

结构优度——估价储油层孔隙 结构的首要参数

陈立官 王柏钧 李鸿智

(成都地质学院)

用压汞法研究油气储集层的孔隙结构已较为普遍。如何综合整理有关成果, 提出一个适当的指标, 以表征孔隙结构的优劣程度, 便于在油气勘探与开发中应用, 是人们关注而未解决的一个重要问题。

1972年G. V. 奇林加等人归纳了研究储层孔隙结构的常用参数和统计方法^[2], 但他们所提到的都是较为一般的方法, 对各参数相对重要性的讨论也欠充分。1974—1976年我院石油系储层队与油田协作, 根据多年研究孔隙结构的经验, 又补充了孔喉直径大于 1μ 、 0.5μ 、 0.25μ 等所连通的孔隙体积百分数, 且认为均值是众参数中的首要参数, 在兼顾其他参数的条件下进行了样品的等级划分, 并在不少方面提出了一些有价值的认识和看法¹⁾。在上述研究的基础上, 根据他们提供的数据和某些见解, 我们用逐步回归、趋势分析、因子分析、聚类分析等多元分析方法, 对某油田某产层800余块岩心样品的压汞资料进行了综合性的分析研究。

根据因子分析(包括方差极大旋转和斜旋转)把原来12个变量〔 x_1 —孔隙度、 x_2 —孔隙间水饱和度、 x_3 —均值(孔隙喉道直径的平均值)、 x_4 —分选(孔隙喉道的均一程度)、 x_5 —歪度(孔隙喉道直径分布的不对称性程度)、 x_6 —峰态(孔隙喉道直径分布的集中程度)、 x_7 —排驱压力、 x_8 —饱和度中值毛管压力、 x_9 —孔喉直径大于 1μ 所连通的孔隙体积百分数、 x_{10} —孔喉直径大于 0.5μ 所连通的孔隙体积百分数、 x_{11} —孔喉直径大于 0.25μ 所连通的孔隙体积百分数、 x_{12} —渗透率〕中的次要参数峰态、歪度和非孔结构参数孔隙度、渗透率除去之后, 用余下的8个孔隙结构参数再作因子分析(因子载荷见图1), 找出了评价孔隙结构好坏的首要参数——结构优度(Gg), (Gg系“结构”两字的汉语拼音之字首)

$$Gg = \frac{DM}{SP} = \frac{x_3}{x_4}$$

式中DM—均值; SP—分选。我们所研究样品的均值在8—13之间, 分选在0.5—2.5之间, 由于DM与SP均以 ϕ 为单位表示($\phi = -\log_2 D$), 故DM之值越大孔喉平均直径愈小, DM越小孔喉平均直径愈大。对SP而言, 其值愈大, 则孔喉的分选愈好, 反之分选愈差。不难看出, Gg 越小, 孔隙结构越好, Gg 越大, 孔隙结构越差。我们研究的样品中孔隙

1) 《陕甘宁盆地延长统油层孔隙结构的研究》1977, 未刊稿。

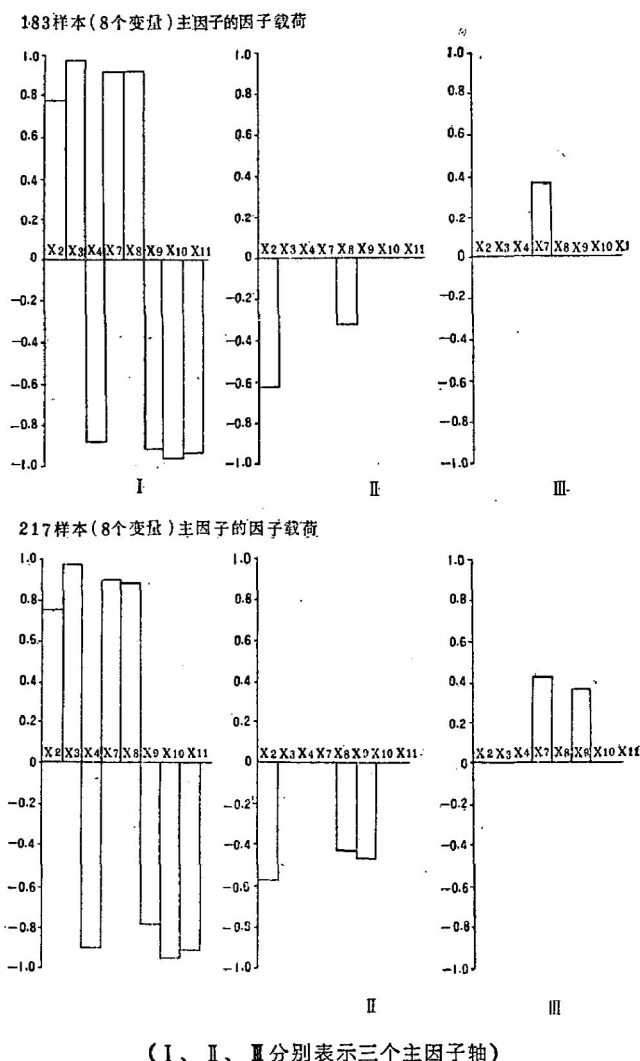
结构最好的 Gg 值在 3 左右, 最差的 Gg 值可接近 20。

提出结构优度的根据是: 首先从图 1 中可以看出, 构成第一主因子(其方差贡献占 80% 或再高一点)的变量包括两个相反的部分(未考虑载荷小于 0.3 的变量), 即分选 x_4 、孔喉直径分别大于 1μ 、 0.5μ 和 0.25μ 所连通的孔隙体积百分数 x_9 、 x_{10} 、 x_{11} 为一部分, 隙间水饱和度 x_2 、均值 x_3 、排驱压力 x_7 及饱和度中值毛管压力 x_8 为另一部分。该两部分变量的载荷都在 0.7 以上, 变量之间的相互关系又相当密切, 相关系数除个别外都在 0.75 以上。因此, 可以认为, 从相反的两部分变量中各选一个代表, 以显示第一主因子的基本特征是适宜的。均值与分选都是综合性的参数, 代表性强, 选用它们二者更能代表第一主因子的基本信息。

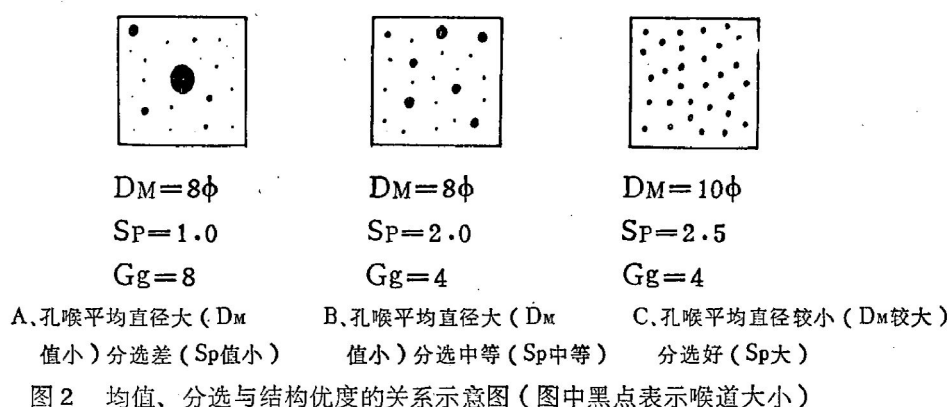
其次, 从孔隙结构的等级划分上看, 结构优度的提出也是合理的。均值在很大程度上受大喉道的影响, 假设有少数特大喉道存在, 则均值势必变小, 但这并不说明孔隙结构就属于好的一类, 它还和喉道的分选程度有关。当均值相同而分选差别较大时, 分选差的即分选系数小的, Gg 值必然较大, 孔隙结构就应当归入相对较差的一类(见图 2 A); 如孔喉分选较好, 即分选系数较大, Gg 值就较前者为小, 孔隙结构自然就应属于相对较好的一类(见图 2 B); 均值虽然较大(即孔喉平均直径较小), 但孔喉均一, 分选系数大, Gg 值自然较小, 孔隙结构也不算差, 可列入较好的一类(见图 2 C)。

笔者 1978 年曾指出^[1]从八个变量的聚类分析中可看到不少有关的典型例子, 按结构优度估量应属同一类的样品, 聚类分析也属同类, 但如果以均值为首要参数进行定性分类则属不同类别。自然也有这种情况, 即按结构优度估量应属同一类的样品, 在聚类分析中不属同类。原因在于聚类分析应用了 8 个变量的全部信息, 而结构优度只代表了变量的主要信息。出现这样的情况是很可理解的。

应当指出, 第一主因子中隙间水饱和度具有较大的载荷, 因此在评价孔隙结构时,



(I、II、III 分别表示三个主因子轴)
图 1 较好储层 183 个样品与较差储层 217 个样品
主因子的因子载荷图



应把它放在相应的地位，特别是对于非均质性十分突出的碳酸盐岩储层，尤为重要。

我们提出的新参数结构优度，不仅能估量孔隙结构的好坏等级，而且对于油气藏的开发过程，特别是对于注水（或水驱）开发中波及系数与洗油效率的研究有重要作用。在老君庙油田M层的注水开发中观察到这样典型的实例：从开发资料井中取出的岩心，渗透率仅几个毫达西的层段，水洗程度高而均一；但有些渗透性较好的（数十毫达西或更高）层段，水洗程度极不均一，呈斑点状。这种现象很容易用结构优度来解释。前者孔喉虽小但分选好，结构优度值 G_g 小，水能均匀推进；后者虽有较大喉道存在，但孔喉分选差，结构优度值较大，即使渗透性好，水也不会均匀推进，因而在小范围内水洗程度亦有较大差别。从此可以看出，关于注入水波及系数的研究，应在孔隙结构的范围内讨论，才更接近于油层的真实情况。

既然结构优度是估量油层孔隙结构的首要参数，又是研究采收率的重要条件，就必然会提出这样的问题：在一个或若干个性质相近的产油层段内，在拥有较多压汞资料的基础上，能否总结出某些规律，以便对结构优度进行预测呢？应该强调指出，我们所说的预测，是在取样井点控制范围内的预测，绝对不是范围之外的无条件外推。经过一系列反复试验，对这个问题得到了比较满意的解决。办法是用趋势面分析直接利用常规物性资料（孔隙度和渗透率）去拟合结构优度，即把孔隙度当成 x 座标，渗透率当成 y 座标（当然这种假定并不严格，因 x 与 y 之间并非无关，但并不影响计算结果），把结构优度当作随 x 、 y 座标变化而变化的空间曲面上的点。在拟合时尽可能提高拟合度。所得到的预测公式为：

对较好储层（由183个样品算出）：

$$G_g = -196.15 + 105.37x - 440y - 19.68x^2 + 171.9xy - 459.1y^2 + 1.73x^3 - 23.35x^2y + 114.53xy^2 - 157.96y^3 - 0.073x^4 + 1.31x^3y - 8.84x^2y^2 + 21.12xy^3 - 10.09y^4 + 0.0012x^5 - 0.026x^4y + 0.21x^3y^2 - 0.58x^2y^3 - 0.119xy^4 + 1.80y^5$$

对较差储层（由217个样品算出）：

$$G_g = -47.41 + 34.44x - 21.33y - 6.6x^2 + 11.91xy - 47.67y^2 + 0.56x^3 - 1.85x^2y + 10.36xy^2 - 1.98y^3 - 0.02x^4 + 0.10x^3y - 0.65x^2y^2 - 0.018xy^3 + 0.30y^4 + 0.0003x^5 - 0.018x^4y + 0.012x^3y^2 + 0.0078x^2y^3 - 0.017xy^4 - 0.00069y^5$$

式中 x ——岩样的孔隙度； y ——岩样的渗透率。

众所周知, 渗透率与孔隙度, 除了将它们作适当变换, 其间不存在明显的统计关系。即具有同一孔隙度的岩样, 其渗透率可在很大范围内变化, 或者具有相同渗透率的岩样, 它们的孔隙度却常有较大差别 (详见图 3)。我们分别以它们作为 x 、 y 座标得到了趋势方程, 更能反映符合这个特点的 Gg 变化规律, 从而保证了预测结果有较高的精确度或较小的偏差。

预测公式的拟合度与偏差统计见表 1。

从表 1 中可以看出, 拟合度虽不很高, 但具体的偏差甚小, 对评价油、气层孔隙结构的等级已够用了。令人不太放心的是, 较差储层 Gg 值的拟合高度仅 64%, 能否满足要求? 从表 3 中可以看到, 85 个样品中偏差大的普遍在 Gg 较高的部分。偏差大的, Gg 值一般都在 6 以上; 偏差大于 2 的, Gg 值几乎都在 10 以上。这样的偏差不会从根本上影响对孔隙结构的估价。因此, 我们提出的公式仍然有实用价值。

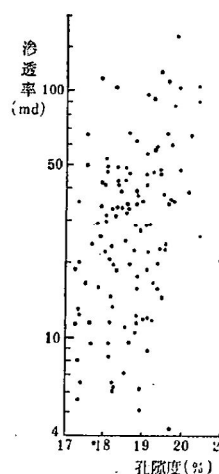


图 3 本项研究中部分岩样的渗透率与孔隙度的关系

表 1 结构优度的拟合度及偏差统计表

内 容 样品数 及储层类型	拟 合 度	偏差 (按占总样品的百分数统计)		
		<0.5	<1.0	<2
183, 较好储层	82.27%	58.4%	85.6%	93.2%
217, 较差储层	64.32%	33.5%	61.2%	81.5%

考虑到上述预测公式项数繁多, 在实际工作中不便应用, 今年我们在多项式之外引进非多项式, 用逐步回归趋势分析程序将公式作了简化, 简化后的公式如下:

对较好储层:

$$Gg = 13959.15 + 857.19x^2 - 12220.83\lg x - 0.094e^{2x} - 18817.81/x - 40.06/y + 4044.02/x^2 + 80.51/xy$$

对较差储层:

$$Gg = -14.94 + 0.808x^2y^2 + 34.64/xy$$

简化后的公式, Gg 值的拟合度与偏差统计见表 2。表 2 与表 1 的结果基本相同, 也能满足工作的要求, 从而在预测公式上又前进了一步。

表 2 公式简化后结构优度的拟合度与偏差统计表

内 容 样品数 及储层类型	拟 合 度	偏差 (按占总样品的百分数统计)		
		<0.5	<1.0	<2
183, 较好储层	79.1%	54%	78%	93%
217, 较差储层	58.7%	25.2%	56.2%	86%

表3 217个样品中×井85个样品G_g值的观察值、预测值(拟合值)与偏差值

样品序号	观察值	预测值	偏差值	样品序号	观察值	预测值	偏差值
1	4.66	4.68	-0.02	44	9.11	8.64	0.47
2	4.32	5.45	-1.13	45	8.24	9.02	-0.78
3	3.54	3.68	-0.14	46	10.25	8.25	2.00
4	4.93	4.76	0.17	47	11.81	10.97	0.84
5	3.63	3.63	0.00	48	9.14	8.07	1.07
6	3.81	3.98	-0.17	49	8.35	8.80	-0.45
7	3.46	4.27	-0.81	50	7.85	10.21	-2.36
8	3.83	4.45	-0.62	51	8.11	8.09	0.02
9	5.79	5.00	0.79	52	9.15	10.12	-0.97
10	6.10	5.35	0.75	53	7.83	9.72	-1.89
11	6.36	5.39	0.97	54	6.59	7.37	-0.78
12	6.25	6.01	0.24	55	8.09	6.48	1.61
13	5.07	4.81	0.26	56	10.78	9.66	1.12
14	5.61	4.71	0.90	57	10.06	9.72	0.34
15	4.89	5.34	-0.45	58	12.24	9.32	2.92
16	6.02	5.02	1.00	59	12.16	10.36	1.80
17	7.34	6.39	0.95	60	11.65	15.14	-3.49
18	5.36	5.06	0.30	61	12.79	13.70	-0.91
19	5.27	5.32	-0.05	62	11.72	10.77	0.95
20	6.16	5.87	0.29	63	9.99	16.85	-6.86
21	6.17	6.55	-0.38	64	12.77	9.37	3.40
22	5.33	5.53	-0.20	65	9.83	13.33	-3.50
23	4.31	4.78	-0.47	66	13.14	11.51	1.63
24	5.02	7.32	-2.30	67	12.92	8.86	4.06
25	4.86	6.10	-1.24	68	12.83	14.76	-1.93
26	7.05	5.53	1.52	69	13.60	12.97	0.63
27	5.05	5.55	-0.50	70	7.84	9.95	-2.11
28	3.90	5.67	-1.77	71	13.59	9.84	3.75
29	7.31	7.26	0.05	72	17.40	17.57	-0.17
30	6.85	6.61	0.24	73	11.67	11.23	0.44
31	6.15	6.68	-0.53	74	15.01	17.38	-2.37
32	5.88	5.29	0.59	75	19.37	15.57	3.80
33	4.89	7.40	-2.51	76	14.05	15.92	-1.87
34	7.36	7.45	-0.09	77	12.29	16.85	-4.56
35	7.11	6.09	1.02	78	15.24	9.88	5.36
36	6.92	5.96	0.96	79	15.37	16.39	-1.02
37	7.46	6.88	0.58	80	16.68	16.67	0.01
38	5.97	5.91	0.06	81	23.89	17.49	6.40
39	6.54	6.16	0.38	82	18.54	17.38	1.16
40	7.49	6.75	0.74	83	21.60	15.57	6.03
41	6.80	8.56	-1.76	84	28.93	16.85	12.08
42	9.43	9.84	-0.41	85	22.19	15.39	6.80
43	8.00	8.75	-0.75				

应当看到, 各类储层的孔隙结构, 千变万化, 十分复杂。现有公式尚难适应多种情况, 今后还要作更多工作才能得到较完善的成果。

本研究课题的数学理论、计算方法和计算机程序由王柏钧付教授负责, 数据处理成果解释与应用由陈立官和李鸿智负责, 相互配合共同完成了这个课题。论文由陈立官执笔。

在研究过程中, 油田研究院和我院石油系储层队, 除提供基础数据和他们的研究成果而外, 在工作上给予了大力支持与密切协作, 七系和石油系不少同志也给了我们各种帮助, 在此表示感谢。

(收稿日期 1979年10月29日)

参 考 文 献

- [1] 陈力关、李鸿智, 1978, 多元统计分析在压汞资料中的应用。成都地质学院院报, 第五期。
- [2] Chilingar, G. V., Mannon, R. W. and Rieke III, H. H., 1972, Oil and gas production from carbonate rocks. American Elsevier Publ. Co., New York.
- [3] Stout, J. E., 1964, Pore geometry as related to carbonate stratigraphic traps. Bull. AAPG, p.329-337.

GOODNESS OF PORE GEOMETRY—THE MOST IMPORTANT PARAMETER FOR ESTIMATING PORE GEOMETRY IN RESERVOIRS

Chen Liguan Wang Bojun Li Hongzhi

(Chengdu College of Geology)

Abstract

Mercury injection is one of the efficient methods for investigating pore geometry of reservoirs. A lot of capillary curves from mercury apparatus have been accumulated in an oil field in northwest China. The most important parameter for estimating pore geometry in reservoirs, which is called Gg, has been found out by multivariate analysis combined with geological studies. It can be used to estimate the mode of pore geometry of reservoir rocks. It is found that, the smaller the value of Gg, the better is the pore geometry and vice versa. Gg can also be used to help estimate the water advance of water driving pools or injection exploitation. Thus, it is a useful parameter in exploitation analysis. On the basis of our observation of the relationship between Gg, porosity and permeability, a polynomial has been suggested for estimating the Gg value and a simple formula is obtained by means of regression.