

川南地区二叠系龙潭组岩石特征及与油气的关系

王珏博, 高天, 段国强, 胡镡分, 李浩, 穆柏雨

西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年9月29日; 录用日期: 2021年11月1日; 发布日期: 2021年11月15日

摘要

四川盆地二叠系龙潭组地层是盆地内非常规油气探勘开发的新热点地层之一。对龙潭组地层岩石特征的认识是勘探开发的基础工作, 对后续进一步深入研究油气富集规律有着重要指导意义。本文采用宏观与微观相结合的方法, 利用偏光显微镜、场发射扫描电镜和岩石有机碳分析(TOC)等手段, 对川南地区龙潭组地层岩石的颜色、岩性、矿物组成、结构构造特征和主要分布范围等进行研究, 将其划分为泥页岩、粉砂岩、砂岩、菱铁岩和煤岩5大类, 灰黑-黑色炭质泥岩、灰-深灰色粉砂质泥岩、灰白色铝土质泥岩、灰色-深灰色(含砾)细砂岩、灰色-深灰色粉砂岩、灰色-深灰色泥质粉砂岩、灰-深灰色粉-细晶菱铁岩和煤层、煤线9种小类。并按照岩性的不同对岩石总有机碳含量进行了统计, 结果表明川南地区龙潭组烃源岩TOC含量介于0.20%~81.38%, 平均值为12.12%。其中的炭质泥岩TOC含量介于3.46%~34.16%, 平均值为12.71%, 是龙潭组页岩气勘探开发的最有利岩类。

关键词

龙潭组, 岩石特征, 川南地区, 页岩气

The Rock Characteristics of the Permian Longtan Formation in Southern Sichuan and Its Relationship with Gas

Juebo Wang, Tian Gao, Guoqiang Duan, Fanfen Hu, Hao Li, Boyu Mu

School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: Sep. 29th, 2021; accepted: Nov. 1st, 2021; published: Nov. 15th, 2021

文章引用: 王珏博, 高天, 段国强, 胡镡分, 李浩, 穆柏雨. 川南地区二叠系龙潭组岩石特征及与油气的关系[J]. 石油天然气学报, 2021, 43(4): 1-9. DOI: 10.12677/jogt.2021.434065

Abstract

One of the new hotspots in the exploration and development of unconventional oil and gas in the Sichuan Basin is the Permian Longtan Formation. The understanding of the rock characteristics of the Longtan Formation is the basic work of exploration and development, and it has important guiding significance for the further study of the law of oil and gas enrichment in the future. This article adopts the method of combining macro and micro. Using polarized light microscope, field emission scanning electron microscope, and rock organic carbon analysis (TOC), the color, lithology, mineral composition, structural features and main distribution range of the Longtan Formation rocks in southern Sichuan are studied. The research results are divided into five categories: shale, siltstone, sandstone, siderite and coal rock. The nine small types are: gray-black carbonaceous mudstone, gray-dark gray silty mudstone, gray-white bauxite mudstone, gray-dark gray (with gravel) fine sandstone, gray-dark gray siltstone, gray-dark Gray argillaceous siltstone, gray-dark gray powder-fine crystal siderite and coal seams, coal lines. According to the different lithologies, the total organic carbon content of the rocks was counted. The results show that the TOC content of the Longtan Formation source rocks in southern Sichuan is between 0.20% and 81.38%, with an average value of 12.12%. The TOC content of carbonaceous mudstone ranges from 3.46% to 34.16%, with an average value of 12.71%, which is the most favorable rock type for the exploration and development of shale gas in the Longtan Formation.

Keywords

Longtan Formation, Rock Characteristics, Southern Sichuan Area, Shale Gas

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国社会经济的快速发展,石油天然气作为经济发展的重要能源,在国家战略中的地位显得更加关键。尤其是近二十年来,随着油气勘探开发技术的快速发展,美国凭借页岩油气勘探开发领域的优势,实现了能源独立的梦想,成为了国际能源杠杆中的重要力量。近年来,我国油气储量虽有较大的增长,但随着经济的快速发展和国家“碳中和”的需要,我国油气资源对外依存度还在不断增加,能源保障形势依然严峻。在此背景下,除了加强常规油气勘探开发,也应该积极增加非常规油气(尤其是页岩油气)的勘探和开发力度,而四川盆地作为天然气勘探开发的重点地区,发展页岩气勘探开发势在必行[1] [2] [3]。近年来盆地内页岩气的勘探开发工作已在海相页岩地层取得了诸多重大突破[4] [5] [6]。

二叠系龙潭组地层在盆地内分布广泛,过去的勘探开发实践中,将整套地层作为一套烃源岩或煤层研究[7] [8] [9],鲜少针对其地质特征展开详细研究。前人研究表明,四川盆地南部地区二叠系龙潭组为一套陆相河泛平原沉积物,其发育情况受到构造、沉积相的控制,具有非均质性较强、地层厚度变化大的特征[10] [11] [12] [13]。但这些研究对川南地区龙潭组地层中发育的岩石类型研究较为粗略,一般注重研究其中煤层的特征,而将其他岩性笼统划分为泥岩和砂岩两类,认为地层主要是由煤、泥页岩、砂岩构成,三种岩性交互出现,具有多旋回性,即“多源、多储、多盖”的特点[11] [14]。但对地层内岩石(特别是泥页岩和粉砂岩类)的特征、分布规律目前仅停留在概念认识上,缺乏系统性深入研究。随着非常规

油气勘探开发工作在四川盆地的稳步推进,对龙潭组岩石特征的研究将有助于更准确地把握盆地内页岩气富集规律。

2. 地质概况

“龙潭组”组名由刘季辰、赵如钧 1924 年命名于江苏省江宁县的龙潭镇,原称“龙潭煤系”。该组广泛分布于四川盆地中-南部,层位稳定,多属于一套海陆过渡相含煤层系。主要由深灰-灰黑色的泥页岩、粉砂岩夹煤层组成,中含黄铁矿、菱铁矿。龙潭组与吴家坪组以及宣威组下部互为同期异相。宣威组为龙潭组在川南地区的同期异相,毗邻峨眉山玄武岩,与下伏茅口组呈不整合接触,与上覆长兴组之间呈整合接触。吴家坪组为龙潭组在川北地区的同期异相(表 1)。

Table 1. Summary table of Permian stratigraphic division in the Sichuan Basin

表 1. 四川盆地二叠系地层划分简表

地层		川西北	川南-川中	剑阁-仪陇	广元-南江
二叠系	上二叠统	长兴阶 峨眉山玄武岩		长兴组	吴家坪组
		吴家坪阶	宣威组	龙潭组	吴家坪组
	中二叠统	茅口阶		茅口组	

3. 岩石微观特征

四川盆地南部地区上二叠统龙潭组岩石类型复杂,主要涉及泥页岩、砂岩(粉砂岩)、煤层和灰岩等类型。由于灰岩主要集中分布在川北地区,不属于本项目的主要研究区,因此,这里重点描述川南地区上二叠系龙潭组的煤层、泥页岩及砂岩(粉砂岩)三大类储集岩及菱铁岩。依据其颜色、粒径大小、成分和古生物特征等将川南地区龙潭组主要岩石类型划分为表 2 中的 5 大类、9 种岩性(表 2)。

Table 2. Summary of the types and distribution of main reservoir rocks of the Longtan Formation in the southern Sichuan Basin

表 2. 川南地区龙潭组主要储集岩类型及分布简表

	主要岩石类型	分布层段
泥页岩	灰黑-黑色炭质泥岩	主要分布于川南龙潭组中下部
	灰-深灰色粉砂质泥岩	
	灰白色铝土质泥岩	川南地区龙潭组底部
砂岩	灰色-深灰色(含砾)细砂岩	川南地区龙潭组中上部
粉砂岩	灰色-深灰色粉砂岩	主要分布于川南地区龙潭组中下部
	灰色-深灰色泥质粉砂岩	
菱铁岩	灰-深灰色粉-细晶菱铁岩	主要分布于龙潭组中下部
煤岩	煤层、煤线	以薄层状夹于泥岩中

3.1. 泥岩类

一般认为泥岩是指粘土矿物含量 > 90%的、其他矿物成分复杂、已固结成岩的、局部失去可塑性、

遇水不立即膨胀的一类沉积岩。其中，页理发育的称之为页岩，呈块状的为泥岩。暗色泥页岩广泛分布于区内龙潭组地层中，属于相对低能还原沉积环境下的产物，颜色表现为灰黑色到黑色。根据岩心和岩屑的观察，按泥岩中各组分含量的高低可进一步划分出三种岩性：炭质泥岩、铝土质泥岩、粉砂质泥岩。

3.1.1. 炭质泥岩

炭质泥岩颜色主要为灰黑色到黑色，野外剖面风化后颜色呈褐色。剖面上炭质泥岩常与泥质粉砂岩互层，含量较高、分布较广。两者关系密切，常互相过渡，相互共生，呈互层状。岩心上可见炭化的植物碎片。这些植物碎片则显示为纯黑色，有点还保留有原组织的部分外形，如图 1(a)。

镜下显泥质结构，岩石主要由炭泥质(一般>70%)、炭屑(约 10%)、硅质组成。粘土矿物呈隐晶质泥状混杂非晶质粉末状炭质分布，炭屑为炭质植物残片，呈条片状为主，杂乱分布于泥基质之间，部分炭质植物残片可见植物结构，如图 1(b)。硅质为细小陆源碎屑石英，粒径 0.02 mm~0.1 mm，主要分布于粘土矿物间，局部炭质植物残片内部空间少量自生石英，如图 1(a)。见发丝状、缠绕状富有机质泥纹。电镜下可见大量有机质充填于粘土矿物间，呈椭圆状、分散状如图 1(c)。原生黄铁矿较发育，呈草莓状集合体，如图 1(d)。炭质泥岩在扫描电镜下可见较多的粘土矿物晶间孔、粒间微孔，面孔率可达 2%~5%，但孔隙较小，连通性较差。

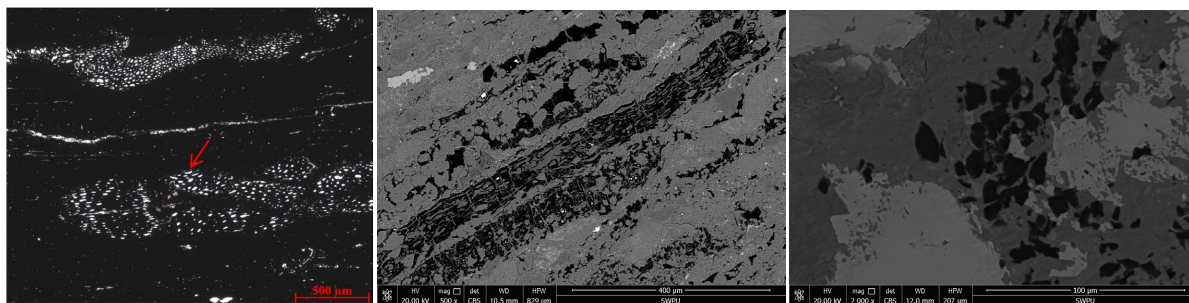
3.1.2. 铝土质泥岩

铝土质泥岩颜色主要为灰色到灰白色，剖面上常分布于龙潭组的底部和厚层煤层的底部如图 1(e)，为一套灰白色铝土质黏土岩、泥岩，多属于风化残积物。镜下呈显微鳞片状结构，岩石主要由粘土矿物(主要是高岭石)与黄铁矿组成。川南地区铝土质泥岩中粘土矿物(一般>90%)主要为高岭石、绿泥石等构成岩石主体，如图 1(f)。岩心上可见大量黄铁矿分布，呈分散状、团块状，电镜下可见大量次生黄铁矿(一般<10%)呈自形-半自形粒状，粒径 0.01 mm~2 mm 以上不等，呈星点状或聚集成条带状分布，可见结晶细小鳞片状绿泥石垂直黄铁矿表面生长。见压实作用产生的泥纹弯曲等现象。

3.1.3. 粉砂质泥岩

粉砂质泥岩颜色呈灰色到灰黑色，野外岩石风化后呈黄褐色，可见菱铁矿结核顺层发育，如图 1(g)。粉砂质泥岩常与粉砂岩伴生，两者关系密切，常互相过渡，相互共生，呈互层状、透镜状。岩心为灰色到灰黑色泥质粉砂岩夹粉砂岩，粒径 0.01 mm~0.5 mm，可见透镜状层理。

镜下呈显微鳞片状结构，岩石主要由粘土矿物与陆源粉砂(15%~20%)组成。可见少量黄铁矿，呈细小黑色粒状零散分布在岩石中。少量有机质(约 3%)，多呈黑色粒状、团块状混在泥质中。此外还可见到炭屑(一般<10%)为炭化植物残片，电镜下呈不规则状，可见植物残余结构，多顺层分布，如图 1(i)。



(a) 炭质泥岩，含陆源粉砂石英和炭化植物碎片(红色箭头)

(b) 炭质泥岩中见炭化植物碎片

(c) 分散状有机质

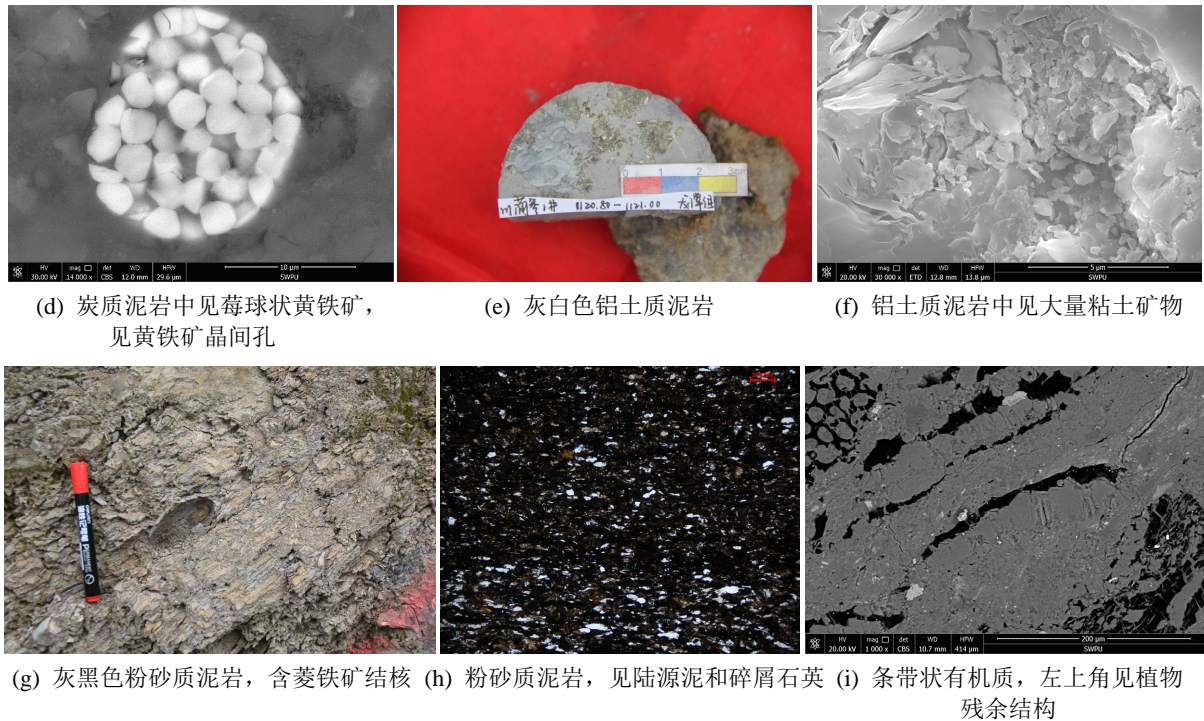


Figure 1. The characteristics of mudstone-like rocks in the Longtan Formation in southern Sichuan
图 1. 川南地区龙潭组泥岩类岩石特征

3.2. 砂岩类

砂岩是指主要出含量大于 50%、粒径 0.1 mm~2 mm 的陆源碎屑颗粒组成的碎屑岩。根据前人的研究，龙潭组砂岩类主要发育在川东南地区的河流相中，厚度介于 0 m~30 m [10]。镜下鉴定可以看出，研究区龙潭组的砂岩主要为细砂岩(局部地区见中砂岩)，颜色主要为灰色到黑色，如图 2(a)，暗色砂岩一般含有一些炭化的植物碎片，粒径 0.1 mm~0.5 mm。可见小型冲刷构造。

镜下呈典型碎屑结构，分选磨圆较差，颗粒以岩屑、石英为主，长石少见。岩屑主要为凝灰质岩浆岩岩屑及部分泥岩岩屑，多发生蚀变；石英，半自形-他形粒状；偶见少量长石，因发生蚀变而显浑浊。岩石压实作用较强，碎屑组分之间多呈线-凹凸接触，颗粒支撑，孔隙式胶结。颗粒间胶结物多为菱铁矿，有时还可见方解石、白云石胶结。有机质少见，一般呈孤立漂浮状或分散状。少量黄铁矿，呈黑色粒状零散分布在岩石中，如图 2(b)和图 2(c)。

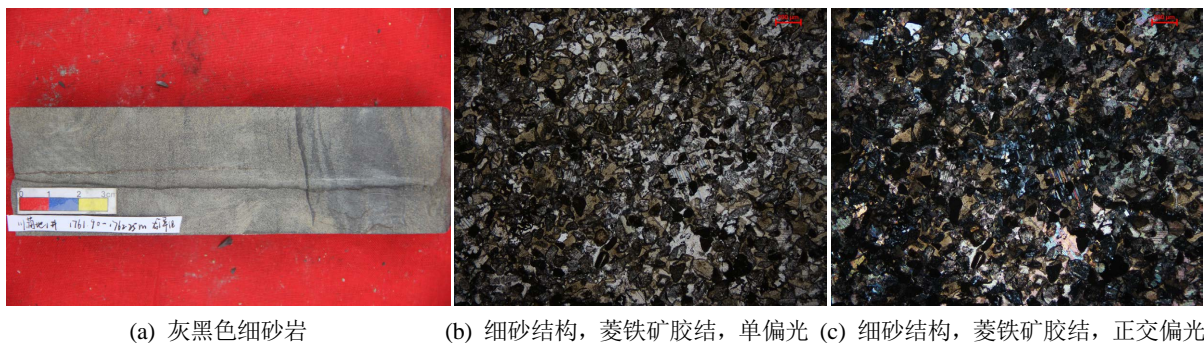


Figure 2. Characteristics of sandstone-like rocks of the Longtan Formation in southern Sichuan
图 2. 川南地区龙潭组砂岩类岩石特征

3.3. 粉砂岩类

粉砂岩主要由含量大于 50%、粒级为 0.005 mm~0.1 mm 的碎屑组成的细粒碎屑岩。研究表明,川南地区龙潭组的粉砂岩主要有两类,一种是碎屑组分含量大于 90%的粉砂岩,另一种是泥质含量在 15%~25%的泥质粉砂岩。

3.3.1. 粉砂岩

粉砂岩颜色主要为灰白色到深灰色,野外常观察到粉砂岩与黑色的泥岩、炭质泥岩互层。野外灰白色粉砂岩风化后呈浅褐红色,如图 3(a)。岩心颜色为灰色,常见裂缝被方解石充填并可见透镜状层理、小型揉皱构造,如图 3(b)。

镜下鉴定为典型粉砂结构,岩石由碎屑颗粒及填隙物组成,其中碎屑组分粒径主要在 0.25 mm~0.72 mm 之间,最大可达 0.1 mm,杂基支撑,含量一般大于 90%。颗粒主要由石英、岩屑及少量长石构成,如图 3(c)。石英,半自形-他形粒状;岩屑主要是凝灰质、隐晶质岩浆岩岩屑;少量石英;长石蚀变而显浑浊。填隙物主要是泥质杂基,充填在碎屑组分之间。有机质偶见,多呈黑色团块状充填在粒间。

3.3.2. 泥质粉砂岩

泥质粉砂岩颜色主要为灰色到灰黑色,野外泥质粉砂岩风化后呈浅褐色。可见菱铁矿结核顺层发育,成薄层状、透镜状,如图 3(d)。岩心上观察到泥质粉砂岩常由于含有有机质泥及炭化的植物碎片而呈灰黑色到黑色,可见一些小型的交错层理,如图 3(e)。

镜下呈典型泥质粉砂结构,岩石主要由碎屑颗粒、泥质和炭屑组成。碎屑颗粒一般大于 70%,呈极细砂和粉砂均匀分布泥质内,成分主要为石英、少量长石颗粒,多呈棱角状-次圆状充填于泥质中,粒径在 0.03 mm~0.05 mm 左右;泥质约占 25%,不均匀分布,可见泥质向绢云母转化现象;炭屑占 10%左右,呈条带状、凝块状不均匀分布,如图 3(f)。

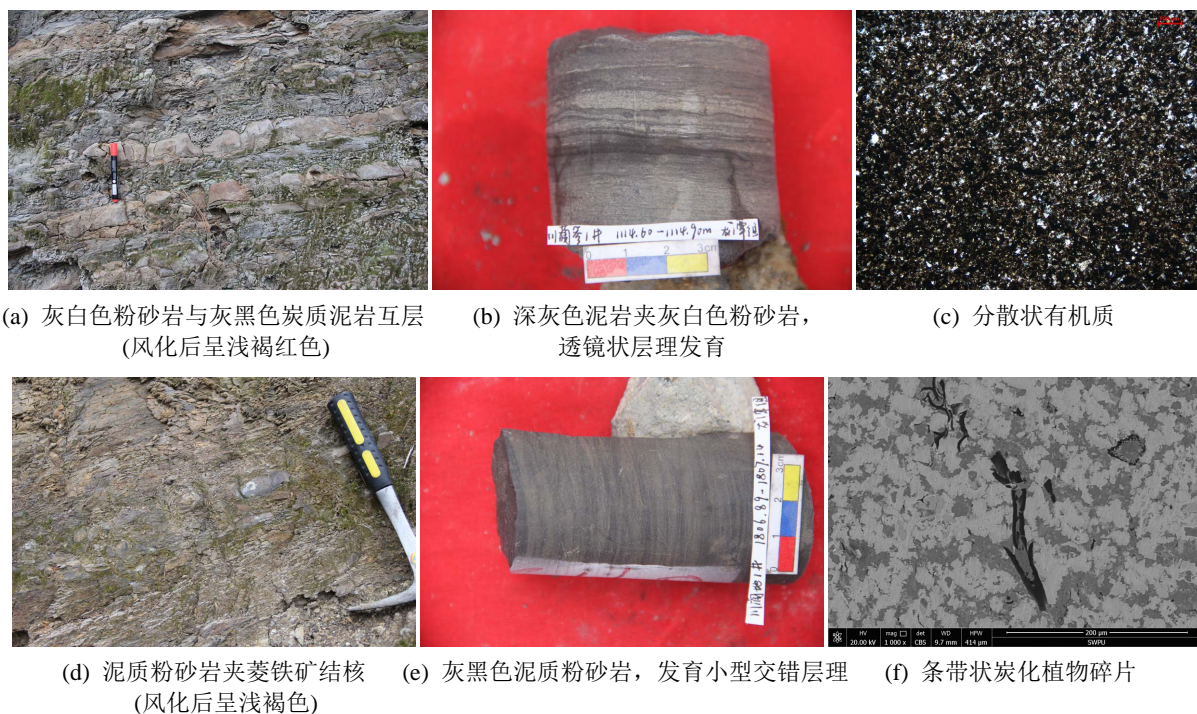
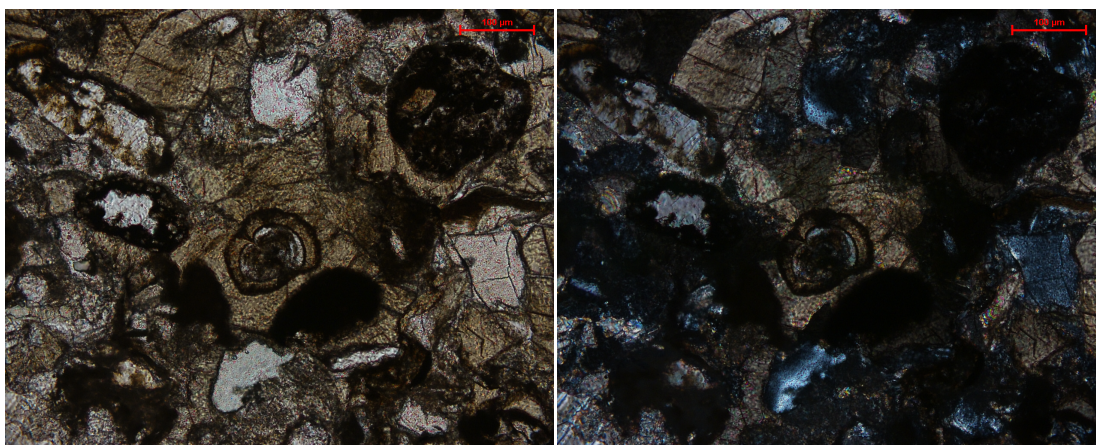


Figure 3. Characteristics of siltstone-like rocks of Longtan Formation in southern Sichuan
图 3. 川南地区龙潭组粉砂岩类岩石特征

3.4. 菱铁岩类

菱铁矿是煤系地层中比较常见的自生碳酸盐矿物。一般研究认为,菱铁矿的成因与成岩期的弱碱性-碱性、还原环境有关[15]。菱铁矿在煤系地层中一般有三种产出形式:胶结物、晶粒状、结核状。龙潭组地层中存在相当量的菱铁矿,除了以胶结物形式出现在砂岩中外,还可经由强烈的重结晶作用形成菱铁岩。呈薄层状富集于煤系地层中。

这一类岩石镜下主要由菱铁矿组成(含量一般>60%),整体呈黄褐色,多呈粒状,粒径在 0.05 mm~0.15 mm 之间,普遍具有波状消光特征,少量菱铁矿呈放射“花朵状”,部分矿物中见有黄褐色铁质氧化物析出环绕颗粒形成“铁环”,如图 4(a)和图 4(b)。此外还可见少量颗粒碎屑(一般少于 15%),颗粒主要是石英,且以燧石为主,少量单晶石英碎屑,粒径主要在 0.1 mm~0.25 mm 之间;还有少量泥质岩屑、凝灰质等零散分布于岩石中。见少量自生的硅质,主要是微晶粒状石英,分布在菱铁矿之间,矿物最大可达 0.1 mm。少量黄铁矿,呈细小黑色粒状、集合体状。有机质偶见,多呈团块状分散分布。



(a) 晶粒状、花朵状菱铁矿,单偏光

(b) 晶粒状、花朵状菱铁矿,正交偏光

Figure 4. Microscopic characteristics of siderite-like rocks of Longtan Formation in southern Sichuan

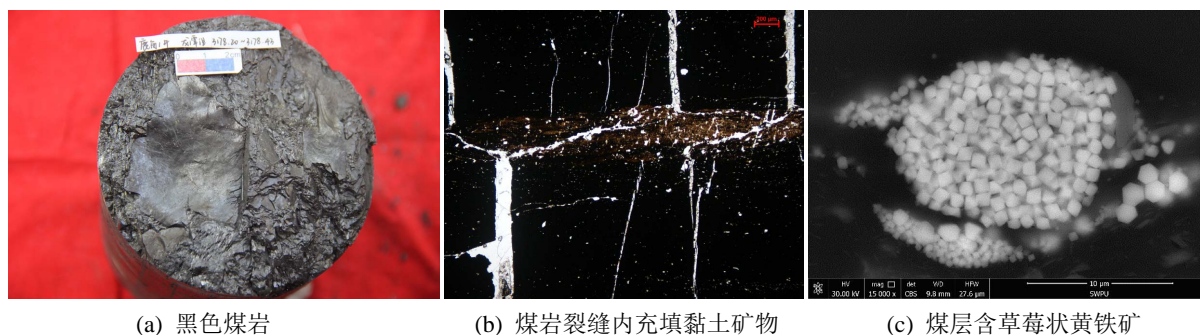
图 4. 川南地区龙潭组菱铁岩类岩石微观特征

3.5. 煤岩类

根据煤的形成作用、形成环境,可将煤分成腐殖煤类和腐泥煤类。前人研究认为,四川盆地海陆过渡相龙潭组煤系地层页岩母质来源为陆源输入,镜质体含量较高,有机质类型属腐殖型,为腐殖煤类[14]。

野外剖面上,龙潭组煤岩颜色多为纯黑色,似金属-金刚光泽,宏观煤岩类型总体上均是以半暗煤和半亮型为主,暗淡煤、光亮型煤次之;黑色中到厚层状,岩性疏松,常呈条带状及线理状结构,层状和块状构造,具参差状或阶梯状断口,如图 5(a)。岩心质轻,疏松多孔,可见裂缝一般被粘土矿物或石英充填,如图 5(b)。

煤在镜下呈均一结构,主要由炭质(约 95%)和少量粘土矿物(一般<3%)、石英颗粒(一般<3%)组成,局部可见大量植物碎片。炭质为非晶质黑色,呈片状为主。粘土矿物呈隐晶质/显微纤维状,多分布于炭质边缘。石英颗粒多充填粘土矿物和炭质之间。星点状或草莓状黄铁矿较为常见,分布不均,粒径 0.01 mm~0.2 mm。岩石中可见大量显微裂隙,宽为 0.01 mm~4 mm,被方解石、硅质和粘土等矿物半充填,如图 5(b)。



(a) 黑色煤岩

(b) 煤岩裂缝内充填黏土矿物

(c) 煤层含草莓状黄铁矿

Figure 5. The characteristics of coal rocks in the Longtan Formation in southern Sichuan

图 5. 川南地区龙潭组煤岩类岩石特征

4. 岩性与油气富集的关系

油气的富集离不开沉积环境的控制，而对沉积环境最直观的反应就是岩石类型。四川盆地南部地区龙潭组为一套陆相河泛平原沉积，总体为一套泥岩夹煤岩的煤系地层[14]。通过干酪根显微组分研究得出：川南地区龙潭组粉砂岩、泥岩、炭质泥岩有机质显微组分中壳质组含量最高，主要为腐殖无定形体；其次为镜质组，主要为正常镜质体；惰质组含量最少，主要为丝质体；未检测出腐泥组。通过类型指数(TI值)综合判断其有机质类型主要为II₂~III型，几种岩性的干酪根显微组分差异较小，表明其干酪根主要来源都是高等植物的壳质组分，都具有一定的生油气潜力，因此其中有机质的富集程度就决定了优势岩性的种类。

总有机碳(TOC)的值反映了岩石中有机质的富集程度。通过对研究区两口勘探井的取芯样品的有机碳含量进行测试，并按照岩石类型进行分类分析，可以得出：川南地区龙潭组烃源岩 TOC 含量介于 0.20%~81.38%，平均值为 12.12%。其中，粉砂质泥岩 TOC 含量介于 0.47%~3.59%，平均值为 1.90%；泥岩 TOC 含量介于 0.20%~27.54%，平均值为 3.89%；炭质泥岩 TOC 含量介于 3.46%~34.16%，平均值为 12.71%；龙潭组煤岩 TOC 含量介于 10.57%~81.38%，平均值为 48.31% (图 6)。

总的来看，川南地区龙潭组烃源岩主要来自于高等植物，煤层的 TOC 含量最高，主要分布于 40%~80%，其中蕴含大量的煤层气已被证实有一定的商业开发价值；炭质泥岩次之，其 TOC 主要分布于 10%~30%之间，应该作为川南地区龙潭组页岩气勘探开发的主要岩类。

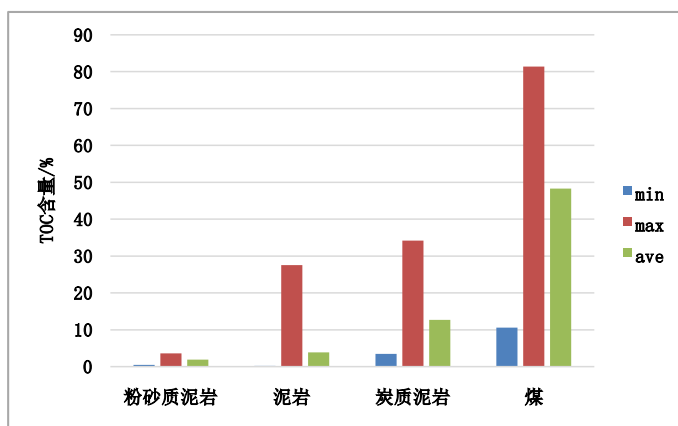


Figure 6. The TOC content distribution map of different rock types in the Longtan Formation in the southern Sichuan Basin

图 6. 川南地区龙潭组不同岩石类型 TOC 含量分布图

5. 结论

1) 川南地区上二叠统龙潭组岩石类型复杂, 主要涉及泥页岩、砂岩(粉砂岩)、煤层等类型。依据其颜色、粒径大小、成分和古生物特征等可进一步细分为 9 种岩性。

2) 研究区内暗色泥页岩可划分出三种岩性: 炭质泥岩、铝土质泥岩、粉砂质泥岩。其中, 铝土质泥岩分布于龙潭组底部与茅口组分界线处; 炭质泥岩广泛分布于龙潭组中下部, 且常与粉砂质泥岩或煤层互层。

3) 川南地区龙潭组的砂岩类型以细砂岩为主, 粉砂岩次之。碎屑成分中含有大量的火山凝灰物质。菱铁矿胶结普遍发育, 严重时使得原岩结构完全消失而成菱铁岩。

4) 通过分析对比不同岩石类型的 TOC 含量, 得出川南地区龙潭组页岩气最有利岩石类型为炭质泥岩。

参考文献

- [1] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
- [2] 王玉满, 董大忠, 李新景, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.
- [3] 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 337-343.
- [4] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
- [5] 罗厚勇, 刘文汇, 王晓锋, 等. 四川盆地海相页岩气藏 TSR 证据的发现[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 434-435.
- [6] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [7] 张慧芳, 吴欣松, 王斌, 等. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 463-477.
- [8] 赵培荣, 高波, 郭战峰, 等. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 335-344.
- [9] 陈代钊, 汪建国, 严德天, 等. 扬子地区古生代主要烃源岩有机质富集的环境动力学机制与差异[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 5-26.
- [10] 郭旭升, 胡东风, 刘若冰, 等. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018, 30(10): 11-18.
- [11] 张吉振, 李贤庆, 王元, 等. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征——以四川盆地南部龙潭组为例[J]. 煤炭学报, 2015(8):1871-1878.
- [12] 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 481-487.
- [13] 陈宗清. 论四川盆地二叠系乐平统龙潭组页岩气勘探[J]. 天然气技术与经济, 2011, 5(2): 21-26, 78.
- [14] 尹中山, 蒋琦, 熊建龙, 等. 川南煤田龙潭组煤系泥页岩气与煤层气组合模式及合采前景分析[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(5): 30-35.
- [15] 徐宏杰, 桑树勋, 杨景芬, 等. 黔北龙潭组菱铁质泥岩解吸气来源及元素背景[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1817-1826.