

计算页岩气储层矿物成分含量的新方法: 黏土视骨架密度法

——以涪陵页岩气田为例

王燕, 冯明刚, 严伟, 魏祥峰, 刘帅

(中国石化勘探分公司勘探研究院)

摘要 常规测井计算方法难以满足页岩气田探明储量申报对储层矿物含量解释精度的要求。基于全岩 X 衍射和数字岩心构建实验对下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分的认识,建立了简化的岩石物理体积模型,把岩石骨架近似看作由硅质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物组成。引入“黏土视骨架密度”参数,建立了新的储层矿物含量计算公式。采用岩心全岩 X 衍射、岩心物性、有机碳含量数据,建立适合研究区的黏土视骨架密度法系列计算图版。基于常规测井数据计算出有机碳含量,通过图版可求得黏土视骨架密度,进一步可求得页岩中与简化模型相对应的三类矿物含量。与传统方法对比,“黏土视骨架密度法”解释精度相对较高,且费用低廉,易于在研究区推广。

关键词 涪陵气田; 页岩气储层; 矿物成分; 含量测定

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

页岩气储层矿物组分及含量的纵向变化是页岩气储层最重要的评价指标之一^[1-5],其中硅质、碳酸盐、黏土矿物的含量是影响后期储层射孔压裂改造的重要因素。对于矿物组分及含量的测井计算方法,目前较为有效的是利用元素俘获测井资料获得矿物组分的质量百分含量,但是该测井资料价格昂贵,不具有普适性;而应用常规测井资料的传统计算方法得到的矿物含量精度较差,仅能作为勘探初期定性—半定量评价,远远达不到储量申报时对储层矿物含量的解释精度要求。为此,本文以涪陵页岩气田焦石坝区块上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段的海相页岩气储层为对象,以 5 口系统取心井的 475 个全岩 X 衍射和黏土矿物分析资料以及 2 块岩心的数字岩心构建实验为基础,对页岩气储层矿物成分组成进行定性认识,建立了简化的岩石物理体积模型,新引入“黏土视骨架密度”这一概念,形成了以常规测井资料为基础的“黏土视骨架密度法”,并据此对页岩气储层矿物成分和含量开展定量评价。这一尝

试取得了较好的应用效果,为国内首个页岩气田探明储量的成功申报提供了技术支持,并有望为进一步寻找有利目标提供指导。

1 涪陵页岩气储层矿物组成

由涪陵页岩气田焦石坝区块 5 口系统取心井的上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段的 475 个全岩 X 衍射和黏土矿物分析资料(部分数据见表 1)可知,页岩气储层的主要矿物成分为石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土矿物。通常把黏土矿物之外的矿物均视为脆性矿物,其总量为 38.4%~89.3%,平均为 61.5%;脆性矿物以硅质矿物(包括石英、长石)为主,平均为 44.3%。黏土矿物含量为 10.7%~61.6%,平均为 32.8%;黏土矿物以伊蒙混层和伊利石为主,次为绿泥石,不含蒙脱石,平均含量分别为 40.8%、44.1%、14.0%。

此外,笔者探索性地应用数字岩心构建实验技术对 JY1 井的两块岩心进行了分析。数字岩心构建实验技术,是利用 X 射线 CT 扫描获得的投影数据

收稿日期: 2015-06-11; 改回日期: 2015-12-17

本文受国家科技重大专项“上扬子及滇黔桂区页岩气资源调查评价与选区”(编号: 14B12XQ151001)资助

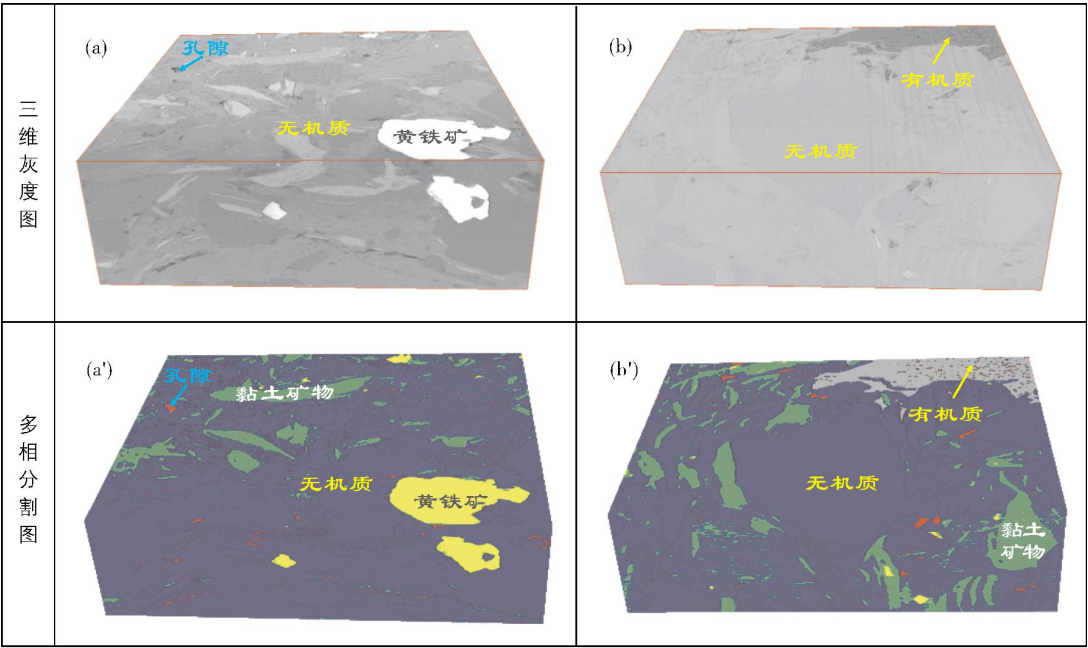
王燕: 女, 1982 年生, 工程师, 2008 年毕业于西南石油大学地球信息及技术专业, 获硕士学位, 目前从事测井技术科研生产工作。通讯地址: 610041 四川省成都市高新区吉泰路 688 号中石化西南科研办公基地; E-mail: daily09@qq.com

重建岩样的三维灰度图像,再通过图像处理技术对泥页岩灰度图像进行阈值分割和三维重建,将泥页岩分割为黄铁矿、有机质、无机质、黏土和孔隙等部分,并

实现对其组分的定量计算。图 1a、1b 为 JY1 井数字岩心构建的三维灰度图,其中,白色为黄铁矿,黑色为孔隙,深灰色为有机质,浅灰色为无机质骨架。

表 1 涪陵页岩气田 JY1 井全岩 X 衍射及黏土矿物分析统计表 (部分数据)

样品 序号	全岩 X 衍射分析结果 (%)							黏土矿物 X 衍射矿物分析结果 (%)			
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
1	34.0	2.7	9.6	4.9	5.0	2.1	41.7	40	56	0	4
2	32.4	3.8	9.8	4.8	4.9	1.5	42.8	51	46	0	3
3	28.9	3.5	8.6	4.7	12.0	1.8	40.5	39	56	0	5
4	27.7	4.0	11.0	4.8	3.9	2.3	46.3	30	66	0	4
5	32.7	3.2	10.5	4.8	4.6	1.7	42.5	26	68	0	6
6	36.0	2.8	6.7	6.3	4.7	2.8	40.7	70	24	0	6
7	40.3	2.7	7.6	7.5	2.3	3.9	35.7	80	17	0	3
8	47.1	1.5	6.4	4.2	6.7	2.8	31.3	78	19	0	3
9	65.8	2.0	1.9	2.1	4.1	7.5	16.6	75	12	13	0
10	69.1	0	3.2	2.3	3.8	3.3	18.3	83	15	0	2



(a, a') 灰黑色页岩。井深2335.55m (b, b') 黑色碳质页岩。井深2348.10m

图 1 涪陵页岩气田 JY1 井龙马溪组数字岩心重建

传统的两相二值化分割方法仅仅将泥页岩分为孔隙和骨架两部分,尚不足以刻画泥页岩的复杂特征。本次研究采用多阈值分割的方法,将泥页岩分割为黄铁矿、有机质、无机质、黏土和孔隙等

部分(图1a',1b'),图中红色代表孔隙,绿色代表黏土,灰色代表有机质,蓝色代表无机质骨架(不包括黄铁矿),黄色代表黄铁矿。

通过分析计算可知:

(1)JY1井的灰黑色页岩样的有机质含量为3.08%,无机质骨架含量为74.9%(不含黄铁矿),黏土含量为9.17%,黄铁矿含量10.34%(图1a')。

(2)JY1井的黑色碳质页岩样的有机质含量为9.8%,无机质骨架含量为73.61%(不含黄铁矿),黏土含量为12.1%,黄铁矿含量0.6%(图1b')。

由上述研究可知,焦石坝区块页岩气储层的脆性矿物含量总体较高。与北美已开发生产的Barnett页岩(硅质矿物含量为35%~50%,黏土矿物小于35%,局部常见碳酸盐矿物和少量的黄铁矿和磷灰石^[6-9])对比可知,两者均具有较高的硅质矿物含量,造缝能力强,有利于压裂改造时裂缝网络的产生,便于页岩气的商业开采。

2 黏土视骨架密度法原理

2.1 常规测井曲线敏感性分析

页岩气储层矿物成分组成相对复杂,难以直接确定哪条或哪几条测井曲线对矿物成分含量变化相对敏感。为此,将研究区参数井JY1井页岩气储层段的87个X衍射全岩矿物分析数据与不同测井曲线值进行相关性分析(表2),以期寻找出对矿物成分纵向变化相对敏感的测井曲线。

由表2可知,矿物含量实验数据与测井曲线值之间存在着一定的相关关系,但是相关系数除个别达到80%外,大部分相关关系均较弱,因此,难以用一条或几条测井曲线精确地定量计算出储层的矿物含量。

表2 涪陵页岩气田JY1井X衍射分析矿物含量与测井曲线值的相关系数

测井曲线	相关系数		
	与黏土矿物	与硅质矿物	与碳酸盐矿物
GR	-0.1395	0.1569	-0.0904
KTH	0.6810	-0.6331	-0.1566
AC	0.2394	-0.1109	-0.2524
DEN	0.7671	-0.8293	0.0175
CNL	0.8439	-0.7345	-0.2450
U	-0.5445	0.5112	0.0463
TH	0.5823	-0.5719	-0.1028
K	0.6541	-0.6162	-0.1309
PE	0.6271	-0.6522	-0.0251
lg(RD)	-0.3198	0.1330	0.3115

2.2 黏土视骨架密度法

2.2.1 计算模型

页岩气储层矿物成分组成复杂,难以用传统测井评价技术对其进行精确定量评价。为解决这一难题,基于前述的数字岩心构建实验,可将页岩气储层合理简化为岩石骨架和孔隙两大部分,岩石骨架又包含脆性矿物(主要分为硅质矿物和碳酸盐矿物)、黏土矿物和干酪根(表3中数字岩心模型)。由于地层中黄铁矿含量相对较少,在实际计算时可将黄铁矿并入硅质矿物。考虑到黏土矿物和干酪根成分复杂,且各黏土矿物和干酪根的骨架密度值难以确定,因此将各种黏土成分和干酪根之和视为黏土矿物(如表3中的简化模型)。

表3 页岩气储层岩石物理体积模型

数字岩心模型		本文简化模型
岩石骨架	脆性矿物	硅质矿物(包括石英、长石及黄铁矿) 碳酸盐矿物
	黏土矿物	黏土矿物 (包括各种黏土成分及干酪根)
	干酪根	
孔隙	孔隙	孔隙

在此基础上,引入“黏土视骨架密度”这一新参数,以建立起全新的页岩气储层矿物含量计算模型,其计算公式如下:

$$\begin{cases} \phi + V_{SI} + V_{CA} + V_{CALY} = 1 \\ \rho_b = \phi \times \rho_f + V_{SI} \times \rho_{SI} + V_{CA} \times \rho_{CA} + V_{CALY} \times \rho_{CALY} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ 为孔隙度; V_{SI} 、 V_{CA} 、 V_{CALY} 分别为硅质矿物含量、碳酸盐矿物含量、黏土矿物含量,%。需要说明的是,式中各类矿物是指简化模型中的分类,它有别于样品全岩X衍射分析所作的分类。

ρ_b 、 ρ_f 、 ρ_{SI} 、 ρ_{CA} 、 ρ_{CALY} 分别为密度测井值、流体密度值、硅质矿物密度值、碳酸盐矿物密度值、黏土视骨架密度值, g/cm^3 ,其中硅质矿物密度值和碳酸盐矿物密度值可分别参考矿物骨架密度值,即2.65和2.71。

2.2.2 建立计算图版

由岩心全岩X衍射分析结果(表1)和岩石物性分析得到的岩石密度值(表4),利用公式(2)可求得

黏土视骨架密度值(表 4)。

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{石英}} + V_{\text{长石}} + V_{\text{方解石}} + V_{\text{白云石}} + V_{\text{黄铁矿}} + V_{\text{黏土}} = 1 \\ \rho_{\text{岩石}} = V_{\text{石英}} \times \rho_{\text{石英}} + V_{\text{长石}} \times \rho_{\text{长石}} + V_{\text{方解石}} \times \rho_{\text{方解石}} + \\ V_{\text{白云石}} \times \rho_{\text{白云石}} + V_{\text{黄铁矿}} \times \rho_{\text{黄铁矿}} + V_{\text{黏土}} \times \rho_{\text{黏土}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $V_{\text{石英}}$ 、 $V_{\text{长石}}$ 、 $V_{\text{方解石}}$ 、 $V_{\text{白云石}}$ 、 $V_{\text{黄铁矿}}$ 、 $V_{\text{黏土}}$ 分别为全岩 X 衍射分析检测分析得到的石英、长石(包括钾长石、斜长石)、方解石、白云石、黄铁矿及黏土矿物的矿物含量, %;

$\rho_{\text{岩石}}$ 为岩石物性分析得到的岩石密度值, g/cm³;

$\rho_{\text{石英}}$ 、 $\rho_{\text{长石}}$ 、 $\rho_{\text{方解石}}$ 、 $\rho_{\text{白云石}}$ 、 $\rho_{\text{黄铁矿}}$ 分别为石英、长石、方解石、白云石和黄铁矿的密度值, g/cm³, 对应取值为 2.6、2.5、2.7、2.8、5;

$\rho_{\text{黏土}}$ 为黏土视骨架密度值, g/cm³。

由于全岩 X 衍射分析结果只包含矿物含量(即页岩气储层岩石物理体积模型中的岩石骨架部分), 而没有包含孔隙部分, 因此需要对相关数据进行孔隙度校正(X 衍射全岩分析含量 $\times (1 - \text{孔隙度})$), 得到孔隙度校正之后的黏土矿物含量和硅质矿物含量(表 4)。

表 4 涪陵页岩气田 JY1 井黏土视骨架密度法的建模数据(部分数据)

样品 序号	原始实验数据				本次建模数据			
	岩石物性分析		X 衍射全岩分析		岩心分析	岩心数据计算	孔隙度校正后	
	孔隙度 (%)	岩石密度 (g/cm ³)	黏土矿物含量 (%)	硅质矿物含量 (%)	有机碳含量 (%)	黏土视骨架密度 (g/cm ³)	黏土矿物含量 (%)	硅质矿物含量 (%)
1	4.55	2.579	41.70	48.40	2.00	2.423	39.80	46.20
2	4.72	2.610	42.80	47.50	1.82	2.537	40.78	45.26
3	4.07	2.599	40.50	42.80	2.06	2.450	38.85	41.06
4	3.99	2.615	46.30	45.00	1.56	2.518	44.45	43.20
5	3.98	2.612	42.50	48.10	1.89	2.532	40.81	46.19
6	5.22	2.534	40.70	48.30	3.27	2.257	38.58	45.78
7	4.23	2.588	35.70	54.50	2.68	2.299	34.19	52.19
8	4.45	2.524	31.30	57.80	4.27	2.112	29.91	55.23
9	4.05	2.490	16.60	77.20	4.25	0.814	15.93	74.07
10	5.73	2.460	18.30	75.60	5.28	1.366	17.25	71.29

然后, 建立黏土视骨架密度与岩心分析的有机碳含量以及孔隙度校正后的黏土矿物含量、硅质矿物含量(表 4 中的建模数据)的经验图版及拟合的计算公式(图 2)。

2.2.3 求取矿物含量

在利用测井资料确定页岩气储层有机碳含量^[10]的基础上, 根据黏土视骨架密度与有机碳含量之间的拟合公式(图 2a), 可以计算出黏土视骨架密度。

再根据黏土矿物含量和硅质含量分别与黏土视骨架密度之间的拟合公式(图 2b, 2c), 可以计算出黏土矿物含量和硅质矿物含量。

最后, 把求得的黏土视骨架密度、黏土矿物含量、硅质矿物含量代入公式(1), 即可计算出碳酸盐矿物含量, 进一步可获得脆性矿物的总含量。

3 实例分析

为验证本文所建方法的效果, 分别应用“黏土视骨架密度法”和传统解释评价方法^[11-14](包括“多元线性拟合法”“复杂岩性分析法”“最优化分析法”和“元素俘获测井法”)对 JY1 井的页岩气储层矿物含量进行精细解释, 并将解释结果进行对比分析(表 5)。

从整体效果来评价, 与四种传统解释评价方法相比, “黏土视骨架密度法”得到的矿物含量的平均差值、相对误差较低, 相关系数较高(表 5), 且该方法是基于常规测井资料建立的, 价格低廉、简单快捷。传统解释方法中, “多元线性拟合法”虽然也有较高的解释精度, 但该方法是以实验分析资料为基础建立的, 推广应用时其解释精度难以保证; “元素俘获

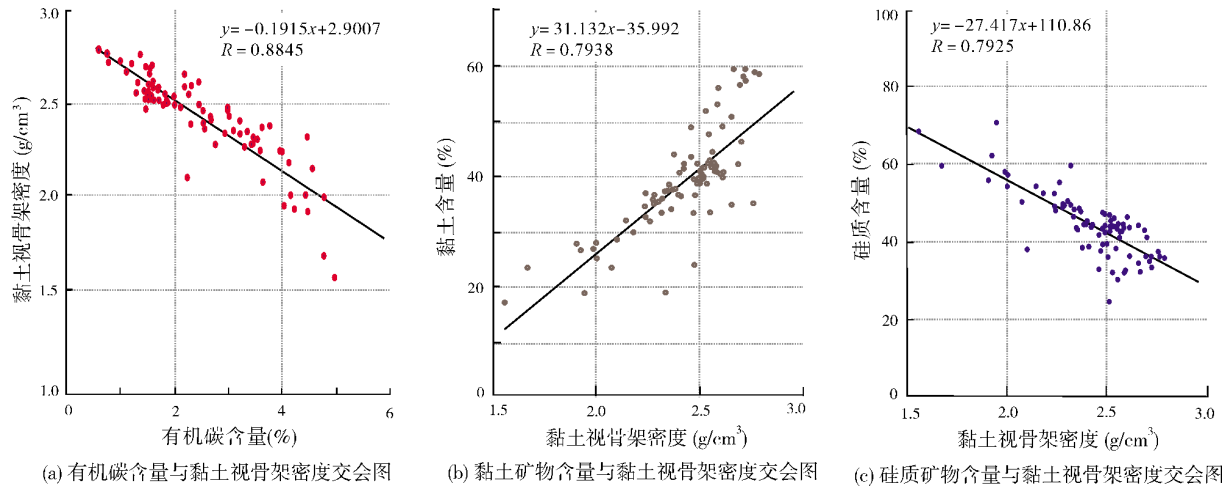


图2 涪陵页岩气田黏土视骨架密度法计算图版

表5 涪陵页岩气田 JY1 井储层岩心分析数据与测井计算矿物含量误差分析统计表

计算方法	矿物类型	平均值(%)		平均差值(%)	相对误差(%)	相关系数	数据点(个)
		测井计算	岩心分析	测井-岩心	测井-岩心 /岩心		
传统解释评价方法	黏土含量	39.51	41.15	-1.64	3.98	0.879	79
		46.91	49.32	-2.41	4.89	0.814	79
	硅质含量	33.39	41.15	-7.76	18.90	0.676	79
		57.93	49.32	8.61	17.46	0.739	79
	元素俘获测井法	43.03	41.15	1.88	4.57	0.854	79
		51.93	49.32	2.61	5.26	0.776	79
	最优化分析法	42.07	41.15	0.92	2.24	0.832	79
		45.87	49.32	-3.45	7.00	0.733	79
黏土视骨架密度法	黏土含量	39.53	41.15	-1.62	3.93	0.883	79
	硅质含量	46.95	49.32	-2.37	4.79	0.843	79

测井法”是基于元素俘获测井资料建立的,其成本相对较高且只有部分井有相关资料,难以在更大范围内推广;“复杂岩性分析法”和“最优化分析法”解释精度均相对较差并且解释周期相对较长,难以满足快节奏的勘探生产需要。

4 结 语

以涪陵页岩气田为例,基于上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组数字岩心构建实验,在不影响解释精度的前提下,对页岩气储层矿物成分进行合并,建立了简化的岩石物理体积模型,新引入“黏土视骨架密度”这一参数,形成“黏土视骨架

密度法”。利用岩心全岩 X 衍射分析、岩心物性分析数据,建立了适合研究区的黏土视骨架密度法计算图版;基于常规测井数据计算出有机碳含量,通过黏土视骨架密度法图版、公式,最终可求得页岩气储层矿物组成含量。

将黏土视骨架密度法与传统测井解释方法进行对比分析,在整体应用效果评价上,“黏土视骨架密度法”解释精度相对较高,解释周期相对较短且费用低廉,易于在研究区推广。

参 考 文 献

[1] 马施民,邹晓艳,朱炎铭,等. 川南龙马溪组笔石类生物与页岩气成因相关性研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(4): 106-109.

- [2] 殷诚,高世葵,董大忠,等. 页岩气产业发展的影响因素[J]. 天然气工业,2015,35(4):117-124.
- [3] 王世谦. 中国页岩气勘探评价若干问题评述[J]. 天然气工业,2013,33(12):13-29
- [4] 崔永强,张玉玮. 页岩气工业前景取决于储层[J]. 天然气工业,2013,33(12):60-65.
- [5] 李世臻,曲英杰. 美国煤层气和页岩气勘探发现现状及对我国的启示[J]. 中国矿业,2010,19(12):17-21.
- [6] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (5): 1777-1794.
- [7] Schmoker J W. Determination of organic content of Appalachian Devonian shales from formation-density logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 63 (9): 1504-1509.
- [8] Schmoker J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [9] Decker A D, Hill D G, Wicks D E. Log-based gas content and resource estimates for the Antrim shale, Michigan Basin [C]// Low Permeability Reservoirs Symposium, 26-28 April 1993, Denver, USA. New York: SPE, 1993.
- [10] 黄仁春,王燕,程斯洁,等. 利用测井资料确定页岩储层有机碳含量的方法优选——以焦石坝页岩气田为例[J]. 天然气工业,2014,34(12): 25-32.
- [11] 高楚桥. 复杂储层测井评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-8.
- [12] 雍世和,张超谟. 测井数据处理和综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1996: 122-126.
- [13] 何生厚,曹耀峰. 普光高酸性气田开发[M]. 北京: 石化出版社, 2010: 299-300.
- [14] 赵良孝,补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 77-85.

编辑:董 庸

A Method of Calculating Percent of Mineral Composition in Gas Reservoir by Apparent Skeleton Density of Clays: A Case of Lower Silurian Longmaxi Gas-bearing Shale Reservoir in Fuling Gas Field, Sichuan Basin

Wang Yan, Feng Minggang, Yan Wei, Wei Xiangfeng, Liu Shuai

Abstract: Shale gas proven reserve declaration in Fuling Gas Field needs to calculate mineral percent with relatively high accuracy. According to core analysis, X-ray diffraction experiments and digital core technology, a simplified volume model is setup, in which rock skeleton is similarly composed of siliceous, carbonate and clay minerals. A new parameter of "apparent skeleton density of clay" is introduced and thus a new formula is setup to calculate percent of minerals in Lower Silurian Longmaxi gas-bearing shale reservoir. According to data of core analysis including X-ray diffraction, porosity and TOC, a series of charts are setup. With common log data, TOC can be calculated firstly, then the "apparent skeleton density of clay" can be obtained. Furtherly, the percent of major minerals suitable to the simplified model can be calculated with the formula. It is proved that this new logging calculation method is reasonable and useful with high accuracy and low cost.

Key words: Shale reservoir; Gas reservoir; Mineral composition; Content calculation; Fuling Gas Field

Wang Yan: MSc., Petroleum Geology Engineer. Add: Exploration Research Institute of SINOPEC Exploration Branch Company, 688 Jitai Rd., Chengdu, Sichuan, 610041, China