

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.182



湘中邵阳凹陷二叠系龙潭组页岩含气性特征与气体成因

张国涛, 陈孝红, 张保民, 李海, 陈林

中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 434023

摘要:针对湘中地区邵阳凹陷二叠系龙潭组页岩气资源评价,部署了页岩气调查井2015H-D3井,通过现场解析气等相关样品测试定量分析了页岩含气性特征及其影响因素,并借助气体稳定碳、氢同位素对气体成因进行了初步探讨。结果显示:钻深从150 m处开始出现气显,随深度增加,解析气含量呈现先逐渐增大后减小的趋势,300~425 m为最高含气层段,累计厚度达125 m,现场解析气含量全部大于0.5 m³/t,最高为2.35 m³/t,平均1 m³/t,证实龙潭组具良好页岩气资源潜力。当埋深大于300 m时,解析气含量受有机碳含量控制,而埋深小于300 m时,解析气含量并不简单受控于有机碳含量,而是受到保存条件的严重制约。气体碳、氢同位素测试显示 $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于-29.87‰~-36.82‰,平均为-34.52‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 介于-29.45‰~-31.02‰,平均为-30.09‰, δD_1 介于-131.20‰~-178.40‰,平均为-167.40‰。气体成因分析揭示龙潭组页岩气属热成因中的油型气类型。基于沉积现象判断龙潭组为海陆过渡相环境,与氢同位素判断结果基本吻合,但目前还无法确定具体判定区间。

关键词:湘中地区;龙潭组;海陆过渡相;页岩气含气性;碳、氢同位素。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)02-0000-12

收稿日期: 2018-12-14

Gas-Bearing Characteristics and Origin Analysis of Shale Gas in Longtan Formation, Permian, Shaoyang Sag, Central Hunan

Zhang Guotao, Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Li Hai, Chen Lin

Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: In order to evaluate shale gas resources potential in the Permian Longtan Formation, Shaoyang sag, Central Hunan, a shale gas survey well-2015H-D3 was done in this study. The gas-bearing properties and its influencing factors were quantitatively analyzed by the well on-site desorption with other related tests, combined with gas stable carbon and hydrogen isotopes, preliminary discussion on the origin of hydrocarbon gas is made. The gas logging values become abnormal from the depth of 150 m, and the gas content of desorption firstly increases gradually and then decreases with the increase of depth. 300-425 m is the highest gas-bearing zone, with a cumulative thickness of 125 m. The gas content of desorption is all over 0.5 m³/t, the highest value is 2.35 m³/t, with an average value of 1 m³/t, indicating that the Longtan Formation has a good potential for shale gas exploration. The gas content of desorption is controlled by organic carbon content while the depth is more than 300 m, and the desorption gas content is not simply constrained by organic carbon content but rather restricted by the preservation conditions while the buried depth is less than 300 m. The gas carbon isotope test shows that $\delta^{13}\text{C}_1$ is between -29.87‰ and -36.82‰ with the average value of -34.52‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ is between -29.45‰ and -31.02‰ with the average value of -30.09‰, and δD_1 is between -131.2‰ and -178.4‰ with the average value of -167.4‰. The gas origin analysis reveals that the shale gas in Longtan Formation belongs to the type of oil source gas in thermal genesis. It can be determined that the Longtan Formation is the transitional environment through sedimentary phenomena, which is consistent with the results of hydrogen isotope, but

基金项目:中国地质调查局基础地质调查项目(No.12120115005601);中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目(No.DD20160194)。

作者简介:张国涛(1985-),男,工程师,主要从事岩石地层学、页岩气资源评价等方面的研究。ORCID: 0000-0003-2157-8138。E-mail: kpasino@163.com

引用格式:张国涛,陈孝红,张保民,李海,等,2019.湘中邵阳凹陷二叠系龙潭组页岩含气性特征与气体成因.地球科学,44(2):xxx-xxx.

it is still unable to determine the specific judgment interval.

Key words: Central Hunan depression; Longtan Formation; transitional facies; gas-bearing property of shale gas; carbon and hydrogen isotopes.

近几年我国一直致力于海相页岩气勘探,取得了一系列重要进展或突破(王志刚,2015;董大忠等,2016;邹才能等,2016;翟刚毅等,2017),在四川盆地发现涪陵焦石坝页岩气田(郭彤楼和刘若冰,2013),建成长宁—威远国家级页岩气示范区,在黄陵背斜东南翼及黔北地区下寒武统获得新区新层系页岩气发现,但是对于陆相及海陆过渡相的页岩气勘探工作投入不足.从最近几年的页岩气勘探实例来看,海陆过渡相地层亦具有不错的页岩气资源潜力(郭少斌等,2015;闫德宇等,2016),目前我国海陆过渡相页岩气勘探主要集中于西北地区的沁水盆地、鄂尔多斯盆地、南华北盆地、四川盆地西南部以及湘中地区(张吉振等,2015;包书景等,2016;唐玄等,2016;魏晓亮等,2016).中石化华东石油局于2011年在湘中地区涟源凹陷内部署实施了湘页1井,获得二叠系大隆—龙潭组页岩气发现,揭开了湘中地区页岩气调查评价与勘探的序幕,随后有学者针对湘中地区的海陆过渡相页岩气调查评价做了部分研究,但

是多集中于页岩气的基础地质方面(顾志翔等,2015;李国亮等,2015),缺少单井页岩气资源评价所必须的含气量等关键参数.针对这一现状,武汉地质调查中心在湘中地区邵阳凹陷部署实施页岩气调查井2015H-D3井,本文系统研究了该井二叠系龙潭组页岩气含气性、有机地球化学特征及储集物性,分析了含气量的影响因素,并且利用气体稳定碳、氢同位素探讨了气体成因类型与页岩沉积环境,旨在评价该地区海陆过渡相页岩气资源潜力,促进周边油气区块页岩气勘探工作.

1 地质背景

湘中坳陷大地构造位置上位于扬子地台与华南褶皱带相邻地带的华南褶皱带一侧,即雪峰隆起由北东向转为北东东向的弧形构造带的凹侧(何红生,2009),邵阳凹陷位于湘中坳陷中部,北接龙山凸起,南临关帝庙凸起,东西缘分别受限于衡山隆起带与

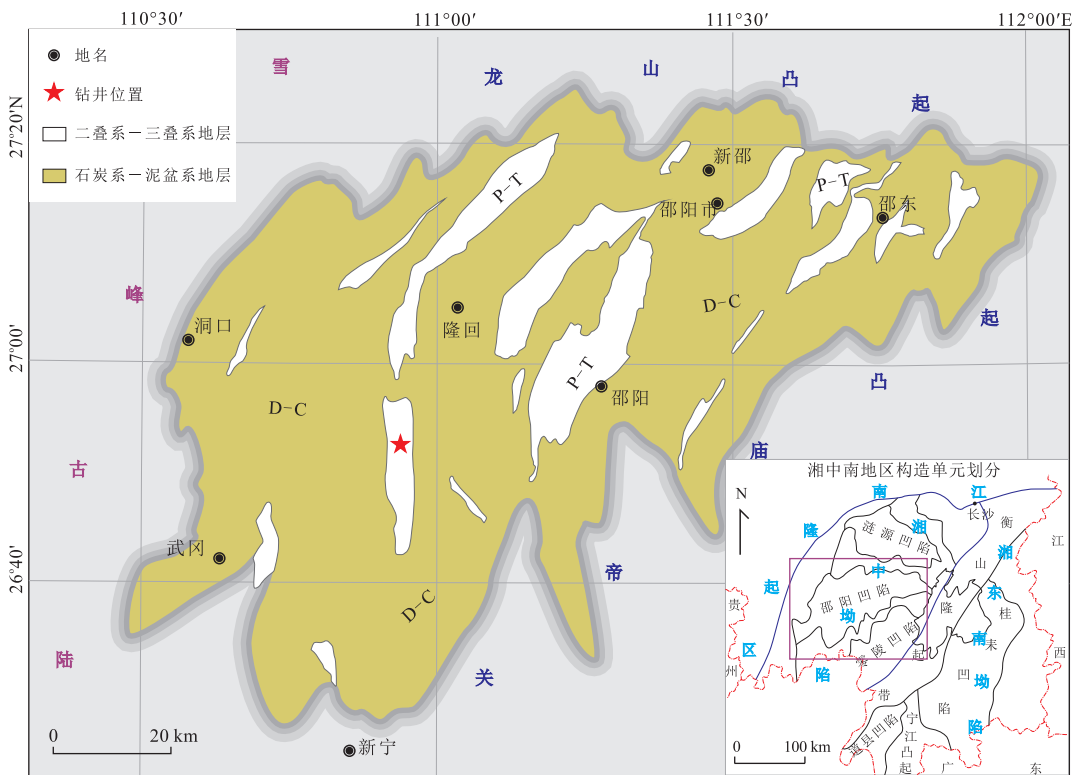


图 1 湘中邵阳凹陷地层分布及钻井位置

Fig.1 Stratigraphic distribution and drilling location map of Shaoyang sag in Central Hunan

江南—雪峰山隆起带(图1),整体呈北东向展布,面积达11 000 km²,地表主要出露中泥盆统一下三叠统地层,区内主要构造线是由一个贯通南北向西突出的弧形褶皱带,构成“祁阳弧”构造的主体,该弧形褶皱带的东西两侧,可进一步划分为西部断褶带、中部褶皱带、东部断块带。

受东吴运动深刻影响,邵阳凹陷内二叠系龙潭组经历了两次完整海侵海退的过程,发育两个三级层序。茅口期末发生的东吴运动造成湘西北古陆持续抬升(王成善等,1999;杨玉卿和冯增昭,2000),海水逐渐退出湘中地区,海平面进一步下降,主要发育三角洲沉积、潮坪沉积;晚期东吴运动减弱,海侵规模又开始逐渐增大,海岸体系向西北方向迁移,早期形成的三角洲沉积受到潮汐改造,发育为障壁岛—泻湖—潮坪沉积体系。根据沉积层序充填过程,可以把龙潭组根据岩性分为上下段,下段为不含煤段,由灰色、灰褐色、灰绿色细粒石英砂岩、长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质页岩、页岩等组成。上段则为含煤层段,主要由炭质页岩、中细粒石英砂岩夹少量粉砂岩及1~3煤层组成,煤层分布不稳定,见丰富的植物化石与顺层分布的菱铁矿层。

2 采样与实验方法

为定量分析单井含气量变化特征,从150 m开始至717 m共采集了56个解析气样品。现场解析气检测采用两种不同的方法:(1)钻深300 m以内,采用廊坊市爱帝工业控制技术有限公司生产的AD-LJ-800-3型现场解析仪通过排水法测试气体含量,然后分析气体组分检测可燃烃比例;(2)钻深300 m以下则用海城石油工业仪器厂生产的YSQ-III岩石解吸气测定仪来检测页岩含气量,其检测原理为燃烧法,通过将岩心密封于解析罐,利用解析炉电加热至设定的地底温度,使解析气体被载气携带出来进入FID检测器,同时由氢气提供燃气,空气提供助燃气,燃烧解析出来的有机气体,分时燃烧信号转换成电压信号由检测器接受,并输入计算机测算结果。由于该检测器仅对有机气体响应,因此YSQ-III型岩石解吸气仪测定的是有机气体含量,排除了其他气体对于分析结果的影响。为了协调匹配两种检测方法,在测算排水法的解析气含量时,通过气体组分中可燃烃的比例换算出有机气体的含量。

气体碳、氢同位素样品全部取自岩心解析气,共计26个气体样品。气体组成显示,样品检测没有发

现丙烷,测定采用气相色谱仪GC IsoLink和气体质谱仪MAT253联机分析完成:(1)单体碳同位素分析:用气密针将页岩气注入GC,由He载气携带经CP-PoraPLOT Q色谱柱依次分离出各单体组分,并在GC高温氧化炉(1 000 °C)内分别氧化成CO₂,再导入气体质谱仪MAT253测定各单体的碳同位素组成;(2)单体氢同位素分析:用气密针将页岩气注入GC,由He载气携带经CP-Pora PLOT Q色谱柱依次分离出各单体组分,在高温裂解炉(1 420 °C)分别还原成H₂后,再导入气体质谱仪MAT253测定各单体的氢同位素组成。

碳、氢同位素比值分析结果分别以相对V-PDB和V-SMOW的值给出,分析过程采用国家标准GBW04478和重复样(数量为样品总数的30%)进行质量监控。其中甲烷、乙烷的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 测定平均值分别为 $-34.22 \pm 0.18\%$ 、 $-24.65 \pm 0.14\%$,甲烷、乙烷的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 测定平均值分别为 $-185.0 \pm 0.2\%$ 、 $-156.7 \pm 1.1\%$,与其推荐值(GBW04478的甲烷、乙烷的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值分别为 $-34.18 \pm 0.1\%$ 、 $-24.66 \pm 0.11\%$,甲烷、乙烷的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值分别为 $-185.1 \pm 1.2\%$ 、 $-156.3 \pm 1.8\%$)在误差范围内一致,且重复样测定结果在误差范围内亦完全一致,表明样品的测定结果可信可靠。

3 含气性特征及控制因素浅析

部署于邓家铺向斜的2015H-D3井钻遇二叠系龙潭组厚度超过540 m,岩性主要为暗色泥页岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,顺层发育大量1~5 cm厚的菱铁矿层,见丰富的植物化石碎片(图2),通过沉积现象可以判断邵阳凹陷龙潭组沉积期为三角洲—泻湖相环境。

钻深150 m处,气测录井开始出现异常,其后气测录井值随深度增加而逐渐增大,至370 m左右达到最高峰,总烃含量接近40%,甲烷含量达到20%以上,收集气体点火后燃烧火焰为纯蓝色,随后气测异常开始呈减小的趋势,但是总烃含量仍然维持在2%~10%。气测录井作为半定量的指标可以有效反映气体显示的宏观趋势,解析气测试结果与气测录井值大体同步,300~450 m为主要含气层段(图3),解析气含量普遍大于0.5 m³/t,最高为2.35 m³/t,平均1 m³/t。含气量是页岩气资源潜力评价的一项关键指标,直接决定了页岩气富集区是否具备经济开发的價值(邹才能等,2010;张晓明等,2017),参照北

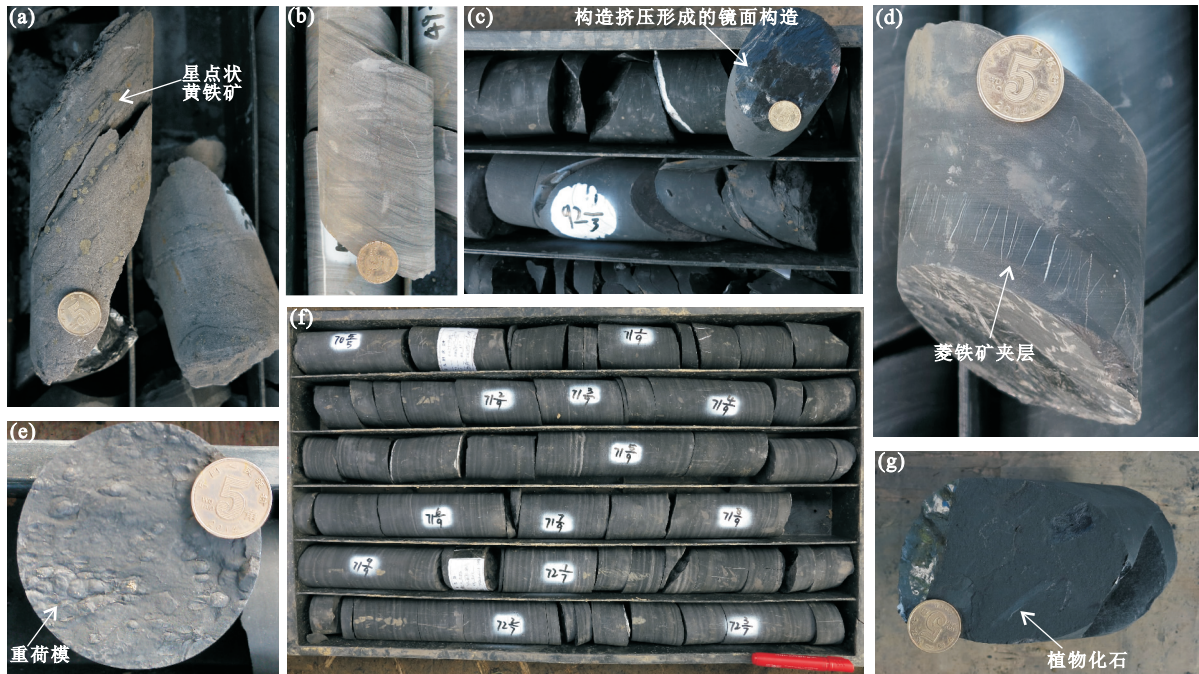


图 2 龙潭组典型岩心照片

Fig.2 Typical core photos of Longtan Formation

a. 上段细砂岩, 顺层分布大量星点状黄铁矿; b. 粉砂岩中的小型槽状交错层理; c. 暗色泥岩, 可见构造挤压形成的镜面构造; d. 泥岩中广泛分布的厚度不等的菱铁矿层, 发育丰富的纵向石英脉; e. 泥质粉砂岩底面重荷模; f. 含粉砂页岩与暗色页岩频繁互层, 水平韵律层发育; g. 暗色泥岩, 见零星植物化石碎片

美页岩气成功开发的经验与评价标准(杨振恒等, 2013), 邓家铺向斜龙潭组地层仅解析气含量已达到工业开发标准, 具备良好的页岩气资源潜力。

为揭示龙潭组含气量的控制因素, 笔者系统研究了页岩样品的有机碳含量、成熟度、等温吸附、孔隙条件及矿物组分特征, 分析它们与现场解析气含量之间的关系。龙潭组页岩有机质类型主要为 II₁ 型, 其次为 II₂ 型, 含气层段有机碳含量介于 0.49%~8.94%, 大于 2% 的样品占 50%, 平均含量为 2.2%。测试结果显示, 纵向有机碳含量与解析气含量之间随深度变化呈现明显不同的相关性。埋深浅于 300 m 时两者并无明显相关性, 而当埋深大于 300 m 时, 两者之间却呈现较好的相关性 ($R^2 = 0.6175$) (图 4)。页岩气调查井 2015H-D3 井东部 1 km 处存在一小型逆断层, 但是气测录井值与现场解析气含量并没有受到影响, 显然断层并没有对页岩气藏产生破坏, 逆断层的挤压特性反而对页岩气的保存起到了正向积极的作用。如果排除断层的破坏作用, 有机碳含量与解析气含量之间呈现不同相关性的现象, 极可能是埋深的差异造成的。埋深太浅时, 表层封盖性太差, 致使页岩气逸散, 随着埋深增大到一定程度, 上覆龙潭组巨厚的页岩起到了良好

的自我封盖作用。

等温吸附实验测得含气量介于 1.25~2.99 m³/t, 平均为 1.96 m³/t, 与有机碳含量及现场解析气含量相关性高 ($R^2 = 0.4748$) (图 4), 暗示现场解析气含量中吸附气含量占比可能较大。

镜质体反射率介于 2.40%~2.73%, 平均为 2.56%, 邵阳凹陷内大量的露头样品测试结果也显示其成熟度较为稳定, 镜质体反射率一般分布在 2.33%~2.67%, 与本井所测值极为接近, 热演化程度都比较高, 已进入过成熟早期阶段。调查井页岩成熟度随深度变化没有明显变化, 与解析气含量之间也没有相关性, 表明单井解析气含量不受成熟度控制, 鉴于野外样品测试结果, 有理由认为区域内解析气含量同样也不受成熟度控制。

孔隙度介于 0.67%~14.74%, 平均为 4.34%, 渗透率全部低于 0.045 mD, 大部分样品低于 0.0065 mD, 为典型的低孔低渗页岩。页岩孔隙度与解析气含量之间没有明显相关性(图 5)。川东南地区是全国页岩气勘探主战场, 该区域的页岩气探井基本证明孔隙度与含气量具有很好的相关性(张汉荣, 2016)。魏志红和魏祥峰(2014)对川东地区志留系页岩研究发现, 90% 的孔隙源自有机质孔与黏土矿物

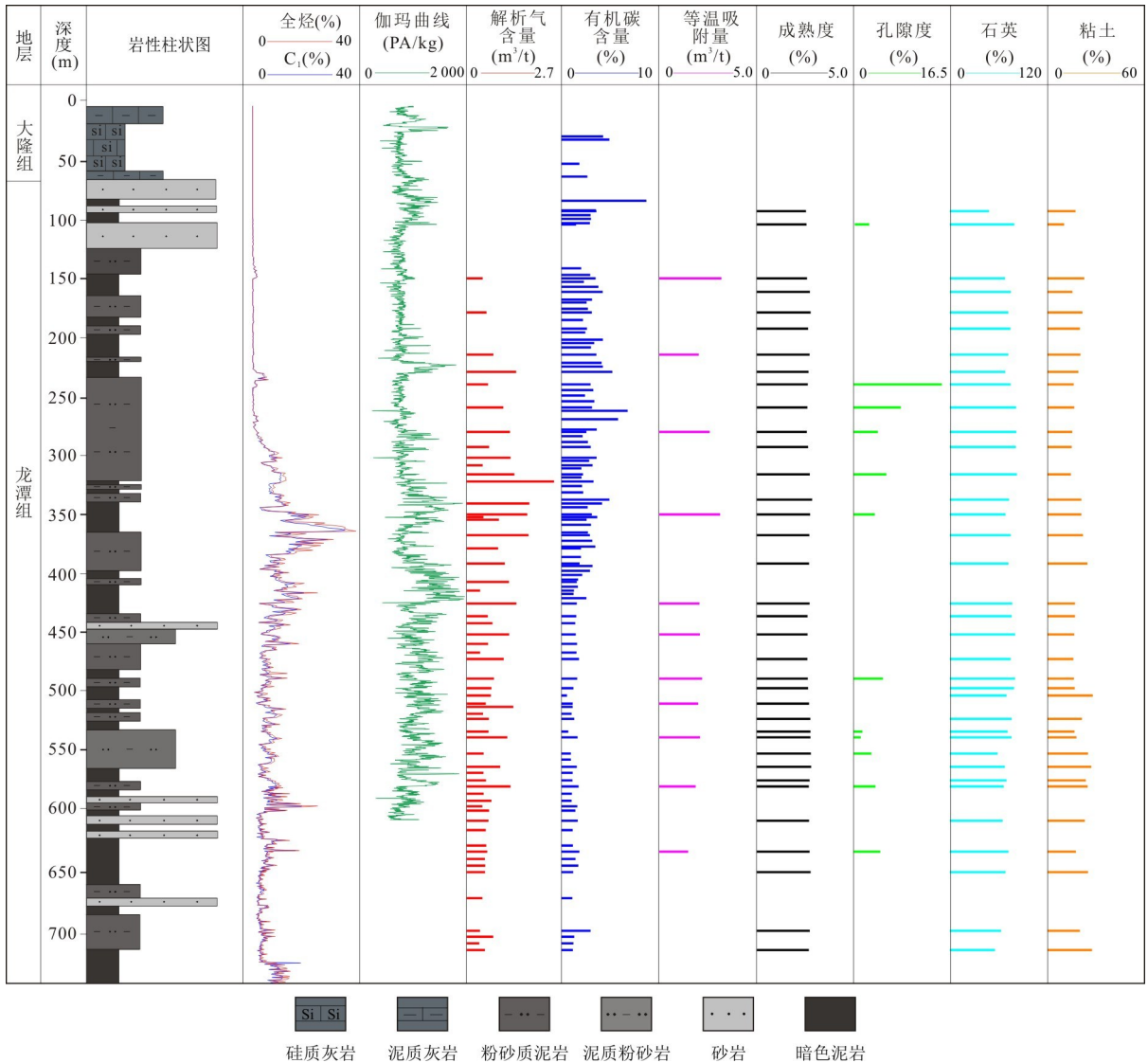


图 3 页岩气调查井 2015H-D3 井龙潭组综合柱状图

Fig.3 Comprehensive histogram of Longtan Formation in 2015H-D3 well

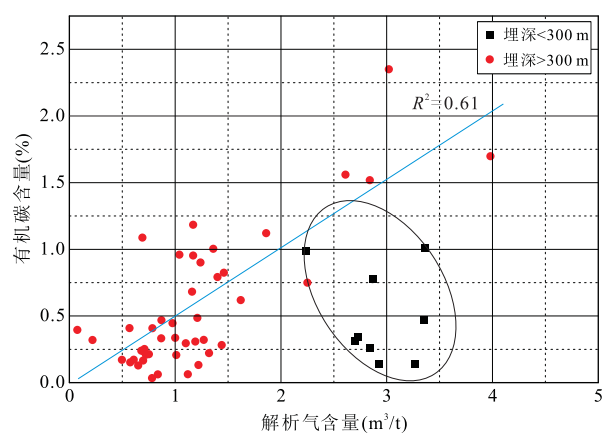


图 4 解析气含量与有机碳含量相关性

Fig.4 Correlation analysis of gas content and organic carbon content

间孔,有机质孔为页岩气吸附提供最重要的储集空间,而黏土矿物间孔隙由于具亲水性,导致含气性差,据此可以认为川东南地区孔隙度与含气量之间,之所以具较好的相关性是因为有机质孔占据了孔隙组成的绝大部分.然而,邓家铺向斜龙潭组孔隙度与解析气含量之间并无明显相关性,表明孔隙中有相当一部分含气性差的黏土矿物间孔与有机质孔并存,部分孔隙为无效孔或含气性差的孔,从而造成解析气含量与孔隙度之间无明显相关性.

通过上述分析,可以确定区域内龙潭组页岩解析气含量主要受控于有机碳含量,与矿物含量及组分、成熟度、孔隙度及渗透率等关系不大.

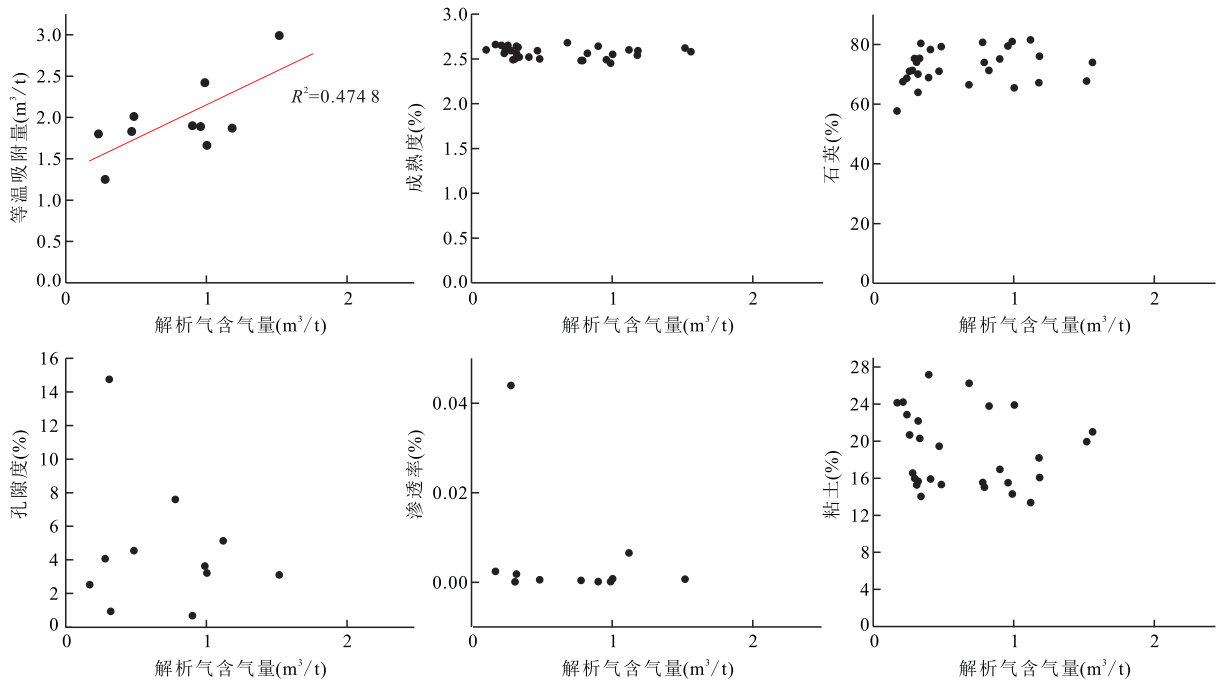


图 5 解析气含量与页岩有机地化指标、矿物组成及孔渗条件的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between gas content of on-site desorption and organic geochemical indexes, mineral composition and porosity and permeability of shale

4 气体成因探讨

4.1 天然气地球化学特征

二叠系龙潭组气体组分中甲烷占绝对主体,乙烷占比极低,基本检测不到丙烷及以上烷烃气,为典型的干气.天然气碳同位素测试结果显示, $\delta^{13}C_1$ 介于 $-29.87\text{‰} \sim -36.82\text{‰}$,平均为 -34.52‰ , $\delta^{13}C_1$ 具明显的随深度增大逐渐减小的特征. $\delta^{13}C_2$ 介于 $-29.45\text{‰} \sim -31.02\text{‰}$,平均为 -30.09‰ ,不同深度的乙烷碳同位素并没有明显变化,数值比较集中.甲烷氢同位素 δD_1 介于 $-131.2\text{‰} \sim -178.4\text{‰}$,平均值为 -167.4‰ ,乙烷氢同位素 δD_2 为 $-137.8\text{‰} \sim -183.1\text{‰}$,平均为 -166.5‰ (表 1).甲烷同位素随深度增加反而变轻的原因,推测可能是龙潭组向上水体逐渐变浅,陆源有机物质供应占比增多,从而造成甲烷同位素相应地变重.此外,甲烷同位素的这种分布特征也可以证明龙潭组天然气的属性,假设天然气来源于下部烃源岩供给,那么按照气体同位素分馏原理,气体同位素向上运移的越远,气体同位素应该越轻,然而龙潭组甲烷碳同位素分布规律恰好相反,因此排除了异地运移的可能,龙潭组天然气应为原地自生自储的页岩气.

4.2 氢同位素与沉积环境

气体氢同位素运用不如碳同位素广泛,但是其

蕴含的特定信息,可以指示沉积环境(刘金萍等, 2007;于聪等,2013).Schoell(1980)对德国、意大利、埃及、美国等地区的气体氢同位素研究发现,陆相淡水环境生成的热成因甲烷氢同位素组成小于 -190‰ ,海相环境生成的甲烷同位素组成大于 -190‰ .王晓锋等(2005)指出塔里木盆地海相与陆相的判别界限为 -170‰ .于聪(2014)综合对比四川盆地、鄂尔多斯盆地及塔里木盆地的天然气氢同位素特征之后,认为四川盆地须家河地区海相成因天然气甲烷氢同位素基本高于 -160‰ ,而陆相成因 δD_1 值基本低于 -160‰ .廖芙蓉等(2014)分析四川盆地多个层位不同成因的氢同位素值,最终确定以 -150‰ 为界划分陆相与海相成因天然气.因此关于海相与陆相成因的氢同位素判别并没有统一的判别标准或者划分界限,不同地区不同层位都会存在差异,但是总体上可以认为海相成因天然气氢同位素值明显要高于陆相成因天然气.刘全有(2007)依据乙烷碳同位素值与氢同位素将塔里木油田的气体母质沉积环境划分为六类,其中IV类的海陆过渡相的碳氢同位素区间与邵阳地区龙潭组比较类似,只是与其不同的是,邵阳凹陷龙潭组甲烷氢同位素值介于 $-157.1\text{‰} \sim -178.4\text{‰}$,平均为 -169.4‰ ,并不是所有氢同位素值大于 -170‰ ,而是比较集中在

表1 龙潭组不同埋深页岩气碳氢同位素数据

Table 1 Hydrocarbon isotope data of shale gas in different depths in Longtan Formation

样品序号	取样深度(m)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (甲烷,‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (乙烷,‰)	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ (甲烷,‰)	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ (乙烷,‰)	备注
1	313.0	-33.80	-30.13	/	/	
2	352.0	-33.57	-29.68	/	/	
3	357.0	-33.35	-30.13	/	/	
4	358.0	-33.14	-30.07	/	/	
5	369.0	-33.60	-31.02	/	/	
6	371.0	-33.72	-30.66	/	/	
7	376.0	-33.75	-29.95	/	/	
8	391.0	-33.59	-29.58	-161.2	-156.7	
9	399.0	-29.87	/	-131.2	-137.8	
10	400.6	-33.10	-30.08	-162.4	-156.0	
11	403.0	-32.94	-29.45	-157.0	-157.6	
12	407.4	-34.14	-29.87	-162.2	-161.8	
13	409.6	-34.17	-29.79	-166.7	-167.2	
14	458.0	-35.01	-30.09	-173.4	-171.2	
15	460.6	-35.14	-29.56	-169.8	-158.6	
16	463.6	-35.17	-29.75	-171.1	-183.1	
17	466.6	-35.48	-30.44	-163.7	/	乙烷含量很低
18	469.6	-35.75	-30.82	-175.3	-168.6	
19	475.6	-35.77	-30.24	-174.3	-165.4	
20	481.6	-35.65	-30.43	-175.6	-175.9	
21	484.6	-35.72	-30.23	-171.0	-161.4	
22	487.6	-36.82	/	-164.2	/	有机气体很少
23	490.6	-36.23	-30.33	-178.3	-174.6	
24	495.6	-36.40	-29.80	-178.4	-170.0	
25	501.8	-35.49	-30.03	-177.9	-183.1	
26	507.0	-36.15	-30.05	-166.7	-181.8	

-170‰左右,钻井岩心证实龙潭组沉积期为三角洲—泻湖—障壁岛环境,这一结果与氢同位素判断结果具有相互验证作用。

烷烃气氢同位素主要受母质的沉积环境控制,但也与母质的热演化程度关系密切。不同类型的天然气甲烷氢同位素组成研究表明,天然气同位素组成随源岩热演化程度的增加,甲烷氢同位素会相对富集,导致甲烷氢同位素组成变重,氢同位素会比实际值偏大(Schoell,1980;杨春等,2009)。龙潭组页岩成熟度较为稳定,平均为2.56%,热演化程度高。实际上,甲烷的碳同位素与氢同位素确实具较高相关性(图6),表明氢同位素受到了热成熟度的影响,实际氢同位素值应该一定程度小于-169.4‰。因此,依据甲烷氢同位素判定沉积环境时,需要结合沉积相等资料,或者通过同地区已证实沉积环境的氢同位素值对比,形成具体的区域性判别标准。

4.3 气源类型判别

烷烃类气体碳蕴含丰富的科学信息,可以用于气体成因、运移过程、母质类型及成熟度等的判断(戴金星,2011;沈忠民等,2011)。通常烷烃气具有一

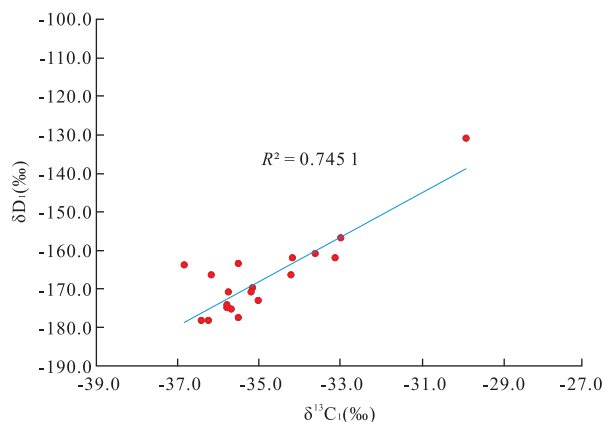


图6 甲烷碳同位素值与氢同位素相关性分析图

Fig.6 Correlation analysis between methane carbon isotope value and hydrogen isotope

定的碳同位素序列特征,有机烷烃气具有正碳同位素序列($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$),无机烷烃气具有反向序列($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$) (戴金星,1993),龙潭组烷烃气中没有检测到丙烷、丁烷等,但是仅存的烷烃组分具有 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ 的正序

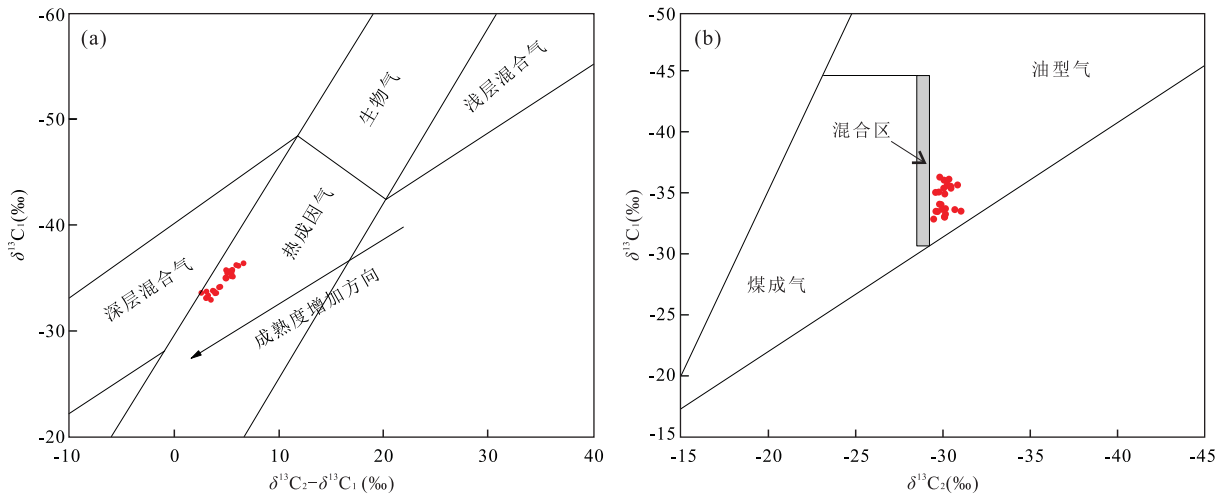


图 7 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_1$ 页岩气成因判别图(a)和 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ 页岩气成因判别图(b)

Fig.7 Shale gas genetic discrimination of $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_1$ (a) and shale gas genetic discrimination of $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ (b)

a.据张义纲(1991);b.据戴金星(1992)

特征.另外,甲烷碳同位素可以用于区分无机成因气与有机成因,有学者将甲烷碳同位素重于 -20% 划定为无机成因(沈平和徐永昌,1991),也有学者将 -25% 设定为界限(王连生等,2004),戴金星(1992)认为除了高成熟和过成熟的极少数煤型气甲烷外,凡甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C}_1$)大于 -30% 的是无机成因甲烷,绝大部分有机甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值小于 -30% ,并且无机成因甲烷一般产出在特定的构造背景条件下(杨玉峰,2000),如火山区、地热区或深大断裂、俯冲带、洋脊附近等,邵阳凹陷邓家铺向斜未曾有火山喷发事件,也未发现深大断裂等特定的构造特征,从2015H-D3井测温显示 $0\sim 610.00\text{ m}$ 井底温度值集中在 $26.6\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,未发现高温区,地温梯度为 $1.29\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$,为正常地温梯度,因此龙潭组不具备无机成因气的基本条件,实际测量的甲烷碳同位素也都小于 -30% ,因此可以确定龙潭组甲烷气体为有机成因气。

在天然气的成因研究中,一般将甲烷的碳同位素 -55% 作为生物气和热成因气的划分界限,龙潭组气体样品碳同位素值全部重于这一数值,指示二叠系龙潭组气体成因为热成因类型.张义纲(1991)建立了利用 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_1$ 的关系来判断天然气成因类型的图版(图7a),据此判别标准,龙潭组天然气成因也全部为热成因.尽管调查井的实际钻进过程中,从 150 m 的浅层处就开始出现气体显示,但是多种判断标准都一致表明龙潭组气体成因较为单一,全部为热成因气,并非推测的浅层生物气。

稳定碳同位素组成是判别天然气成因类型的有

效指标, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值受成熟度、母质性质及运移等的共同影响,而 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值则主要反映生烃母质的碳同位素继承效应(史洪亮等,2015;高波,2015),乙烷碳同位素具有较强的原始母质继承性,尽管也受源岩热演化程度的影响,但是受影响程度远小于甲烷碳同位素,因此乙烷碳同位素是区别煤成气与油型气最常用的指标(张士亚等,1988;廖凤蓉等,2013),煤型气的乙烷同位素明显重于油型气,刚文哲等(1997)提出 $\delta^{13}\text{C}_2 = -29\%$ 可以作为煤型气和油型气的划分界限,即腐殖型天然气 $\delta^{13}\text{C}_2 > -29\%$,腐泥型天然气 $\delta^{13}\text{C}_2 < -29\%$.戴金星(2005)提出利用乙烷和丙烷碳同位素来判断油型气和煤型气,其中油型气乙烷碳同位素值一般小于 -28.8% ,丙烷碳同位素值小于 -25.5% ;而煤型气乙烷碳同位素值一般大于 -25.1% ,丙烷碳同位素值小于 -23.2% .肖芝华(2008)认为腐泥型天然气碳同位素组成比腐殖型轻,腐泥型气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 的值一般小于 -30% ,而腐殖型气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 的值一般大于 -28% .依据前人提出的判别标准,这里采用 $\delta^{13}\text{C}_2 = -29\%$ 为划分煤成气与油型气的划分界限,龙潭组乙烷同位素值从 $-29.45\% \sim 31.02\%$,全部小于 -29% ,表明龙潭组气体成因类型为油型气.除了单独运用气体碳同位素判别外,通过交汇图等来判别气体成因与类型会使判断结果更为可靠,并可以获得更为丰富的成因信息.根据戴金星(1992)的 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$ 交汇判别图(图7b),也可以确定龙潭组页岩气并非煤成气成因,而是典型的油型气。

5 结论

(1)针对邵阳凹陷龙潭组部署的页岩气勘探井(2015H-D3井)获得良好的页岩气显示,现场解析气含量达到 $0.5\text{ m}^3/\text{t}$ 的含气层段厚达125 m,含气量最高为 $2.35\text{ m}^3/\text{t}$,平均可达 $1\text{ m}^3/\text{t}$,证实浅层海陆过渡相地层同样具有较好的页岩气资源潜力,应给予更多关注或者加大投入。

(2)钻深300 m以上解析气含量与有机碳含量、等温吸附气含量都具有较好的相关性,但是300 m以内并无明显相关性。保存条件是该地区页岩气富集的首要条件,埋深浅、封盖性欠佳是导致浅层含气性差的主要原因。在埋深足够的情况下页岩解析气含量主要受控于有机碳含量,基本不受其他如石英、黏土矿物、成熟度及孔渗条件的影响。

(3)气体碳同位素揭示龙潭组页岩气属热成因气中的油型气类型;氢同位素分析结果验证了龙潭组海陆过渡相的沉积环境,但由于缺乏区内其他海相或陆相氢同位素数据,所以无法确定该地区海相、陆相、海陆过渡相具体判断区间。

References

- Bao, S. J., Lin, T., Nie, H. K., et al., 2016. Preliminary Study of the Transitional Facies Shale Gas Reservoir Characteristics: Taking Permian in the Xiangzhong Depression as an Example. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 44–53 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., 1992. Identification of Various Genetic Natural Gases. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 4(1): 11–19 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., 1993. Hydrocarbon Isotope Features of Natural Gas and Their Identification. *Natural Gas Geoscience*, 4(2–3): 1–40 (in Chinese).
- Dai, J. X., 2011. Significance of the Study on Carbon Isotopes of Alkane Gases. *Natural Gas Industry*, 31(12): 1–6, 123 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Qin, S. F., Tao, S. Z., et al., 2005. Developing Trends of Natural Gas Industry and the Significant Progress on Natural Gas Geological Theories in China. *Natural Gas Geoscience*, 16(2): 127–142 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D. Z., Wang, Y. M., Li, X. J., et al., 2016. Breakthrough and Prospect of Shale Gas Exploration and Development in China. *Natural Gas Industry*, 36(1): 19–32 (in Chinese with English abstract).
- Gang, W. Z., Gao, G., Hao, S. S., et al., 1997. Carbon Isotope of Ethane Applied in the Analyses of Genetic Types of Natural Gas. *Experimental Petroleum Geology*, 19(2): 164–167 (in Chinese with English abstract).
- Gao, B., 2015. Geochemical Characteristics of Shale Gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and Its Geological Significance. *Natural Gas Geoscience*, 26(6): 1173–1182 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Z. X., Peng, Y. M., He, Y. B., et al., 2015. Geological Conditions of Permian Sea-Land Transitional Facies Shale Gas in the Xiangzhong Depression. *Geology in China*, 42(1): 288–299 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. B., Fu, J. J., Gao, D., et al., 2015. Research Status and Prospects for Marine-Continental Shale Gases in China. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(5): 535–540 (in Chinese with English abstract).
- Guo, T. L., Liu, R. B., 2013. Implications from Marine Shale Gas Exploration Breakthrough in Complicated Structural Area at High Thermal Stage: Taking Longmaxi Formation in Well JY1 as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 24(4): 643–651 (in Chinese with English abstract).
- He, H. S., 2009. Ceshui Formation Lithofacies Paleogeography and Coal Accumulation in Northern Section of Lianyuan-Shaoyang Coalfield, Central Hunan. *Coal Geology of China*, 21(3): 11–15 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. L., Wang, X. H., Bo, D. Y., et al., 2015. Potentiality Exploration of the Upper Permian Longtan Formation Shale Gas in Central and Southeastern Hunan Province. *Geological Science and Technology Information*, 34(3): 133–138 (in Chinese with English abstract).
- Liao, F. R., Wu, X. Q., Huang, S. P., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Gas-Source Correlation of Leikoupo Formation in Zhongba Field, Northwest Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(1): 108–115 (in Chinese with English abstract).
- Liao, F. R., Yu, C., Wu, W., et al., 2014. Stable Carbon and Hydrogen Isotopes of Natural Gas from the Zhongba Gasfield in the Sichuan Basin and Implication for Gas-Source Correlation. *Natural Gas Geoscience*, 25(1): 79–86 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. P., Geng, A. S., Xiong, Y. Q., et al., 2007. Application of Free C and H Isotopes in Normal Alkane to Correlation of Oil Sources in Huanghua Depression. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(1): 104–107 (in Chinese with English abstract).
- Schoell, M., 1980. The Hydrogen and Carbon Isotopic Composition of Methane from Natural Gases of Various Origins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(5): 649–661. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90155-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90155-6)
- Shen, P., Xu, Y. C., 1991. The Isotopic Composition of Natural

- Gases from Continental Sediments in China. *Geochimica*, (2): 144–152 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Z. M., Wang, P., Liu, S. B., et al., 2011. Carbon Isotopes of Xujiahe Formation Nature Gas in Middle Part of Western Sichuan Depression. *Natural Gas Geoscience*, 22(5): 834–839 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. L., Yang, K. M., Xiong, L., et al., 2015. The Unconventional Gas Characteristics and Origin of Continental Shale in Upper Triassic Xujiahe Formation the Fifth Member of Xinchang Area. *Science Technology and Engineering*, 15(21): 109–116 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X., Zhang, J. C., Ding, W. L., et al., 2016. The Reservoir Property of the Upper Paleozoic Marine-Continental Transitional Shale and Its Gas-Bearing Capacity in the Southeastern Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 147–157 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Li, X. H., Chen, H. D., et al., 1999. Permian Sea-Level Changes and Rising-Falling Events in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 536–541 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Guo, Z. Q., Ma, Z. H., et al., 2004. Geochemistry Characters of Inorganic Natural Gas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(4): 542–545 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. F., Liu, W. H., Xu, Y. C., et al., 2005. Natural Gas Carbon and Hydrogen Isotopic Compositions in Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 32(3): 55–58 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. G., 2015. Breakthrough of Fuling Shale Gas Exploration and Development and Its Inspiration. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X. L., Zhang, J. C., Dang, W., et al., 2016. Characteristics and Gas-Bearing Property of Transitional Shale in Well Mouye 1. *Science Technology and Engineering*, 16(26): 42–50 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. H., Wei, X. F., 2014. Comparison of Gas-Bearing Property between Different Pore Types of Shale: A Case from the Upper Ordovician Wufeng and Longmaxi Fms in the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(6): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Z. H., Xie, Z. Y., Li, Z. S., et al., 2008. Isotopic Characteristics of Natural Gas of Xujiahe Formation in Southern and Middle of Sichuan Basin. *Geochimica*, 37(3): 245–250 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. Y., Huang, W. H., Lu, X. X., et al., 2016. Contrast of Reservoir-Forming Conditions of Marine-Continental Transitional Shale Gas in Different Sedimentary Environments in the Lower Yangtze Area of China. *Journal of China Coal Society*, 41(7): 1778–1787 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C., Liu, Q. Y., Zhou, Q. H., et al., 2009. Genetic Identification of Natural Gases in Qingshen Gas Field, Songliao Basin. *Earth Science*, 34(5): 792–798 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. F., Zhang, Q., Huang, H. P., et al., 2000. Abiogenic Natural Gases and Their Accumulation Model in Xujiaweizi Area, Songliao Basin, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 523–533 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. Q., Feng, Z. Z., 2000. Permian Depositional Systems in South China. *Journal of Palaeogeography*, 2(1): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. H., Han, Z. Y., Li, Z. M., et al., 2013. Characteristics and Patterns of Shale Gas Accumulation in Typical North American Cratonic Basins and Their Enlightenments. *Oil & Gas Geology*, 34(4): 463–470 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Gong, D. Y., Huang, S. P., et al., 2014. Geochemical Characteristics of Carbon and Hydrogen Isotopes for the Xujiahe Formation Natural Gas in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(1): 87–97 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Huang, S. P., Gong, D. Y., et al., 2013. Partial Reversal Cause of Carbon and Hydrogen Isotope Compositions of Natural Gas: A Case Study in Sulige Gas Field, Ordos Basin. *Acta Petrolei. Sinica*, 34(Suppl. 1): 92–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Bao, S. J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057–1068 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. R., 2016. Gas Content of the Silurian Shale in the SE Sichuan Basin and Its Controlling Factors. *Natural Gas Industry*, 36(8): 36–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Z., Li, X. Q., Wang, Y., et al., 2015. Accumulation Conditions and Reservoir Characteristics of Marine-Terrigenous Facies Coal Measures Shale Gas from Longtan Formation in South Sichuan Basin. *Journal of China Coal Society*, 40(8): 1871–1878 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Y., Gao, J. J., Jiang, T. R., 1988. A New Method for Discrimination of Natural Gas Types Using Carbon Isotope of Methyl Ethane. Geological Publishing House, Beijing, 48–58 (in Chinese).
- Zhang, X. M., Shi, W. Z., Shu, Z. G., et al., 2017. Calculation Model of Shale Gas Content and Its Application in

- Fuling Area, *Earth Science*, 42(7): 1157—1168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., 1991. Formation, Accumulation and Preservation of Natural Gas. Hohai University Press, Nanjing, 51—61 (in Chinese).
- Zou, C. N., Dong, D. Z., Wang, S. J., et al., 2010. Geological Characteristics, Formation Mechanism and Resource Potential of Shale Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641—653 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Dong, D. Z., Wang, Y. M., et al., 2016. Shale Gas in China: Characteristics, Challenges and Prospects (II). *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 166—178 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包书景, 林拓, 聂海宽, 等, 2016. 海陆过渡相页岩气成藏特征初探: 以湘中坳陷二叠系为例. *地学前缘*, 23(1): 44—53.
- 戴金星, 1992. 各类天然气的成因鉴别. *中国海上油气(地质)*, 6(1): 11—19.
- 戴金星, 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别. *天然气地球科学*, 4(2—3): 1—40.
- 戴金星, 2011. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义. *天然气工业*, 31(12): 1—6, 123.
- 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等, 2005. 中国天然气工业发展趋势和天然气地学理论重要进展. *天然气地球科学*, 16(2): 127—142.
- 董大忠, 王玉满, 李新景, 等, 2016. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考. *天然气工业*, 36(1): 19—32.
- 刚文哲, 高岗, 郝石生, 等, 1997. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用. *石油实验地质*, 19(2): 164—167.
- 高波, 2015. 四川盆地龙马溪组页岩气地球化学特征及其地质意义. *天然气地球科学*, 26(6): 1173—1182.
- 顾志翔, 彭勇民, 何幼斌, 等, 2015. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件. *中国地质*, 42(1): 288—299.
- 郭少斌, 付娟娟, 高丹, 等, 2015. 中国海陆交互相页岩气研究现状与展望. *石油实验地质*, 37(5): 535—540.
- 郭彤楼, 刘若冰, 2013. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例. *天然气地球科学*, 24(4): 643—651.
- 何红生, 2009. 涟邵煤田北段测水煤系岩相古地理与聚煤作用. *中国煤炭地质*, 21(3): 11—15.
- 李国亮, 王先辉, 柏道远, 等, 2015. 湘中及湘东南地区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景. *地质科技情报*, 34(3): 133—138.
- 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏, 等, 2013. 川西北地区中坝气田雷口坡组天然气地球化学特征及气源探讨. *天然气地球科学*, 24(1): 108—115.
- 廖凤蓉, 于聪, 吴伟, 等, 2014. 四川盆地中坝气田天然气碳、氢同位素特征及气源探讨. *天然气地球科学*, 25(1): 79—86.
- 刘金萍, 耿安松, 熊永强, 等, 2007. 正构烷烃单体碳、氢同位素在油源对比中的应用. *新疆石油地质*, 28(1): 104—107.
- 刘全有, 戴金星, 李剑, 等, 2007. 塔里木盆地天然气氢同位素地球化学与对热成熟度和沉积环境的指示意义. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(12): 1599—1608.
- 沈平, 徐永昌, 1991. 中国陆相成因天然气同位素组成特征. *地球化学*, (2): 144—152.
- 沈忠民, 王鹏, 刘四兵, 等, 2011. 川西坳陷中段须家河组天然气碳同位素特征. *天然气地球科学*, 22(5): 834—839.
- 史洪亮, 杨克明, 熊亮, 等, 2015. 新场地区上三叠统须五段陆相页岩系非常规天然气特征与成因. *科学技术与工程*, 15(21): 109—116.
- 唐玄, 张金川, 丁文龙, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界海陆过渡相页岩储集性与含气性. *地学前缘*, 23(2): 147—157.
- 王成善, 李祥辉, 陈洪德, 等, 1999. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件. *沉积学报*, 17(4): 536—541.
- 王连生, 郭占谦, 马志红, 等, 2004. 无机成因天然气的地球化学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(4): 542—545.
- 王晓锋, 刘文汇, 徐永昌, 等, 2005. 塔里木盆地天然气碳、氢同位素地球化学特征. *石油勘探与开发*, 32(3): 55—58.
- 王志刚, 2015. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示. *石油与天然气地质*, 36(1): 1—6.
- 魏晓亮, 张金川, 党伟, 等, 2016. 牟页1井海陆过渡相页岩发育特征及其含气性. *科学技术与工程*, 16(26): 42—50.
- 魏志红, 魏祥峰, 2014. 页岩不同类型孔隙的含气性差异——以四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例. *天然气工业*, 34(6): 37—41.
- 肖芝华, 谢增业, 李志生, 等, 2008. 川中—川南地区须家河组天然气同位素组成特征. *地球化学*, 37(3): 245—250.
- 闫德宇, 黄文辉, 陆小霞, 等, 2016. 下扬子区海陆过渡相不同沉积环境页岩气成藏条件对比. *煤炭学报*, 41(7): 1778—1787.
- 杨春, 刘全有, 周庆华, 等, 2009. 松辽盆地庆深气田天然气成因类型鉴别. *地球科学*, 34(5): 792—798.
- 杨玉峰, 张秋, 黄海平, 等, 2000. 松辽盆地徐家围子断陷无机成因天然气及其成藏模式. *地学前缘*, 7(4): 523—533.
- 杨玉卿, 冯增昭, 2000. 中国南方二叠纪沉积体系. *古地理学报*, 2(1): 11—18.
- 杨振恒, 韩志艳, 李志明, 等, 2013. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示. *石油与天然气地质*, 34(4): 463—470.
- 于聪, 龚德瑜, 黄士鹏, 等, 2014. 四川盆地须家河组天然气

- 碳、氢同位素特征及其指示意义. 天然气地球科学, 25(1): 87-97.
- 于聪, 黄士鹏, 龚德瑜, 等, 2013. 天然气碳、氢同位素部分倒转成因——以苏里格气田为例. 石油学报, 34(S1): 92-101.
- 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 等, 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测. 地球科学, 42(7): 1057-1068.
- 张汉荣, 2016. 川东南地区志留系页岩含气量特征及其影响因素. 天然气工业, 36(8): 36-42.
- 张吉振, 李贤庆, 王元, 等, 2015. 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. 煤炭学报, 40(8): 1871-1878.
- 张士亚, 郜建军, 蒋泰然, 1988. 利用甲烷碳同位素判别天然气类型的一种新方法. 北京: 地质出版社, 48-58.
- 张晓明, 石万忠, 舒志国, 等, 2017. 涪陵地区页岩含气量计算模型及应用. 地球科学, 42(7): 1157-1168.
- 张义纲, 1991. 天然气的生成聚集和保存. 江苏: 河海大学出版社, 51-61.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 等, 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37(6): 641-653.
- 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等, 2016. 中国页岩气特征、挑战及前景(二). 石油勘探与开发, 43(2): 166-178.