页岩气开采用水量影响因素分析*

贾婉琳[1,2]　曾 勇[1,2]　张强斌[1,2]　王新伟[1,2]

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院;2. 油气资源与探测国家重点实验室)

摘　要　不同页岩区块开采用水量差异显著。目前,关注页岩气开采用水量的研究多忽略了导致用水量差异的影响因素分析。文章选取中国、美国和加拿大 15 个典型页岩区块为样本,选取了影响用水量大小的相关指标,应用多元逐步回归分析和聚类分析方法定量分析影响因素之间的统计规律。逐步回归分析结果表明,厚度、孔隙度、黏土含量、水平段长度与页岩气开采用水量显著相关,其中表征压裂作业量大小的指标——厚度和水平段长度与用水量正相关;表征储层可改造性指标——孔隙度与用水量负相关,黏土含量与用水量正相关,根据回归方程可预测类似页岩气开采用水量。根据聚类分析谱系图,依据用水量大小、压裂作业量大小、储层可改造性难易程度的差异可以将 15 个页岩区块分为 3 类;聚类分析结果进一步验证了压裂作业量大小和储层可改造性是影响页岩气开采用水量的显著因素。

关键词　页岩气;用水量;影响因素;聚类分析;多元逐步回归分析

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.02.014　　**文章编号:** 1005-3158(2018)02-0046-05

0　引　言

页岩气是蕴藏于页岩层可供开采的典型非常规天然气资源,成分以甲烷为主,是一种环境友好、高效的能源资源和化工原料[1-3]。页岩气的开采是一个高密集型用水过程,短时间内消耗大量的水资源可能会对当地造成用水压力。根据美国能源部的统计[4],美国典型页岩气区块每口井平均总用水量为 10 000～15 000 m^3,其中用于水力压裂的水量占总用水量的 73%～98%。不同页岩气区块,页岩气开采用水量差异显著。Vandecasteele 等[5]调研 2010—2014 年现有文献,页岩气开采用水量 3 500～50 000 m^3/井,平均用水量 8 000～19 000 m^3/井。页岩气水资源影响因素可能与压裂水平段的深度、长度和数量、页岩区块的地质特征有关[6]。Guo 等[7]分别建立了涪陵、Marcellus 和 Barnett 地区水平段长度对开采用水量影响的回归模型,并得到了涪陵、Marcellus 和 Barnett 地区页岩气开采用水量的回归方程。

关于页岩气用水量影响因素的研究以定性分析为主,尚未对影响因素进行系统定量分析。本文针对目前研究存在的问题,通过文献调研收集样本,采用多元逐步回归分析、聚类分析对影响开采用水量因素进行定量化分析,探讨影响页岩气开采用水量的规律。

1　研究方法

1.1　研究方法框架

在页岩气开采影响因素的定量化分析研究中,首先通过文献调研逐步获取和掌握影响页岩气开采用水的机理和机制的相关信息,归纳总结影响开采用水量的相关因素、确定相关指标;通过文献调研方法获取样本数据,采用逐步回归分析和聚类分析方法对样本数据进行数理统计分析,结合专业知识对统计分析结果进行解读,最后得到相应的研究结论。

研究方法框架及流程如图 1 所示。

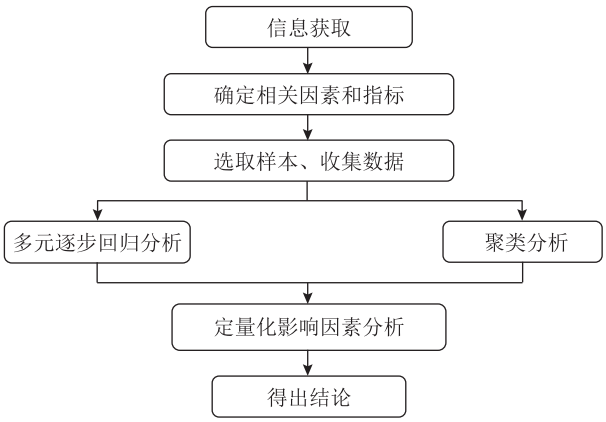

图 1　研究方法框架及流程

* 基金项目:"十三五"国家油气重大专项"页岩气等非常规油气开发环境影响评估与环境效益综合评价技术"(2016ZX05040-001)。

贾婉琳,中国石油大学(北京)2015 级在读硕士,研究方向:页岩气水资源承载力方面的研究。通信地址:北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地球科学学院,102249

1.2 多元逐步回归分析方法

采用多元线性回归方法，得出各要素间的数量依存关系，从而进一步揭示各要素间内在规律。本文采用多元逐步回归分析[8]选取对页岩气开采用水量影响显著的因素，获得页岩气开采用水量最优回归方程。数学模型为：

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_k X_k \quad (1)$$

其中，b_k 为偏回归系数；b_0 为常数项，表示当所有自变量为 0 时，因变量 $\hat{Y}$ 的总体平均值的估计值，回归项表示除 $b_k X_k$ 以外的其它自变量固定不变的情况下，每改变一个测量单位时所引起的因变量 $\hat{Y}$ 的平均改变量。

逐步回归法在向前引入每一个新自变量之后都要重新对之前已选入的自变量进行检查，以评价其有无继续保留在方程中的价值。为此引入和剔除交替进行，直至无统计学意义的新变量可引入、也无统计学意义的自变量可剔除时为止。本文进行逐步回归分析时，进入变量的显著性水平为 0.10，剔除变量的显著性水平为 0.10。

1.3 聚类分析方法

聚类分析是将样品或变量按照性质上的亲疏程度，划分成相对同质的群组或类别。每类内部的个体在特征上具有相似性，不同类间个体特征的差异性较大[9]。

采用欧氏距离对 15 个页岩区块的相关指标进行系统聚类分析。样本 x，y 之间的距离如公式(2)所示，G_q 两类之间的距离如公式(3)所示[8]：

$$d^2(x,y) = \sum_{i=1}^{k} (x_i - y_i)^2 \quad (2)$$

$$D_{pq}^2 = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{x_i \in G_p} \sum_{x_j \in G_q} d^2(x,y) \quad (3)$$

公式(2)中 x_i 为样本 x 的第 i 个变量的变量值，y_i 为样本 y 的第 i 个变量的变量值，$d^2(x,y)$ 是样本 x，y 之间的欧氏距离；公式(3)中 G_p，G_q 表示类 p 和类 q；n_p、n_q 分别表示 G_p，G_q 两类中的样本数，D_{pq}^2 为两类之间的距离。

2 研究结果与讨论

2.1 影响用水量指标选取

本文认为用水量影响因素包括：①压裂作业量大小：包括埋深、压裂水平段的深度、长度和数量等。②储层的可改造性：包括厚度、孔隙度、脆性矿物含量、黏土含量、TOC(Total Organic Carbon)等地质特征指标[10-11]。

各指标含义和对用水量的影响如表 1 所示。

通过文献调研与现场调查，国内外 15 个典型页岩气区块地质特征、水平段长度和用水量指标数据[12-21]见表 2。其中长宁、威远、昭通样本是通过现场调查获取。

表 1　指标分析

选取指标	指标含义	指标对用水量的影响
厚度	页岩的有效厚度，富含有机质页岩的厚度	厚度大是页岩储层具有充足储渗空间和有机质的保证，过小的页岩厚度将会影响压裂裂缝的效果，不利于储层改造，开采用水量大
孔隙度	岩体中孔隙体积与岩体体积的比值	孔隙度越高，有利于储层改造，压裂用水量越少
脆性矿物含量	脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂隙发育程度、含气性及压裂改造效果的重要因素。主要有石英、长石、黄铁矿等	含量高，天然裂缝较发育，在储层压裂改造中也容易产生较多的诱导裂缝，从而沟通基质孔隙和天然裂缝，可压性好
黏土含量	包括蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等，黏土含量对脆性具有负面影响	膨胀性黏土由于遇水膨胀作用，在压裂改造中会堵塞形成的新裂缝而不利于后期压裂改造
TOC	单位质量岩石中有机质的含量，是表征岩石中有机质相对丰度的重要参数	TOC 含量越高，储层成熟度越好，产能越高，利于水力压裂
埋深	页岩气埋藏深度	埋藏较深，有效孔隙度会随着深度减小，开采难度大
水平段长度	压裂改造时，影响压裂作业量，水平段长，作业量大	作业量越大，用水量越多

表 2 国内外典型页岩气区块气藏特征水平井长度和用水量

国家	页岩气田	厚度/m	孔隙度/%	脆性矿物含量/%	黏土含量/%	TOC/%	埋深/m	水平段长度/m	用水量/(m^3/井)
中国	涪陵	90.00	5.80	57.10	40.00	4.20	2 750.00	1 500.00	27 790.00
	长宁	40.00	4.50	63.60	43.00	3.00	2 750.00	1 600.00	33 270.00
	威远	45.30	4.10	63.95	38.00	3.20	3 250.00	1 650.00	32 573.00
	昭通	35.00	5.40	50.00	36.00	3.70	2 497.50	1 425.00	28 060.00
	富顺-永川	62.00	2.75	43.00	40.00	3.05	3 500.00	1 500.00	30 500.00
美国	Marcellus	38.00	10.00	59.85	50.00	7.00	1 752.50	1 300.00	17 568.00
	Barnett	65.00	5.00	45.00	35.00	4.50	2 287.50	779.00	11 450.00
	Haynesville	75.00	8.50	30.50	29.00	2.25	3 657.50	1 500.00	14 000.00
	Woodford	50.00	6.00	71.00	21.00	6.00	2 590.00	1 100.00	17 200.00
	Fayetteville	60.00	6.00	40.00	28.00	6.90	1 219.00	1 500.00	11 225.00
	Antrim	29.00	9.00	31.00	26.00	10.00	670.00	1 500.00	19 000.00
	Eagle Ford	50.00	8.00	87.00	7.50	5.00	2 550.00	1 600.00	19 250.00
加拿大	Horn River	150.00	4.70	62.00	30.00	3.25	2 750.00	1 650.00	16 700.00
	Montney	300.00	6.50	60.00	30.00	4.00	2 850.00	1 425.00	8 700.00
	Utica	195.00	7.00	65.00	24.00	3.00	2 050.00	1 500.00	13 000.00

国内外典型页岩气区块用水量如图 2 所示，从图 2 可以看出，中国页岩气开采用水量 27 790～33 270 m^3/井，美国页岩气开采用水量 11 225～19 250 m^3/井，加拿大页岩气开采用水量 8 700～16 700 m^3/井，中国页岩气开采用水量普遍高于美国和加拿大。

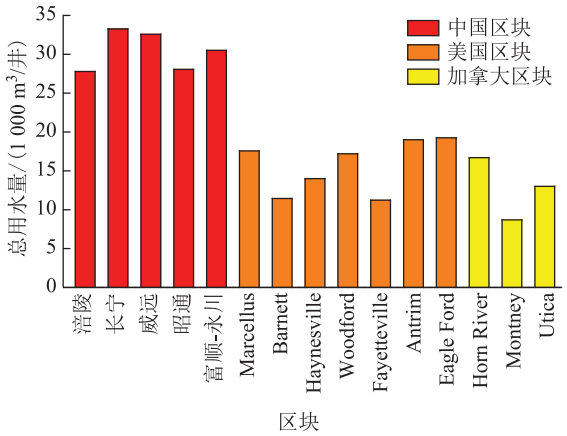

图 2 国内外典型页岩气区块总用水量

2.2 影响用水量的显著因素

对表 2 的样本数据进行逐步回归分析，其中的厚度、孔隙度、脆性矿物含量、黏土含量、TOC、埋深和水平段长度指标为自变量，用水量指标为因变量。用统计软件 SPSS 进行逐步回归分析，得到的最优回归方程为：

$$总用水量=6\ 249.604-82.114\times厚度-1\ 853.211\times孔隙度+16.501\times水平段长度+244.188\times黏土含量 \quad (4)$$

模型调整后的 R^2 为 0.707，表明自变量厚度、孔隙度、水平段长度和黏土含量能解释 70.7% 的用水量变化。对最优模型的方差分析如表 3 所示。最优模型的 F 统计量的 P 值为 0.002，小于 0.10，方差分析结果表明，在 $\alpha=0.10$ 水平下模型符合整体显著性要求。

最优模型方差分析见表 3。

表 3 最优模型方差分析

项目	平方和	自由度	均方
回归	758 266 182.844	4	189 566 545.711
残差	200 799 542.089	10	20 079 954.209
总计	959 065 724.933	14	

注：其中，F 值为 9.441；P 值为 0.002。

回归系数检验见表 4。由表 4 可知，最优模型中的 4 个自变量 P 值均小于 0.10，达到显著性水平，可认为厚度、孔隙度、黏土含量、水平段长度对总用水量

的线性回归关系有统计学意义。模型共线性诊断 VIF(Variance Inflation Factor)均小于 10，认为某一自变量与其余自变量之间不存在多重共线性，自变量相对独立，不会影响回归模型的解释能力。因此，最优模型能很好解释用水量变化，4 个指标构成的回归方程即为逐步回归的最优回归方程。

表 4　回归系数检验

模型	非标准化系数		标准系数 β 系数	T 检验	P 值	共线性统计	
	B 偏回归系数	标准误差				容许	VIF
常量	6 249.604	10 455.219		0.598	0.563		
厚度	−82.114	18.943	−0.741	−4.335	0.001	0.716	1.396
孔隙度	−1 853.211	632.185	−0.497	−2.931	0.015	0.727	1.375
水平段长度	16.501	5.270	0.456	3.131	0.011	0.986	1.014
黏土含量	244.188	120.564	0.304	2.025	0.070	0.928	1.077

从回归方程可看出，用水量和厚度、孔隙度呈负相关，和水平段长度、黏土含量成正相关。而厚度、孔隙度和黏土含量反映了气藏发育成熟度和储层的可改造性特征；水平段长度反映了压裂作业量大小。

在已知区块厚度、孔隙度、黏土含量、水平段长度时可以用此回归方程预测类似地区页岩气开采的用水量。

2.3 页岩气用水量特征分类结果

从逐步回归分析结果可知，用水量主要影响因素为气藏发育成熟度和储层的可改造性特征及压裂作业量大小。通过对样本进一步的聚类分析，将样本进行分类，分析各类的用水量特征和相关指标的差异，交叉验证用水量的影响因素。

聚类分析得出 15 个区块的聚类谱系图，结果见图 3。可将 15 个页岩区块分为 3 类。第一类：涪陵、昭通、长宁、威远、富顺-永川；第二类：Woodford、Horn River、Marcellus、Antrim、Eagle Ford；第三类：Barnett、Fayetteville、Utica、Haynesville、Montney。

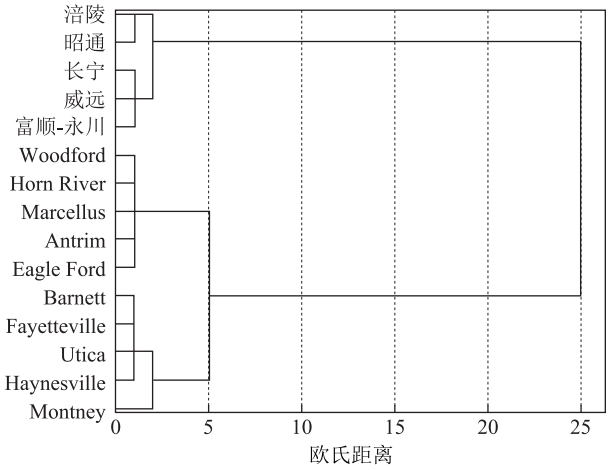

图 3　系统聚类方法得到的聚类谱系

对各类的相关指标进行比较分析，得到各类用水量主要特征，结果见表 5。

表 5　页岩气开采用水量类型

页岩类型	用水量	压裂作业量大小特征	储层可改造性特征	代表性区块
Ⅰ	用水量大 (27 790～33 270 m^3)	水平段长度长 (1 425～1 650 m)；厚度小；埋深深	孔隙度低；黏土含量高	涪陵、昭通、长宁、威远、富顺-永川
Ⅱ	用水量中等 (16 700～19 250 m^3)	水平段长度中等 (1 100～1 650 m)；厚度中等；埋深浅	孔隙度高；黏土含量低	Woodford，Horn River，Marcellus，Antrim，Eagle Ford
Ⅲ	用水量小 (8 700～14 000 m^3)	水平段长度短(779～1 500 m)；厚度大；埋深浅	孔隙度较高；黏土含量低	Barnett，Montney，Utica，Fayetteville，Haynesville

由表 5 可以看出：①第一类区块页岩气层发育较差，不利于进行储层改造，且水平井水平长度长，在开采过程中用水量大，将这种页岩气田命名为Ⅰ类页岩区块；②第二类区块页岩气层发育较好，可压性强，水平井长度较长，在开采过程中用水量较大，将这种页岩气田命名为Ⅱ类页岩区块；③第三类区块指标页岩气层发育较好，可压性强，水平井长度短，在开采过程中用水量较小，将这种页岩气田命名为Ⅲ类页岩

区块。

分类结果进一步验证了页岩气开发用水量的主要影响因素为页岩气层发育特征和储层可改造性及压裂作业量大小。

2.4 类似研究结果比较分析

Guo 等[7]提出了涪陵、Marcellus、Barnett 页岩区块的用水量和水平段长度的回归方程。将本文所建的回归方程和 Guo 等提出的回归方程的预测精度进行比较，将表 2 中涪陵、Marcellus 和 Barnett 的相关数据分别带入回归方程(4)与 Guo 建立的预测方程，得出用水量预测值，并计算相对误差，比较结果见表 6。

表 6 页岩气开采用水量预测检验

区块	实际用水量/(m^3/井)	预测值[1]/(m^3/井)	预测值[2]/(m^3/井)	相对误差[1]/%	相对误差[2]/%
涪陵	27 790	22 630	32 400	18.57	16.59
Marcellus	17 568	18 258	19 810	3.93	12.76
Barnett	11 450	13 047	12 989	13.95	13.44

注：1.(4)式计算结果；2.Guo 等得到的公式计算结果。

本文预测各区块的开采用水量平均误差为 12.15%，Guo 等预测的各区块开采用水量平均误差为 14.06%，说明本文建立的模型预测相对误差较小，预测页岩气开采用水量较为准确；对比模型的表达式，Guo 等的模型中只有水平段长度一个解释变量，本文有 4 个解释变量，本文所建模型的解释性较好。

3 结 论

在已有的影响页岩气开采用水量因素定性分析的基础上，收集中国、美国和加拿大 15 个典型页岩区块气藏特征、压裂作业量和总用水量数据，采用逐步回归分析和聚类分析定量化分析影响页岩气开采总用水量因素。

调研现有文献，选取储层可改造性指标——厚度、孔隙度、脆性矿物含量、黏土含量、TOC；压裂作业量大小指标——埋深、水平段长度，得到了各指标的含义及对用水量的影响机制，对影响因素进行分析。

逐步回归分析说明厚度、孔隙度、黏土含量、水平段长度与页岩气开采用水量有显著相关，并建立了与这 4 个指标相关的预测方程，根据回归方程，预测不同气藏特征地区页岩气开采用水量。与其他相关研究结果对比，该方程可解释性好、精度高，可应用于类似区域的用水量预测。

在逐步回归分析的基础上，对 15 个典型页岩区块进行聚类分析，得出 3 类可改造性和压裂作业量情况不同的区块。结合厚度、孔隙度、黏土含量、水平段长度 4 个指标对相似区块进行分析命名，Ⅰ类页岩区块储层可改造性差，压裂作业量大，开采难度最大，用水量最多；Ⅱ类页岩区块储层可改造性中等，压裂作业量中等，开采难度适中，用水量适中；Ⅲ类页岩区块储层可改造性好，压裂作业量小，开采难度最小，用水量最少。

参 考 文 献

[1] 邹才能，董大忠，王社教，等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发，2010，37(6)：641-653.

[2] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京：地质出版社，2011：13-78.

[3] 孙张涛，田黔宁，赵霞，等. 世界页岩气开发现状及对中国页岩气合理勘探开发的建议[J]. 国土资源情报，2015(7)：48-51.

[4] Office of fossil energy and national energy technology laboratory UDOE. Modern shale gas development in the United States: A primer[R]. Oklahoma: Ground water protection council, 2009.

[5] VANDECASTEELE I, RIVERO I M, SALA S, et al. Impact of shale gas development on water resources: A case study in northern poland[J]. Environmental management, 2015, 55(6): 1285-1299.

[6] 埃哲森. 水资源和页岩气开发[R]. 2013.

[7] GUO M, LU X, NIELSEN C P, et al. Prospects for shale gas production in China: Implications for water demand[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2016(66): 742-750.

[8] 李洪成. SPSS 18 数据分析基础与实践[M]. 北京：电子工业出版社，2010：34-66.

[9] 周全. 几种多元统计分析方法及其在生活中的应用[D]. 荆州：长江大学，2012：6-22.

[10] 杨海雨. 页岩储层脆性影响因素分析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2014：51-52.

[11] 裴森龙. 多级压裂技术在龙马溪组页岩中的适应性研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2013：16-29.

[12] 赵文光，夏明军，张雁辉，等. 加拿大页岩气勘探开发现状及进展[J]. 国际石油经济，2013，21(7)：41-46.

[13] ZOU Y, YANG C, WU D, et al. Probabilistic assessment of shale gas production and water demand at Xiuwu Basin in China[J]. Applied energy, 2016(180): 185-195.

(下转第 56 页)

表 8 标准样品测试结果

项目	Cr	As	Pb	Cd
保证值	66	12.9	22	0.175
扩展不确定度	4	0.5	1	0.010
实际测试结果/(mg/kg)	65.8	13.0	22.5	0.185

3 结 论

①在 HNO_3-H_2O_2-HF 混合无机酸体系下，可以通过微波消解方式对油田化学剂样品进行完全消解。

②电感耦合等离子体质谱法测定油田化学剂中 Cr、As、Cd、Pb 四种元素，该方法线性关系、检出限较好，精密度在 1.36%～7.84%，加标回收率在 88.5%～99.7%，经验证能够满足油田化学剂环保性能评价要求。

参 考 文 献

[1] 李秀珍，李斌莲，范俊欣，等. 油田化学剂和钻井液生物毒性检测新方法及毒性分级标准研究[J]. 钻井液与完井液，2004，21(6)：44-46.

[2] 马亮帮，葛颖. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定固体沥青中微量金属元素[J]. 岩矿测试，2013，32 (3)：441-444.

[3] 胡清源，李力，石杰，等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定烟草中 27 种元素[J]. 光谱学与光谱分析，2007，27(6)：1210-1213.

[4] 周勇义，谷学新，范国强，等. 微波消解技术及其在分析化学中的应用[J]. 冶金分析，2004，24(2)：30-36.

[5] 李冰，杨红霞. 电感耦合等离子体质谱原理和应用[M]. 北京：地质出版社，2005：144-147.

[6] 白金峰，刘彬，张勤，等. 碰撞池-电感耦合等离子体质谱法测定地球化学样品中钒和铬[J]. 冶金分析，2009，29(6)：17-22.

[7] 余兴. 电感耦合等离子体四级杆质谱碰撞/反应池技术现状与进展[J]. 冶金分析，2013，33(3)：14-23.

[8] 刘虎生，邵宏翔. 电感耦合等离子体质谱技术与应用[M]. 北京：化学工业出版社，2005：143-174.

[9] 邓勃. 应用原子吸收与原子荧光光谱分析[M]. 北京：化学工业出版社，2007：94.

[10] 程秀花，王海蓉，黎卫亮，等. 电感耦合等离子体质谱法测定硒时多元素干扰的碰撞/反应研究及其在地质样品中的应用[J]. 冶金分析，2015，35(12)：5-9.

[11] 谢华林. 微波消解电感耦合等离子体发射光谱法同时测定水产品中铅镉铬汞砷硒有害元素的研究[J]. 食品科学，2002，23(2)：108-110.

（收稿日期 2017-12-15）
（编辑 郎延红）

（上接第 50 页）

[14] GUERRA O J, CALDERON A J, PAPAGEORGIOU L G, et al. An optimization framework for the integration of water management and shale gas supply chain design[J]. Computers & chemical engineering, 2016(92)：230-255.

[15] 刘新，张玉玮，钟显东，等. 美国典型页岩油气藏水平井压裂技术[J]. 大庆石油地质与开发，2014，33(6)：160-164.

[16] ARTHUR J D, BOHM B K, COUGHLIN B J, et al. Evaluating the environmental implications of hydraulic fracturing in shale gas reservoirs[C], 2009.

[17] 张小龙，张同伟，李艳芳，等. 页岩气勘探和开发进展综述[J]. 岩性油气藏，2013，25(2)：116-122.

[18] 杨振恒，韩志艳，李志明，等. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示[J]. 石油与天然气地质，2013，34(4)：463-470.

[19] 杨海雨. 页岩储层脆性影响因素分析[J]. 资源导刊·地球科技版，2015(7)：50-54.

[20] 伍坤宇，张廷山，杨洋，等. 昭通示范区黄金坝气田五峰—龙马溪组页岩气储层地质特征[J]. 中国地质，2016(1)：275-287.

[21] 王淑芳，董大忠，王玉满，等. 中美海相页岩气地质特征对比研究[J]. 天然气地球科学，2015，26(9)：1666-1678.

（收稿日期 2017-11-24）
（编辑 王 薇）