

页岩气聚集条件及含气量计算

——以四川盆地及其周缘下古生界为例

聂海宽¹⁾, 张金川²⁾

1) 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京, 100083;

2) 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083

内容提要:为了研究页岩气聚集条件及含气量的影响因素、计算方法,根据页岩气聚集机理、聚集特征将页岩气聚集的因素分为内部因素和外部因素。内部因素主要包括页岩有机地球化学参数、矿物组成以及物性参数等,外部因素主要包括深度、温度、压力等。通过对四川盆地及其周缘下寒武统和上奥陶统一下志留统41块黑色页岩的有机地球化学参数、矿物组成、物性参数、深度、温度、压力等因素对页岩含气量影响作用的分析,可知反映内部因素的有机碳含量、总烃含量、石英含量、粘土矿物含量、孔隙度(裂缝)、密度、黄铁矿含量和碳酸盐含量等8个参数对页岩气聚集具有重要影响。通过对“二参数”、“六参数”、“八参数”与含气量的多元线性回归得出计算页岩含气量的计算公式,据此公式计算的含气量与实测值吻合良好,且参数越多对页岩含气量的预测越准确。本文建议在条件允许的情况下,尽可能多地利用各种参数对页岩含气量进行预测,以达到更好的预测效果。在勘探早期,建议采用简单易得到的两个最主要参数——有机碳含量和孔隙度进行页岩含气量的计算。

关键词:页岩气;聚集条件;主控因素;内部因素;外部因素;四川盆地及其周缘

页岩气是美国目前勘探开发最成功的非常规天然气之一,2009年美国页岩气产量接近 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过我国常规天然气的年产量(张大伟,2010)。虽然我国页岩气研究起步较晚,但已在美国页岩气勘探开发经验介绍(陈建渝等,2003;李新景等,2007;张抗等,2009;黄玉珍等,2009;胡文瑞,2009;闫存章等,2009)、页岩气勘探前景(刘丽芳等,2005;张金川等,2008b;李玉喜等,2009;李建忠等,2009;张大伟,2011)、页岩气聚集机理(张金川等,2004,2011;薛会等,2006;邹才能等,2010)、聚集条件及主控因素(张金川等,2008a;聂海宽等,2009;王社教等,2009;程克明等,2009;王兰生等,2009)、有利区预测(张金川等,2004,2008a,2008b,2008c;聂海宽等,2009,2010,2011;张林晔等,2008;黄籍中,2009)和资源前景(张金川等,2008c;董大忠等,2009,2011;朱华等,2009;李建忠等,2009;刘洪林等,2010)等方面取得深入研究。笔者认为根据页岩气聚集机理和聚集特征,可将页岩气聚集因素分为内

部因素和外部因素,认为页岩有机地球化学参数、矿物组成、物性参数等属于页岩气聚集的内部因素,而诸如深度、温度和压力属于页岩气聚集的外部因素。本文是笔者在页岩气聚集主控因素和我国南方页岩气发育有利区预测研究基础上(聂海宽等,2009),对页岩气发育最有利区进行采样,通过分析页岩有机地球化学参数、矿物组成、物性参数、深度、温度、压力等因素对页岩含气量(包括吸附气含量和游离气含量)的影响,进一步对我国四川盆地及其周缘页岩气聚集条件、主控因素和含气量计算进行系统研究。

1 样品采集及实验测试

样品取自四川盆地及其周缘下寒武统牛蹄塘组及其相当层位和上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组及其相当层位黑色页岩,其中下寒武统16块,上奥陶统一下志留统25块,为了避免露头样品不同程度氧化导致有机碳含量降低、孔渗扩大等不足,在有条件的地方,尽量选取矿洞和井下样品(图1)。主

注:本文为全国油气资源战略选区调查与评价国家专项(编号2009GYXQ15-02)、国家自然科学基金项目(编号40672087)资助的成果。

收稿日期:2011-06-30;改回日期:2011-11-29;责任编辑:周健。

作者简介:聂海宽,男,1982年生。博士,主要从事油气成藏机理和非常规天然气地质的研究工作。通讯地址:100083,北京市海淀区学院路31号,中国石化石油勘探开发研究院;Email:niehk.syky@sinopec.com。

DOI:CNKI:11-1951/P.20120113.0857.004 网络出版时间:2012-1-13 8:57

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20120113.0857.004.html>

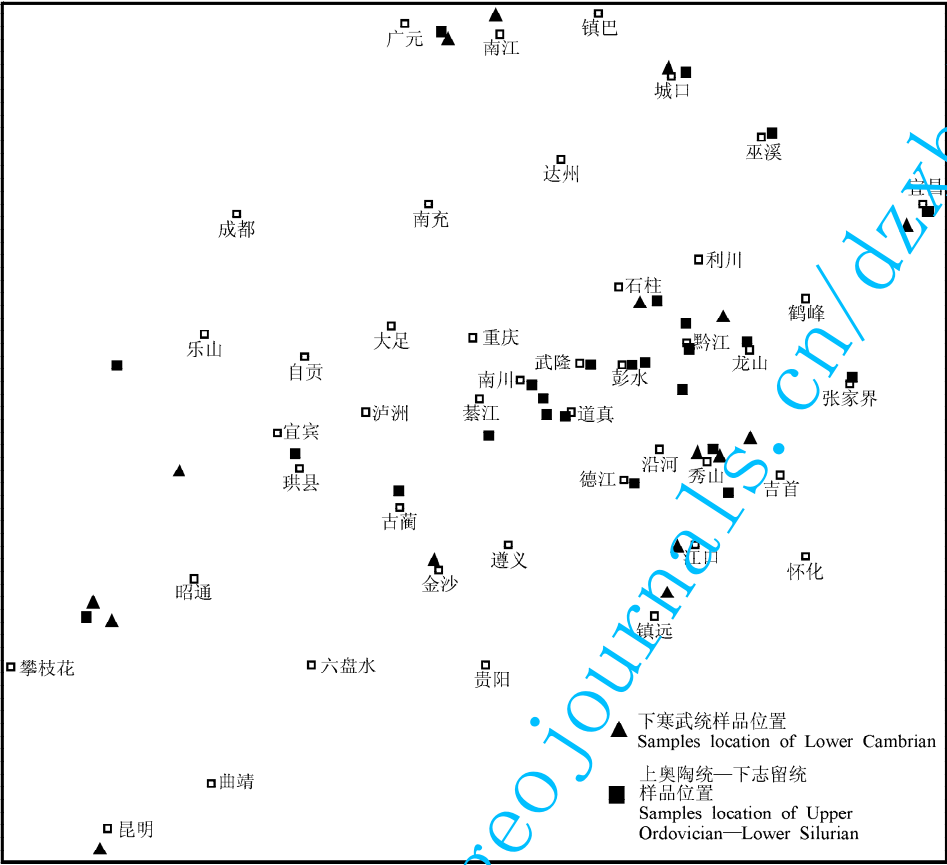


图 1 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩样品分布
Fig.1 The distribution of black shale samples of Early Paleozoic in Sichuan basin and its periphery

要分析了吸附气含量(仪器:美国 TER-TEK ISO-300 型自动等温吸附仪;条件:室温 20℃、压力 3 MPa)、有机碳含量、成熟度、岩石热解、矿物组成、孔隙度和渗透率等。

鉴于以溶解态赋存的天然气,很难和吸附态赋存的天然气区分开,在合适的条件下二者呈转化关系,并且很难测试,目前还没有有效的办法能准确测试这类气体的含量。因此,本文把溶解态和吸附态天然气归为一类进行研究,统称为吸附气。

2 页岩气聚集的内部控制因素

2.1 页岩有机地球化学参数

页岩有机地球化学参数属于控制页岩气聚集的内部因素,主要包括有机碳含量、成熟度、岩石热解参数和微观组分等,这些参数控制页岩气藏中吸附气和游离气的含量。

2.1.1 有机碳含量

有机碳含量是页岩气聚集最重要的控制因素之一,不仅控制着页岩的物理化学性质,包括颜色、密度、抗风化能力、放射性、硫含量,并在一定程度上控

制着页岩的弹性和裂缝的发育程度,更重要的是控制着页岩的含气量(聂海宽等,2009)。研究区黑色页岩的有机质颗粒有多种形态,如不规则细粒状、长条状和尘点状,有时可见极小的黄铁矿颗粒散布。吸附气含量和有机碳含量呈正相关关系,拟合系数(r^2)达 0.7549(图 2),说明有机碳含量是控制页岩吸附气含量的主要因素,但是由于拟合系数(r^2)不

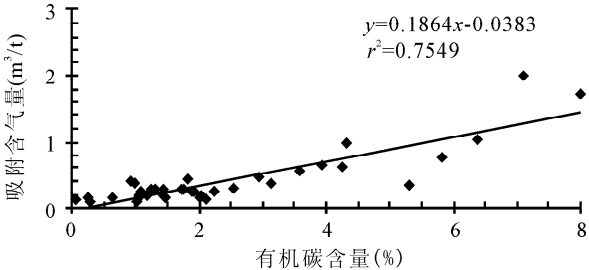


图 2 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
有机碳含量和吸附气含量关系
Fig.2 The relationship between total organic carbon content and adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

到 1,说明还有其他因素影响着页岩吸附气的含量,如页岩的矿物组成、页岩物性等。不同有机碳含量的页岩样品吸附气含量差别较大,以美国页岩气勘探最有利的有机碳含量 2% 为例,根据拟合公式计算,研究区黑色页岩在有机碳含量为 5% 和 10% 时的吸附气含量分别是有机碳含量为 2% 时的 2.6 倍和 5.5 倍,不难看出,有机碳含量是控制吸附气含量的主要因素。有机碳含量和吸附气含量成很强的正相关关系,主要因为有机质具有多微孔的特征,并且随有机碳含量的增大,各种微孔隙类型增多、微孔隙度增大(Ross et al.,2007),可供天然气吸附的比表面也增大,页岩吸附气含量也增加。另外,黑色页岩中残留沥青的含量,也是影响页岩吸附气含量的因素。

2.1.2 成熟度

镜质组反射率(R_o)是国际上公认的标定有机质成熟阶段的一项独立指标,但不适用于下古生界烃源岩(腾格尔等,2007)。下古生界缺乏来源于高等植物的标准镜质组,即下寒武统和上奥陶统一志留统页岩中不存在真正意义上的镜质组,因此无法直接获得镜质组反射率。国内外学者提出了诸如沥青反射率、镜状体反射率、牙形刺相对荧光强度等成熟度的判识指标(Jacob,1985;丰国秀等,1988;涂建琪等,1999),并将这些反射率通过相差计算转换成镜质组反射率,即“等效镜质组反射率”,其中沥青反射率已成为表征那些缺乏镜质组而含有沥青的海相页岩有机质成熟度的一个重要指标(丰国秀等,1988;涂建琪等,1999)。据干酪根镜质体和有机显微组分鉴定,本次采集的下古生界样品富含沥青,故本文采用换算过的沥青反射率(等效镜质组反射率)评价成熟度。

从研究区黑色页岩吸附气含量和成熟度关系可以看出,成熟度(R_o)在 1.1%~3.0% 之间时,吸附气含量达到最大值区域,平均超过 0.5 m³/t,最大超过 2 m³/t,总含气量也达到最大值区域,平均超过 1 m³/t。在小于 1.1% 和大于 3.0% 时,吸附气含量和总含气量均有不同程度的降低,前者因为处在生油窗,生气量有限且溶解于石油中,后者成熟度过高,生气能力有限,均导致吸附气含量不高(图 3)。但很难在吸附气含量和成熟度之间建立相关关系,只能说明在给定的成熟度范围内,吸附气含量较大。由此可以看出,无论成熟度高低,在页岩层中,均有吸附气赋存,甚至形成页岩气藏。值得讨论的是本次研究缺少成熟度小于 1% 的样品值,加上小于 1%

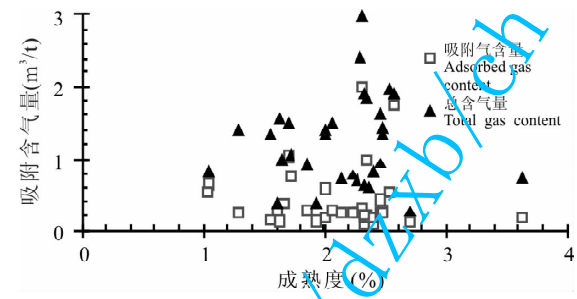


图 3 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩成熟度和吸附气含量关系
Fig. 3 The relationship between organic thermal maturity and adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

的数据,关系也许会发生变化。

从目前勘探开发情况讲,对于热成因的页岩气藏,如圣胡安盆地 Lewis 页岩气藏和福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏为高成熟度的页岩气藏,天然气主要来源于热成熟作用。福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏的天然气是由高成熟度($R_o \geq 1.1\%$)条件下原油裂解形成的(Jarvie et al.,2007),GTI(Gas Technology Institute)公布了 Barnett 页岩气藏产气区的成熟度为 1%~1.3%,实际上产气区西部为 1.3%,东部为 2.1%,平均为 1.7%(Martineau,2007;Pollastro et al.,2007)。阿巴拉契亚盆地页岩成熟度的变化范围在 0.5%~4% 之间(Schmoker,1981),产气区的维吉尼亚州和肯塔基州为 0.6%~1.5%,宾夕法尼亚州西部为 2%,在西弗吉尼亚州南部最高可达 4%,且只有在成熟度较高的区域才有页岩气的产出(Milici et al.,2006)。由此可见,页岩的高成熟度($>2\%$)不是制约页岩气聚集的主要因素,相反,成熟度越高越有利于页岩气的生产,说明在高成熟度下能发育页岩气藏。

研究区在古生代经历了复杂的、多期次的热史变化(马力等,2004),虽然局部地区的成熟度偏高,但是高的有机碳含量预示着这些层位可能是页岩气发育的有利层位。如在黔中隆起的方深 1 井的下寒武统牛蹄塘组,成熟度(R_o)高达 5.5%,有机碳含量高达 8.02%,在 1723.4~1726.7 m 井段,仍有气测异常,泥浆见雨状气泡,含气 38%,点燃呈蓝色火焰(李建忠等,2009)。因此,不难看出即使是高成熟度的页岩,也可能有天然气赋存。

2.1.3 岩石热解参数

岩石热解能定量检测岩石中的含烃量。总烃量为 S_0 、 S_1 与 S_2 之和,其中 S_0 为气态烃含量,代表了单

位质量页岩中轻烃(C₇以前)的含量(mg/g);S₁为游离烃含量,代表单位质量页岩中生成但未运移走的液态烃(C₇以后)(mg/g);S₂代表单位质量页岩中干酪根可裂解的总烃量(mg/g),包括重烃、胶质、沥青质的含量。黑色页岩的总烃量和吸附气含量呈正相关关系,拟合系数为 0.4818(图 4)。

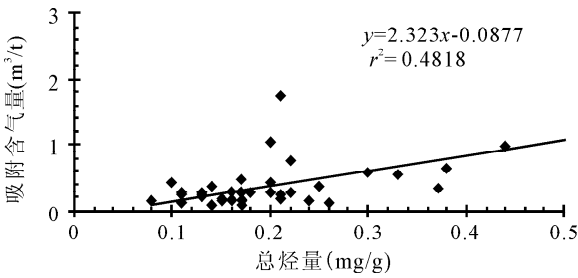


图 4 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩总烃量和吸附气含量关系

Fig. 4 The relationship between the total hydrocarbon content and adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

2.1.4 微观组分

实验结果表明,I_H和 H/C 原子比值分别小于 50、0.5,难于准确标定不同母质类型的干酪根。干酪根 δ¹³C 能够反映原始生物母质的特征,次生的同位素分馏效应不会严重掩盖原始生物母质的同位素印记,普遍认为是划分高一过成熟烃源岩有机质类型的有效指标(黄第藩等,1984;Schidlowski,1991;郝石生等,1996)。前人对南方下古生界黑色页岩的有机质类型进行了深入研究,普遍认为有机质类型均属腐泥型(I 型),以海洋菌藻类为主的生源组合,原始组分属富氢、富脂质,具高生烃潜力(腾格尔等,2007;戴鸿鸣等,2008)。根据前人研究,并结合本次样品的显微特征,研究区下寒武统和上奥陶统一下志留统黑色页岩的有机质类型多为 I 型,少量为 II₁型,属于生油源岩。下寒武统和上奥陶统一下志留统黑色页岩显微组分主要表现以腐泥组和块状、脉状、碎屑状沥青为主,油浸反射光下呈灰白色,不发光,缺乏镜质组、惰质组和壳质组,上奥陶统一下志留统黑色页岩还存在一些似镜质体组分。

显微组分不同,页岩中天然气的赋存方式、吸附气含量均不相同,鉴于研究区的有机质类型和特征,主要考虑形态有机质含量对吸附气含量的影响,形态有机质主要包括来源于菌藻和浮游类生物的藻类体、菌类体、镜状体和浮游动物体(吴朝东等,

1999)。形态有机质和吸附气含量成正相关关系(图 5),这一方面是因为藻类中的宏观底栖藻和单细胞藻在高、过成熟阶段具有较好的生气潜力(孟庆强等,2008),另一方面是藻类等有机质对天然气的吸附作用所致。

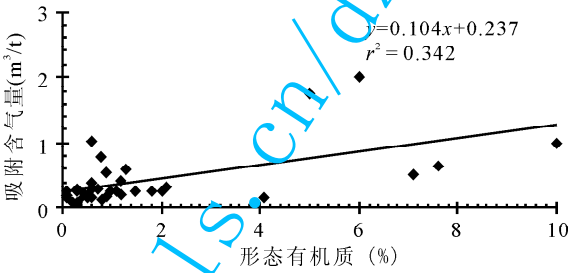


图 5 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩形态有机质和吸附气含量关系

Fig. 5 The relationship between form organic matter and adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

综上,页岩有机地球化学参数中,影响含气量(主要是吸附气含量)的主要因素是有机碳含量,随有机碳含量的增大,吸附气含量也增大;对热成因页岩气藏中的吸附气含量,成熟度(R_o)在 1.1%~3.0%之间时,吸附气含量较大;岩石的总烃量和吸附气含量成正相关关系;页岩的各微观组分对吸附气含量亦有重要影响,主要表现为形态有机质和吸附气含量呈正相关关系。

2.2 页岩矿物组成

美国页岩气勘探实践表明,矿物组成决定着页岩气藏的品质,影响着气体含量,能对成熟度进行分析,同时也能为钻井、完井和压裂提供分析资料。根据粘土矿物 X 衍射分析和扫描电镜观察结果,研究区两套黑色页岩的主要矿物为石英(16%~80%,平均 43.4%)、粘土矿物(16%~57%,平均 37%)、长石(1%~20%,平均 8.7%,其中钾长石 1%~7%,平均 2.6%、斜长石 2%~18%,平均 7%)、碳酸盐(1%~17%,平均 7.4%,其中方解石 1%~6%,平均 3.6%、白云石 1%~13%,平均 5.4%),次要矿物为黄铁矿(1%~10%,平均 4.1%)、石膏(1%~5%,平均 3.25%)等。

2.2.1 石英

石英含量的多寡影响着页岩的含气量,随石英含量的增加,黑色页岩的吸附气含量是增加的(图 6)。研究区在下寒武统和上奥陶统一下志留统沉积时,基本上为深海陆棚沉积(梁狄刚等,2009),少量为热水

沉积,沉积水体比较深,距离物源较远,在远离海岸的沉积环境,陆源碎屑、碳酸盐台地流入物与表层水浮游生物体含量都十分稀少的情况下,岩石主要由海水中缓慢沉降的 SiO₂形成和一些有机硅生物死亡沉积形成,硅质含量高,越靠近深海,泥质含量越低,硅质含量越高,石英含量也就越高。这种沉积环境中有利于有机质的富集,硅质含量和有机碳含量呈正相关关系,即石英含量和有机碳含量呈正相关关系,随石英含量增加,有机碳含量也增加(图 7)。有机碳含量和吸附气含量呈正相关关系,因此,石英含量和吸附气含量也有一定的正相关关系。

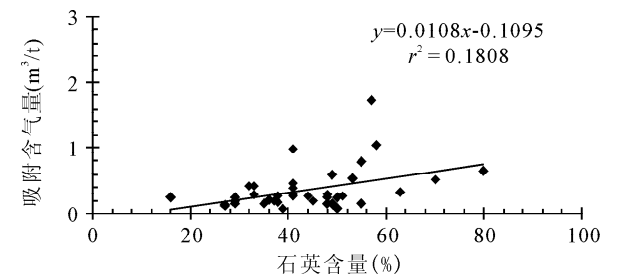


图 6 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
石英含量和吸附气含量关系

Fig. 6 The relationship between quartz content and adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

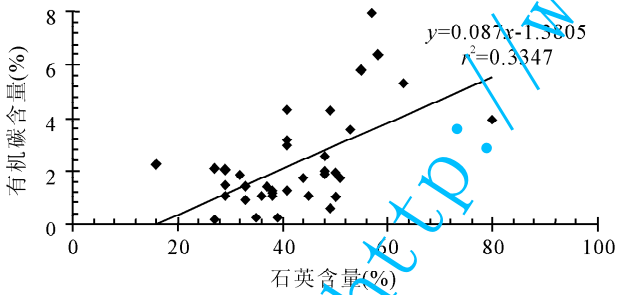


图 7 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
石英含量和有机碳含量关系

Fig. 7 The relationship between quartz content and total organic carbon content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

由于石英属于刚性矿物(多为页岩沉积时的同沉积矿物),具有抗压实能力强的特点。由实验数据分析,石英含量高的页岩,孔隙度也较大,而孔隙度是控制游离气含量的主要因素,因此,石英含量和游离气含量呈一定的正相关关系(图 8)。

2.2.2 粘土矿物

黑色页岩的粘土矿物主要为伊利石(30%~

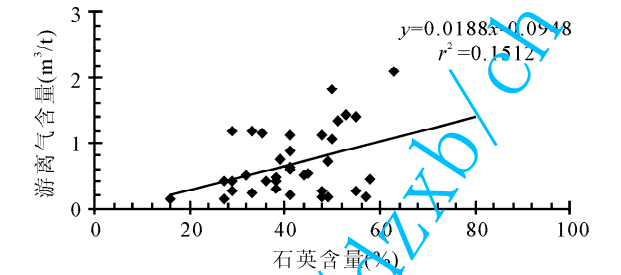


图 8 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
石英含量和游离气含量关系

Fig. 8 The relationship between quartz content and free gas content of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

83%,平均 57%)、伊/蒙混层(6%~69%,平均 35%),次要粘土矿物为高岭石(1%~20%,平均 5%)、绿泥石(1%~22%,平均 6%)和蒙脱石(10%~70%,平均 17%)。

粘土矿物含量影响着页岩的吸附气含量,诸如伊利石的微孔有吸附天然气的能力。但研究区的实验分析表明,粘土矿物含量和吸附气含量关系不大,呈微负相关关系(图 9)。如前文所述,这些页岩在沉积时距离物源较远,粘土矿物含量低,且粘土矿物含量和有机碳呈负相关关系(图 10),这主要是由于中国南方地区沉积环境是控制优质烃源岩有机质的主要因素(秦建中等,2010),有机碳含量和吸附气含量呈正相关关系,由此决定的吸附气含量也和粘土矿物含量呈负相关关系。如美国大多数页岩含有很高的粘土,然而 Barnett 页岩气藏和其他一些页岩气藏的页岩粘土矿物含量并不高(Curtis, 2002)。在寻找 Barnett 型页岩气藏中,勘探工作者必须寻找可以被压裂的页岩,这些页岩的粘土含量小于 50%,能被成功压裂。

2.2.3 黄铁矿

黄铁矿的普遍存在表明曾经所处的还原沉积环境,有利于有机质的保存。研究区黑色页岩中含草莓状黄铁矿、显微球粒状黄铁矿、自形黄铁矿,粒状、板状或呈斑晶充填各种裂缝、孔洞或分布于岩石表面。草莓状黄铁矿和显微球粒状黄铁矿常紧密伴生,富集成群,是早期成岩作用的产物,自形黄铁矿以立方体为主,可见五角十二面体,形成于成岩阶段。在四川宜宾珙县双河镇红旗村下志留统黑色页岩露头 and 重庆彭水连湖渝 1 井下志留统黑色页岩中均可见不同产状的黄铁矿。由实验结果分析,可知黄铁矿含量和吸附气含量呈正相关关系(图 11)。

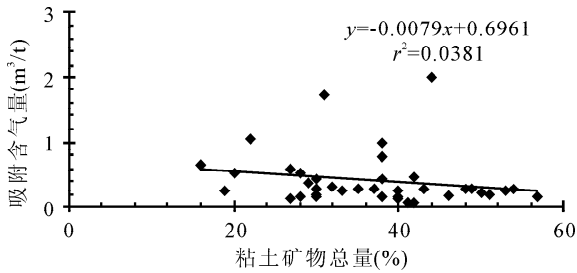


图 9 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
粘土矿物含量和吸附气含量关系
Fig. 9 The relationship between clay mineral content
and adsorbed gas content of Early Paleozoic black
shale in Sichuan basin and its periphery

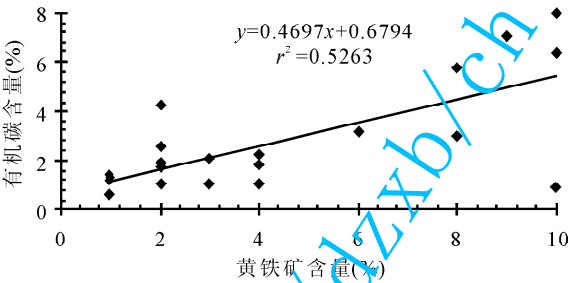


图 12 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
黄铁矿含量和有机碳含量关系
Fig. 12 The relationship between pyrite content and
total organic carbon content of Early Paleozoic black
shale in Sichuan basin and its periphery

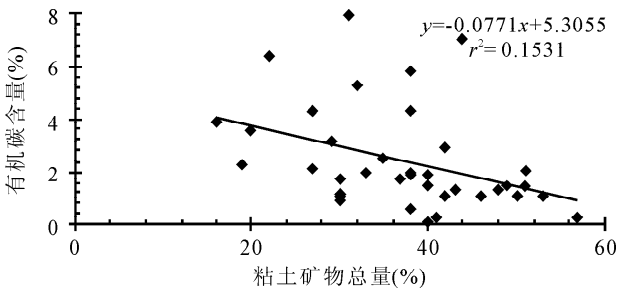


图 10 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
粘土矿物含量和有机碳含量关系
Fig. 10 The relationship between clay mineral content
and total organic carbon content of Early Paleozoic black
shale in Sichuan basin and its periphery

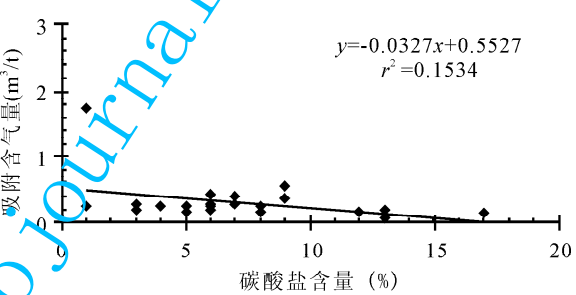


图 13 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
碳酸盐含量和吸附气含量关系
Fig. 13 The relationship between carbonate content
and adsorbed gas content of Early Paleozoic black
shale in Sichuan basin and its periphery

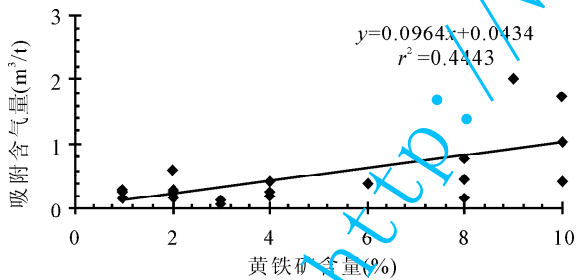


图 11 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩
黄铁矿含量和吸附气含量关系
Fig. 11 The relationship between pyrite content and
adsorbed gas content of Early Paleozoic black shale
in Sichuan basin and its periphery

的富集程度预测页岩最大含气区。

2.2.4 碳酸盐含量

研究区页岩中的碳酸盐主要包括方解石和白云石,为了研究和统计的方便,将方解石和白云石合为一类,统称为碳酸盐含量。随碳酸盐含量的增加,页岩吸附气含量是下降的(图 13)。碳酸盐(方解石)一般多以胶结物的形式出现,充填了微孔隙或微裂缝,降低了供天然气吸附的页岩比表面积,导致随碳酸盐含量增大页岩的吸附气含量减小,表现为碳酸盐含量和吸附气含量呈负相关关系。

综上,页岩矿物组成也是影响页岩含气量(包括吸附气含量和游离气含量)的主要因素,其中石英含量和黄铁矿含量是主要的影响参数。

2.3 页岩物性参数

在常规储层研究中,物性参数是评价储层特征的主要参数,这对于页岩气藏同样适用。页岩的物性参数主要包括孔隙度和渗透率、含水饱和度、厚度、密度等,均影响着页岩的含气量(包括吸附气含量和游离气含量)。

铁离子是有机质沉积必需的物质,铁含量高有利于有机质富集(图 12),而有机质含量的高低直接影响着页岩中天然气的生成能力和赋存能力。Shiley 等(1981)认为在伊利诺斯盆地肯塔基州可以根据岩芯中铁离子的百分含量变化预测气体大量聚集的地方。结合实验结果分析,笔者认为可以根据黄铁矿

2.3.1 孔隙

页岩主要由各种粘土矿物、碎屑、非碎屑矿物以及有机质组成,并具有很强的非均质性,泥页岩看上去似乎是均质、致密和不渗透的,常作为常规油气的烃源岩和盖层进行研究。在扫描电镜下(样品经氩离子抛光后)可以观察到不同大小的孔隙、喉道、晶洞和裂缝组成的复杂多孔系统,并具有网状连通的特征。在页岩气研究中,这些孔隙是主要的储集空间,赋存了大量的游离态天然气,孔隙度大小直接控制着游离态天然气的含量。

页岩孔隙为游离态的天然气提供赋存空间,是控制游离气含量的主要因素(还有裂缝等其他因素,页岩气藏也有一部分天然气以游离态赋存于裂缝中)。本次研究中,为了研究方便,假设天然气(全部为甲烷)全部充满孔隙,含水饱和度为零(真实地下页岩层有一定的含水率)。

游离气含量的计算主要是基于压力、页岩总孔隙体积,利用范德瓦耳斯方程计算最大游离气含量。压力的选取主要是根据页岩吸附实验所达到的最大压力(3 MPa),目的是压力一致,便于统计分析,且具有一定的地质意义(渝页1井钻井达到的最大深度为300 m,井底压力大约为3 MPa)。孔隙度和密度通过物理测试手段获得。具体方法如下:

(1)首先计算单位页岩的总孔隙体积。根据页岩密度计算出单位页岩的体积,然后乘以孔隙度计算出单位页岩的总孔隙体积:

$$V_{\text{孔}} = \phi \times \frac{M}{\rho} \quad (1)$$

其中: $V_{\text{孔}}$ 为单位页岩的总孔隙体积(m^3); M 为单位页岩的质量(t); ϕ 为页岩孔隙度(%); ρ 为页岩密度(t/m^3)。

(2)根据实际气体采用范德瓦耳斯方程计算一定压力下页岩的最大游离气含量。假设在加压情况下温度(T)和岩石总孔隙体积(V)不发生变化:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2)$$

式中: V 为单位体积页岩游离气含量(m^3); P 为单位面积上的压力,初始压力为一个大气压(0.1 MPa),目标压力为3 MPa; T 为温度(K),本次计算中为恒量; $a = 0.2283 \text{ m}^6 \cdot \text{Pa}/\text{mol}^2$; $b = 0.000042781 \text{ m}^3/\text{mol}$ 。

(3)通过公式(1)和(2)计算页岩在3 MPa压力下的游离气含量。

孔隙度较大的地区,游离态天然气含量也较大,反之则较小,如下寒武统黑色页岩孔隙度为1.3%~

14.2%,平均5%,根据假设条件计算的游离气含量在0.1291~1.8283 m^3/t 之间,平均0.6250 m^3/t ;上奥陶统一志留统黑色页岩孔隙度为0.8%~15.1%,平均6.4%,根据假设条件计算的游离气含量在0.1673~2.0876 m^3/t 之间,平均0.8004 m^3/t 。

2.3.2 含水饱和度

含水饱和度在很大程度上影响着页岩气的含气量,如果页岩的孔隙被水占据,则孔隙储存天然气的能力将降低,极端地假设,如果孔隙全部被水充填,则游离气含量为零。根据美国业已开采页岩气藏的情况,这只是一种假设,实际上页岩气井产水很少,尤其是热成因的页岩气藏,含水饱和度对游离气含量的影响较小,主要影响吸附气含量。岩石润湿后,由于水比气吸附性能好,从而会占据部分页岩比表面,孔隙或喉道很可能被水阻塞,导致甲烷接触不到大量的吸附区域,大大降低甲烷吸附量。根据重庆城口修齐下寒武统和四川珙县双河红旗村上奥陶统一志留统两块黑色页岩干燥吸附和饱含水吸附的对比可知,干燥页岩吸附气含量比饱含水页岩的大,其中下寒武统干燥页岩样品比饱含水样品在0.7 MPa、1.7 MPa、2.9 MPa、4.1 MPa分别多吸附0.07 m^3/t 、0.15 m^3/t 、0.21 m^3/t 、0.26 m^3/t ,上奥陶统一志留统干燥页岩样品比饱含水样品在0.7 MPa、1.7 MPa、2.9 MPa、4.1 MPa分别多吸附0.41 m^3/t 、0.69 m^3/t 、0.85 m^3/t 、0.96 m^3/t (图14)。

虽然已经观察到随着含水饱和度的增加,吸附气含量通常是减小的,但是在含水饱和度和吸附气含量之间还不能建立起直接的关系,只能说明在给定区域,含水饱和度对吸附气含量的影响比其他因素起的作用大。如对细粒砂岩的研究表明,当含水饱和度为21%时,自由表面减少5.5倍(相对于空气干燥过的砂岩),而含水饱和度为10%时,减少3倍,随着含水饱和度的增加,大部分气体转为水溶态,用烃气进行的实验表明,当含水饱和度大于8%时,岩石的吸附能力明显降低(戴金星等,1986)。

含水饱和度往往随页岩成熟度增加而减小。密执安盆地 Antrim 页岩气藏、伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏和阿巴拉契亚盆地北部 Ohio 页岩气藏的含水饱和度均较大,含水饱和度较高,而演化程度较高的阿巴拉契亚盆地南部 Ohio 页岩气藏、圣胡安盆地 Lewis 页岩气藏和福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏则含水较少,含气量较高。含水量高不但降低含气量,还会降低气体的生产速度,导致处理产

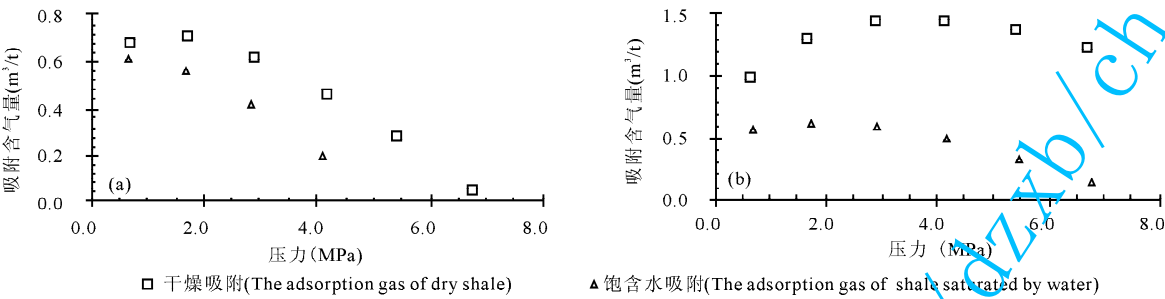


图 14 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩干燥页岩和饱含水页岩吸附气含量
Fig. 14 The adsorption gas of dry shale and shale saturated by water of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

(a)—重庆城口修齐下寒武统黑色页岩;(b)—四川珙县双河下志留统黑色页岩
(a)—black shale in Lower Cambrian in Xiuyi, Chengkou, Chongqing; (b)—black shale in Lower Silurian in Shuanghe, Gongxian, Sichuan

出水的麻烦,所以有利的页岩气区应该是产水较少的区域。

2.3.3 密度

研究区黑色页岩密度的分布范围是 1.89~3.02 t/m³,平均 2.47 t/m³。密度不但影响游离气含量而且影响吸附气含量,无论吸附气含量还是游离气含量均随密度的增大而减小(图 15、16)。吸附气含量随密度的增大呈微减小的趋势,呈微负相关关系,主要原因是随密度的增加,有机碳含量是减小的,而有机碳含量和吸附气含量有很好的正相关关系,且拟合系数较高,因此,随密度的增大,吸附气含量是减小的。游离气含量和密度有很好的负相关关系,拟合系数为 0.4564,主要原因是随密度的增大,孔隙度是减小的,而孔隙度是控制游离气含量的主要因素。

页岩的物性参数主要包括孔隙度和渗透率、含水饱和度及密度等,孔隙是页岩中气体的储集空间,很大程度上决定着页岩的储能,主要控制着页岩游离气的含量;而含水饱和度的增大导致吸附气含量的降低;随密度的增大,吸附气含量和游离气含量都是减小的。

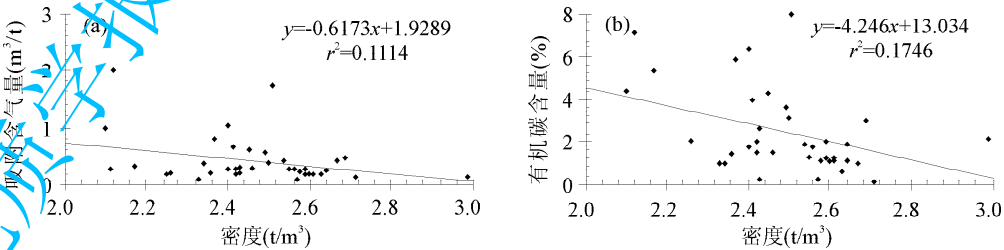


图 15 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩密度与吸附气含量关系(a)及密度与有机碳含量关系(b)
Fig. 15 The relationship between density and adsorbed gas content (a) & relationship between density and total organic carbon content (b) of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

3 页岩气聚集的外部控制因素

外部因素主要分析深度、温度和压力对页岩气聚集的影响作用。鉴于研究程度和实验条件的限制,温度未进行实验,前人研究表明,随温度增加,由于热膨胀导致气体分子运动速度加快,含气量下降。

3.1 深度

深度直接控制着页岩气藏的经济价值,决定着经济效益。由于研究区的研究程度限制,这里用美国主要的页岩气藏深度分布特征来研究。美国发现的页岩气藏通常分布在 76.2~3658 m 范围的 4 个深度段。第一个深度段小于 1000 m,伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏和密执安盆地 Antrim 页岩气藏大约有 9000 口井,深度范围是 200~610 m;第二个深度段小于 1600 m,阿巴拉契亚盆地 Ohio 页岩气藏和圣胡安盆地 Lewis 页岩气藏大约有 20000 口井,分布深度为 915~1524 m;第三个深度段小于 2600 m,福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏和阿科马盆地 Fayetteville (Arkansas) 和 Caney (Oklahoma) 页岩气藏分布在 1981~2591 m 之间;第四个深度段小于 3600 m,如帕落杜罗盆地 Bend 页岩气藏深

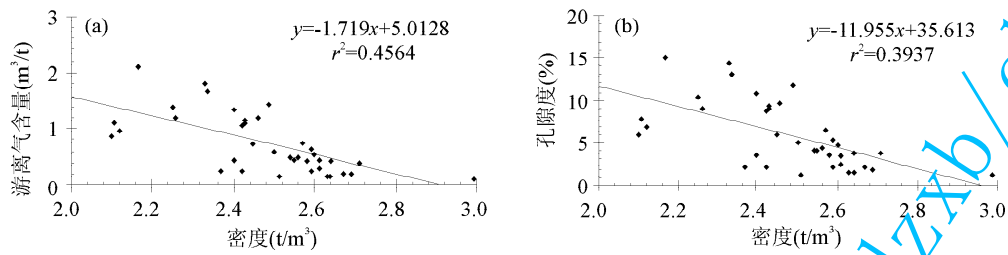


图 16 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩密度与游离气含量关系(a)及密度与孔隙度关系(b)
Fig. 16 The relationship between density and free gas content (a) & relationship between density and porosity (b) of Early Paleozoic black shale in Sichuan basin and its periphery

度在 2515~2896 m 之间,阿科马盆地 Woodford 页岩气藏深度在 1729~3657 m 之间,黑勇士盆地 Floyd 页岩气藏深度在 1524~3658 m 之间。

由此可见,页岩气藏深度变化较大,深度不是决定页岩气藏发育的决定因素,关键问题是该页岩气藏是否具有商业开发价值。随着科技和工艺的进步,埋藏更深的页岩气藏也将得到开发。深度不同,页岩气藏的特征也有较大差别(表 1)。

表 1 页岩气藏埋藏深度与气藏特征
Table 1 Shale gas reservoir buried depth and reservoir characteristics

浅层(<1000 m)	深层(>1000 m)
低压力	高压力
低成熟度	高成熟度
生物成因或热成因	热成因
低气体饱和度	高气体饱和度
高吸附气含量	低吸附气含量
高孔渗	低孔渗
陡峭的等温吸附线	平缓的等温吸附线
低成本	高成本

3.2 压力

一般情况下,随压力的增大,无论何种方式赋存的气体,含量都是增大的,但压力增大到一定程度以后,吸附曲线趋于平缓,因为孔隙和孔隙表面是一定的,前者控制游离气含量,后者控制吸附气含量。压力对吸附作用有明显的影响,随着压力升高,吸附气含量是增加的,但由于实验本身误差或针对煤层气研究的吸附仪器及其计算方法是否适用于页岩,导致观测到的吸附气含量在压力增大到 3 MPa 以后是下降的,原因有待进一步研究(图 17)。但是,随着压力的增大,也即高压区(对于甲烷是 3 MPa),气体分子运动速度较快,降低了页岩中各种吸附剂的吸附能力,有可能是导致实验数据下降的原因。压力较低时,吸附态气体含量高,如圣胡安盆地 Lewis

页岩气藏具有异常低压力梯度,为 4.97 KPa/m,吸附气含量高达 88%,而福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏具有微超高压压力梯度的特征,为 12.21 KPa/m,其吸附气含量最高为 60%,最低仅为 40% (Curtis,2002)。

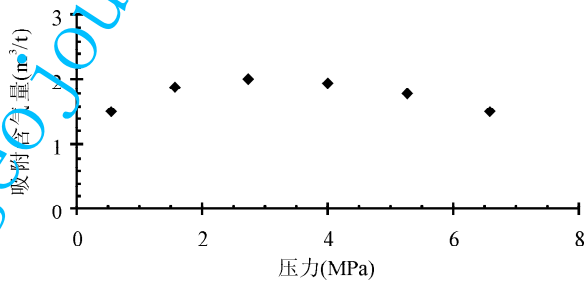


图 17 重庆巫溪徐家下志留统黑色页岩等温吸附曲线
Fig. 17 The adsorbed isotherm of black shale in Lower Silurian in Xujia, Wuxi, Chongqing

4 主控因素及含气量计算

评价非常规天然气藏一个重要的参数就是含气丰度或每单位体积页岩的含气量(Montgomery et al.,2005),因此,评价页岩气聚集的主控因素即主要分析含气量的主控因素。为获得一个有经济价值的页岩气藏,含气量是一个重要的决定因素,必须有足够的原地含气量(Bowker,2007),这就要求对页岩的各项参数都必须有一个很高的要求且达到良好的匹配关系。

页岩的内部因素(页岩有机地球化学参数、矿物组成、物性参数等)和外部因素(深度、温度、压力等)是影响页岩含气量的因素。页岩的总含气量包括吸附气含量和游离气含量两部分,影响吸附气含量的主要因素有有机碳含量、石英含量、总烃量、形态有机质含量、黄铁矿含量、含水饱和度、密度、压力和温度等,而影响游离气含量的主要因素为压力、温度、

含水饱和度和碳酸盐含量、孔隙度和密度等。可见,影响页岩含气量的因素比较多,预测比较困难,本文在分析各因素和吸附气含量、游离气含量的基础上,认为含气量和各因素主要呈线性关系。为了在预测上更精确、更符合客观,本文假设在一定的温度和压力条件下,采用多元线性回归的方法对页岩含气量进行预测计算。

在参数选取上,遵循以下两个原则:①吸附气含量和游离气含量与选取参数的拟合系数要大于 0.4,拟合系数太低的相关性差,但在进行更多参数拟合时,为了更精确地得到计算含气量的公式,可以考虑采用拟合系数较小的数据;②虽然石英含量、粘土矿物含量和吸附气含量、游离气含量的拟合系数不是很高,但它们和有机碳含量的拟合系数很高,对有机碳含量的影响较大,因此,石英含量和粘土矿物含量对页岩含气的影响作用不容忽视,且又是页岩的主要组成部分,因此选取这两个参数。虽然成熟度对页岩吸附气含量有一定影响,如成熟度(R_o)在 1.1%~3.0% 之间时,吸附气含量达到最大,但很难在吸附气含量和成熟度之间建立相关关系,只能说明在给定的成熟度范围内,吸附气含量较大,鉴于研究区的成熟度普遍大于 2%,均为可能发育热成因的页岩气藏,因此,本次计算,暂不选取成熟度参数。

基于以上研究,本文选取有机碳含量、总烃含量、石英含量、粘土矿物含量、孔隙度(裂缝)、密度、黄铁矿含量和碳酸盐含量等参数,采用多元线性回归的方法,对页岩含气量进行统计分析,以达到预测页岩含气量的目的。由于单位不尽相同,统一单位比较困难,因此,计算出的各系数也均有单位。

$$V=a_1 \times TOC+a_2 \times S+a_3 \times Q+a_4 \times K+a_5 \times \phi+a_6 \times \rho+a_7 \times Fe+a_8 \times C \quad (3)$$

式中: V 为页岩总含气量(m^3/t); a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 a_7 、 a_8 为系数,通过多元线性回归计算获得; TOC 为有机碳含量(%); S 为总烃含量,为 S_0 、 S_1 、 S_2 的总和(mg/g); Q 为石英含量(%); K 为粘土矿物含量(%); ϕ 为孔隙度(%); ρ 为页岩密度(t/m^3); Fe 为黄铁矿含量(%); C 为碳酸盐含量(%)。

(1)当考虑有机碳含量和孔隙度两个参数时,共 36 组数据,它们与含气量的多元线性回归拟合公式为:

$$V=0.1703 \times TOC+0.1185 \times \phi \quad (4)$$

据此公式计算的含气量和实测值的线性拟合良好,全部样品的回归系数为 0.8947(图 18),由于有机碳含量和孔隙度两个参数易得到,该方法在页岩气早

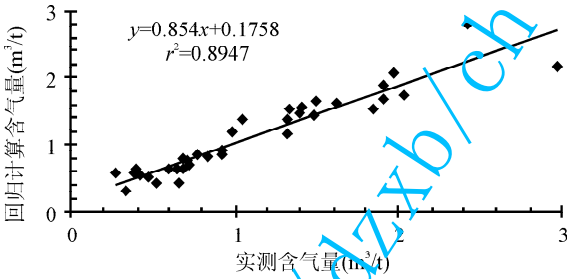


图 18 多元回归计算含气量和实测含气量关系(两个参数)
Fig. 18 The relationship between multiple linear regression calculated gas content and measured gas content (two parameters)

期评价中优势明显。

(2)当考虑有机碳含量、总烃含量、石英含量、粘土矿物含量、孔隙度和密度 6 个参数时,共 34 组数据,它们与含气量的多元线性回归拟合公式为:

$$V=0.1703 \times TOC+0.1362 \times S-0.0014 \times Q+0.0042 \times K+0.1189 \times \phi-0.0561 \times \rho \quad (5)$$

据此公式计算的含气量和实测值的线性回归表明,拟合效果明显好于采用有机碳含量和孔隙度两个参数时的拟合,全部样品的回归系数为 0.9161(图 19)。

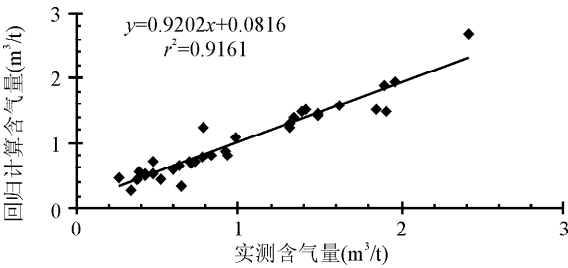


图 19 多元回归计算含气量和实测含气量关系(6 个参数)
Fig. 19 The relationship between multiple linear regression calculated gas content and measured gas content (six parameters)

(3)为了检验采用参数数量多少对回归公式计算结果的影响,同时考虑到黄铁矿含量和碳酸盐含量也对含气量有重要影响,因此,选取有机碳含量、总烃含量、石英含量、粘土矿物含量、孔隙度、密度、黄铁矿含量和碳酸盐含量 8 个参数拟合计算,共 18 组数据,它们与含气量的多元线性回归拟合公式为:

$$V=0.1911 \times TOC-0.2508 \times S-0.0023 \times Q+0.0036 \times K+0.1091 \times \phi+0.0046 \times \rho-0.0069 \times Fe+0.0255 \times C \quad (6)$$

据此公式计算的含气量和实测值的线性回归表明,八参数法对页岩含气量的回归计算更精确,全部样

品的回归系数高达 0.9654(图 20)。

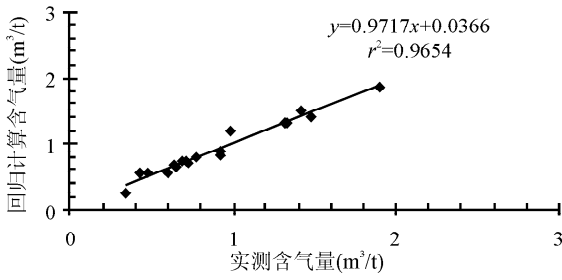


图 20 多元回归计算含气量和实测含气量关系(8 个参数)

Fig. 20 The relationship between multiple linear regression calculated gas content and measured gas content (eight parameters)

从不同参数与含气量多元线性回归拟合结果的对比易知,选取的参数越多,预测效果越好,但是考虑有机碳含量和孔隙度两个参数时,拟合系数高达 0.8947,不难看出,这两个参数是控制页岩含气量的主要因素。因此,本文建议在条件允许的情况下,尽可能多地利用各种参数对页岩含气量进行预测,以达到更好的预测效果。虽然参数越多拟合回归计算的含气量越接近实测值,对页岩气藏评价越准确,但往往会受参数的限制,尤其对四川盆地及其周缘大范围的区域来讲。在勘探早期,建议采用简单易得到的有机碳含量和孔隙度这两个最主要参数进行页岩含气量的拟合计算。

5 结论

(1)控制页岩气聚集的因素可以分为内部因素和外部因素,前者主要包括页岩有机地球化学参数、矿物组成、物性参数等,后者主要包括深度、温度、压力等。反映内部因素的有机碳含量、成熟度、总烃含量、石英含量、粘土矿物含量、孔隙度(裂缝)及渗透率、密度、黄铁矿含量和碳酸盐含量等参数对页岩气聚集具有重要影响,其中有机碳含量和孔隙度是最主要的影响因素。

(2)通过对不同参数与含气量的多元线性回归得出计算页岩含气量的统计公式,根据这些拟合公式计算的含气量与实测值吻合良好,说明能起到预测页岩含气量的作用,且参数越多对页岩含气量的预测越准确。本文建议在条件允许的情况下,尽可能多地利用各种参数对页岩含气量进行预测,以达到更好的预测效果。在勘探早期,建议采用简单易得到的有机碳含量和孔隙度这两个最主要参数进行

页岩含气量的计算。

致谢:感谢龙鹏宇、张培先、林拓等同志在样品采集和整理方面所做的工作。

参 考 文 献

- 陈建渝,唐大卿,杨楚鹏. 2003. 非常规含气系统的研究和勘探进展. 地质科技情报, 22(4): 55~59.
- 程克明,王世谦,董大忠,黄金亮,李新景. 2009. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件. 天然气工业, 29(5): 40~44.
- 戴鸿鸣,黄东,刘旭宁,杨毅,贺雪萌,彭海润,童俊文. 2008. 蜀南西南地区海相烃源岩特征与评价. 天然气地球科学, 19(4): 503~508.
- 戴金星,吴少华,郑汉璇,等. 1986. 天然气地质学. 北京:石油工业出版社,18~25.
- 董大忠,程克明,王世谦,吕宗刚. 2009. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用. 天然气工业, 29(5): 33~39.
- 董大忠,邹才能,李建忠,王社教,李新景,王玉满,李登华,黄金亮. 2011. 页岩气资源潜力与勘探开发前景. 地质通报, 30(2~3): 324~336.
- 丰国秀,陈盛吉. 1988. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系. 天然气工业, 8(2): 20~25.
- 郝书生,高岗,王飞宇,刚文哲. 1996. 高过成熟海相烃源岩. 北京:石油工业出版社,126~127.
- 胡文瑞. 2009. 迎接页岩气发展的春天. 中国石油石化, (11): 15.
- 黄第藩,李晋超,张大江. 1984. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性. 沉积学报, 2(3): 18~33.
- 黄籍中. 2009. 四川盆地页岩气与煤层气勘探前景分析. 岩性油气藏, 21(2): 116~120.
- 黄玉珍,黄金亮,葛春梅,程克明,董大忠. 2009. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键. 天然气工业, 29(5): 7~10.
- 李建忠,董大忠,陈更生,王世谦,程克明. 2009. 中国页岩气资源前景与战略地位. 天然气工业, 29(5): 11~16.
- 李新景,胡素云,程克明. 2007. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示. 石油勘探与开发, 34(4): 392~400.
- 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇. 2009. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区. 天然气工业, 29(12): 115~118.
- 梁狄刚,郭彤彬,陈建平,边立曾,赵喆. 2009. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二):南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征. 海相油气地质, 14(1): 1~15.
- 刘洪林,王红岩,刘人和,赵群,林英姬. 2010. 中国页岩气资源及其勘探潜力分析. 地质学报, 84(9): 1374~1378.
- 刘丽芳,徐波,张金川,徐波,聂海宽. 2005. 中国海相页岩及其成藏意义. 见:中国科协 2005 学术年会论文集,以科学发展观促进科技创新(上). 北京:科学技术出版社, 457~463.
- 马力,陈焕疆,甘克文,徐克定,许效松,吴根耀,叶舟,梁兴,吴少华,邱蕴玉,章平澜,葛芃芃. 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质(上册). 北京:地质出版社, 1~200.
- 孟庆强,秦建中,刘文斌,胡文瑄,郑伦举. 2008. 多细胞宏观底栖藻类生烃特点实验研究. 石油学报, 29(6): 822~826.
- 聂海宽,唐玄,边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及我国南方页岩气发育有利区预测. 石油学报, 30(4): 484~491.

- 聂海宽, 张金川. 2010. 页岩气藏分布地质规律与特征. 中南大学学报(自然科学版), 41(2): 700~708.
- 聂海宽, 张金川, 李玉喜. 2011. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件. 石油学报, 32(6): 959~967.
- 秦建中, 申宝剑, 付小东, 陶国亮, 腾格尔. 2010. 中国南方海相优质烃源岩超显微有机岩石学与生排烃潜力. 石油与天然气地质, 31(6): 826~837.
- Schidlowski M. 1991. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值作为生物成因标志. In: 约翰斯 R B 主编. 沉积记录中的生物标志物. 王铁冠, 黄第藩, 徐丽娜, 译. 北京: 科学出版社, 205~213.
- 腾格尔, 高长林, 胡凯, 方成名, 吕俊祥, 翟常博, 张长江. 2007. 上扬子北缘下组合优质烃源岩分布及生烃潜力评价. 天然气地球科学, 18(2): 254~259.
- 涂建琪, 金奎励. 1999. 表征海相烃源岩有机质成熟度的若干重要指标的对比与研究. 地球科学进展, 14(1): 18~23.
- 王兰生, 邹春艳, 郑平, 陈盛吉, 张琦, 许斌, 李红卫. 2009. 四川盆地下古生界存在页岩气的地球化学依据. 天然气工业, 29(5): 59~62.
- 王社教, 王兰生, 黄金亮, 李新景, 李登华. 2009. 上扬子区志留系页岩气成藏条件. 天然气工业, 29(5): 45~50.
- 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999. 湘西震旦—寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件. 岩石学报, 15(1): 453~461.
- 薛会, 张金川, 刘丽芳, 卞昌蓉. 2006. 天然气机理类型及其分布. 地球科学与环境学报, 18(2): 53~57.
- 同存章, 黄玉珍, 葛春梅, 董大忠, 程克明. 2009. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源. 天然气工业, 29(5): 1~6.
- 张大伟. 2010. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想. 石油与天然气地质, 31(2): 135~139, 150.
- 张大伟. 2011. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径. 天然气工业, 31(5): 1~5.
- 张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布. 天然气工业, 24(7): 15~18.
- 张金川, 聂海宽, 徐波, 姜生玲, 张培先. 2008a. 四川盆地页岩气成藏地质条件. 天然气工业, 28(2): 151~156.
- 张金川, 汪宗余, 聂海宽, 徐波, 邓飞涌, 张培先, 殷毅, 郭华强, 林拓, 张琴, 张德明. 2008b. 页岩气及其勘探研究意义. 现代地质, 22(4): 640~646.
- 张金川, 徐波, 聂海宽, 汪宗余, 林拓. 2008c. 中国页岩气资源量勘探潜力. 天然气工业, 28(6): 136~140.
- 张金川, 边瑞康, 荆铁亚, 唐玄, 尹腾宇, 张琴, 朱华. 2011. 页岩气理论研究的基础意义. 地质通报, 30(2~3): 318~323.
- 张抗, 谭云冬. 2009. 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景. 当代石油石化, 17(3): 9~12.
- 张林晔, 李政, 朱日曜. 2008. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性. 天然气工业, 28(12): 26~29.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 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.
- 朱华, 姜文利, 边瑞康, 宋晓微, 姜生玲, 尹腾宇. 2009. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西拗陷为例. 天然气工业, 29(12): 130~134.
- Bowker K A. 2007. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: issues and discussion. AAPG Bulletin, 91(4): 523~533.
- Curtis J B. 2002. Fractured shale gas systems. AAPG Bull., 86(11): 1921~1938.
- Jacob H. 1985. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas. Erdol & Kohle Erdgas Petrochemie, 38(5): 365.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. AAPG Bulletin, 91(4): 475~499.
- Martineau D F. 2007. History of the Newark East field and the Barnett shale as a gas reservoir. AAPG Bulletin, 91(4): 399~409.
- Milici K C, Swezey C S. 2006. Assessment of Appalachian Basin Oil and Gas Resources: Devonian Shale Middle and Upper Paleozoic Total Petroleum System. Published 2006, Version 1.0 - Available online only. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1237/>.
- Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, Pollastro R M. 2005. Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas-shale play with multitrillion cubic foot potential. AAPG Bulletin, 89(2): 155~175.
- Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, Craig W A. 2007. Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bendarch Fort Worth basin, Texas. AAPG Bulletin, 91(4): 405~436.
- Ross D J K, Bustin R M. 2007. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 55(3): 51~75.
- Schmoker J W. 1981. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs. AAPG Bulletin, 65(7): 1285~1298.
- Shiley R H, Cluff R M, Dickerson D R, Hinckley C C, Smith G V, Twardowska H, saporoschenko M. 1981. Correlation of natural gas content to iron species in the New Albany shale group. Fuel, 60(8): 732~738.

Shale Gas Accumulation Conditions and Gas Content Calculation: A Case Study of Sichuan Basin and Its Periphery in the Lower Paleozoic

NIE Haikuan¹⁾, ZHANG Jinchuan²⁾

1) *Petroleum Exploration and Development Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083;*

2) *Energy Resource School, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083*

Abstract

Based on theory and condition of shale gas accumulation, shale gas accumulation factors in this study are classified into internal and external ones so as to better study accumulation conditions and calculation methods of gas content. The internal factors include geochemical parameters, mineral compositions and petrophysical parameters of shale, while the external factors include reservoir depth, temperature and pressure, etc. Geochemical analysis of 41 black shale samples from Lower Cambrian and Upper Ordovician and Lower Silurian strata in Sichuan basin and its surrounding area shows that mineral compositions, physical features, depth, temperature and pressure affect the shale gas contents and also reflect eight internal parameters (organic carbon, total hydrocarbon content, quartz content, clay minerals, porosity, density, pyrite and carbonate contents) which have important influence over shale gas accumulation. A formula of calculation for shale gas contents was obtained using the multivariate linear regression analysis between two parameters, six parameters, or eight parameters and gas content, and results based on this formula is in good agreement to in site measurement. The more parameters, the more precision. The study recommends that if conditions permitting, it is better to use more parameters to predict the shale gas content in order to achieve better results. It is also suggested that at the early stage of exploration, two leading parameters (organic carbon content and porosity) should be given priority to calculate the shale gas content.

Key words: shale gas; accumulation conditions; controlling factors; internal factors; external factors; Sichuan basin and its periphery