河流相砂岩储层为主。储层中粘土含量较高,约占碎屑组分的6%~15%,平均为10%。粘土矿物的类型和含量对储层物性影响很大,同时对钻井储层保护和后期压裂改造的敏感性等也有重要影响。王行信等系统研究了砂岩储层不同类型的粘土矿物与油层保护的关系^[2],赵杏媛等结合粘土矿物的矿物学特征与组合特征进行判别沉积环境等研究^[3-8],本文拟从鄂尔多斯盆地苏里格气田上古生界主要含气层系粘土矿物的类型和相对含量变化入手进行研究,并探究其形成机

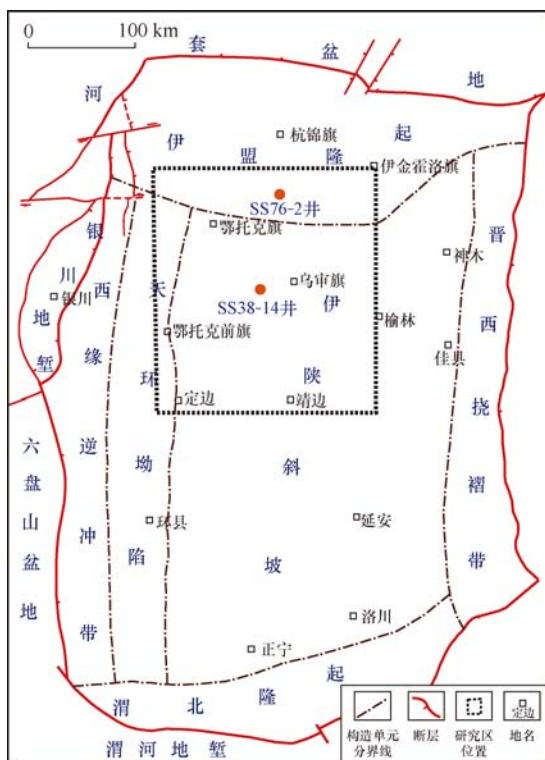


图1 苏里格气田区域位置

Fig. 1 Location of Sulige gas field

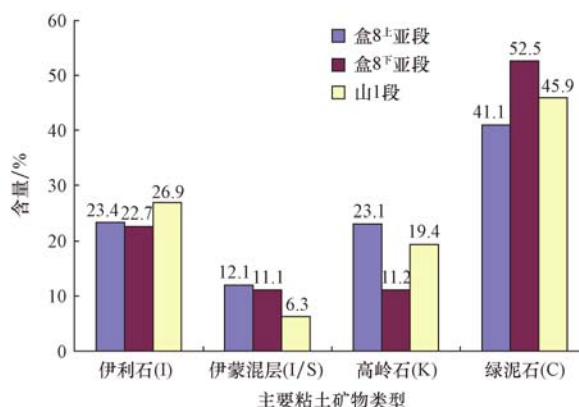


图2 苏里格气田盒8段及山1段主要粘土矿物平均相对含量柱状图

Fig. 2 Histograms showing the average relative contents of clay minerals in the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in Sulige gas field

理,为提高单井产量及有效勘探开发提供依据。

1 常见粘土矿物类型及含量

通过统计分析研究区主要含气层系64口井350块样品的粘土矿物X-射线衍射资料,表明下石盒子组盒8段及山西组山1段粘土矿物类型主要为绿泥石、伊利石、高岭石及伊蒙混层。其中绿泥石相对含量占粘土矿物总量的比例最大,其次为伊利石、高岭石及伊蒙混层含量,另外见绿蒙混层零星分布。整体上,盒8^上亚段高岭石及伊蒙混层的含量相对其他层段的高。山1段伊利石相对百分含量高5%左右,平均为26.9%。盒8^下亚段绿泥石含量相对高,平均为52.5%,但是高岭石及伊利石的含量比较盒8^上亚段及山1段的相对低(图2)。

统计发现,研究区粘土矿物伊蒙混层比以小于等于10为主,其中山1段、盒8^下亚段及盒8^上亚段中伊蒙混层比小于等于10的样品数分别占总样品数的74.7%,76.9%,85%。粘土矿物组合类型主要有I型(绿泥石、伊利石、高岭石、伊蒙混层)和II型(绿泥石、伊利石、伊蒙混层)两种。山1段的I型和II型组合所占比例分别为83.5%和16.5%。盒8^下亚段的I型和II型组合所占比例分别为71.5%和38.5%。盒8^上亚段的I型和II型组合所占比例分别为75%和25%。

2 盒8段及山1段粘土矿物分布规律

研究区主要目的层含有的伊利石、伊蒙混层、

高岭石及绿泥石四种主要粘土矿物特性各异。其中伊利石具有易水化膨胀,相对易迁移的特性;高岭石具有易发生分散和迁移,一般不易水化膨胀的特性;绿泥石具有易酸蚀,不易水化膨胀,易产生 Fe^{3+} 沉淀阻塞喉道的特性;伊蒙混层具有伊利石及蒙脱石的易水化膨胀特性。在钻井及储层改造中,避免粘土矿物对储层造成损害十分重要。根据岩心分析化验结果,对山1段、盒8^下亚段、盒8^上亚段3个层进行纵向及平面上粘土矿物分布规律的探讨。

2.1 单井粘土矿物含量垂向变化

对比分析表明,受沉积特征及成岩环境等差异的影响,不同区块单井纵向上粘土矿物变化趋势不一致。而且同一口井纵向上受成岩作用等影响,粘土矿物含量变化也不同。如SS38-14井位于研究区的中部,盒8^上亚段—盒8^下亚段—山1段,伊蒙混层的含量变化为低—高—低,绿泥石的含量与伊利石的含量出现截然相反的变化趋势,高岭石含量只在盒8^上亚段零星分布(图3)。而位于研究区北部的SS76-2井由于离物源相对较

近及当时的沉积环境水动力条件好等影响,从盒8段到山1段,样品分析中可见高岭石含量由低向高变化。与研究区中部的SS38-14井相比,其伊利石含量明显偏低,变化趋势也不明显。而伊蒙混层的含量变化与绿泥石的出现相反的趋势(图4)。

2.2 粘土矿物平面分布特征

盒8^上亚段平面分布特征(图5):伊利石在研究区东西两侧出现两条呈近南北向展布的富集区;绿泥石含量在研究区中部出现高值区;东北部及西部高岭石含量相对较高,向中区逐渐减少;研究区的北部现局部条带状伊蒙混层高值区。

盒8^下亚段平面分布特征(图6):伊利石在研究区的西部及东南部含量较高;绿泥石在整个研究区广泛分布,在研究区的中部及北部含量偏高;高岭石在研究区的中部及西北部出现含量较低。伊蒙混层分布与盒8^上亚段类似,高值区主要分布在研究区北部,分布范围比盒8^上亚段更广,延伸范围大,并且部分井的相对含量超过30%。

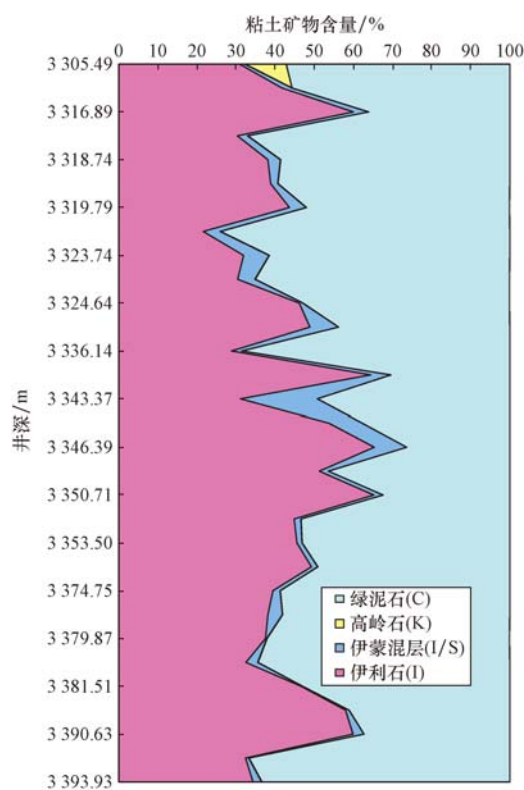


图3 苏里格气田SS38-14井主力含气层粘土矿物相对含量变化

Fig. 3 Relative contents of clay minerals in the key gas-bearing layers in well SS38-14 of Sulige gas field

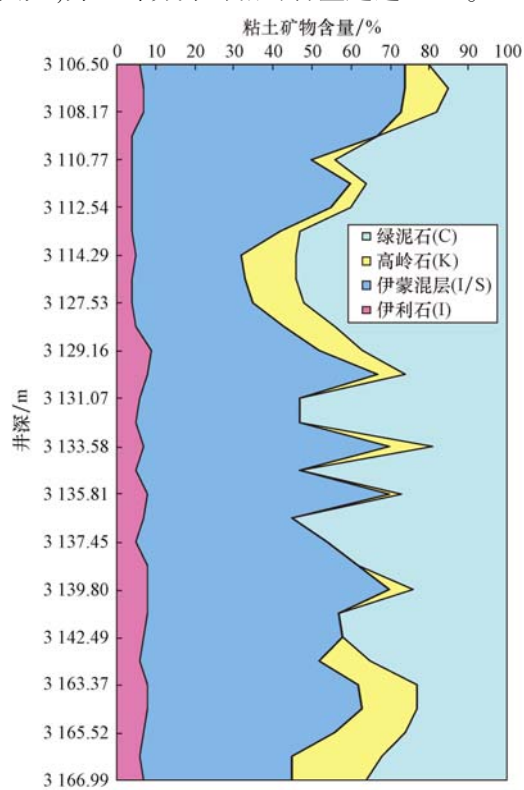


图4 苏里格气田SS76-2井主力含气层粘土矿物相对含量变化

Fig. 4 Relative contents of clay minerals in the key gas-bearing layers in well SS76-2 of Sulige gas field

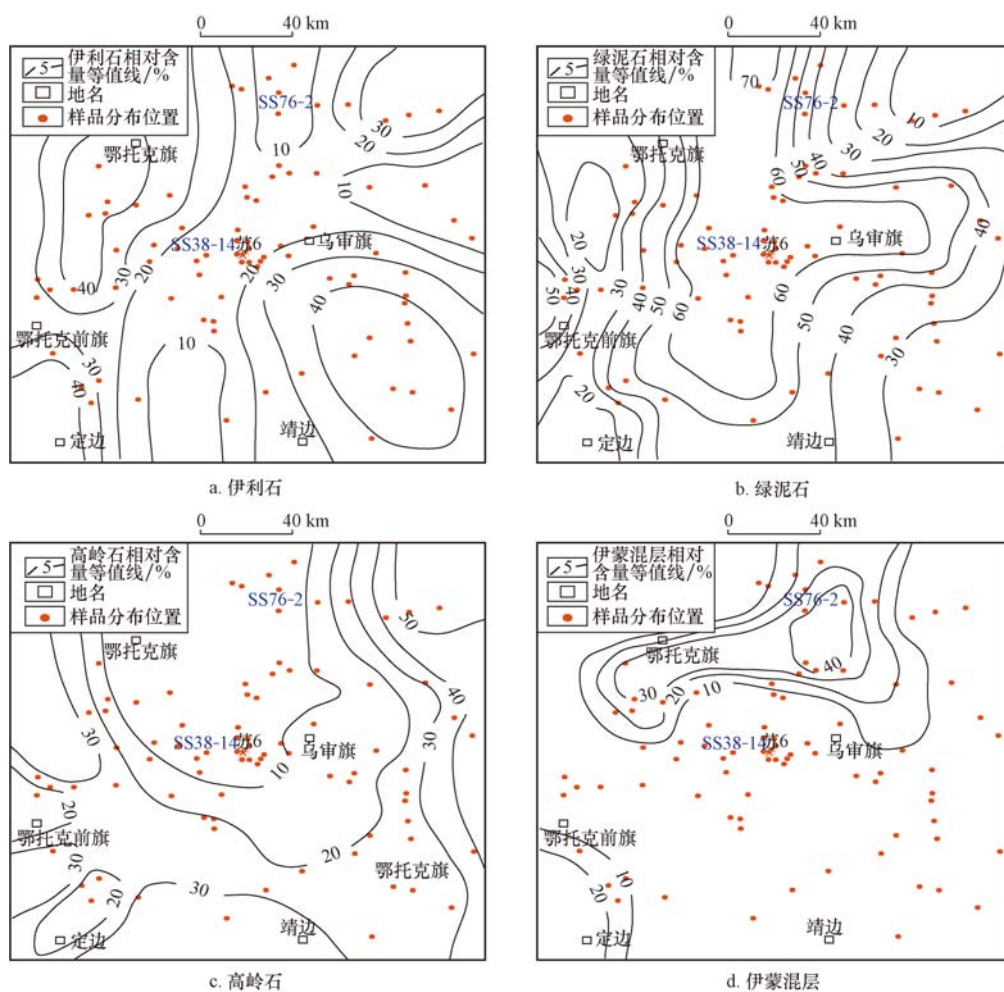


图5 苏里格气田盒8^上亚段粘土矿物含量等值线

Fig. 5 Content contour of clay minerals in the upper 8th member of the Shihezi Formation in Sulige gas field

山1段平面分布特征(图7):与盒8^下亚段类似,伊利石在研究区的西部及东南部含量较高;除了研究区南部绿泥石含量略低,其它区域的绿泥石相对含量都大于40%;高岭石在研究区的东南部含量相对较高;伊蒙混层分布与盒8段类似,高值区主要分布在研究区东北部。

针对苏里格气田主要目的层粘土矿物的平面分布特征,在钻井和压裂施工作业中,必须要考虑储层保护。针对伊利石及伊蒙混层等易水化膨胀的粘土矿物含量高的地区,防止水敏对储层的伤害,钻井施工中需要降低钻井液的比重和失水,储层改造压裂时尽可能少进压裂液。高岭石及丝状伊利石富集区要防止速敏发生,所以对高岭石含量高地区进行储层改造后,应该采用合理的压差放喷排液和后期测试求产,尽量避免速敏发生。同时可以利用酸敏特征,采用前置酸加

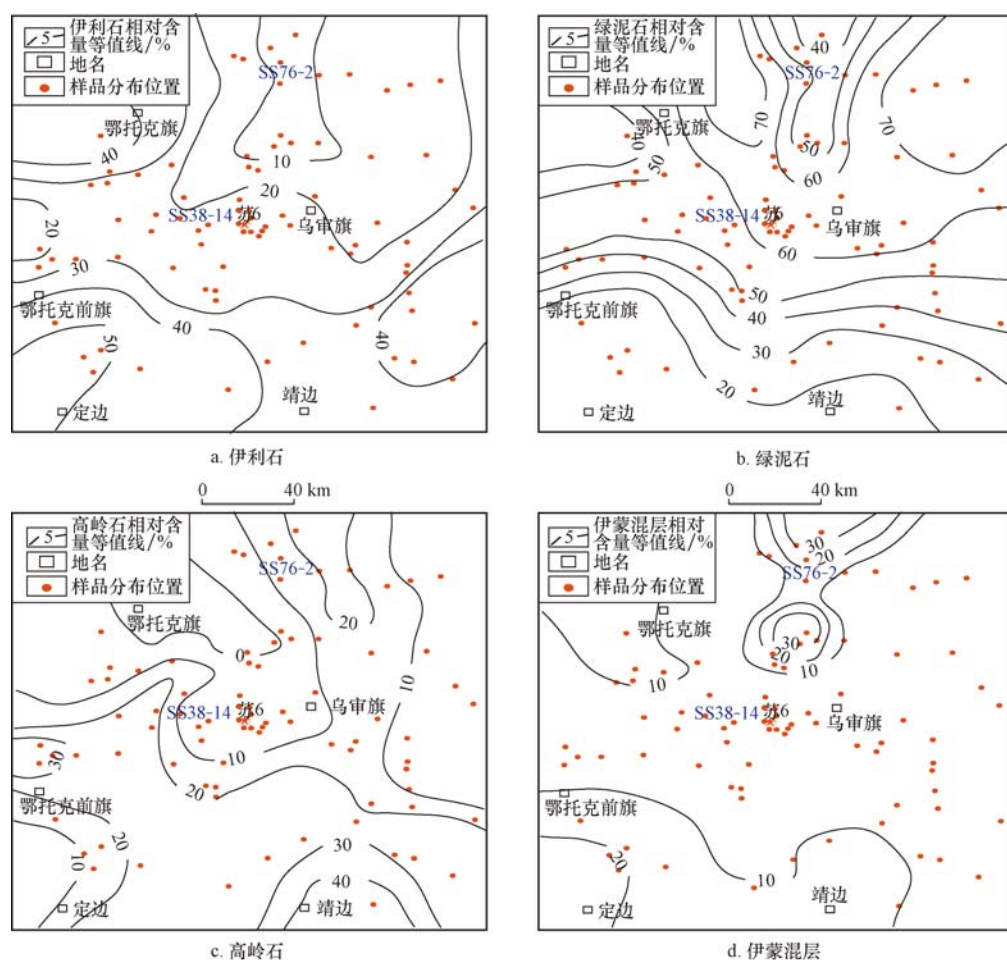
砂压裂工艺对绿泥石富集区进行改造,改善储层渗透率。

3 粘土矿物分布主控因素

3.1 母岩类型

母岩类型决定粘土矿物的组成。研究区盒8段、山1段沉积期的物源主要来自阴山古陆,平面上分布具有南北向展布、东西向分带特征,自西向东分别受到了西北部、北部和东北部3个物源区供给的影响^[9]。

西北部物源主要以中、上元古界沉积变质岩和中基性火山岩为主,岩性为浅肉红-灰白色石英岩、石英砂岩、片岩、深灰色板岩、结晶灰岩、大理岩,岩石组分以石英为主,其次为云母。其中片岩及板岩等发育为蒙脱石、伊利石等形成创造了

图6 苏里格气田盒8^下亚段粘土矿物含量等值线Fig. 6 Content contour of clay minerals in the lower 8th member of the Shihezi Formation in Sulige gas field

物质条件。蒙脱石在成岩作用过程中,当地层温度升高至130~180℃时转化成伊利石,所以研究区西部伊利石相对含量较高,是原始沉积和成岩演化共同作用的结果。

北部物源为前寒武系变质岩系与兴蒙造山带岩系共同组成的物源区。母岩主要为太古宇、元古宇中混合花岗岩及侵入岩体。花岗岩为深成酸性火成岩,组分以长石为主,其次为石英及云母。其中花岗岩中长石及白云母的蚀变及风化程度依次为:伊利石-蒙脱石-高岭石。花岗岩中黑云母等暗色矿物的蚀变及风化程度依次为:绿泥石-蒙脱石-高岭石。由于黑云母稳定性差,所以研究区北部绿泥石的相对含量普遍较高,大部分绿泥石应该是风化作用的产物。

东北部物源主要以太古宇酸性混合岩为主,岩性为花岗片麻岩、钾长花岗岩等,岩石组分以钾长石、斜长石为主,其次为石英及黑云母等。以该套母岩为物源,形成富含岩屑的砂岩,物性较差。受

物源影响,研究区东北部盒8段、山1段沉积物中绿泥石和高岭石含量相对较高,伊蒙混层相对含量在研究区东北部普遍较高,主要是成岩作用的产物。

受到西北、北部和东北部3个不同物源区母岩性的影响,研究区西侧砂岩的石英含量相对高,东侧砂岩的岩屑含量相对高,研究区西侧的粘土矿物相对含量偏低,平均8%,东侧粘土矿物相对含量高,平均12%。不同类型的母岩在风化及蚀变过程中形成了不同类型的粘土矿物,既影响了原始沉积岩的类型,也影响了后期成岩改造的产物。

3.2 气候条件

气候条件主要通过影响母岩的化学风化作用强度来控制粘土矿物的风化或蚀变程度^[10]。高岭石为1:1型二八面体的层状硅酸盐,一般是在潮湿气候、酸性介质中由长石、云母和辉石等经强烈淋滤形成。伊利石属于2:1型层状硅酸盐族的二八面体亚族,形成于温暖或气温稍低的气候条

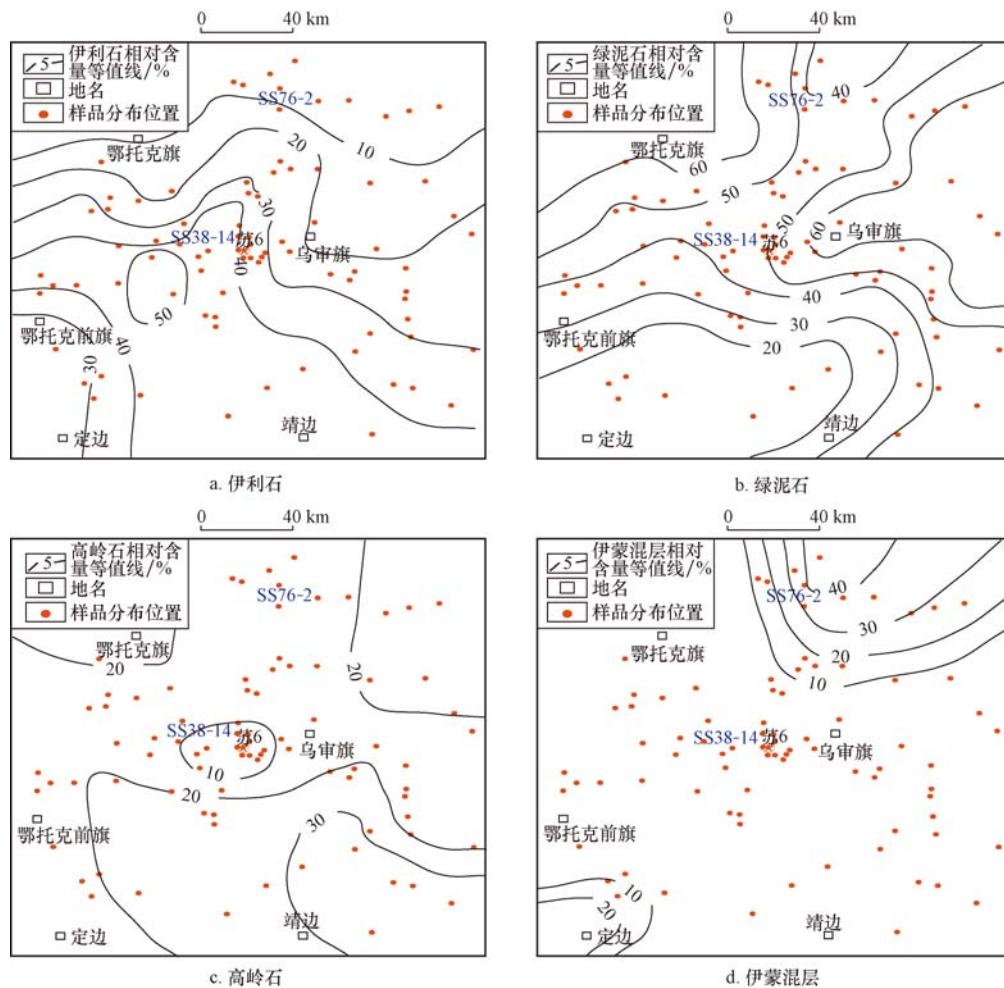


图7 苏里格气田山1段粘土矿物含量等值线

Fig. 7 Content contour of clay minerals in the 1st member of the Shanxi Formation in Sulige gas field

件,形成环境为弱碱性,由长石、云母等铝硅酸盐矿物在风化脱 K^+ 的情况形成。蒙脱石是形成于干湿交替的气候条件二八面体,在富盐基、贫 K^+ 而富含 Na^+ 和 Ca^{2+} 的弱碱性介质中形成,同时火山灰物质在碱性介质中也容易变成蒙脱石。常见的绿泥石是主要阳离子为 Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} 的三八面体,形成环境为弱碱性,一般在化学风化作用受抑制的干冷气候条件下存在^[11]。

山1段砂岩颜色以灰白色和灰色为主,亦有少量呈浅灰绿色的砂岩,泥岩颜色均为深灰色或黑色并含有多层煤层或煤线,表现为还原条件的暗色特征,并在露头和岩心中发现了大量的植物化石,说明山1段沉积期气候温暖潮湿,碎屑岩沉积时大多处于水下弱还原-还原环境,即使是水上部分,也是沼泽广布,地下潜水面很高。在山1段沉积期的温暖潮湿气候条件下,淋滤作用强,母岩风化时,一些碱金属、碱土金属元素易被淋滤流

失,先形成蒙脱石,后在成岩作用中形成伊蒙混层、伊利石和绿泥石。

盒8段砂岩颜色多呈灰白色、灰绿色和灰色,泥岩颜色多为杂色、灰绿色、褐色、灰色和棕色,灰黑色和深灰色次之,很少含有植物化石,聚煤作用不复存在,反映其沉积环境水位变化频繁,水体常在氧化环境与还原环境之间变化,沉积物可能经常暴露,推测其沉积环境早期主要为季节性干旱气候环境,沉积水体的流量变化大。盒8段沉积期有利于半干旱条件下的绿泥石、伊利石的形成,所以盒8段储层中富含的绿泥石和伊利石绝大部分为原生沉积的产物。

3.3 沉积环境

早二叠世山1段沉积期,华北地台整体抬升,鄂尔多斯盆地北缘明显抬升,南北地形差异升降显著^[12-13],沉积环境由以前的三角洲相转变为曲

流河沉积环境。而盒8段沉积期区域构造活动进一步加剧,北部物源区抬升较为剧烈,陆源碎屑供给充足,水动力能量强,具较强的携砂能力,为辫状河沉积环境,沉积物粒度粗,碎屑颗粒分选好,矿物成熟度较高,储层性能进一步变好。

山西组山1段和下石盒子组盒8段沉积时相比,河流水动力变弱,易迁移的 K^+ 含量增加,pH值增加,造成蒙脱石及高岭石向伊利石转换。同时河流沉积环境带来的富铁、镁的碱性环境也有利于绿泥石的形成与保存。所以,研究区山1段和盒8段绿泥石和伊利石的相对含量普遍较高的原因之一是受河流沉积环境的影响。

3.4 成岩作用

在沉积和埋藏等作用的过程中,粘土矿物经常发生成岩变化。其中温度、压力、时间、全岩矿物组成及化学成分、砂岩骨架颗粒的矿物组成及孔隙流体的组成、流动特征及渗透性等是影响砂岩粘土矿物成岩演变的主要因素^[14-15]。

早成岩A-B期,沉积物处于弱固结到半固结成岩阶段,古地温大致在65℃以下,镜质体反射率 R_o 值小于0.5%,埋藏深度小于2 000 m,有机质热演化处于生化甲烷阶段早期,受有机质热演化及煤系沉积环境控制,孔隙水性质偏酸性,以压实作用为主,其次为胶结作用。不稳定的长石类硅酸盐通过粒间孔隙水化学沉淀方式发生溶解,以蒙脱石、自生蠕虫状高岭石、颗粒薄膜状绿泥石、孔隙衬里状绿泥石等形式沉淀在粒间孔隙中。该阶段的粘土矿物以蒙脱石为主,局部存在蒙脱石向高岭石转化、蒙脱石向伊利石转化、黑云母向绿泥石转化过程。受孔隙水性质偏酸性,抑制了伊/蒙混层的大量形成,成岩早期形成的孔隙衬里状绿泥石等薄膜也抑制了石英胶结物的次生加大,保护了储层的原始孔隙度。

晚成岩A期,岩石进入深埋藏阶段,埋深在2 000~3 000 m,古地温65~140℃,镜质体反射率 R_o 值为0.5%~1.5%,伊蒙混层比为50%~15%,有机质热演化处于凝析油-湿气阶段。以溶解作用及胶结作用为主,后期由于有机酸生成阶段的基本结束,二氧化硅供给基本停止,孔隙水性质偏弱碱性。不稳定的暗色矿物(黑云母、角闪石)和岩屑(火山灰、基性及超基性岩屑)产生水解及溶蚀作用,在富 Al^{3+} 和 K^+ 的条件下,蒙脱石向

伊利石转化,形成伊蒙混层及伊利石等,该转化的同时生成的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 也为蒙脱石向绿泥石转换提供了条件,以上的溶解作用造成该阶段蒙脱石基本消失。由于研究区东部、东北部处于晚成岩A期,所以该区伊蒙混层普遍较高,就是蒙脱石转化的中间产物,而绿泥石相对含量高的原因之一是部分蒙脱石经成岩演化最终转化而成的。

研究区绝大部分地区山西组山1段及下石盒子组盒8段的成岩阶段已进入晚成岩B期,埋藏深度大于3 200 m,古地温大至处于140~170℃,镜质体反射率(R_o)测定值大于1.5%,成岩作用强^[16]。随着埋藏深度及温度的增加,水介质为碱性的条件下,高岭石变得不稳定,在富铁、镁的碱性还原环境下高岭石向绿泥石转换,在富 K^+ 碱性还原环境下,高岭石与长石反应生成伊利石和石英。所以研究区绿泥石和伊利石相对含量普遍较高,石英的次生加大现象也非常明显,这是造成苏里格地区山1段及盒8段储层物性差的主要原因。

4 结论

1) 苏里格气田上古生界二叠系下石盒子组盒8段及山西组山1段储层粘土矿物含量较高,平均为10%。粘土矿物类型主要为绿泥石、伊利石、高岭石及伊蒙混层,其中绿泥石相对含量最高。

2) 利用单因素分析法对山1段、盒8^下亚段、盒8^上亚段不同粘土矿物平面分布进行了研究,认为研究区北部绿泥石相对含量高,西部伊利石相对含量较高,南部高岭石相对含量较高,东北部伊蒙混层相对含量较高,这为勘探开发过程中分区储层保护提供了参考。

3) 从母岩类型、气候条件、沉积环境、成岩作用等主控因素探讨了苏里格气田上古生界粘土矿物分布差异的主控因素。认为西北、北部和东北部三个物源区母岩差异是粘土矿物类型与含量变化的主要因素。山1段沉积期温暖潮湿气候条件及盒8段沉积期季节性干旱气候环境控制着粘土矿物的风化或蚀变程度。河流沉积环境的强水动力条件、弱还原-氧化环境为粘土矿物的沉积、转换及保存提供了条件。研究区埋藏深度大,已经入晚成岩阶段B期,长石蚀变形成伊利石和石英次生加大使储层物性变得更差。

参 考 文 献

- [1] 戴金星, 黄士鹏, 刘岩, 等. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 689–698.
Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689–698.
- [2] 王行信, 周书欣. 砂岩储层粘土矿物与油层保护[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 69–97.
Wang Xingxin, Zhou Shuxin. The clay minerals of sandstone reservoir and protection of oil layer[M]. Geological Publishing House, 1992: 69–97.
- [3] 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.
Zhao Xingyuan, Zhang Youyu, Song Jian. Some mineralogical characteristics of clay minerals in China Oil-bearing basin [J]. Geoscience, 1994, 8(3): 264–272.
- [4] 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 416–419.
Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, et al. Clay minerals as indicators of paleoclimate [J]. Acta petrologica et Mineralogica, 2003, 22(4): 416–419.
- [5] 李文厚, 魏红红, 马振芳, 等. 苏里格庙气田碎屑岩储集层特征与天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 387–395.
Li Wenhui, Wei Honghong, Ma Zhenfang, et al. Characteristics of detrital reservoirs and regularity of gas concentration in Sulige-miao gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 387–395.
- [6] 庞雄奇. 中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法 with 意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 517–534, 541.
Pang Xiongqi. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 517–534, 541.
- [7] 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 200–204.
Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, et al. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2): 200–204.
- [8] 赵东升, 李建青, 胡勇, 等. 柴达木盆地储集层中粘土矿物的分布规律及其影响因素[J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 34–40.
Zhao Dongsheng, Li Jianqing, Hu Yong, et al. Distribution of clay minerals in the reservoir strata of Qaidam basin and its affecting factors [J]. Geology Geochemistry, 2001, 29(4): 34–40.
- [9] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 194–196.
He Zixin. Evolution and hydrocarbon of Ordos basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 194–196.
- [10] 孙庆峰, Christophe Colin, 陈发虎, 等. 气候环境变化研究中影响粘土矿物形成及其丰度因素的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(2): 291–298.
Sun Qingfeng, Christophe Colin, Chen Fahu, et al. A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental researches [J]. Acta petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 291–298.
- [11] 张楠楠. 致密天然气砂岩储层: 成因和讨论[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1–10.
Zhang Shaonan. Tight sandstone gas reservoirs: their origin and discussion [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 1–10.
- [12] 朱筱敏, 刘成林, 曾庆猛, 等. 我国典型天然气藏输导体系研究—以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 724–728.
Zhu Xiaomin, Liu Chenglin, Zeng Qingmeng, et al. Study of carrier system of typical gas reservoirs in China-taking Sulige gas field in Ordos basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 724–728.
- [13] 张永贵, 刘振峰. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏储层建模[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 560–567.
Zhang Yonggui, Liu Zhenfeng. Reservoir modeling of tight gas sands in the Upper Palaeozoic of the northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 560–567.
- [14] 谭先锋, 田景春, 李祖兵, 等. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化—以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例 [J]. 地质通报, 2010, 29(4): 535–543.
Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment-taking the Member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying sag [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 535–543.
- [15] 郑和荣, 尹伟, 胡宗全, 等. 中国中西部碎屑岩领域油气富集主控因素与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 753–762.
Zheng Herong, Yin Wei, Hu Zongquan, et al. Main controlling factors for hydrocarbon accumulation and potential exploration targets in clastic sequences in western central China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 753–762.
- [16] 刘飞, 周文, 李秀华, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界砂岩中储层粘土矿物特征分析[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 92–96.
Liu Fei, Zhou Wen, Li Xiuhua, et al. Analysis of characteristics of the clay minerals in the upper Palaeozoic sandstone reservoir of Hangjinqi area in north Ordos basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(1): 92–96.

(编辑 董立)