

# 基于多元统计方法的油气成藏关键因素筛选与分析

## ——以江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏为例

彭伟<sup>1</sup>, 黄华<sup>1</sup>, 杜学斌<sup>2,3</sup>, 张成<sup>2,3</sup>, 何云龙<sup>2,3</sup>, 李宸<sup>2,3</sup>, 赵珂<sup>2,3</sup>, 杨盼<sup>2,3</sup>

(1. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 武汉 430223; 2. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074;  
3. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 岩性油藏是江汉盆地江陵凹陷未来油气勘探的重要领域, 但其成藏控制因素尚未进行系统研究。基于多元统计方法开展了岩性油藏成藏控制因素筛选分析, 提出储层条件是江陵凹陷古近系新沟嘴组岩性油藏成藏的关键因素。江陵凹陷新沟嘴组沉积期处于咸化湖盆沉积环境, 硬石膏胶结物含量对新沟嘴组岩性油藏砂岩储层致密化起到主要控制作用。其中, 硬石膏胶结物含量达 7.5% 是储层物性的临界值, 当含量小于 7.5% 时物性好, 当含量大于 7.5% 时储层物性变差明显, 测井解释偏干。可利用古水深与硬石膏含量的关系, 划分有利储层的分布。

**关键词:** 多元统计; 岩性油藏; 油气成藏; 新沟嘴组; 古近系; 江陵凹陷; 江汉盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## Analysis of main controls of stratigraphic reservoirs in Xingouzui Formation of Jiangling Sag based on a multivariate statistical method

PENG Wei<sup>1</sup>, HUANG Hua<sup>1</sup>, DU Xuebin<sup>2,3</sup>, ZHANG Cheng<sup>2,3</sup>,

HE Yunlong<sup>2,3</sup>, LI Chen<sup>2,3</sup>, ZHAO Ke<sup>2,3</sup>, YANG Pan<sup>2,3</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute, Jianghan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. School of Oceanology, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;  
3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Stratigraphic reservoirs are important areas for future oil and gas exploration in the Jiangling Sag of Jianghan Basin, but their hydrocarbon accumulation controls have not been systematically studied. Based on a multivariate statistical method, some key controls of stratigraphic reservoir formation were analyzed. It was proposed that reservoir conditions were the key factors for reservoir formation in stratigraphic reservoirs in the Paleogene Xingouzui Formation in the Jiangling Sag. When the Xingouzui Formation was deposited, the Jiangling Sag was a salt lake basin. The anhydrite cement content played a major role in controlling sandstone densification in stratigraphic reservoirs in the Xingouzui Formation. The anhydrite cement content of 7.5% is a critical value of reservoir physical properties. When the content is less than 7.5%, the physical properties are good. When the content is more than 7.5%, the reservoir physical properties are obviously deteriorated, and the logging interpretation indicates no petroleum resource. The relationship between paleo water depth and anhydrite content can be used to classify the distribution of favorable reservoirs.

**Key words:** multivariate statistics; stratigraphic reservoir; hydrocarbon accumulation; Xingouzui Formation, Paleogene; Jiangling Sag; Jianghan Basin

江陵凹陷位于江汉盆地西部, 是江汉盆地面积最大的沉积凹陷, 也是除潜江凹陷外江汉盆地最主要的富油凹陷, 勘探面积 6 500 km<sup>2[1-6]</sup>。目前江陵凹陷探明石油地质储量 1 948.39 × 10<sup>4</sup> t, 资源探明

率仅为 20.8%, 在潜江凹陷勘探程度高、难度大的情况下, 江陵凹陷的勘探更为重要和迫切。近年来江陵凹陷岩性油藏勘探不断取得发现, 已成为江陵凹陷油气勘探和增储上产的重要领域, 但其成藏规

收稿日期: 2018-10-25; 修订日期: 2019-02-21。

作者简介: 彭伟(1984—), 男, 硕士研究生, 工程师, 能源地质工程专业。E-mail: pwandwh@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05027-001)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB239102)、中国石油化工股份有限公司重大专项攻关课题(2DP17009)和中国石油化工股份有限公司项目(P15120)联合资助。

律的研究和认识程度仍然较低,尤其是对岩性油气藏控制因素尚未开展系统研究,制约了岩性油藏的勘探进程<sup>[7-13]</sup>。本文借助多元统计手段,对相关控制因素进行了因子分析,筛选出主要的控制因子进行进一步的讨论,提出在相近成藏条件下,江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏受储层物性控制,而储层中硬石膏胶结物的含量是控制物性好坏的主要因素。

### 1 地质概况

江陵凹陷以新太古界—新元古界变质岩和震旦系—侏罗系沉积岩为基底,自下而上依次为白垩系红花套组、渔洋组,古近系沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组,新近系广华寺组及第四系平原组(图 1),其主力含油层系是新沟嘴组。受区域构造控制,凹陷构造格局具有隆洼相间的特点

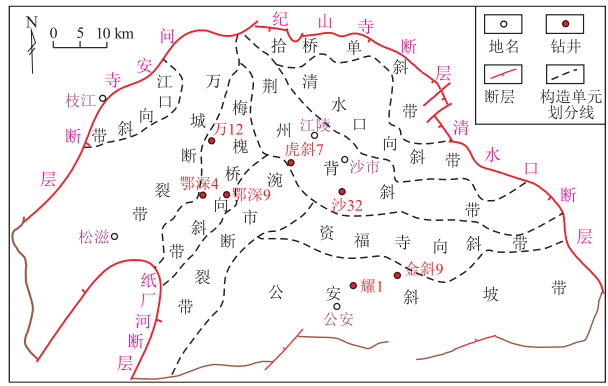


图 2 江汉盆地江陵凹陷构造单元划分

Fig.2 Structural units of Jiangling Sag, Jiangnan Basin

(图 2),平面上划分为 5 个正向构造单元(荆州背斜带、万城断裂带、公安斜坡带、浠市断裂带、拾桥单斜带)和 4 个负向构造单元(梅槐桥向斜带、资福寺向斜带、清水口向斜带、江口向斜带)。

新沟嘴组沉积期具有“盆缓、水浅、咸化、源远”特征,形成了江陵凹陷独特的“浅水—盐湖沉积体系”<sup>[14-19]</sup>。沉积体系主要以浅水三角洲和湖相为主,在盆内同沉积断层前缘偶见湖底扇沉积体系;整体水介质的古盐度较高,膏盐大量发育,深刻影响了沉积—成藏过程。

### 2 岩性油藏成藏主控因素

#### 2.1 成藏基本特征

烃源岩是油气成藏的物质基础,优质烃源岩大面积分布是成藏的关键<sup>[20-21]</sup>。江陵凹陷主力烃源岩为新沟嘴组下段,从有机质丰度指标看,垂向上有利烃源岩主要分布在新下段 II 油组,其有机碳含量平均为 1.68%,氯仿沥青“A”含量平均为 0.245 8%,生烃潜量平均为 5.29 mg/g,总体评价为中等—好烃源岩(表 1)。

江陵凹陷新沟嘴组主要发育 3 种类型储集体:三角洲前缘型、滩坝砂型和湖底扇型储集体(图 3)。三角洲前缘型储集体发育最广泛,是江陵凹陷北部物源形成的三角洲向浅水湖盆大规模推进的产物;滩坝砂型储集体是湖浪作用改造三角洲砂体的产物<sup>[4, 19, 22-23]</sup>;湖底扇型储集体是三角洲砂体向湖盆中心推进在同沉积断层前缘发育的产物。总体上,这 3 类储集体粒度较细,以粉细砂岩为主,少量达到中—粗粒砂岩级别。储层类型上,不同沉积类型储集体的物性也具有较大差别。三角洲前缘相砂体中等孔隙度样品所占比例明显高于其他 2 类,可达 45%;中等渗透率所占比例也明显高于其他 2 类,近 40%,孔渗平均值较大,物性最好。滩

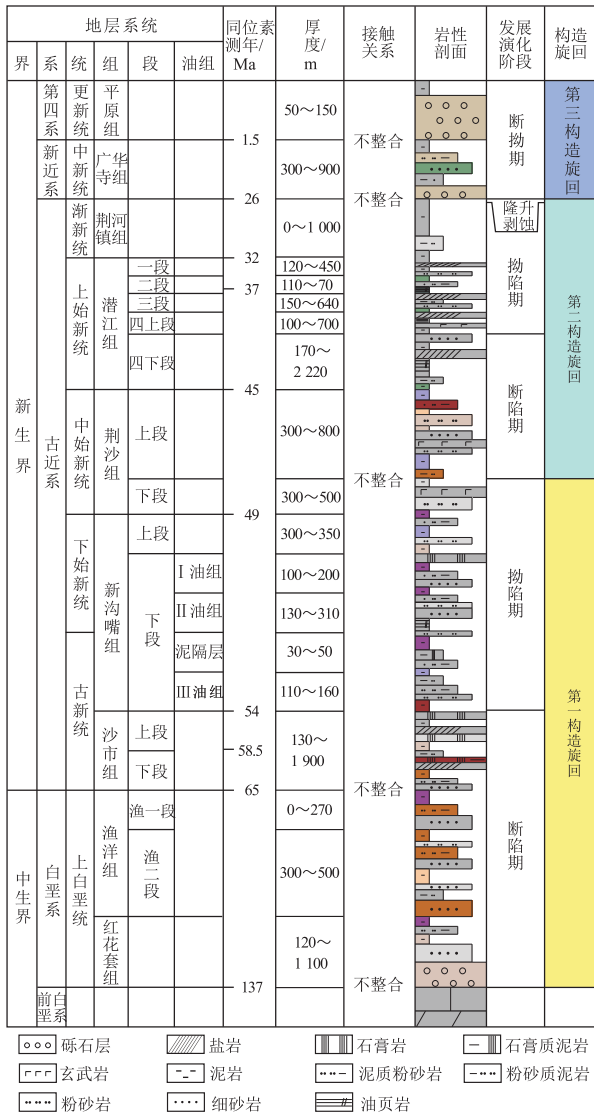


图 1 江汉盆地江陵凹陷地层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive column of strata in Jiangling Sag, Jiangnan Basin



表1 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组下段不同油组烃源岩指标对比

Table 1 Comparison of source rocks of different oil groups in the lower member of Xingouzui Formation, Jiangling Sag, Jiangnan Basin

油组	样品数/ 个	w(TOC)/ %	氯仿沥青“A”/ %	(S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> )/ (mg·g <sup>-1</sup> )	各烃源岩占比/%		
					中等	好	很好
I	136	0.71~0.76/0.74	0.012~0.055/0.032	1.28~5.65/3.12			
II	381	0.6~3.66/1.68	0.051 2~0.981/0.246	2.23~14.62/5.29	45	47	8
III	97	0.62~2.02/1.14	0.052~0.442/0.141	2.73~5.66/3.77	54	43	3

注:表中数值意义为:最小值~最大值/平均值;烃源岩评价标准为:0.6% < w(TOC) ≤ 1%中等, 1% < w(TOC) ≤ 2%好, w(TOC) > 2%很好。

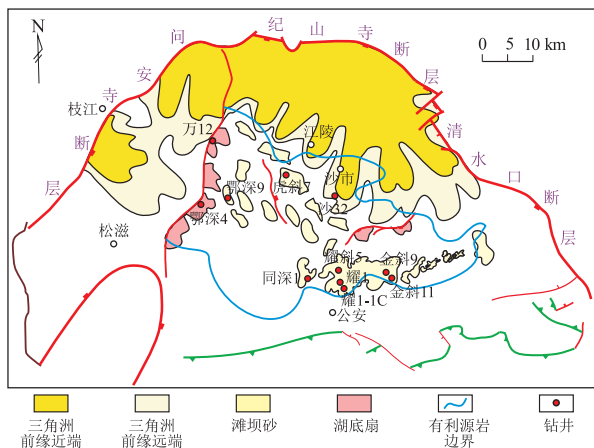


图3 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组有利烃源范围与沉积相叠合图

Fig.3 Overlap of favorable hydrocarbon source and sedimentary facies of Xingouzui Formation in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

坝砂和湖底扇砂体孔渗性相差不大,总体物性较差,大多处于特低孔特低渗—低孔低渗之间(图4)。

江陵凹陷新沟嘴组地层现今压力系数大多介于1.0~1.2之间,表现为弱超压。弱超压主要分布在洼陷中心,表明地层超压以生烃增压为主。从恢

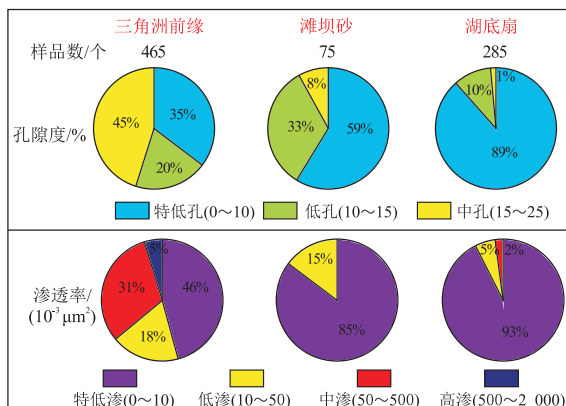


图4 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组主要储层类型

Fig.4 Main reservoir types of Xingouzui Formation in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

复的古压力来看,古超压范围主要分布在梅槐桥洼陷和资福寺洼陷,从压力系统与油藏平面叠置图(图5)看,超压区到常压区油藏均有分布,但油藏类型明显不同,构造—岩性和岩性油藏主要分布在超压区或者超压—常压过渡区,构造类油藏主要分布在常压区。分析认为主要是与储层类型有关,岩性类油藏在烃源区主要以滩坝和坡折砂储层类型,

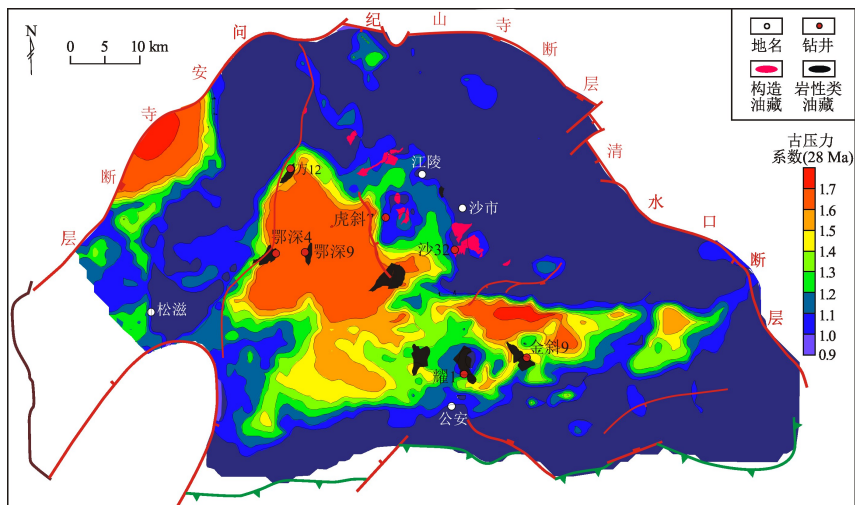


图5 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组下段古压力系数(28 Ma)与油藏类型叠合图  
Fig.5 Superposition diagram of reservoir type and paleopressure coefficient (28 Ma) of the lower member of Xingouzui Formation, Jiangling Sag, Jiangnan Basin

砂体侧向连通性差,油气难以远距离运移,呈近源成藏,平面上岩性油藏具有环超压区(生烃洼陷)分布的特征。构造类油藏主要以三角洲砂岩储层为主,呈指状延伸至烃源区,往常压区储层变厚、物性变好,易于油气大规模侧向运移。

### 2.2 主控因素提取方法

江陵凹陷岩性油藏按储层类型可划分为湖底扇型、三角洲前缘砂体型和滩坝砂体型 3 类。总的来讲,储层的孔渗性都较差,属于低孔低渗—特低孔特低渗型。毋庸置疑,生、储、盖、圈、运、保共同决定了岩性圈闭成藏与否及其规模大小,但是很难确定哪些因素具有实质性的主导作用。本次研究尝试利用多元统计分析方法(SPSS 软件),通过因子分析和多元线性回归,查明岩性油藏的主控因素<sup>[24-26]</sup>。

因子分析法的基本思想是找到能控制所有变量的几个随机变量,从而描述多个变量之间的相关性,并以相关关系的亲疏进行聚类,使得每一类变量之间相关性较高,而类间变量的相关性很低。每一类变量实际上就是一个基本结构,也就是公共因

子。因子分析的一般数学模型为:

$$x_m = a_{m1}F_1 + a_{m2}F_2 + \dots + a_{mn}F_n + \varepsilon_m$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为实测变量; $a_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 为因子荷载; $F_1, F_2, \dots, F_n$ 为公共因子; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$ 为特殊因子;它们都是不可观测的随机变量。

因子分析有 4 个基本步骤:(1) 确认待分析的原有变量是否适合作因子分析;(2) 构造因子变量;(3) 利用旋转方法使因子变量更具有可解释性;(4) 计算因子变量得分。

本文选取江陵凹陷已发现不同构造位置的 9 个岩性类油藏进行主控因子分析,统计油藏参数涉及到的油气成藏静态要素和动力条件方面的参数共 12 个,明确岩性油藏含油高度的主控因素(表 2)。

### 2.3 提取结果分析

运用主成分分析提取法从上述 12 个地质因素中挑选 10 个主要地质因素进行因子分析(表 3a),并将其整体归类为  $F_1$ (第一公因子)与  $F_2$ (第二公因子)。第一公因子  $F_1$  能解释 46.409% 样本的信

表 2 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏主控因素分析参数统计

Table 2 Main controls of stratigraphic reservoirs in Xingouzui Formation, Jiangling Sag, Jiangnan Basin

油田	油藏	地层	油藏高度/m	埋藏深度/m	平均有机碳/%	镜质体反射率/%	烃源岩厚度/m	孔隙度/% ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	渗透率/ $\mu\text{m}^2$	砂岩厚度/m	粒度中值/ $\mu\text{m}$	碳酸盐含量/%	分选系数	与排烃中心平面距离/km	与排烃中心垂直距离/m
金家场	同升 1	Ex <sup>下</sup>	600	2 700	0.87	1.00	158	12.0	8.00	3.8	58.50	5.7	1.93	10.2	0
金家场	金斜 11	Ex <sup>下</sup>	400	2 450	0.80	0.94	145	10.1	3.12	3.2	59.10	4.3	1.86	7.4	150
金家场	金斜 9	Ex <sup>下</sup>	700	2 750	0.80	0.94	138	14.1	7.46	4.7	63.80	2.2	1.69	7.4	0
金家场	耀 1	Ex <sup>下</sup>	850	2 525	0.80	0.94	136	15.0	17.90	4.2	58.90	6.1	1.72	9.0	200
金家场	耀斜 5	Ex <sup>下</sup>	600	2 500	0.80	0.94	148	13.9	10.20	2.5	77.50	11.1	1.54	9.0	0
金家场	耀 1-1C	Ex <sup>下</sup>	100	2 550	0.80	0.94	141	14.5	5.60	2.9	61.60	5.5	1.91	9.0	100
南岗	鄂深 9	Ex <sup>下</sup>	275	2 937.5	1.04	1.00	210	9.6	1.20	6.1	57.47	4.6	2.25	7.5	0
谢凤桥	鄂深 4	Ex <sup>下</sup>	87.5	3 447.5	0.81	1.21	250	8.9	0.86	6.5	90.96	2.1	2.06	7.7	0
万城	万 12	Ex <sup>下</sup>	220	3 850	0.93	1.40	260	10.6	3.20	7.6	87.31	2.3	2.15	5.3	0

表 3 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏含油高度控制因素公因子提取及因子旋转参数统计

Table 3 Extraction and rotation table of main controlling factors of stratigraphic reservoirs in Xingouzui Formation in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

公因子方差			解释的总方差				旋转成分矩阵		
变量	初始	提取	成分	旋转平方和载入			变量	成分	
				合计	方差的百分比	累计百分比		$F_1$	$F_2$
埋藏深度	1.000	0.894	$F_1$	4.641	46.409	46.409	埋藏深度	0.942	-0.076
平均有机碳	1.000	0.767	$F_2$	2.993	29.934	76.343	平均有机碳	0.751	-0.451
镜质体反射率	1.000	0.920					镜质体反射率	-0.325	0.902
烃源岩厚度	1.000	0.902					烃源岩厚度	0.909	-0.274
孔隙度	1.000	0.750					孔隙度	-0.273	0.822
渗透率	1.000	0.746					渗透率	0.197	0.841
砂体厚度	1.000	0.758					砂体厚度	0.578	-0.651
分选系数	1.000	0.938					分选系数	0.950	-0.187
与排烃中心平面距离	1.000	0.661					与排烃中心平面距离	-0.808	-0.089
与排烃中心垂直距离	1.000	0.298					与排烃中心垂直距离	-0.504	0.211

a.主成分提取

b.公共因子提取

c.因子旋转

息,第二公因子  $F_2$  可以解释 29.934% 样本的信息, 2 个公因子累计可以解释 76.343% 样本的信息(表 3b), 因此可以认为公因子  $F_1$  和  $F_2$  控制了岩性油藏的发育。但公因子  $F_1$  和  $F_2$  在地质模型中并不具备实际含义, 不利于解释岩性油藏的控制因素, 而在因子分析法中, 当各公共因子对于原始指标的反映不明显时, 可利用因子旋转法, 得到互不相关的公共因子, 来分散公共因子的贡献, 也就是用第一公共因子解释一部分变量, 第二公共因子解释另一部分变量, 依次类推, 使每个公共因子有实际含义, 有助于分析与解释(表 3c)。

从岩性油藏含油高度主要因素的第 1、2 载荷平面图上可以看出(图 6), 与第 1 公因子相关的参数为烃源类表征参数(红色圈内)和运移类表征参数(绿色圈内), 与第 2 公因子相关的参数为储层类表征参数(紫色圈内), 综合分析认为江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏具有烃源、压力、储层“三元”控

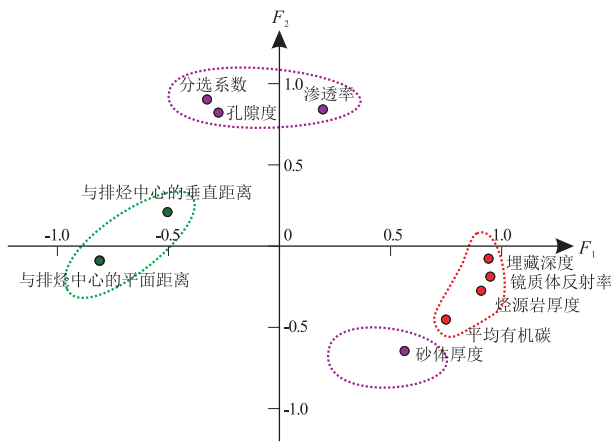


图 6 江汉盆地江陵凹陷岩性油藏含油高度主控因素的第 1、2 公因子载荷平面图

Fig.6 Load plan of the first and second common factors for the main controlling factors of the oil-bearing height of stratigraphic reservoirs in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

变量	成分		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
碳酸盐胶结物	0.868	0.093	0.064
石膏	-0.813	-0.313	0.06
次生加大	-0.02	0.243	0.599
黏土矿物	0.048	0.639	0.392
其他矿物	-0.255	-0.488	-0.072
石英	-0.062	0.886	0.035
长石	-0.308	-0.581	-0.618
岩屑	-0.094	-0.014	-0.901
杂基	0.67	-0.318	0.447

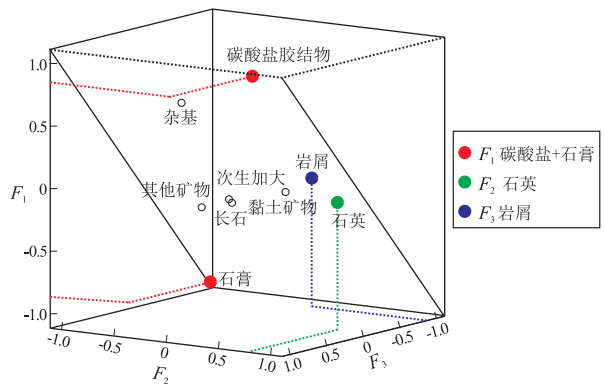


图 7 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组储集层物性主控因素因子旋转结果及因子载荷图

Fig.7 Rotation and loading of main controls of reservoir physical properties of Xingouzui Formation in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

制的特征。目前研究已证实江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏具有“近源、环洼”的聚集特征, 因此在烃源条件和运聚条件相对明确的情况下, 储层条件的认识对于岩性油藏勘探显得更为迫切。

### 3 储层物性主控因素筛选

为了查明储层物性主控因素, 本文选取与上述油藏关联的 8 口单井进行薄片鉴定及物性资料统计, 探究影响储层物性的主要因素, 即主控成分。储层物性主控因素分析中涉及到的相关参数包括石英、长石和岩屑等 3 个碎屑颗粒含量参数(沉积参数)以及碳酸盐胶结、硬石膏胶结、杂基、次生加大和黏土矿物等 5 个填隙物含量参数(成岩参数)。遵循同样的原则, 对数据进行基于主成分的因子分析, 归类得到 3 个公共因子, 并利用因子旋转法获得不同参数对公共因子的贡献, 从而得到砂岩物性影响因子载荷图(图 7)。

$F_1$  为主要的控制因子, 代表“碳酸盐和硬石膏胶结作用”, 主要控制岩性油藏储层的孔渗性; 次之为  $F_2$  “石英碎屑颗粒含量”, 再为  $F_3$  “岩屑颗粒含量”(图 7)。即碳酸盐和硬石膏的胶结作用是影响研究区储集层物性的主要因素。因此, 在储层物性条件分析中, 需主要考虑碳酸盐和硬石膏的胶结作用。

### 4 储层物性微观机制分析

江陵凹陷新沟嘴组成岩作用明显受沉积水介质性质的控制, 成岩特征呈现出咸水介质富碳酸盐胶结与盐湖富硬石膏胶结特征<sup>[27]</sup>。通过对新沟嘴组砂岩储层胶结物含量与孔隙度关系统计发现, 碳酸盐和硬石膏胶结物对岩性油藏储层物性起关键作用, 物性随胶结物含量增加而降低(图 8a, b)。这主要受江陵凹陷新沟嘴组岩性油藏“近源、环洼”特征所决定, 岩性油藏靠近生烃中心, 埋深较

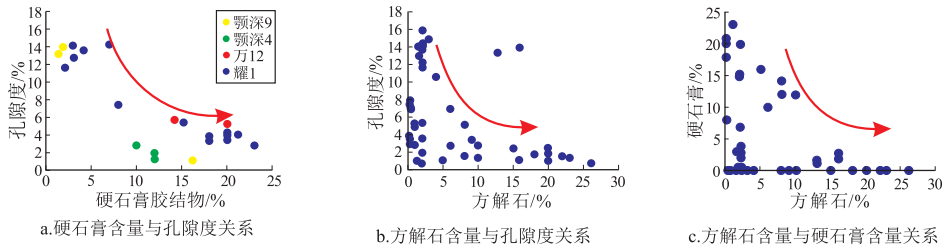


图8 江汉盆地江陵凹陷碳酸盐胶结物、硬石膏胶结物与物性的关系对比

Fig.8 Relationships among carbonate cements, anhydrite cements and physical properties in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

大(基本大于2 500 m),砂岩储层中原生孔隙保存较少,在成岩过程中,碳酸盐和硬石膏的胶结作用使得储层进一步致密化。

通过碳酸盐及硬石膏胶结物含量与储层物性的对比分析表明,硬石膏对物性影响更为明显<sup>[28]</sup>。以耀1井滩坝砂岩性油藏为例(图9),同一套储层上下物性表现出明显的差异,在碳酸盐胶结物含量变化不大(5.5%~8%)的情况下,硬石膏胶结物含量变化(2%~23%)对储层物性起到主要控制,硬石膏含量较高时储层明显致密化,不利于油气聚集。进一步研究发现,碳酸盐(方解石)和硬石膏含量此消彼长,呈明显的负相关关系(图8c),这也反映了两者之间的成因联系。研究认为油气生成和运移过程中形成的酸性流体溶蚀碳酸盐胶结物,

产生了大量的钙离子(Ca<sup>2+</sup>),同时江陵凹陷新沟嘴组地层水以硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)型为主<sup>[25]</sup>,造成了地层水中硫酸钙的局部富集,形成石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)沉淀在溶蚀孔隙中,并脱水形成硬石膏填隙物致密化储层。

总体来看,硬石膏胶结对于砂岩储层次生孔隙发育不利,但硬石膏胶结过程中碳酸盐发生了溶蚀,又在一定程度上增加了储层孔隙度。研究表明硬石膏的发育对储层物性的影响具有双重作用,硬石膏含量在一定范围内往往对应相对较高的孔隙度。根据油水干物性图版(图9)以及硬石膏胶结物含量与孔隙度的关系散点图(图10)得出,硬石膏胶结物含量7.5%是储层物性临界值,当含量大于7.5%时,储层物性偏干。

江陵凹陷新沟嘴组沉积时期具有咸化湖盆沉积特征,其成岩过程受控于成岩早期古湖盆的水介质条件<sup>[27]</sup>,在湖盆水体分层效应的影响下,水介质条件(盐度)与湖盆水体深度密切相关。本次研究

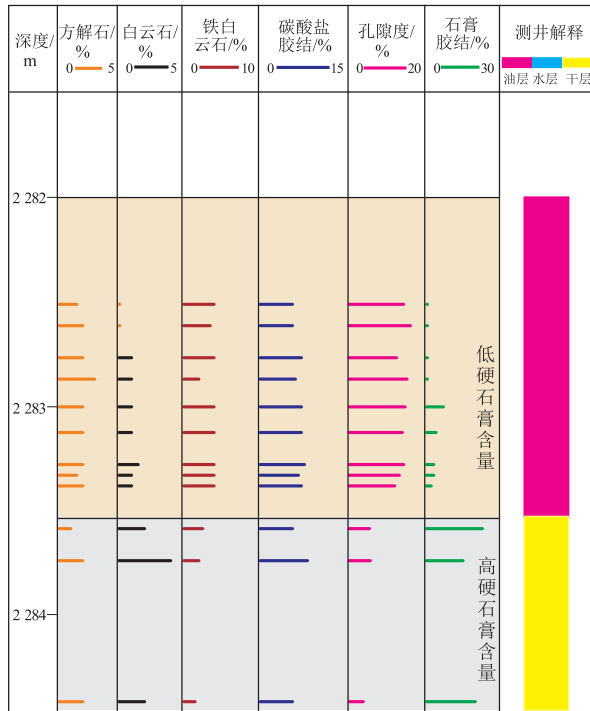


图9 江汉盆地江陵凹陷耀1井滩坝砂岩性油藏砂岩储层胶结物含量与孔隙度关系

Fig.9 Relationship between cement content and porosity of beach dam sandstone reservoirs in well Yao 1, Jiangling Sag, Jiangnan Basin

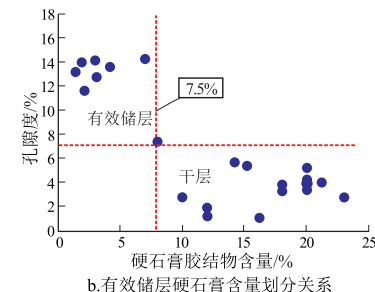
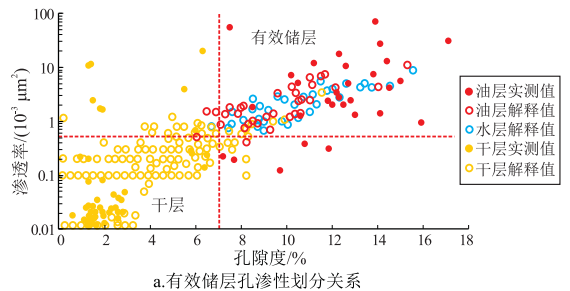


图10 江汉盆地江陵凹陷有效储层硬石膏含量与孔隙度关系

Fig.10 Relationship between anhydrite content and porosity of effective reservoirs in Jiangling Sag, Jiangnan Basin

表4 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组下段II油组胶结物含量与古水深变化趋势的关系

Table 4 Relationship between the cement content of II oil group and the change trend of paleo-water depth in the lower section of Xingouzui Formation, Jiangling Sag, Jianghan Basin

井名	层位	古水深/m	方解石/%	硬石膏/%
沙32井	II油组	12.2	8.0	1.0
金斜9井	II油组	16.0	4.0	6.0
虎斜7井	II油组	18.2	0.5	15.0

也发现同一层位硬石膏胶结物含量随古水深增加呈增大趋势(表4)。因此下步可开展研究古水深控制下的硬石膏胶结物含量分析,大致确定硬石膏含量高值带和低值带,进而确定次生孔隙发育带和有利储层发育区。

## 5 结论

在源生烃条件和原油的运聚条件相近的情况下,通过多元统计手段分析后,认为江陵凹陷新沟嘴组岩性油气藏受储层物性条件控制,而决定储层物性条件的主要因素是硬石膏胶结物和方解石胶结物,硬石膏含量小于7.5%左右时,最有利次生孔隙发育,而形成相对高孔渗带,因此可以根据硬石膏的含量来进行有利储层发育区预测。

### 参考文献:

[1] 杨长清,陈孔全,程志强,等.江陵凹陷形成演化与勘探潜力[J].天然气工业,2003,23(6):51-54.  
YANG Changqing, CHEN Kongquan, CHENG Zhiqiang, et al. Constituent evolution and exploration potential in Jiangling Depression[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(6): 51-54.

[2] 戴少武.江汉盆地印支期以来区域构造特征探讨[J].地质力学学报,1996,2(4):80-84.  
DAI Shaowu. Discussion on the regional structural features of Jianghan Basin since the Indosinian Movement[J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(4): 80-84.

[3] 刘俊,卢明国,童小兰,等.江陵凹陷构造演化与含油气系统关系研究[J].地球学报,2008,29(1):89-94.  
LIU Jun, LU Mingguo, TONG Xiaolan, et al. Correlation between structure evolution and petroleum system of the Jiangling Depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(1): 89-94.

[4] 刘云生,罗劲,黄华,等.江汉盆地江陵凹陷南部斜坡带新沟嘴组下段滩坝成因及控制因素[J].中国石油勘探,2016,21(3):92-98.  
LIU Yunsheng, LUO Jin, HUANG Hua, et al. Beach bar genesis of the lower member of Xingouzui Formation in the southern slope zone of Jiangling Sag, Jianghan Basin, and its controlling factors[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 92-98.

[5] 王必金,林畅松,陈莹,等.江汉盆地幕式构造运动及其演化

特征[J].石油地球物理勘探,2006,41(2):226-230.

WANG Bijin, LIN Changsong, CHEN Ying, et al. Episodic tectonic movement and evolutionary character in Jianghan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(2): 226-230.

[6] 王必金.江汉盆地构造演化与勘探方向[D].北京:中国地质大学(北京),2006.  
WANG Bijin. The structural evolution and favorable exploration areas in Jianghan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.

[7] 田继军,姜在兴,陈振林,等.江陵凹陷新沟嘴组下段砂岩成岩作用及孔隙演化[J].石油地质与工程,2007,21(4):1-4.  
TIAN Jijun, JIANG Zaixing, CHEN Zhenlin, et al. Diagenesis and pore evolution of the lower member of Xingouzui Formation sandstone in Jiangling Depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(4): 1-4.

[8] 高楠安,陈金荣.江陵凹陷油气成藏主控因素及勘探方向[J].江汉石油职工大学学报,2012,25(2):4-7.  
GAO Nanan, CHEN Jinrong. Key factors controlling hydrocarbon accumulation in Jiangling Depression and corresponding exploration orientation[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2012, 25(2): 4-7.

[9] 曾溅辉,杨智峰,冯泉,等.致密储层油气成藏机理研究现状及其关键科学问题[J].地球科学进展,2014,29(6):651-661.  
ZENG Jianhui, YANG Zhifeng, FENG Xiao, et al. Study status and key scientific issue of tight reservoir oil and gas accumulation mechanism[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 651-661.

[10] 陈金荣,施昭彤,黄华,等.江陵凹陷不同期次断层与油气成藏的关系[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2014,36(7):27-31.  
CHEN Jinrong, SHI Zhaotong, HUANG Hua, et al. The relationship between faults and hydrocarbon accumulation at different stages in Jiangling Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2014, 36(7): 27-31.

[11] 黄华,袁娟梅.江陵凹陷荆州背斜带形成演化及成藏特征[J].断块油气田,2013,20(3):301-304.  
HUANG Hua, YUAN Juanmei. Evolutionary process and accumulation feature of Jingzhou anticlinal belt in Jiangling Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(3): 301-304.

[12] 罗开平,邱歧,叶建中.江汉盆地江陵凹陷油气富集规律与勘探方向[J].石油实验地质,2013,35(2):127-132.  
LUO Kaiping, QIU Qi, YE Jianzhong. Petroleum accumulation regulations and exploration targets in Jiangling Sag, Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2): 127-132.

[13] 范存辉,王保全,朱雨萍,等.盐下油气藏勘探发现状与发展趋势[J].特种油气藏,2012,19(4):7-10.  
FAN Cunhui, WANG Baoquan, ZHU Yuping, et al. Present situation and development trend of under-salt reservoirs[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2012, 19(4): 7-10.

[14] 贺锋.江汉盆地潜东南地区新沟嘴组下段古地貌和沉积体系分析[D].北京:中国地质大学(北京),2009.

- HE Feng. Research on palaeogeomorphology and sedimentary of Lower Xingouzui Formation in southeast Qianjiang Uplift, Jianghan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [15] 芮志锋. 江汉盆地江陵凹陷新沟嘴组沉积体系分析与有利目标区带预测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- RUI Zhifeng. Analysis of sedimentary system and prediction of favorable exploration target of Xingouzui Formation in Jiangling Depression, Jianghan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [16] 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 江陵凹陷古新世盐湖沉积碳酸盐碳氧同位素组成及其环境意义 [J]. 地球学报, 2013, 34(5): 567-576.
- WANG Chunlian, LIU Chenglin, XU Haimin, et al. Carbon and oxygen isotopes characteristics of Palaeocene saline lake facies carbonates in Jiangling Depression and their environmental significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(5): 567-576.
- [17] 王春连, 刘成林, 胡海兵, 等. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义 [J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 165-175.
- WANG Chunlian, LIU Chenglin, HU Haibing, et al. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jianghan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(2): 165-175.
- [18] 张永生, 王国力, 杨玉卿, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系盐湖沉积盐韵律及其古气候意义 [J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 461-470.
- ZHANG Yongsheng, WANG Guoli, YANG Yuqing, et al. Rhythms of saline lake sediments of the Paleogene and their paleoclimatic significance in Qianjiang Sag, Jianghan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(4): 461-470.
- [19] 沈均均, 陈波, 王春连, 等. 江汉盆地江陵凹陷古近系新沟咀组含膏盐岩系沉积特征及控制因素 [J]. 古地理学报, 2015, 17(2): 265-274.
- SHEN Junjun, CHEN Bo, WANG Chunlian, et al. Sedimentary characteristics and control factors of gypsum-salt rocks in the Paleogene Xingouzui Formation in Jiangling Depression, Jianghan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(2): 265-274.
- [20] 程建, 段铁军, 向洪, 等. 松辽盆地南部九佛堂组烃源岩特征及与油气富集的关系 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 397-402.
- CHENG Jian, DUAN Tiejun, XIANG Hong, et al. Characteristics of Jiufotang source rock and its relationship to hydrocarbon enrichment, southern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 397-402.
- [21] 王丹丹, 张文浩, 李世臻, 等. 辽宁省红庙子盆地烃源岩特征与生烃潜力研究: 来自红地 1 井的证据 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 526-531.
- WANG Dandan, ZHANG Wenhao, LI Shizhen, et al. Features and hydrocarbon potential of source rocks in the Hongdi 1 well, Hongmiaozi Basin, Liaoning Province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 526-531.
- [22] 刘磊, 朱博华, 刘显太, 等. 中国滩坝砂勘探现状与储层基本特征分析 [J]. 特种油气藏, 2013, 20(5): 14-18.
- LIU Lei, ZHU Bohua, LIU Xiantai, et al. Exploration status and basic characteristics of beach-bar sand reservoirs in China [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20(5): 14-18.
- [23] 商晓飞, 侯加根, 程远忠, 等. 厚层湖泊滩坝砂体成因机制探讨及地质意义: 以黄骅坳陷板桥凹陷沙河街组二段为例 [J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1705-1718.
- SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, CHENG Yuanzhong, et al. Formation mechanism of the thick layer lacustrine beach-bar and its geological implications: an example of the 2nd member of the Shahejie Formation in Banqiao Sag [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1705-1718.
- [24] 傅德印. 因子分析统计检验体系的探讨 [J]. 统计研究, 2007, 24(6): 86-90.
- FU Deyin. Exploring the statistical test system of factor analysis [J]. Statistical Research, 2007, 24(6): 86-90.
- [25] 王楠, 苗迪. SPSS 因子分析在企业社会责任评价中的应用 [J]. 价值工程, 2012, 12(1): 112-113.
- WANG Nan, MIAO Di. The application of SPSS factor analysis in the evaluation of corporate social responsibility [J]. Value Engineering, 2012, 12(1): 112-113.
- [26] 魏威, 王诗雨. 基于 SPSS 软件的因子分析 [J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2015, 27(3): 15-17.
- WEI Wei, WANG Shiyu. Factor analysis based on SPSS software [J]. Journal of Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, 2015, 27(3): 15-17.
- [27] 田继军, 姜在兴, 陈振林. 江陵凹陷新沟咀组下段成岩特征及高孔隙带的分布规律 [J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(1): 39-44.
- TIAN Jijun, JIANG Zaixing, CHEN Zhenlin. Diagenetic features and distribution of high-porosity zones in Lower Xingouzui Formation of Jiangling Depression [J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 2008, 27(1): 39-44.
- [28] 陈波, 韩定坤, 赵海涛, 等. 江陵凹陷深层储层次生孔隙非均质性成因 [J]. 石油学报, 2006, 27(5): 66-70.
- CHEN Bo, HAN Dingkun, ZHAO Haitao, et al. Genesis of heterogeneity of secondary pores in deep reservoir of Jiangling Depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 27(5): 66-70.

(编辑 徐文明)