

非常规天然气

四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物研究

王秀平^{1,2}, 牟传龙^{2,3}, 葛祥英^{2,3}, 陈小炜^{2,3}, 周恩恩^{2,3},

王启宇^{2,3}, 梁 薇^{2,3}, 陈 超^{2,3}

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081;

3. 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:为了分析页岩气储层中黏土矿物特征及其对页岩气勘探、开发的影响,以四川盆地南部及其周缘下志留统龙马溪组黑色富有机质页岩发育层段为主要研究对象,利用X-射线衍射分析,并与大量的薄片和背散射分析资料相结合,较系统地揭示了研究区龙马溪组黏土矿物的发育及分布特征。研究表明:黏土矿物以绿泥石+伊/蒙混层+伊利石为主,具有陆源碎屑和次生成因2种类型,主要分布在盆地中心及其边缘地区,具有高伊利石、伊/蒙混层含量,较高绿泥石含量的特点;黏土矿物的类型和含量具有一定的指相意义,平均含量大于50%的地区,主要为深水陆棚沉积,在30%~50%之间的地区通常为浅水陆棚沉积,小于30%的地区为海陆过渡相沉积;龙马溪组沉积时为半干旱—干旱的气候,成岩过程中水介质具有盐度较高、偏碱性,富K⁺的特点;成岩演化已达到晚成岩阶段,烃类演化至干气阶段,具备形成页岩气的气源条件;根据黏土矿物对页岩气储集空间的影响,并与有机碳的展布特征相叠合,渝东南地区的綦江—武隆—彭水一带、黔西—滇北地区的雷波—筠连—兴文—仁怀—桐梓近EW向展布的一带,以及研究区西北部的峨边西河地区为页岩气的有利区,位于盆地中心的宜宾—江津—涪陵呈NE—SW向展布的区域,为次级有利区。

关键词:成因;分布特征;页岩气;黏土矿物;龙马溪组;四川盆地南部及周缘

中图分类号: TE132.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2014)11-1781-14

引用格式: Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Ge Xiangying, *et al.* Study on clay minerals in the lower silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1781-1794. [王秀平, 牟传龙, 葛祥英, 等. 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1781-1794.]

0 引言

黏土矿物是细分散的含水的层状硅酸盐和含水的非晶质硅酸盐矿物的总称,它是地层中最丰富的矿物^[1]。泥页岩中黏土矿物的形成、转变、消失及其所反映出的分布规律受古环境、成岩作用及物源母质等多种因素控制^[2],不同地区、不同层位黏土矿物的影响因素不同,其分布特征及类型也不相同。分

析黏土矿物的类型、产状、含量及其变化特征,不仅有助于分析其所经历的古环境和成岩作用,也被认为是寻找油气的有利工具^[3-4]。

随着非常规油气勘探、开发的日益加强,中国页岩气的研究逐步深入。页岩气藏既生又储的模式,需要用异于常规油气藏的思路和方法进行研究。四川盆地及周缘是中国南方页岩气发育的有利地区,下古生界具有独特的地质条件是勘探获得突破的有

收稿日期: 2014-01-09; **修回日期:** 2014-03-25.

基金项目: 中国石化股份有限公司勘探南方分公司项目;中国岩相古地理编图项目(编号:1212010916060)联合资助.

作者简介: 王秀平(1988-),女,山东济宁人,博士研究生,主要从事沉积与储层研究. **E-mail:** wangxiuping198805@126.com.

通讯作者: 牟传龙(1965-),男,四川达州人,研究员,博士生导师,主要从事沉积地质学及油气地质学研究.

E-mail: cdmchuanlong@163.com.

利层段^[5]。盆地南部及其周缘地区下志留统龙马溪组是中国页岩气研究的重点和热点^[6-7]。对于龙马溪组的岩石组分特征,已经进行了大量的研究^[1,6-8],但通常关注影响页岩气增产压裂性的脆性矿物^[6,8]。与脆性矿物相对的黏土矿物的类型、分布与含量,不仅是影响页岩气增产压裂效果的主要因素之一,同时也是反映页岩气藏储集性和含气性的主要指标。因此,黏土矿物作为龙马溪组主要岩石组分,对其类型、分布和演化特征的详细研究,有助于分析和认识四川盆地南部及其周缘下志留统龙马溪组岩性和成岩演化特征,以期有助于其页岩气的勘探、开发。

1 地质背景

四川盆地位于扬子准地台西部,北为米苍山隆起一大巴山褶皱带,南为峨眉山—凉山冲断带,西为龙门山造山带,东为湘黔鄂冲断带^[9](图1)。早志留世龙马溪期,中上扬子陆块边缘处于挤压褶皱造山过程中,川西—康滇古陆、汉南古陆、川中隆起范围不断扩大,扬子南缘的黔中隆起、武陵隆起、雪峰隆起、苗岭隆起基本相连形成滇黔桂隆起带,形成多隆围一拗的构造格局。使早中奥陶世具有广海特征的海域,转变为被隆起所围限的局限海域,形成陆棚沉积体系,并具有向上变浅的演化过程^[8,9-12],产生大面积低能、欠补偿、缺氧的沉积环境^[13]。研究区位于四川盆地南部,靠近雪峰—黔中隆起,北部为川中隆起(图1)。

其地层属于中国华南型,区域上地层发育齐全,从前震旦系至第四系均有出露,志留系现今残余厚度变化在0~1 200m之间^[14]。早志留世龙马溪期是中国南方挤压最强烈的时期^[15],同时受全球性海侵的影响^[16],龙马溪组形成了一套分布范围广、厚度较大的以黑色页岩为主的细粒碎屑岩,构成了区域范围的烃源岩系^[4,15]。中奥陶世—志留纪处于加里东运动主要活动期,早期的古陆和由于加里东运动形成的古隆起为物源供应区^[9],推断陆源碎屑物质主要来自包括黔中古隆起在内的前陆隆起带以及雪峰隆起^[12,15],川中隆起可能仅提供溶解物质^[15],故早志留世沉积充填具多物源的混合型陆棚沉积性质^[4,15]。

2 剖面测量、样品采集与测试

本文以下志留统龙马溪组黑色富有机质页岩发育层段为主要研究对象,通常分布在龙马溪组的下段。通过对四川盆地南部及其周缘龙马溪组的分布

和发育情况,共选取了覆盖全区的33条露头剖面进行观测(图1),结合2口钻井资料及文献资料,利用X-射线衍射分析,获得龙马溪组(下段为主)436件样品的全岩组分和其中的368件样品的黏土矿物组分资料,结合大量的岩石薄片镜下观察、扫描电镜、背散射分析测试结果,较系统地揭示了四川盆地南部及其周缘龙马溪组泥页岩的黏土矿物发育及分布特征。

样品的全岩组分和黏土矿物组分的X-射线衍射分析结果,由中国石油华北油田勘探开发研究院沉积实验室采用D8 DISCOVER型X-射线衍射仪,在实验室温度为22℃、湿度为30%RH的条件下获得;矿物组分定量分析的检测依据为SY/T 5163-2010。背散射与光谱分析是在国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成。

3 黏土矿物的分布特征

研究区龙马溪组露头发育良好,由多种岩相组成,主要为黏土—粉砂级细粒沉积物^[4,8,15]。中下部以富含笔石的黑色、灰黑色及深灰色含钙质和硅质泥页岩、砂质泥岩或薄层状粉砂岩为主,黄铁矿比较丰富;上部为灰色、灰绿色、黄绿色泥页岩及砂质页岩夹薄层粉砂岩与灰岩透镜体(图2);颜色自下而上逐渐变浅、砂质增加、有机质含量减少^[4-6]。下段黑色富有机质页岩厚度大,通常为20~200m不等,为一套重要的烃源岩,也是该区页岩气勘探的重点层段。

3.1 龙马溪组黏土矿物的特征

据X-射线衍射的分析测试结果,黏土矿物含量为4%~82%,主要集中在25%~50%之间;黏土矿物组分中,几乎每件岩样中都含有较多的伊利石,相对含量在23%~100%之间,平均为48.2%;绝大部分样品中含有伊/蒙混层矿物和绿泥石,相对含量分别为2%~76%与1%~46%,其平均含量分别为44.1%与12.3%;伊/蒙混层矿物中蒙皂石的含量主要局限在10%,占全部样品的83.6%,其次为15%,5%的较少;只有部分样品中含少量高岭石,其平均相对含量为4.6%,通常小于7%,仅1个样品中可达10%。蒙皂石很不发育,仅在马边县下沙腔地区的一个样品中观测到,相对含量为6%,占总含量的3.4%。黏土矿物组分在垂向上基本相似,含量相差不大,均未发现绿/蒙混层矿物。

统计分析同时发现,不同地区龙马溪组中的黏土矿物组分基本相似,但含量存在差别(表1)。其中,盆地东南部(务川、道真、南川等地区)和西南部边缘(金阳、永善等地区)以及长芯1井的部分层

段^[17], 含有高岭石。黏土矿物总量平均为 34.5%, 均含有伊利石, 个别样品中无绿泥石或伊/蒙混层矿物, 伊利石与伊/蒙混层矿物的平均相对含量分别为 54.7%、28.8%, 绿泥石的平均相对含量为 11.9%。未发育高岭石的盆地及其边缘的其他地区, 黏土矿物组分相似, 含量亦存在一定的差别。渝东南—黔北地区, 黏土矿物的平均含量为 35.2%, 伊/蒙混层的平均相对含量最高, 为 45.8%, 伊利石与绿泥石含量分别为 43.3% 与 11.3%, 其中的 5 件样品中未发现绿泥石。黔西—滇北地区, 伊利石平均相对含

量最高, 为 54.6%, 伊/蒙混层为 33.1%, 所有的样品均含有绿泥石, 平均相对含量为 12.3%。川西地区 18 个样品中, 成分比较复杂, 黏土矿物平均含量为 23.1%, 均无高岭石; 其中, 汉源轿顶山与天全大井坪剖面中, 其黏土矿物几乎全部为伊利石, 个别样品中含有少量的伊/蒙混层矿物, 无绿泥石, 岩性为炭质页岩和粉砂质页岩; 马边下沙腔剖面中的 1 个样品中含有 6% 的蒙皂石, 大部分样品中伊/蒙混层矿物不发育, 伊利石与绿泥石的平均相对含量较高, 分别为 60.6% 和 24.4%。

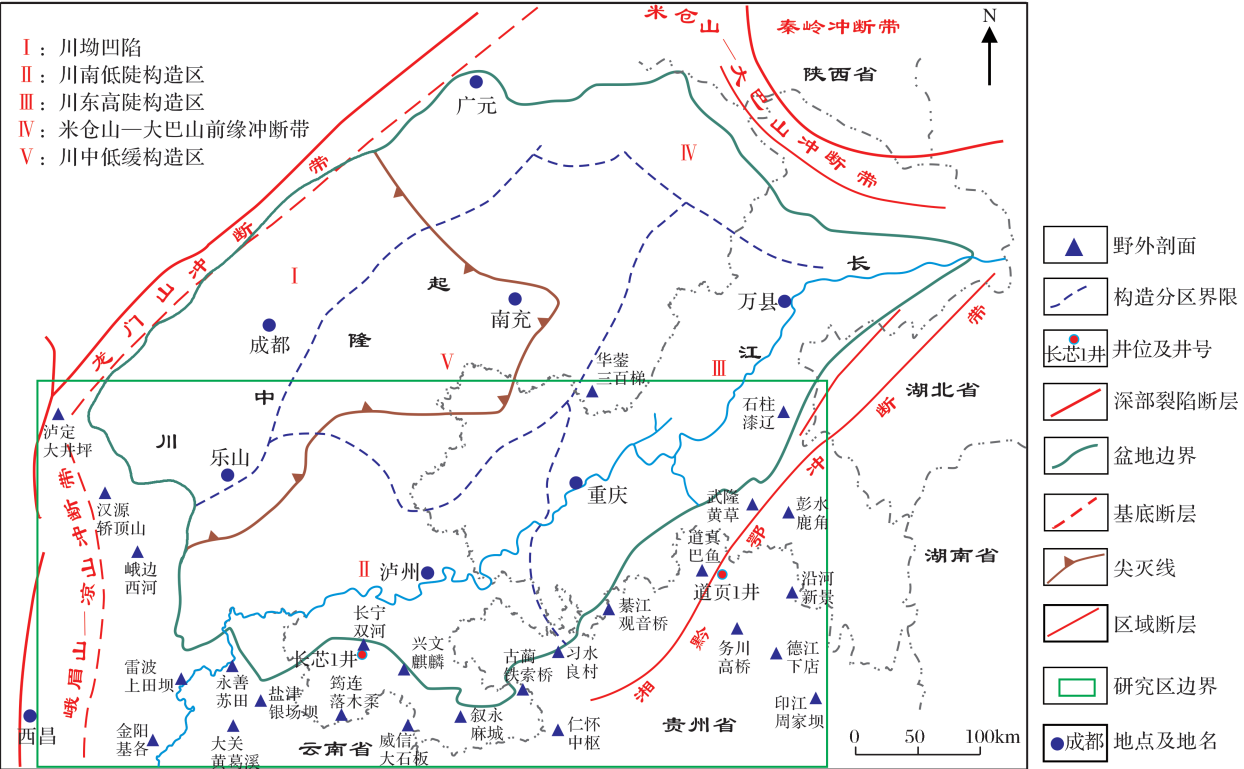


图 1 研究区构造分区及区域位置(据黄金亮等^[6], 修改)

Fig. 1 Structural subdivision and location of the study area(modified from Huang Jinliang et al^[6])

3.2 黏土矿物组合及其分布特征

由上可知, 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黑色富有机质页岩中, 黏土矿物组合以绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(C+I/S+I)为主, 主要分布在盆地中心及渝东南—黔北地区和黔西—滇北地区; 其次为高岭石+绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(K+C+I/S+I)组合, 主要分布在四川盆地的东南部 and 西南部边缘地区, 靠近黔中隆起和康滇古陆; 少量样品黏土矿物组合表现为高岭石+绿泥石+伊利石(K+C+I)、伊/蒙混层+伊利石(I/S+I)和绿泥石+伊利石(C+I)以及全部为伊利石(I)的特征, 主要分布在川西地区, 靠近康滇古陆和川中隆起(图 3)。

在赵杏媛等^[18]根据泥页岩的分析资料, 对黏土矿物分布总结出的 6 种基本模式中, 主要属于 I 类—正常转化型。正常转化模式黏土矿物的纵向分布特征是随着深度增加, 存在蒙皂石转化为伊利石和高岭石转化为绿泥石 2 个序列。

研究区龙马溪组黑色富有机质页岩中, 黏土矿物含量具有明显的规律性(图 3)。越靠近盆地中心的宜宾—江津—涪陵地区, 黏土矿物含量越高, 其平均含量通常大于 50%; 盆地边缘处的华蓥、乐山、仁怀和彭水等地区, 黏土矿物的平均含量通常为 30%~50%; 而靠近隆起区的泸定、金阳、务川等地区, 黏土矿物含量较低, 平均含量小于 30%。

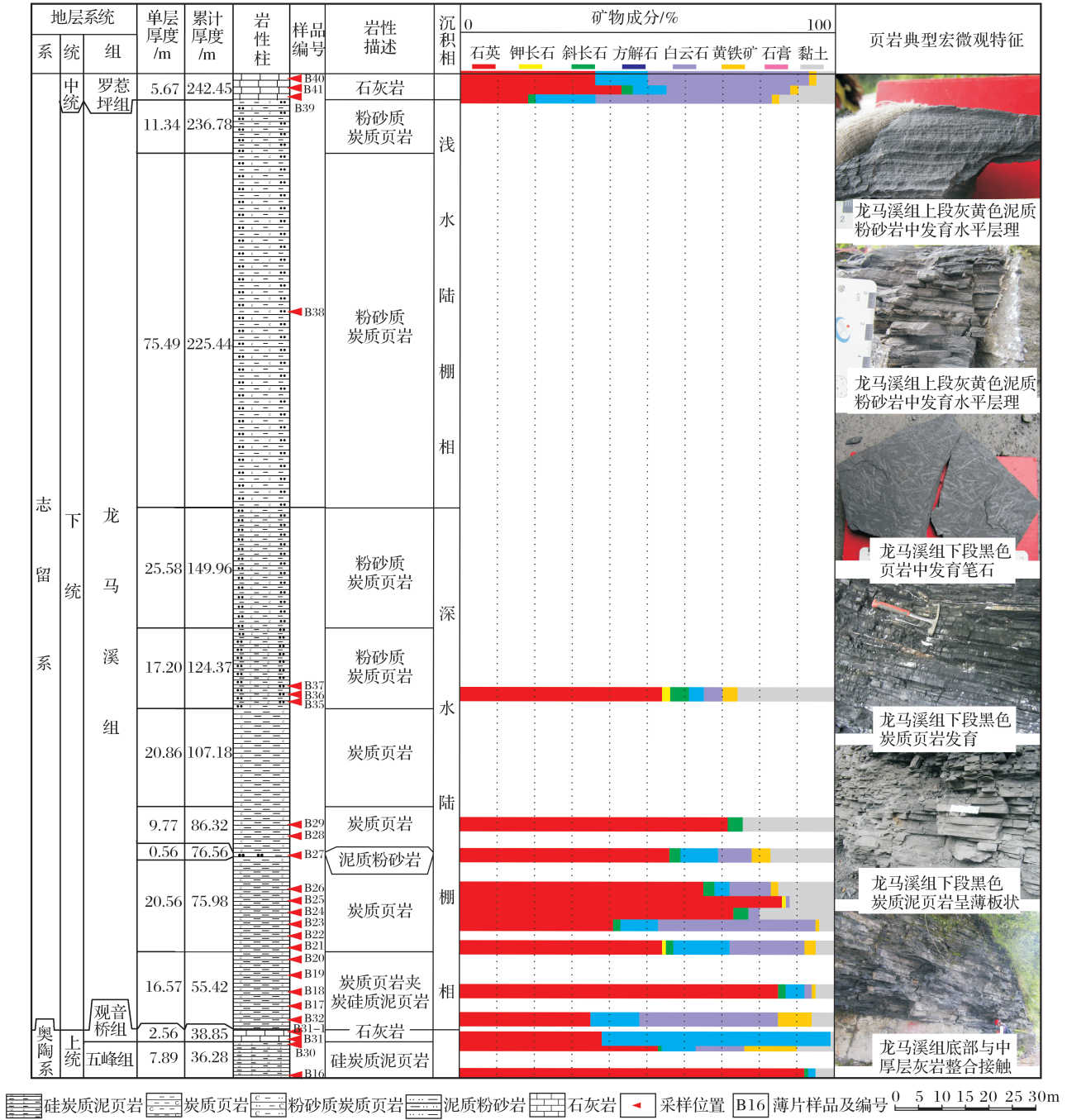


图 2 四川省天全县大坪垭龙马溪组地质综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive geological histogram of Longmaxi Formation in Tianquan county, Sichuan Province

4 黏土矿物形成、分布的主要控制因素

一般地, 沉积岩中的黏土矿物, 据成因可分为原生、他生和次生 3 种类型^[19-20]。在研究中, 他生黏土矿物用于分析古气候、物源和沉积环境, 原生的黏土矿物可以用来分析盆地演化特征和成岩环境^[8, 18, 21-22]。另外, 不同成因类型的黏土矿物对油气的生、储性具有明显的差别^[22-23], 因此, 利用黏土矿物

分析古气候、物源、沉积环境、成岩环境及其水介质条件, 必须首先区分黏土矿物的成因及形成时期^[24]。

绝大多数泥页岩的主要组分(黏土矿物和粉砂)都是经过风化作用, 以碎屑状态被搬运至沉积场所形成的^[25-26], 且密度相对较小、搬运距离较远。中上扬子地区古生界泥质烃源岩的沉积物, 其黏土矿物含量总体低于陆相烃源岩和现代湖泊沉积物, 也低于滨海地区陆源沉积物和深海黏土中的黏土矿物含量, 这说明其沉积物并非都来自陆源碎屑^[27]。

4.1 陆源碎屑黏土矿物特征

陆源碎屑黏土矿物经受过剥蚀、搬运和沉积作用的改造,其原有的晶体形态受到了不同程度的破

坏,出现磨损和溶蚀等现象^[19]。通过偏光显微镜或扫描电镜观察时,碎屑黏土矿物常呈团块状或分散状分布,矿物的结晶形态很差^[28]。

表 1 四川盆地南部及其周缘地区不同地区龙马溪组黏土矿物特征

地区	样品数	黏土矿物含量/%	伊利石相对含量/%	伊/蒙混层相对含量/%	绿泥石相对含量/%	高岭石相对含量/%
盆地东南部 and 西南部边缘等地区	57	34.5	54.7	28.8	11.9	4.6
渝东南—黔北地区	65	35.2	43.3	45.8	11.3	—
黔西—滇北地区	223	44.3	54.6	33.1	12.3	—
川西地区	18	23.1	81.0	7.5	11.0	局部出现

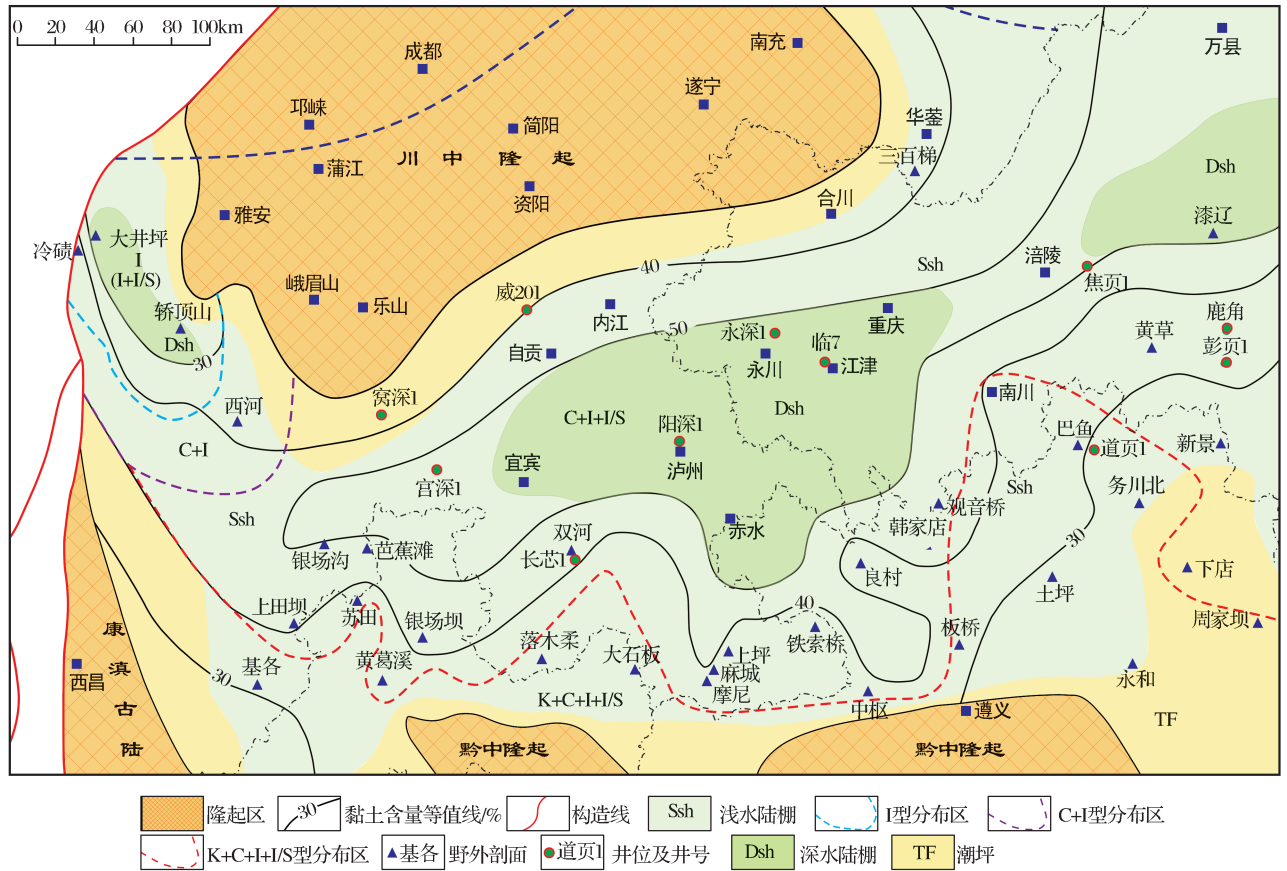


图 3 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物平面分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of clay minerals in different area of southern Sichuan Basin and its periphery

4.1.1 絮状体的大量出现

受多个物源的影响,碎屑黏土矿物在平面上与垂向上具有不均匀性和多样性^[19,29]。大量页岩中显示含有差别较大的毫米级和厘米级的矿物组分,具磨蚀的表面以及由粗向上变细的系统性分布特征,呈交叉或平行的叠状结构^[30],也称絮状体结构。这种絮状体被认为与粗粒碎屑物一样,在经历了相同的水动力条件下,由牵引流搬运沉积;由带静电的

片状黏土矿物在充满离子的海水中沉淀,形成的片架状结构,矿物间以“边一面”或“边一边”或“面一面”的形式相接触^[31-32]。并且絮状体的这种形成过程可能有助于大量黏土矿物的长距离搬运^[33],它的出现表明海相环境中大量黏土矿物远距离悬浮沉积的特殊性和复杂性。

背散射电镜下,研究区龙马溪组富有机质泥页岩中,富含孔隙的黏土矿物特征与 Barnett 页岩和

Woodford 页岩中的十分相似[图 4(a),图 4(b)],并与实验室生成的和古代地层中的这种絮状体相

似^[33],由此说明,研究区龙马溪组黏土矿物中具有大量的陆源碎屑成因类型。

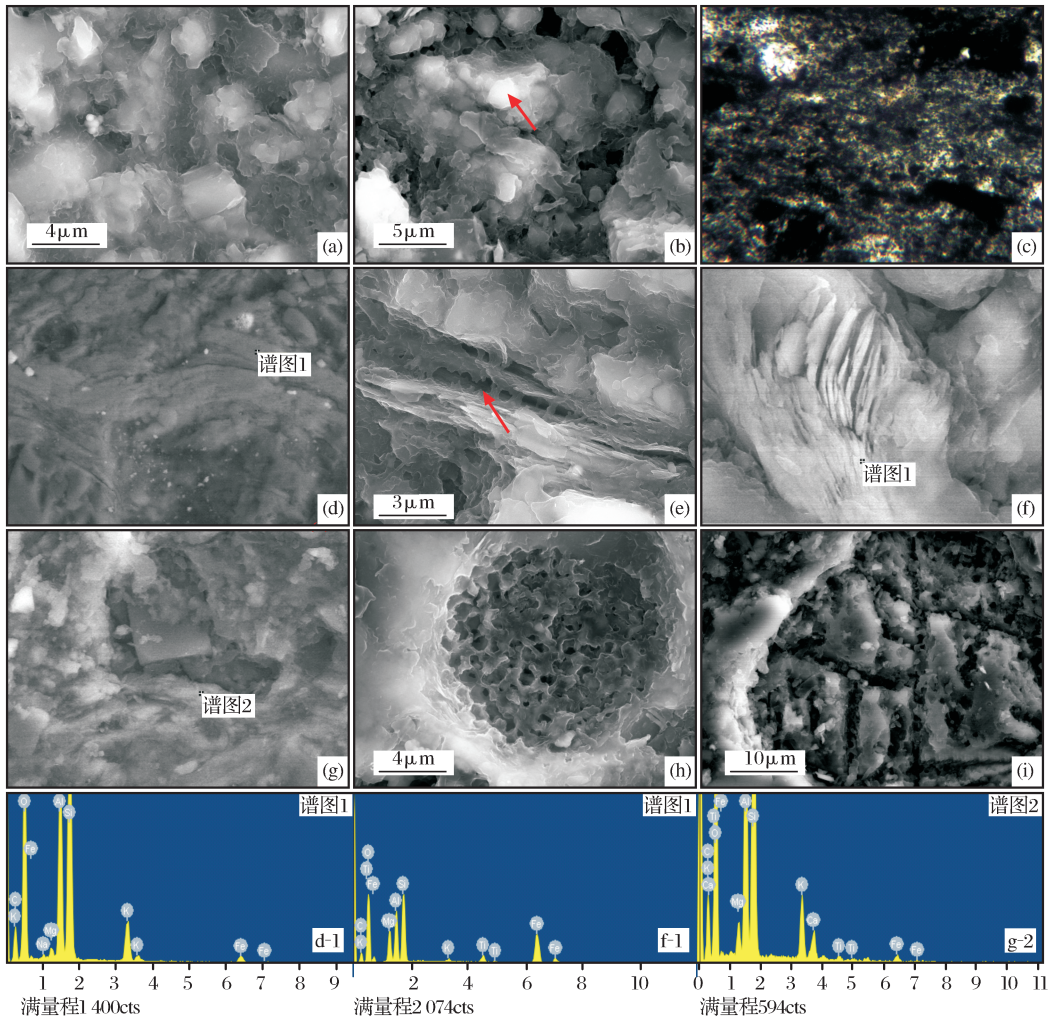


图 4 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of clay minerals in southern Sichuan Basin and its periphery

(a)伊利石为主的絮状体结构,重庆武隆黄草剖面;(b)絮状体结构,自生石英(箭头)与黏土矿物共生,贵州习水良村剖面;(c)黏土矿物呈团块状,贵州习水良村剖面;(d)绿泥石由黑云母蚀变形成,[图(d-1)为其 X-射线衍射图谱],重庆南川三泉剖面;(e)次生伊利石呈连接状充填孔隙,重庆武隆黄草剖面;(f)蚀变成因伊利石,[图(f-1)为其 X-射线衍射图谱],重庆武隆黄草剖面;(g)伊/蒙混层矿物包裹孔隙边缘,[图(g-2)为其 X-射线衍射图谱],孔隙内为自生方解石,四川叙永麻城剖面;(h)伊/蒙混层矿物,重庆石柱漆料剖面;(i)黏土矿物充填碎屑溶蚀孔,四川叙永麻城剖面

4.1.2 稳定性黏土矿物的大量出现

根据大量岩石薄片、扫描电镜和背散射电镜的观察,研究区龙马溪组泥质岩中黏土矿物,具有明显的碎屑黏土矿物的特征[图 4(c)];伊利石多呈碎屑板片状或弯曲片状,晶形不完整,轮廓圆滑清晰,略具定向性^[24][图 4(a),图 4(b)],此种伊利石是由长石等铝硅酸盐矿物风化改造形成的^[34];绿泥石平均含量为 4.82%,最多可达 25.3%,主要呈片状或薄板状,形状不规则,晶体边缘不平直,无叶片状集合体结构。一般而言,伊利石是黏土矿物中最稳定的

物相,目前比较普遍地认为伊利石主要是来自陆地,形成于物理风化较强的气候环境^[35]。根据 X-射线衍射分析,研究区龙马溪组伊利石在垂向上和平面上均较稳定分布,平均含量为 19.03%,最多可达 36%。Khormali 等^[36]也指出较高含量的伊利石和绿泥石,主要来源于富含此 2 类矿物的母岩。同时,李娟等^[1]对渝东南地区龙马溪组黑色页岩中黏土矿物进行研究时指出,黑色页岩中的绿泥石和伊利石是在古水介质呈盐碱性质的环境中沉淀,并使异地搬来的伊利石和绿泥石保存至今。

4.1.3 成岩反演—蒙皂石含量较高

蒙皂石具有很好的悬浮力,常与伊利石相伴沉积。蒙皂石的伊利石化过程是埋藏成岩的常见特征^[37],根据 X-射线衍射分析,研究区龙马溪组下段伊/蒙混层矿物在垂向上和平面上均较稳定分布,平均含量为 13.3%,最多可含 52.7%。伊/蒙混层矿物作为蒙皂石发生伊利石化的间层矿物,其相对较高的含量指示出原始沉积物中含有较多的蒙皂石。

4.2 非陆源碎屑黏土矿物特征

碎屑成因黏土的成岩演化,遵循的一般规律是蒙皂石→伊/蒙混层→伊利石、高岭石→伊利石^[23],研究区伊/蒙混层矿物含量较高,因此,发育次生黏土矿物。

分析表明,酸性介质条件下,充分的 SiO_2 和 Al_2O_3 胶体的存在而无其他元素(特别是 K^+)的干扰,相对安定的结晶环境和足够大的结晶空间,是假六方片状高岭石形成的必要条件^[34]。而在泥质岩中,由于缺乏足够大的结晶空间,即使在酸性环境中具有丰富的成岩组分,也很难形成自生高岭石。因此,研究区龙马溪组黑色富有机质页岩中的高岭石,可能有碎屑成因与次生成因 2 种来源。由于在酸性条件下,长石、蒙皂石、白云母等矿物可以自发蚀变

为高岭石^[38],所以,在滨浅海环境中,沉积物在风化、搬运过程中就可以发生长石、云母等蚀变,产生高岭石^[39]。

长芯 1 井中取样十分密集,取样间距通常小于 0.5m,岩性及其矿物组分类型和含量相差不大,而高岭石在垂向上不均匀分布^[17]。如果高岭石是在成岩过程中形成的,那么地层水的性质在垂向上变化十分频繁,相同的沉积背景以及矿物组分相差不大的情况下,发生一定的高岭石化后,长石、石英等矿物含量应具有相应的变化,不会具有现今相似的含量特征;同时在后期充填的方解石脉中,所含有的 4% 的黏土矿物中,具有 25% 的高岭石^[17],应为后期流体携带而来的碎屑高岭石。由此可以推测,高岭石应是非埋藏成岩过程中的产物。然而,在道页 1 井与长芯 1 井中高岭石与长石之间呈明显的负相关性(图 5),说明高岭石的长石蚀变成因。另外,研究区黏土矿物中检测到含有高岭石成分的地区(图 3),即盆地东南部(务川、道真、南川等地区)和西南部边缘(金阳、永善等地区),均分布在盆地边缘与隆起附近,距物源区较近。综上所述,高岭石是在搬运过程中,主要由长石等铝硅酸盐矿物蚀变形成,并在水体中呈继承性沉淀。

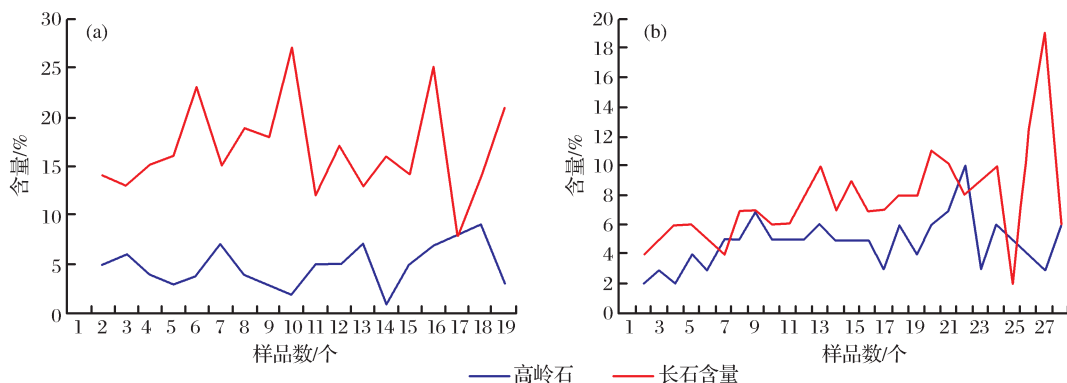


图 5 道页 1 井(a)与长芯 1 井(b)高岭石与长石含量对比

Fig. 5 Content comparison of kaolinite and feldspar in DY1(a) and CX1(b) well

在碱性埋藏成岩环境下,可发生蒙皂石和高岭石的绿泥石化与伊利石化作用。研究区蒙皂石的伊利石化作用十分发育,而所有样品中均无绿/蒙混层矿物,说明其绿泥石化作用可能不发育。长石、高岭石、蒙皂石向绿泥石的转化,只要有丰富的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 供应,就可以发生,而伊利石化作用却需要 K^+ 的参与^[38]。同时,由于高岭石的伊利石化作用比其绿泥石化需要额外的热量^[38],在成岩离子供应充足的情况下,高岭石通常发生绿泥石化。

研究区龙马溪组黑色页岩段高岭石不均匀分布,而伊/蒙混层矿物的大量出现指示出碱性成岩作用的发育。李娟等^[1]认为龙马溪组具有上淡下咸的特点,较高盐度的古水介质由于富含 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,促使高岭石提前消失,出现较多的绿泥石;然而,从彭水鹿角剖面^[1]、长芯 1 井^[17]以及本文研究的分析资料来看,绿泥石在垂向上并不随着古盐度的增大而增多,且高岭石和绿泥石之间并无明显相关性;背散射电镜下,绿泥石呈片状或薄板状,厚度

较大,晶体较小且边缘不平直,并常见黑云母蚀变成因的类型[图 4(d)],与黄铁矿共生,具相当高的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} (表 2)。由此推断黏土矿物的绿泥石化作用不发育,这主要是受控于 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量,次生绿泥石主要来自陆源碎屑蚀变成因。

对比分析发现,同一剖面中,五峰组伊利石与伊/蒙混层的平均相对含量分别为 41.9%与 47%;龙马溪组其平均相对含量则分别为 31.9%与 55%。由此可见,随着深度的增加,伊利石含量的增加与伊/蒙混层矿物含量的减少是正相关的,由此可以推断伊利石具有成岩次生类型。根据长石类的热力学特征,钾长石是相对稳定的矿物,而伊利石化作用的发生消耗 K^+ ,促使钾长石的溶解^[38],研究区龙马溪组泥页岩中钾长石含量明显低于斜长石。说明伊利石化所需的 K^+ 除水介质提供少部分外,主要由钾长石等富钾矿物随深度增加、温度升高溶解提供^[1]。因此,伊/蒙混层矿物和部分伊利石为主要的成岩次生矿物,次生伊利石呈不规则叶片状,通常充填在微

孔中[图 4(e)]。

利用 X-射线衍射光谱检测到伊利石含有较高的 K^+ 和 Al_2O_3 ,相对较低的 SiO_2 ,而 K^+ 含量大于 6%时(表 2),说明伊利石具有云母蚀变成因类型,背散射电镜下呈长条状[图 4(f)];伊/蒙混层矿物通常位于孔隙边缘,与次生石英、黄铁矿晶粒以及后期充填的碳酸盐矿物共生,微观形态介于伊利石和蒙皂石之间[图 4(g)],呈叶片状或鳞片状,边缘呈锯齿状,较弯曲,并出现纤细的丝状突出,似“花瓣状”,分布杂乱而无定向性^[34],具有一定的晶间孔[图 4(h)];而次生黏土矿物通常沿流体运移通道分布,充填孔隙[图 4(i)]。

综上所述,四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物以陆源碎屑成因为主,并含有一定的成岩次生类型,自生黏土矿物由于缺乏生长空间,含量较少。陆源碎屑成因黏土矿物主要为蒙皂石、伊利石、绿泥石和高岭石,次生成因以伊/蒙混层矿物为主,次为伊利石和少量的碎屑蚀变的绿泥石。

表 2 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黑色富有机质页岩段黏土矿物组分特征

Table 2 Component characteristics of clay minerals in southern Sichuan Basin and its periphery

样品号	黏土矿物	MgO/%	Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	K ₂ O/%	TiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	(CaO/Na ₂ O)/%	总量/%
JKP-B1	伊利石	1.12	26.79	42.40	7.48	0.30	1.44	—	79.53
QLP-B8	伊利石	0.78	26.42	48.39	7.58	0.00	1.60	—	84.76
HCP-B1	伊利石	0.86	28.29	45.50	7.82	0.45	1.07	0.51	83.99
SQP-B6	伊利石	1.39	25.66	45.65	7.52	0.00	2.73	—	82.94
HJDP-B3	伊利石	1.55	29.59	53.12	8.60	0.00	1.82	—	94.67
QGP-B6	绿泥石	4.15	19.73	47.47	2.64	0.00	10.12	—	84.10
XMP-B3	绿泥石	5.60	20.63	49.09	2.52	1.00	18.00	—	96.85
SQP-B4	绿泥石	8.29	22.64	37.03	1.65	0.00	23.32	—	92.93
SQP-B4	伊/蒙混层	2.17	21.79	48.28	5.26	0.47	2.89	0.67	80.86
XMP-B3	伊/蒙混层	1.69	18.18	48.45	4.37	0.58	1.53	2.34	74.81
SQP-B2	伊/蒙混层	1.76	19.35	60.84	6.08	1.00	4.22	—	93.25

5 黏土矿物的沉积、成岩意义及与页岩气的关系

5.1 黏土矿物的沉积意义

陆源碎屑成因的黏土矿物通过风和水体的长距离搬运后沉积到海底,此种黏土矿物的组分和特征可以指示源区的古气候和构造背景。古气候是影响蒙皂石和高岭石生成的最主要因素^[37],在陆地风化环境中,蒙皂石和高岭石通常被认为是在湿热—热带环境中经化学风化形成^[40-41]。伊利石和绿泥石由沉积岩和变质岩在干冷的环境中由物理风化形成^[42]。袁鹤然等^[43]认为,高岭石+伊利石(K+I)

黏土矿物组合代表湿润型气候,高岭石+伊利石+蒙皂石(K+I+S)黏土矿物组合代表半干旱型气候,而伊利石+绿泥石+高岭石(极少)(I+C+K)型黏土矿物组合往往代表干旱型气候。

研究区龙马溪组黑色富有机质页岩段中,陆源成因黏土矿物为蒙皂石+伊利石+绿泥石+高岭石(S+I+C+K),说明其沉积期为半干旱—干旱的气候。碎屑绿泥石往往不稳定,经长期搬运常发生分解,其含量变化可反映陆源区的远近^[44]。靠近黔中隆起的仁怀中枢龙马溪组剖面中绿泥石的含量为 6.23%,而相对靠近盆地中心的长宁地区的长芯 1 井,其龙马溪组中绿泥石含量为 4.91%;相同的,靠

近隆起区的彭水鹿角龙马溪组剖面中,绿泥石含量为 4.62%^[1],而相对靠近盆地中心的道真巴鱼剖面中,龙马溪组绿泥石的含量为 3.72%,绿泥石含量的差异表明四川盆地南部及其边缘的物源来自边缘隆起区。并且,高岭石局部存在于靠近黔中隆起的边缘,靠近盆地内部消失,表现了沉积物源搬运和机械分异作用的差异。

研究区龙马溪组黏土矿物以陆源碎屑成因为主,受沉积水体的深度和距物源区的远近影响较大。因此,黏土矿物的类型和含量具有一定的指相意义,含量越高、稳定黏土矿物越多则其沉积水体越深。黏土矿物含量大于 50%的地区,为深水陆棚沉积;30%~50%的地区通常为浅水陆棚沉积;黏土矿物组合均以绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(C+I/S+I)为主。而黏土矿物含量小于 30%的地区通常靠近古隆起,为海陆过渡相沉积,黏土矿物组合以高岭石+绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(K+C+I/S+I)为主(图 3)。

5.2 黏土矿物的成岩意义

5.2.1 黏土矿物反映成岩水体特征

陆源碎屑成因的黏土矿物,在成岩过程中受成

岩环境中水介质的影响,发生成岩变化。根据黏土矿物的转化特征,可以反演成岩流体的性质以及盆地的演化特征。四川盆地南部及其周缘龙马溪组黑色富有机质页岩中,以绿泥石+伊利石+伊/蒙混层(有序)型(C+I+I/S)黏土矿物组合最为发育,伊利石与伊/蒙混层矿物含量最高,缺乏高岭石,极少见蒙皂石,表明龙马溪组埋藏成岩过程中水介质具有盐度较高、偏碱性,富 K⁺ 的特点。川西地区龙马溪组泥页岩中伊利石含量最高,钾长石含量很少,反映了川西地区龙马溪组的水介质的盐度比其他地区更高,更趋于碱性,伊利石化作用最发育。

5.2.2 次生黏土矿物反映成岩组分

伊利石与伊/蒙混层矿物作为黏土矿物的主要成分,其含量与石英呈明显的负相关性,[图 6(a)],说明石英主要是以碎屑搬运成因为主;而伊利石与伊/蒙混层的相对含量却与石英具有近似正相关性[图 6(b)],黏土矿物中此 2 种矿物的含量越高则石英含量越高。成岩过程中,长石、蒙皂石的伊利石化作用能释放出一定量的 SiO₂[式(1)和式(2)]^[38],由此说明石英不仅具有陆源成因,其中一部分来自成

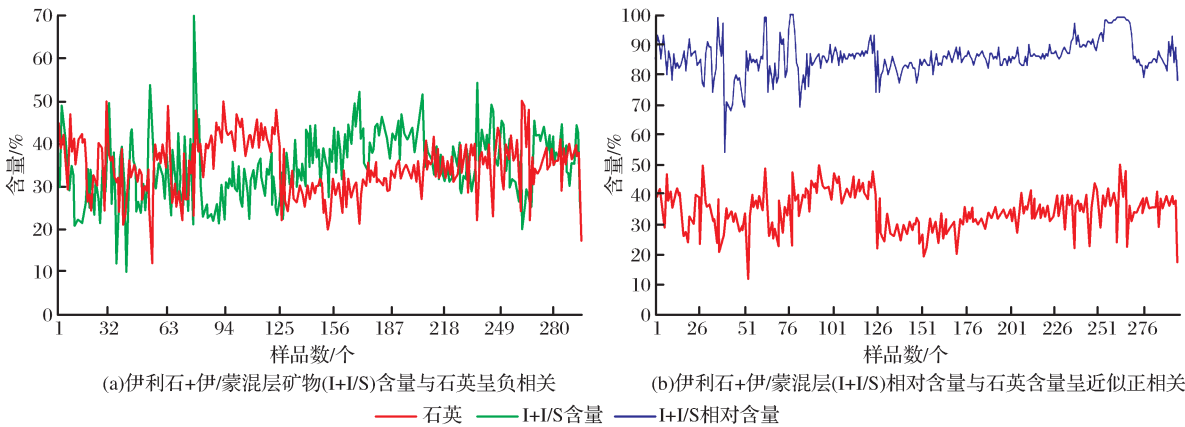
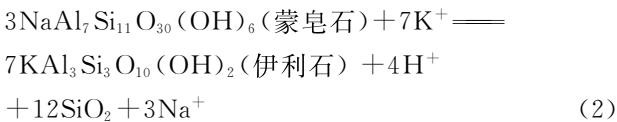
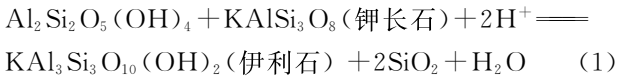


图 6 四川盆地南部及其周缘龙马溪组伊利石+伊/蒙混层矿物含量(I+I/S)与石英的关系
Fig. 6 Content relationship between I/S and quartz in southern Sichuan Basin and its periphery

岩过程中长石蚀变与黏土矿物的转化。张正顺等^[4]对四川盆地长宁双河地区龙马溪组岩石特征和矿物组成进行了详细的研究,认为石英具有碎屑石英和次生石英 2 种类型,并且次生石英含量为 15%~80%,从垂向上看,从底部向顶部石英含量明显减少。由于硅酸离子半径大,不易扩散^[45],因此黏土矿物转化产生的硅质,通常原地重结晶形成微显晶质细粒石英夹杂在黏土矿物中[图 4(b)]。次生石英的存在虽可降低黏土矿物中的微孔隙,不利于页岩气的储集性^[46],然而次生石英作为脆性矿物却可

以有效的增强页岩气的压裂效果,有利于页岩气的开发。



5.2.3 黏土矿物对成岩演化的指示

页岩气成藏与成熟度关系密切,某些标志性的黏土矿物演化及组合可作为表征成岩作用阶段及其

成熟度的指标^[7]，并可以指示其盆地的演化特征^[20,31]。按照黏土矿物类型和组合特征，与有机质的成熟度相对比，对沉积盆地的演化进行了综合划分(图 7)。黏土矿物组合特征及有序伊/蒙混层矿物的大量出现，说明研究区龙马溪组至少已经进入中成岩阶段。其有机质的镜质体反射率主要为 1.63%~2.46%，平均为 2.23%，说明烃源岩成熟度已达高成熟—过成熟阶段^[5-6]。因此，研究区龙马溪组黑色富有机质页岩，成岩演化已达到晚成岩阶段，烃类演化至干气阶段，有助于页岩气藏的形成。

5.3 黏土矿物与页岩气的关系

黏土矿物作为泥页岩最主要的成分之一，其分布、成因和成岩演化特征，对页岩气藏的形成具有一定的影响，在某些程度上可以指导页岩气的勘探和开发。一般而言，铁镁质岩石类型的蒙脱石黏土和火山起源的黏土，在钻井和水力压裂时都存在黏土膨胀问题，气体采收率差；高岭石和花岗岩类的伊利石对钻井和清水压裂液的负面影响最小^[47]。研究区龙马溪组黑色富有机质页岩的黏土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主，吸水膨胀性强的蒙脱石含量很少，对页岩气的采收影响较小。龙马溪组黑色富有机质页岩的烃类已演化至干气阶段，同时具有地层厚度大、有机碳含量高等特点，具备形成页岩气的气源条件^[13,48-49]，因此储集空间是决定有利页岩气藏形成的关键因素。龙马溪组页岩气储层具有低孔、特低渗的特征，储集

空间以黏土矿物层间孔和有机质微孔隙为主^[49-50]。在相同的成岩环境中，伊利石化作用发育，而绿泥石化作用不发育，说明成岩流体中缺乏 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} ，可能是在成岩早期，受强烈成岩作用的影响，储层中的孔渗性变差，流体运移受限，水—岩反应不强烈。同时，龙马溪早期沉积速率较低，利于形成有利烃源岩，而龙马溪晚期沉积速率快速增加^[51]，使得龙马溪组富有机质页岩段沉积物，受上覆地层的重力影响，在成岩早期就发生了强烈、快速的压实作用，造成了页岩气储层中原生孔隙的几近完全丧失。因此，龙马溪组富有机质页岩在成岩早期的快速致密，使得成岩流体的活动性受限，造成高岭石、长石等酸性易溶矿物在生烃过程中，受到有机酸的作用较弱，溶蚀次生孔隙很少。

呈絮状体的陆源碎屑黏土矿物中含有丰富的纳米—微米孔隙，研究区呈絮状体的黏土矿物受成岩压实较强，具有较好的定向性，但仍保留了一定的原生孔隙[图 4(a)，图 4(b)]，提供了一定的页岩气储集空间。絮状体的出现，表明海相环境中大量黏土矿物远距离悬浮沉积的特征，而含有高岭石的地区，具物源区较近，沉积水体较浅，富孔的絮状体发育较少，限制了成岩流体的运移，使得高岭石保存下来。另外，含有高岭石的地区，往往属于黏土含量小于 30% 的海陆过渡沉积环境，不利于形成黑色富有机质的页岩。

盆地成熟度	黏土矿物来源	黏土矿物组合特征	烃类成熟阶段	伊利石结晶度	镜质体反射率/%	成烃阶段	成岩阶段
未成熟	自生+继承性	蒙脱石+高岭石+伊利石+绿泥石	未成熟	~ 1.0	0.5 0.7 1.3	生物气	早成岩阶段
成熟	自生+继承性+次生	高岭石+伊/蒙混层+伊利石+绿泥石	成熟			重质—轻质油阶段	中成岩 A 期
		伊/蒙混层+伊利石+绿泥石	高成熟			湿气阶段	中成岩 B 期
过成熟或低变质	继承性+次生	伊利石+绿泥石	过成熟早期	0.42	2.0 2.5	干气阶段	晚成岩阶段
			过成熟晚期	0.3	3.0	干气阶段	
				0.25	4.0	干气阶段	
			变质期			生烃终止	变质阶段

图 7 黏土矿物与盆地演化等指标的关系(据 Merriman^[20],修改)

Fig. 7 Relationship among clay mineral and other indicators of basin maturity(modified from Merriman^[20])

随着地层埋深增加、地温增高和地层水逐渐变为碱性，黏土矿物发生脱水转化而析出大量层间水，

在层间形成微裂隙^[50]。同时，黏土矿物脱水转化形成的伊/蒙混层矿物，通常具有一定的晶间孔，可增

加泥页岩中的次生孔隙。由此可知,研究区在陆源碎屑成因黏土矿物含量较高的背景下,伊/蒙混层含量较高的地区,有利于页岩气储层的发育。考虑到,深水沉积环境有助于黑色富有机质页岩的发育,并且黏土矿物含量的增加有助于增加页岩气的吸附量,却不利于开发过程中压裂改造的气体扩散^[48];同时,受埋藏深度的影响,越靠近沉积中心,孔隙度越小^[52]。因此,黏土含量介于30%~50%之间、高岭石不发育、伊/蒙混层矿物含量较高的浅水陆棚沉积区域,应为页岩气的较有利区;而黏土含量大于50%的深水陆棚沉积区,由于黑色富有机质页岩发育,含有较高的有机碳和有机质微孔隙,应为页岩气的次级较有利区。

根据以上条件筛选,并与有机碳的展布特征相叠合,渝东南地区的綦江—武隆—彭水一带、黔西—滇北地区的雷波—筠连—兴文—仁怀—桐梓近EW向展布的一带,以及研究区西北部的峨边西河地区为页岩气的有利勘探区,有机碳含量大于2%,黏土矿物组合以绿泥石+伊利石+伊/蒙混层(C+I/S+D)为主,黏土含量介于30%~50%之间;其中,渝东南地区的綦江—武隆—彭水一带,伊/蒙混层矿物相对含量最高,应为相对最有利区;而位于盆地中心的宜宾—江津—涪陵呈NE—SW向展布的区域,为深水陆棚沉积物,黏土含量大于50%,富含有机质,储集空间以有机质微孔为主,为次级有利区。

6 结论

(1)四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物主要为伊利石、伊/蒙混层、绿泥石和少量的高岭石,蒙皂石很少。不同地区龙马溪组中的黏土矿物组分基本相似,含量存在差别。

(2)黏土矿物组合以绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(C+I/S+D)为主,其次为高岭石+绿泥石+伊/蒙混层+伊利石(K+C+I/S+D)组合,其分布具有一定的分带性。

(3)黏土矿物以陆源碎屑成因为主,并含有一定的成岩次生类型,自生黏土矿物很少。陆源碎屑成因黏土矿物主要为蒙皂石、伊利石、绿泥石和高岭石,保留有大量的层间微孔隙;次生黏土以伊/蒙混层矿物为主,在成岩早期受快速强压实作用的影响,水—岩反应不强烈,溶蚀次生孔隙很少。

(4)黏土矿物的类型和含量具有一定的指相意义,含量越高、稳定黏土矿物越多则其沉积水体越深。平均含量大于50%的地区,主要为深水陆棚沉

积;30%~50%的地区通常为浅水陆棚沉积;而平均含量小于30%的地区,通常靠近古隆起,为海陆过渡沉积环境。

(5)龙马溪组沉积时总体为半干旱—干旱的气候,埋藏成岩过程中水介质具有盐度较高、偏碱性,富K⁺的特点。

(6)龙马溪组黑色富有机质页岩,成岩演化已达到晚成岩阶段,烃类演化至干气阶段,具备形成页岩气的气源条件。根据黏土矿物对页岩气储集空间的影响,并与有机碳的展布特征相叠合,渝东南地区的綦江—武隆—彭水一带、黔西—滇北地区的雷波—筠连—兴文—仁怀—桐梓近EW向展布的一带,以及研究区西北部的峨边西河地区为页岩气的有利区;而位于盆地中心的宜宾—江津—涪陵呈NE—SW向展布的区域,为次级有利区。

参考文献(References):

- [1] Li Juan, Yu Bingsong, Liu Che, *et al.* Clay minerals of black shale and their effectson physical properties of shale gas reservoirs in the southeast of Chongqing: A case study from Lujiao outcrop section in Pengshui, Chongqing[J]. *Geoscience*, 2012, 26(4): 732-740. [李娟, 于炳松, 刘策, 等. 渝东南地区黑色页岩中粘土矿物特征兼论其对储层物性的影响——以彭水县鹿角剖面为例[J]. *现代地质*, 2012, 26(4): 732-740.]
- [2] Zhao Xingyuan, Chen Hongqi. Characteristics of the distribution of clay minerals in oil-bearing basins in China and their controlling factors[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1988, 9(3): 28-37. [赵杏媛, 陈洪起. 我国含油盆地粘土矿物分布特征及控制因素[J]. *石油学报*, 1988, 9(3): 28-37.]
- [3] Daoudi L, Ouajhin B, Rocha F, *et al.* Comparative influence of burial depth on the clay mineral assemblage of the Agadir-Essaouira Basin(western High Atlas, Morocco)[J]. *Clay Minerals*, 2010, 45: 453-467.
- [4] Zhang Zhengshun, Hu Peiqing, Shen Juan, *et al.* Mineral compositions and organic matter occurrence modes of Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 766-771. [张正顺, 胡沛青, 沈娟, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩矿物组成与机质赋存状态[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 766-771.]
- [5] Wang Qingbo, Liu Ruobing, Li Chunyan, *et al.* Geologic condition of the Upper Ordovician-Lower Silurian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. *Journal of Chongqing College of Technology: Science and Technology Edition*, 2012, 14(4): 17-21. [王庆波, 刘若冰, 李春燕, 等. 四川盆地及周缘五峰—龙马溪组页岩气地质条件研究[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2012, 14(4): 17-21.]
- [6] Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzong, *et al.* Shale gas accumulation conditions and favorable zones of Silurian Longmaxi Formation in south Sichuan Basin, China[J]. *Journal of*

- China Coal Society, 2012, 37(5): 782-787. [黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 782-787.]
- [7] Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, *et al.* Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichua Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 775-782. [陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.]
- [8] Liu Shugen, Ma Wenxin, Jansa L, *et al.* Characteristics of the shal egas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, east Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2239-2252. [刘树根, 马文辛, Luba Jansa, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252.]
- [9] Zeng Xiangliang, Liu Shugen, Huang Wenming, *et al.* Comparison of Silurian Longmaxi Formation shale of Sichuan Basin in China and Carboniferous Barnett Formation shale of Fort Worth Basin in United States[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 372-384. [曾祥亮, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 372-384.]
- [10] Su Wenbo, Li Zhiming, Ettensohn F R, *et al.* Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi Formations(Ordovician-Silurian), South China; Major controlling factors and implications[J]. *Earth Science; Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(6): 819-827. [苏文博, 李志明, Ettensohn F R, 等. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(6): 819-827.]
- [11] Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Mingcai, *et al.* Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian(Cambrian -Silurian)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2299-2317. [黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2299-2317.]
- [12] Li Yifan, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, *et al.* Sequence stratigraphy of Silurian Black Shale and its distribution in the southeast area of Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 299-306. [李一凡, 樊太亮, 高志前, 等. 渝东南地区志留系黑色岩层层序地层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 299-306.]
- [13] Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, *et al.* Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze Region and petroleum and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 526-532. [牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532.]
- [14] Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, *et al.* The geologic background of the Siluric shale-gas reservoiring in Szechwan, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1160-1164. [朱炎铭, 陈尚斌, 方俊华, 等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1160-1164.]
- [15] Guo Yinghai, Li Zhuangfu, Li Dahua, *et al.* Lithofacies palaeogeography of the Early Silurianin Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 20-29. [郭英海, 李壮福, 李大华, 等. 四川地区早志留世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 20-29.]
- [16] Rong Jiayu. The ecological formation evidence and glacier activities for the regression Late Ordovician Epoch in Upper Yangtze Region[J]. *Journal of stratigraphy*, 1984, 8(1): 19-28. [戎嘉余. 上扬子区晚奥陶世海退的生态地层证据与冰川活动影响[J]. 地层学杂志, 1984, 8(1): 19-28.]
- [17] Chen Wenling, Zhou Wen, Luo Ping, *et al.* Analysis of the shale gas reservoir in the Lower Silurian Longmaxi Formation, Changxin1 well, Southeast Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1073-1086. [陈文玲, 周文, 罗平, 等. 四川盆地长芯 1 井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1073-1086.]
- [18] Zhao Xingyuan, He Dongbo. Clay mineral analysis and some problems of application in petroleum geology[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(6): 756-758. [赵杏媛, 何东博. 粘土矿物分析及其在石油地质应用中的几个问题[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 756-758.]
- [19] Wu Xianhui, Liu Chengwu, Ju Junchang. The identification method of neoformed, inherited and transformed clay minerals [J]. *Journal of Xianning Normal College: Science and Technology Edition*, 1997, 17(3): 74-76. [武羨慧, 刘成武, 巨军昌. 他生、原生及次生粘土矿物的鉴别方法研究[J]. 咸宁师专学报: 自然科学版, 1997, 17(3): 74-76.]
- [20] Merriman R J. Clay minerals and sedimentary basin history [J]. *Eur. J. Mineral*, 2005, 17: 7-20.
- [21] Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan. The Cretaceous clay minerals and paleoclimate in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(1): 115-123. [曹柯, 李祥辉, 王成善. 四川盆地白垩系黏土矿物特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 115-123.]
- [22] Fu Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(3): 59-68. [伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. 古地理学报, 2000, 2(3): 59-68.]
- [23] Kang Yili, Luo Yaping, Jiao Li, *et al.* Clay minerals and the potential formation damage of the gas bearing dense sandstone in western Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998, 20(4): 1-5. [康毅力, 罗平亚, 焦隼, 等. 川西致密含气砂岩的黏土矿物与潜在地层损害[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(4): 1-5.]
- [24] Xie Yuan, Wang Jian, Li Lingxi, *et al.* Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos Basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 93-104. [谢渊, 王剑, 李令喜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系黏土矿物的分布特征及其沉积—成岩意义[J]. 地质通报, 2010, 29(1): 93-104.]
- [25] Liu Baojun. *Sedimentology* [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1980. [刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社, 1980.]
- [26] Song Zhaojun, Zhang Zhixun, Yu Jifeng, *et al.* Study on distribution and material sources of clay minerals in the surface sediments of the southern Yellow Sea[J]. Journal of Shandong University of Science & Technology, 2008, 27(3): 1-4. [宋召军, 张志珣, 余继峰, 等. 南海海表层沉积物中粘土矿物分布及物源分析[J]. 山东科技大学学报, 2008, 27(3): 1-4.]
- [27] Fu Xiaodong, Qin Jianzhong, Teng Geer, *et al.* Mineral components of source rocks and their petroleum significance: A case from Paleozoic marine source rocks in the Middle-Upper Yangtze region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 671-684. [付小东, 秦建中, 滕格尔, 等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义——以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 671-684.]
- [28] Liu Yulin, Di Shixiang, Xue Xiangxu. Clay minerals from the Lower Cretaceous to Middle Jurassic strata in the Bazhou depression, eastern Qilian folded belt[J]. Journal of Palaeogeography, 1998, 18(5): 10-15. [刘玉林, 邸世祥, 薛祥煦. 巴州坳陷下白垩统一中侏罗统的粘土矿物特征[J]. 岩相古地理, 1998, 18(5): 10-15.]
- [29] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of North American unconventional gas shales: Commonality or coincidence[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, (8): 68-84.
- [30] Slatte R M, Abusleiman Y. Merging quence stratigraphy and geomechanics for unconventional gas shales[J]. The Leading Edge, 2011, 3: 274-282.
- [31] O'Brien N R, Slatte R M. Argillaceous Rock Atlas[M]. New York: Springer-Verlag, 1990: 141.
- [32] Bennett R H, O'Brien N R, Hulbert M H. Determinants of clay and shale microfabric signatures: Processes and mechanisms[M]//Bennett R H, Bryant W R, Hulbert M H, *et al.* Microstructure of Fine-grained sediments: From Mud to Shale; New York: Springer Verlag, 1991: 5-32.
- [33] Slatte 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 rock[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [34] Zhang Rufan. Application of scanning electron microscopy to study of mineral change-transformation of feldspar into clay minerals[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992, 1: 66-70. [张汝藩. 扫描电镜在矿物变化研究中的应用——长石的黏土矿物转化[J]. 地质科学, 1992, 1: 66-70.]
- [35] Jin Ning, Li Anchun, Liu Haizhi, *et al.* Clay minerals in surface sediment of the northwest Parece Vela Basin: distribution and provenance[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(6): 504-511. [靳宁, 李安春, 刘海志, 等. 帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中粘土矿物分布特征及物源分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 504-511.]
- [36] Khormali F, Abtahi A. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran[J]. Clay Minerals, 2003, 38: 511-527.
- [37] Daoudi L, Rocha F, Ouajhain B, *et al.* Palaeoenvironmental significance of clay minerals in Upper Cenomanian-Turonian sediments of the Western High Atlas Basin (Morocco) [J]. Clay Minerals, 2008, 43: 615-630.
- [38] Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Gong Yunyun, *et al.* Diagenetic evolution and facies of the reservoir in section 8 of Permian Shihezi Formation He8 section of Z30 block of the Sulige Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 883-895. [王秀平, 牟传龙, 贡云云, 等. 苏里格气田 Z30 区块下石盒子组 8 段储层成岩演化与成岩相[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 883-895.]
- [39] Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, *et al.* Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: A case study of the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, weastern Sichuan Depression[J]. Geochemica, 2009, 38(5): 498-506. [黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506.]
- [40] Long Hao, Wang Chenhua, Liu Yongping, *et al.* Application of clay minerals in paleoenvironment research[J]. Journal of Salt Lake Research, 2007, 15(2): 456-459. [隆浩, 王晨华, 刘勇平, 等. 黏土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究, 2007, 15(2): 456-459.]
- [41] Wu Bihao, Yang Huining, Li Songjun. The Mineral Composition of Sediment and Sedimentation of Central Pacific[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 44-45. [吴必豪, 杨惠宁, 李松筠. 太平洋中部沉积物的矿物组成与沉积作用的研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 44-45.]
- [42] Jeong G Y, Yoon H I. The origin of clay minerals in soils of King George Island, South Shetland Island, South Shetland Island, west Antarctica, and its implications for the clay-mineral compositions of marine sediments[J]. Journal of Sedimentary, 2001, 71(5): 833-842.
- [43] Yuan Heran, Nie Zhen, Liu Junying, *et al.* Paleogene sedimentary characteristics and their Paleoclimatic implications in the Baise Basin, Guangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12): 1692-1697. [袁鹤然, 乜贞, 刘俊英, 等. 广西百色盆地古近系沉积特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1692-1697.]
- [44] Liu Yun. The clay mineral characteristics and the analysis for sedimentary environment of the Late Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 131-137. [刘云. 松辽盆地晚白垩世粘土矿物特征及沉积环境分析[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 131-137.]
- [45] Zheng Ruilin. Diagenesis of the quartz sandstones in coal-bearing formations in Shan-Gan-Ning Basin and the revolution of their pore structure[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, (6): 31-40. [郑瑞林. 陕甘宁盆地煤系地层中石英砂岩成岩作用及其孔隙演化[J]. 石油勘探与开发, 1986, (6): 31-40.]
- [46] Liu Li, Wang Lijuan, Yang Yongzhi, *et al.* Mineral composi-

- tion and origin of authigenic quartz crystals in black mudstone, in well HX, Qingshankou Formation, Upper Cretaceous, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1358-1365. [刘立, 王力娟, 杨永智, 等. 松辽盆地南部 HX 井上白垩统青山口组黑色泥岩的矿物组成与自生微晶石英成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1358-1365.]
- [47] Zhang Weidong, Guo Min, Jiang Zaixing. Parameters and method for shale gas reservoir evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1093-1099. [张卫东, 郭敏, 姜在兴. 页岩气评价指标和方法[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1093-1099.]
- [48] Zuo Zhonghang, Yang Fei, Zhang Cao, *et al.* Evolution of advantaged area of Longmaxi Formation shale gas of Silurian in southeast area of Sichuan[J]. Geology of Chemical Minerals, 2012, 34(3): 135-142. [左中航, 杨飞, 张操, 等. 川东南地区志留系龙马溪组页岩气有利区评价优选[J]. 化工矿产地质, 2012, 34(3): 135-142.]
- [49] Wang Qingbo, Liu Ruobing, Li Chunyan, *et al.* Geologic condition of the Upper Ordovician-Lower Silurian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2012, 14(5): 17-21. [王庆波, 刘若冰, 李春燕, 等. 四川盆地及周缘五峰—龙马溪组页岩气地质条件研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2012, 14(5): 17-21.]
- [50] Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Jianzhong, *et al.* Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561. [王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.]
- [51] Zhang Chunming, Zhang Weisheng, Guo Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source of Longmaxi Formation in southeast Sichuan and north Guizhou, China[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 136-145. [张春明, 张维生, 郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 136-145.]
- [52] Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, *et al.* Shale gas accumulation condition of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(3): 335-345. [聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统—下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335-345.]

Study on Clay Minerals in the Lower Silurian Longmaxi Formation in Southern Sichuan Basin and Its Periphery

WANG Xiu-ping^{1,2}, MOU Chuan-long^{2,3}, GE Xiang-ying^{2,3}, CHEN Xiao-wei^{2,3}, ZHOU Ken-ken^{2,3},
WANG Qi-yu^{2,3}, LIANG Wei^{2,3}, CHEN Chao^{2,3}

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Key Laboratory Sedimentary Basins Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081, China;

3. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to investigate the physical characteristics of clay minerals in shale gas reservoir and their influence on the gas exploration and development, black shale from the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery were as studied. Based on X-diffraction analysis, combined with observation of thin sections and backscattered electron images, characteristics of clay minerals and their distribution were revealed. Chlorite+illite/smectite+illite is the main assemblage, including transformed and inherited types, which is dominated by illite, illite/smectite mixed layers and chlorite. The type and content of clay minerals have a certain meaning for sedimentary facies, for example, deep shelf facies have an average content of $>50\%$, transitional facies are of $<30\%$, and shallow shelf facies is between them. Longmaxi Formation had experienced arid-semiarid climate during sedimentation, burial water medium was saline and alkaline, and enriched in K^+ . The diagenetic evolution has reached the late diagenetic stage. In combination with the distribution characteristics of TOC, the area of Qijiang-Wulong-Pengshui in southeast of Chongqing, and Leibo-Junlian-Xingwen-Renhuai-Tongzi in west of Guizhou and north of Yunnan, as well as Xihe county in western Sichuan, are favorable for shale gas. The area of Yibin-Jiangjin-Fuling in Sichuan, is a secondary favorable zone.

Key words: Genesis; Distribution; Shale gas; Clay mineral; Longmaxi Formation; Southern Sichuan Basin and its periphery