

塔里木盆地蒸发岩岩性判别模型及其实现过程

王永志^{1,2)}, 潘 懋¹⁾, 焦鹏程³⁾, 杨海军⁴⁾, 顾乔元⁴⁾, 刘成林³⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2) 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 教育部地球探测重点实验室, 吉林长春 130026;

3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4) 塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘 要: 蒸发岩与油气经常共存于一个沉积盆地中, 蒸发岩是优良油气藏盖层, 故应用油气的测井数据进行盆地地下蒸发岩地层岩性的判别, 可为在油气探区蒸发岩研究和寻找油气与钾盐资源提供便捷的技术手段。笔者提出了一种蒸发岩盆地岩性判别模型, 它在蒸发岩盆地综合利用物探测井参数的基础上, 使用专家知识对测井数据进行半定量、定性处理, 给出了经验的判别公式, 建立了专家知识数据模型。通过对羊塔 5 井测井数据进行判别, 有 84% 与原岩岩性相符。结果表明, 此判别模型对类似应用具有参考价值。

关键词: 塔里木盆地; 蒸发岩; 岩性判别模型; 测井数据

中图分类号: P611.4-5; P588.247 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)05-679-05

The Evaporate Rock Lithology Discrimination Model for Tarim Basin and its Implementation Process

WANG Yong-zhi^{1,2)}, PAN Mao¹⁾, JIAO Peng-cheng³⁾, YANG Hai-jun⁴⁾,
GU Qiao-yuan⁴⁾, LIU Cheng-lin³⁾

1) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871;

2) College of Instrumentation Science and Electrical Engineering, Jilin University, Key Laboratory of Earth Exploration of Ministry of Education, Changchun, Jilin 130026;

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) Institute of Exploration and Development, Tarim Oil and Gas Branch Company, Korla, Xinjiang 841000

Abstract: The evaporate and oil-gas resources often coexist in the same basin, and evaporates are the quality covering strata for oil and gas deposits. Therefore, the utilization of logging data from oil-gas drill holes to judge the lithology of evaporates in the deeply-buried strata of the depositional basin can provide a good method for the study of salt rocks and the search for potash resources in the oil-gas prospect area. This paper suggests a judging model for the lithology of the evaporate basin, which uses comprehensively geophysical prospecting logging data in the evaporate basin and then processes the logging data semi-quantitatively and qualitatively on the basis of expert knowledge. It gives experiential formula and expert knowledge data model and designs the basic implementation of algorithm. Model experimentation calculation for logging data from drill hole Yangta #5 shows that 84% of the results are identical to the known data, indicating that the model has a fairly good reference value for similar application.

Key words: Tarim basin; evaporate; lithology discrimination model; logging data

本文由塔里木油田公司科研项目《塔里木盆地重要蒸发岩坳陷成盐及油气生储条件研究》(编号: 41005050002); 金土工程“我国石油、煤炭、铁矿、钾盐矿产资源潜力数据库建设”(编号: JTXM-DW-KZ4); 国土资源部地质调查重大专项《全国重要矿产资源潜力预测评价》(编号: 1212010633901)联合资助。

收稿日期: 2009-04-01; 改回日期: 2009-09-21。

第一作者简介: 王永志, 男, 1974 年生。讲师, 博士后。主要从事地学数据集成与应用、空间数据挖掘的研究及 GIS 技术应用工作。

通讯地址: 100871, 北京市海淀区颐和园路 5 号。电话: 010-58584301。E-mail: iamwangyongzhi@126.com。

近 20 年来,塔里木盆地油气勘查工作已积累了大量详实的测井数据,对测井数据进行二次开发和处理,并结合岩心、岩屑、地球物理、区域地质、构造和岩相古地理等资料的分析,对成盐地层岩性进行判别(王登红等, 2005),其成果可作为在油气探区内盖层研究和钾盐寻找及矿产资源评价系统建设(董英君等, 2005)等提供重要参考依据。

塔里木盆地自寒武纪到新近纪,有广泛的海相、海陆过渡相沉积,相应在各时代地层中形成了大量蒸发岩沉积(贾承造等, 2003)。盐与油气的形成在构造条件和沉积环境方面有一致性,即封闭-半封闭的、持续沉降的大型沉积盆地有利于盐与油气的生成,地质历史上沉积盆地通常经历湿润与干旱的古气候交替变化,湿润气候有利于油气生成,干旱气候利于蒸发岩的沉积,两种资源常共存于一个盆地中。同时,蒸发岩系是油气的良好盖层,盐丘是良好的储油构造,盆地中油盐通常具有密切关系(李勇等, 2006)。盆地蒸发岩地层的研究具有重要的实际意义,为更好地研究盆地深部盐层分布规律,笔者建立了一种蒸发岩盆地岩性判别模型,并给出了经验公式。首先应用伽玛测井、电阻率测井等方法计算出有待进一步加工的测井数据,应用半定量、定性的专家经验知识对这些测井数据进行综合性的分析和判别。文中给出了蒸发岩岩性判别具体实现的全过程及成盐(钾)岩性分布实现。

1 蒸发岩岩性判别模型

1.1 蒸发岩岩性判别的概念模型

海盆或湖盆水体遭受蒸发,其盐分逐渐浓缩以至沉淀,这种化学成因的岩石称为“蒸发岩”,其包括氯化物岩、碘酸盐岩、硫酸盐岩、碳酸盐岩和硼酸盐岩等。岩性识别是地层评价、油藏描述以及实时钻井监控等方面的重要研究内容之一。目前,获取地下岩性信息的手段有岩屑录井、取心和钻后测井参数资料的解释处理(张辉等, 2005),其中以后者为主。

设判别的结果岩性有 m 类(m 个总体),并把从第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 类中取出的代表性岩石样本记为 n_i ,称 $G=(n_1, n_2, \dots, n_m)$ 为研究区内的岩石类型样本空间。其中任何一个样品 X 都是由 l 个确定岩性的测井参数表示的向量,即 $X=(x_1, x_2, \dots, x_l)$ 。岩性识别就是对来源于 m 类岩石中的任何一个未知岩石类型的样品 Y , 根据确定岩性的 l 个测井参数的观测值判定它属于 G 中的哪一类及其属于各类的可信程度(刘秀娟等, 2007)。

2.2 岩性判别模型流程

蒸发岩盆地岩性判别模型,是主要针对蒸发岩地层,综合利用地球物理测井参数,建立一种半定量、定量判别岩性模型,对钻井地质绘制测井剖面图及测井解译均具有重要意义。判别模型根据测井数据、测井曲线、专家经验知识等,综合分析识别岩性,从测井曲线的形态特征和测井值的相对大小进行定性判别,其解译结果的可靠性主要取决于专家实践经验知识和岩心剖面的复杂程度。由于地下构造的复杂性,地层分布并不一定是规律性的,导致对盆地、测井的分析均有其特殊性,针对不同的测井曲线,建立统一的数学模型和不同的专家知识进行岩性判别,应用岩性统计矩阵、岩性统计权重系数等统计方法提高评价的准确率与可靠性,最后确定地层的岩性。

岩性判别模型(系统)的结构主要包括①岩性(岩石、矿物)数据库和物探测井曲线参数;②岩性(岩石、矿物)数学函数或半经验公式;③供分析的测井数据;④岩性判别及结果评价(判别矩阵);⑤岩性输出。岩性判别(模型)的结构如图 1 所示。

岩性数据库汇集了矿物的岩性特征,表示为 $F=\{\text{name, category, chemistry, unitCell-Parameter, color, luster, striation, hardness, density, solubility, fusibility, infrared spectrum}\}$, 专家知识库给出了半定量、经验的判别规则 $R=\{\text{loggingName, method, startValue, endValue, weight, rockType, description}\}$ 。

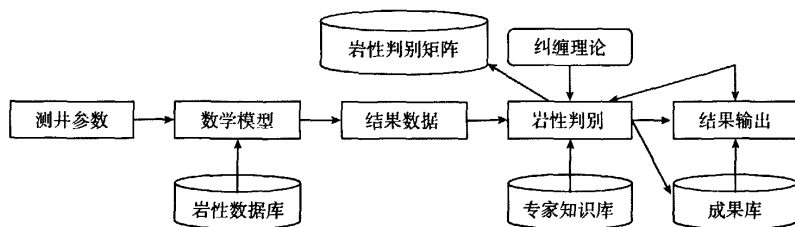


图 1 岩性判别模型结构

Fig. 1 Structure of the lithology discrimination model

1.3 岩性判别的数学模型

根据测井曲线, 在判别模型中给出了基于伽玛测井、密度测井、中子测井、声波测井、电阻率测井、自然电位测井、测向测井等 8 种常见测井曲线岩性判别的数学函数或半经验公式(原宏壮等, 2005; 曹正良等, 2005; 徐海浪等, 2006; 邓小波等, 2006), 并给出了经验判别规则(陈一鸣等, 1994)。同时判别规则中的定量值根据不同的盆地地质背景、测井数据不同而各异, 此外判别规则中的定性数据在计算时也要转化成具体的定量数据, 对每一个方法分配权重, 对每一个岩性也要分配权重。笔者给出了常用的伽玛测井和声波测井的数学公式和判别规则。

1.3.1 基于伽玛测井的岩性判别模型

(1) 数学公式

$F(X_1)=aX_1+bY_1+cZ_1$, 其中 X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别表示钾石盐、光卤石和粘土的百分含量, a 、 b 、 c 是系数。

(2) 判别规则

表 1 和表 2 分别给出了伽玛测井的定量和定性的判别规则。

1.3.2 基于声波测井的岩性判别模型

(1) 数学公式

$F(X_4)=f(V)=t_2-t_1=\frac{b_2}{v_b}-\frac{b_1}{v_b}=\frac{\Delta b}{v_b}$, 其中: t_1 、 t_2 表示声波到达两个接受器的纵波运行时间; Δb 表示两个接受器之间的距离; v_b 表示声波通过地层的传播速度。

表 1 伽玛测井的定量判别规则
Table 1 Quantitative discrimination rules of Gamma logging

定量值	岩性
0	石盐、硬石膏、石膏、方解石、白云岩、石英
2.0~10.0	页岩、泥岩
13.1	钙芒硝泥岩
15.5~63.0	杂卤石、钾石盐、长石砂岩
...	...

表 2 伽玛测井的定性判别规则
Table 2 Qualitative discrimination rules of Gamma logging

定性规则	岩性
高	钾石盐、酸性火山灰沉积、岩浆岩、海相泥岩
中	泥岩、页岩
低	硬石膏、石膏、岩盐、纯的石灰岩、白云岩
膏盐剖面	最高 泥岩 最低 岩盐
...	...

表 3 声波测井的定量判别规则
Table 3 Quantitative discrimination rules of sound wave logging

定量值	岩性
164	硬石膏
155~250	石灰岩、白云岩
250~380	砂岩
...	...

表 4 声波测井的定性判别规则
Table 4 Qualitative discrimination rules of sound wave logging

定性规则	岩性
最低	致密的石灰岩、白云岩
中	含泥质、孔隙裂隙性石灰岩、白云岩
高	泥岩、泥灰岩
最高	渗透型砂岩
膏盐剖面	中等 含钙、石膏泥岩及致密砂岩 最低 无水石膏
...	...

(2) 判别规则

受篇幅所限, 仅列 2 种测井方法的部分公式和岩性判别规则供参考。

2 应用实例

2.1 测井数据

测井数据主要指测井参数值, 它是地下岩石的矿物成分、结构和孔隙度等的综合反映。对于一组特定的测井参数值, 它必然对应着地层中的某一种或某几种岩性。在分析研究区内钻井岩心和测井参数对应特征的基础上, 划分研究区域岩心的岩石类型, 并从各类岩石中读取能够代表岩石样的测井参数值, 作为确定岩性与测井参数对应关系的基础数据, 然后通过上述数学手段和岩性识别模型进行判别(李新虎, 2007)。

用于计算的测井数据有两类获得方式, 一类是已经计算好可以直接使用的; 另一类是根据岩心取样化验结果使用数学模型进行计算得出。由于地下不同深度的岩性变化很大, 故在不同深度区间使用的测井方法一般会有所变化, 测得数据的处理方法也稍有不同。测井数据一般以非关系型结构进行存储, 故在计算前应使用抽取、转换和装载 ETL (Extract, Transfer and Loading)工具按照规则进行规范化, 即通过数据清洗、转换成统一标准的数据并保存到测井数据仓库中等待处理。图 2 给出了测井数据的 ETL 过程, 表 5 给出了羊塔 5 井 5100—5193 m 经过处理后的伽玛、电位、深电阻率测井数据。

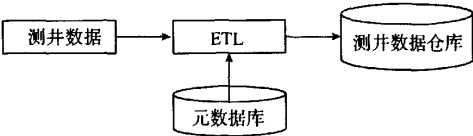


图 2 测井数据 ETL 模型
Fig. 2 ETL model of logging data

表 5 羊塔 5 井 5100-5193 m 测井数据
Table 5 Logging data of Yangta #5 at the level of 5100-5193 m

#DEPTH	GR	RFOC	RILD	RILM	SP
5100	32.970	0.102	82.799	10000.000	-12.419
5101	22.865	0.102	105.609	8000.000	13.055
.....					
5193	21.790	0.102	114.908	10019.618	24.166

2.2 专家知识

岩性判别的专家知识是经过地学领域专家根据多年的野外一线工作、室内资料整理及数据处理等积累的宝贵经验，并通过科学的整理上升到理论高度，并具有可参与计算能力的、一定的、半规范化的知识。岩性判别知识具有模型和方法一致性、参数特殊性的特点，即每一个盆地和每一口井因其环境、地下成因等因素的不同而具有不同的判别参数，同一口井的不同深度区间也会根据测井方法和计算方法不同而具有不同的判别规则。专家知识系统具有较强的自学习能力，并且经过多种训练集进行严格训练之后才形成可用的知识。图 3 给出了用于岩性判别的专家知识的核心数据模型。

2.3 判别结果

根据岩性判别模型，对给出的测井数据通过计算、判别后，并与经验岩性库进行对比得出了含盐地层岩性数据。判别结果与岩芯对比信息(表 6)显示，在钻井深处 5100—5193 m 之间 94 m 地层段内，有 15 段点的岩性与已知资料不一致，而有 79 个结果是一致的，正确率达到 84%。从判别结果中可以看出

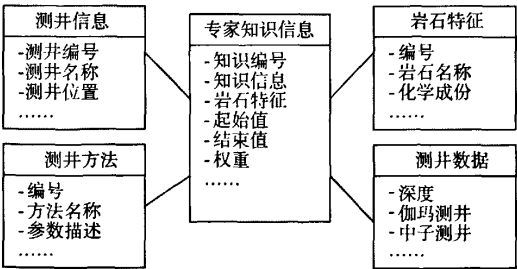


图 3 专家知识核心数据模型
Fig. 3 Core data model of expert's knowledge

表 6 羊塔 5 井岩性判别结果与岩芯岩性对比表
Table 6 Comparison of lithology between rock cores and discrimination results

深度 m	岩芯岩性	判别岩性	判别结果评价
5100	泥岩	泥岩	正确
5101	泥岩	泥岩	正确
5102	泥岩	泥岩	正确
5103	岩盐	岩盐	正确
5104	石膏	石膏	正确
5105	石膏	岩盐	不正确
.....			
5193	灰质砾岩	灰质砾岩	正确

石膏、膏岩和盐岩分布较多，为盆地蒸发盐地层研究和探测提供了快速的技术方法。

3 结论

本研究在分析石油测井参数与地层岩性之间存在的半定量和经验关系基础上，建立了半定量、定性的蒸发岩岩性判别模型，并使用 C#语言编制实现了模型的软件。通过输入一定量的测井数据进行处理，得出了物探测井地下岩性的判别结果，与实际岩心测得的结果有 84%相同。由于地下地质构造和岩性变化的复杂性和专家知识的局限性，目前模型还需要进一步完善，即岩性判别的专家知识库需要综合岩心、岩屑、地球物理、区域地质、构造和岩相古地理等资料，并且要使用不同的方法经过大量试验和测试，可以提高判别结果的精确性和可信度。另外还可以对处理后多口井的岩性做进一步的趋势面分析、数据挖掘等处理，反馈到模型进行校正，提高判别系统的判别正确率。

致谢：塔里木油田公司马玉杰、肖承文、卢玉红高工等给予大力的支持和帮助，硕士研究生胡妍娜、唐敏参与完成了岩性判别专家数据库的输入建库等工作，在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献：

曹正良，王克协，谢荣华，马在田. 2005. 三种阵列声波测井数据频散分析方法的应用与比较[J]. 地球物理学报, 48(6): 1449-1459.

陈一鸣，朱德怀，任康. 1994. 矿场地球物理测井技术测井资料解释[M]. 石油工业出版社.

邓小波，聂在平，赵延文. 2006. 用相位感应测井数据反演地层电阻率和介电常数[J]. 地球物理学报, 49(2): 604-608

董英君，张德全，徐文艺，余宏全. 2005. 矿产资源评价系统及其在东昆仑的应用[J]. 地球学报, 26(1): 83-88.

贾承造，魏国齐. 2003. “九五”期间塔里木盆地构造研究成果概

述[J]. 石油勘探与开发, 30(1): 11-14.

李新虎. 2007. 基于不同测井曲线参数集的支持向量机岩性识别对比[J]. 煤田地质与勘探, 35(3): 72-76, 80.

李勇, 钟建华, 温志峰, 段宏亮, 王海侨. 2006. 蒸发岩与油气生成、保存的关系[J]. 沉积学报, 24(4): 596-606.

刘秀娟, 陈超, 曾冲, 兰磊. 2007. 利用测井数据进行岩性识别的多元统计方法[J]. 地质科技情报, 26(3): 109-112.

王登红, 陈毓川, 徐珏, 余金杰, 李纯杰. 2005. 中国大陆科学钻100-850 m 深度岩心的贵金属地球化学[J]. 地球学报, 26(6): 535-540.

徐海浪, 吴小平. 2006. 电阻率二维神经网络反演[J]. 地球物理学报, 49(2): 584-589.

原宏壮, 陆大卫, 张辛耘. 2005. 测井技术新进展综述[J]. 地球物理学进展, 20(3): 786-795.

张辉, 高德利. 2005. 钻井岩性实时识别方法研究[J]. 石油钻采工艺, 27(1): 13-15, 80.

References:

CAO Zheng-liang, WANG Ke-xie, XIE Rong-hua, MA Zai-tian. 2005. A comparative study on application of three dispersion analysis to array sonic logs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(6): 1449-1459(in Chinese with English abstract).

CHEN Yi-ming, ZHU De-huai, REN Kang. 1994. Interpretation for geophysical logging technology and logging material of mine farm. Oil Industry Press(in Chinese with English abstract).

DENG Xiao-bo, NIE Zai-ping, ZHAO Yan-wen. 2006. Inversion of resistivity and permittivity using phase induction logging data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(2): 604-608(in Chinese with English abstract).

DONG Yin-jun, ZHANG De-quan, XU Wen-yi, SHE Hong-quan. 2005. Studies on Geophysical Properties and Distribution of Mineral Resources in East Kunlun[J]. Acta Geoscientica

Sinica, 26(1): 83-88(in Chinese with English abstract).

JIA Chen-gzao, WEI Guo-qi. 2003. The summary of the achievements on the tectonic researches in Tarim basin during the period of 9th Five-Year Plan[J]. Petroleum Exploration and Development, 30(1): 11-14(in Chinese with English abstract).

LI Xin-hu. 2007. Lithology identification methods contrast based on support vector machines at different well logging parameter[J]. Coal Geology & Exploration, 35(3): 72-76, 80(in Chinese with English abstract).

LI Yong, ZHONG Jian-hua, WEN Zhi-feng, WANG Hai-qiao. 2006. Study on the relationship between evaporate and hydrocarbon generation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(4): 596-606(in Chinese with English abstract).

LIU Xiu-juan, CHEN Chao, ZENG Chong, LAN Lei. 2007. Multivariate Statistical Method of Utilizing Logging Data to Lithologic Recognition[J]. Geological Science and Technology Information, 26(3): 109-112(in Chinese with English abstract).

WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Jue, YU Jin-jie, LI Chun-jie. 2005. Precious Metals Geochemistry of Cores from 100 to 850 m Depth of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(6): 535-540(in Chinese with English abstract).

XU Hai-lang, WU Xiao-ping. 2006. 2-D resistivity inversion using the neural network method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(2): 584-589(in Chinese with English abstract).

YUAN Hong-zhuang, LU Da-wei, ZHANG Xin-yun. 2005. An overview of recent advances in well logging technology[J]. Progress in Geophysics, 20(3): 786-795(in Chinese with English abstract).

ZHANG Hui, GAO De-li. 2005. Method for real-time lithology identifying while drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 27(1): 13-15, 80(in Chinese with English abstract).