

文章编号: 0253-9985(2009)06-0720-06

川西坳陷盐井沟构造沙溪庙组现今地应力方向

邓虎成¹, 周文^{1,2}, 姜浩罡³, 姜文利⁴

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059 2 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,

四川 成都 610059 3 中国石油化工股份有限公司 西北油气分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

4 中国国土资源部 油气资源战略研究中心, 北京 100034)

摘要: 川西坳陷盐井沟构造沙溪庙组属于低孔、低渗储层, 现今地应力方向的研究是该区人工压裂获效的基础。通过追踪川西坳陷历年天然地震 P 波方向, 结合相邻构造现今地应力方向的研究成果, 对研究区现今地应力方向进行了分析和判断; 在此基础上, 通过单井取心古地磁定向实验和波速各向异性实验, 进行现今最大主应力方向的测定和计算。结果发现, 计算获得的现今地应力方向与天然地震和相邻构造上地应力方向具有一致性。综合各种资料及实验分析成果, 判定研究区沙溪庙组现今地应力方向为北西向。

关键词: 天然地震; 波速各向异性; 现今地应力方向; 沙溪庙组; 盐井沟构造; 川西坳陷

中图分类号: TE121.1 **文献标识码:** A

Current terrestrial stress direction of the Shaximiao Formation in the Yanjinggou Structure of the West Sichuan Depression

Deng Hucheng, Zhou Wen², Jiang Haogang, Jiang Wenli

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Sichuan 610059, China;

3. SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

4. Strategic Research Center of Oil & Gas Resources, Ministry of Land & Resources, Beijing 100034, China)

Abstract: Reservoir of the Shaximiao Formation in the West Sichuan Depression is of low porosity and permeability. To know the current terrestrial stress direction is the basis for effective fracturing in this area. Through tracking down the P-wave direction of natural earthquakes in the West Sichuan Depression over the years and referring to researches on current terrestrial stress direction in adjacent structures, the current terrestrial stress direction of the study area is analyzed and predicted. By the paleomagnetic directional experiments and velocity anisotropy experiment with single well core, the maximum principal stress direction is measured and calculated. The results show that the calculated current terrestrial stress direction is consistent with that of the adjacent structures. Eventually according to various data and experimental results, the current terrestrial stress direction of the Shaximiao Formation in the study area is determined to be a NW direction.

Key words: natural earthquake; velocity anisotropy; current terrestrial stress direction; Shaximiao Formation; Yanjinggou Structure; West Sichuan Depression

现今地应力方向的确定是当前地应力研究中的重要核心内容之一, 其研究成果对石油工程的

各个领域^[1~4], 如油气勘探、油气藏工程、钻完井工程、开发方案设计、储层保护与改造等均具有重

要指导意义。地应力方向研究从目前已有的技术手段来看,大致可以分为地质分析、实验分析、各种监测技术、数值模拟技术等几个方面^[2-3]。然而在实际应用过程中往往资料是有限的,那么就需要充分有效地利用各种有限的资料来尽可能精确地确定现今地应力的方向。川西侏罗系沙溪庙组是天然气勘探的重要层位,该层段岩性致密,孔渗性差,储层保护与改造、井网合理部署是投产、稳产、上产的必要手段,而这些均需要对现今地应力方向具有正确的认识^[4]。因此对川西坳陷盐井沟构造沙溪庙组现今地应力方向的正确认识将对在该区的天然气开发具有重要意义。

1 地质背景

盐井沟构造位于彭山县、双流县、仁寿县和眉山县四县境内,属于川西中新坳陷低陡构造区龙泉山—熊坡构造(图 1)^[6]。该构造沙溪庙组顶界构造为一不对称的背斜,构造核部被一小断层切割,轴向为北东向,轴线呈弧形,东南翼被盐①和盐②号断层控制,西北翼发育盐③号断层;轴部

最老出露侏罗系蓬莱镇组,两翼为白垩系天马山组、夹关组和灌口组,构造周边为第四系黄土砾石,平原砾石及河滩砾石覆盖。区域上,整个川西坳陷位于龙门山构造带东缘,处于龙门山挤压活动作用的构造背景下,现今构造应力主要来源于印度板块向北俯冲,龙门山推覆构造带向东、东北挤压作用,应力状态主要以压性为主^[7]。

2 天然地震及相邻构造应力方向

2.1 天然地震分析地应力方向

现代地震的产生主要是由现今地应力场的应力集中造成断层错动及位移而形成的,因此根据地震震源的地震波监测,确定地震波传播的 P波方向,可以得到现今近水平最大主应力方向^[8]。

通过对 1958—1999年间川西重要的地震资料和 2008年 5月 12日汶川大地震资料的收集和统计^[9-10],地震主要发生在在龙门山断裂带(松潘一带)附近、甘孜一带、南面沐川、盐源等地(表 1)。

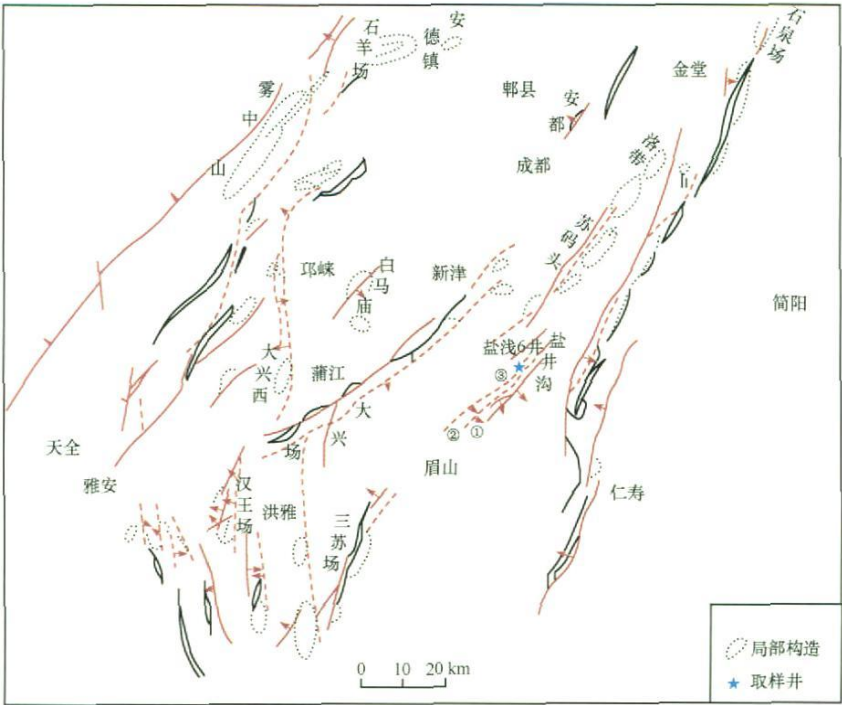


图 1 川西地区区域构造

Fig 1 Regional structures in the West Sichuan Depression

表 1 川西天然地震统计结果

Table 1 Statistics on natural earthquakes in the West Sichuan Depression

地点		时间	震级 (M _S)	震中位置		P轴		震源深度 / km
			级	φ _N	λ _E	方位 / (°)	仰角 / (°)	
沐川县	凤村	1993—08—07	5. 0	29°01′	103°36′	337. 0	5. 0	5
	杨村	1994—12—30	5. 7	29°01′	103°39′	316. 0	20. 0	13
	凤村	1995—04—26	5. 1	28°59′	103°39′	114. 0	14. 0	10
绵竹县		1999—09—14	5. 0	31°36′	104°17′	298. 0	29. 0	22
炉霍县		1973—02—06	7. 6	31°30′	100°24′	71. 5	7. 0	17
道孚县		1981—01—24	6. 9	31°00′	101°10′	84. 8	2. 8	12
		1988—06—02	5. 0	30°35′	101°28′	103. 0	21. 0	15
甘孜县		1982—06—16	6. 0	31°50′	99°51′	64. 0	11. 0	17
康定、九龙		1975—01—15	6. 2	29°26′	101°48′	150. 0	29. 0	25
松潘(黄龙)		1973—08—11	6. 5	32°53′	104°00′	288. 5	3. 0	8
黑水(阿坝)		1978—07—13	5. 4	31°56′	102°57′	260. 0	34. 0	23
松潘—平武		1976—08—16	7. 2	32°42′	104°06′	71. 5	3. 0	15
理塘(甘孜)		1986—08—07	5. 6	29°17′	100°48′	82. 0	29. 0	15
		1988—08—07	5. 6	29°17′	100°48′	82. 0	29. 0	15
小金(阿坝)		1989—03—01	5. 0	31°30′	102°26′	129. 0	16. 0	10
		1989—09—22	6. 6	31°33′	102°23′	122. 0	12. 0	10
		1991—02—18	5. 0	31°35′	102°23′	109. 0	28. 0	10
石棉(雅安)		1989—06—09	5. 2	29°16′	102°13′	234. 0	18. 0	10
盐源		1976—11—07	6. 7	27°32′	101°03′	158. 0	26. 0	19
		1976—12—13	6. 4	27°21′	101°03′	166. 0	6. 0	9
		1986—07—10	4. 7	27°25′	101°27′	167. 0	9. 0	15
		1986—08—12	5. 2	27°25′	101°25′	332. 0	6. 0	15
白玉—巴塘		1996—12—21	5. 5	30°42′	99°36′	236. 0	37. 0	5
会东		1988—04—15	5. 2	26°18′	102°45′	79. 0	9. 0	15
龙门山附近		1958—02—08	—	31°42′	104°18′	296. 0	31. 0	—
		1981—11—07	—	31°20′	103°53′	114. 0	14. 0	—
		1983—03—12	—	31°34′	104°00′	291. 0	20. 0	—
		1988—07—18	—	31°42′	103°54′	294. 0	16. 0	—
		1993—12—30	—	30°57′	103°43′	302. 0	17. 0	—
		1994—02—25	—	31°43′	104°47′	307. 0	36. 0	—
龙门山断裂带中南段		1980—01—1986—12	—	—	—	321. 0	34. 0	—
茂汶一带		1984—01—1991—12	—	—	—	335. 0	18. 0	—
汶川		2008—05—12	8. 0	31°01′	103°22′	117. 0	7. 0	14

对川西坳陷西北面龙门山地区、甘孜地区以及南面的盐源一带的地震数据进行了整理, 绘制出天然地震 P轴方向的玫瑰花图(图 2)。从各图优势方向可以看出, 西北面龙门山地区 P轴优势方向大概为 115°左右(图 2 a); 甘孜地区 P轴优势方向大概为 110°~120°之间(图 2 b); 南部的盐源一带由于统计点数据有限, 优势方向不够集中, 但 P轴方向大概为 85°~120°之间(图 2 c)。由于 P轴方向反映了最大主应力方向, 因此从川西凹陷周缘的上述地震统

计结果可以看处, 川西坳陷西北面、甘孜地区及南面周边地区的最大主应力方向总体上位于北西西向。

位于川西凹陷内部地区, 如石棉、绵竹、小金、沐川地区 P轴方向分别为 154°, 118°, 109°~129°, 114°~157°, 均为北西方向趋势, 因此从天然地震 P轴的方向来看, 川西坳陷现今最大主应力方向趋势为北西方向, 不同地方的地应力方向的差异主要受南面印度板块俯冲和北西面龙门山挤压作用应力的叠加差异所致。

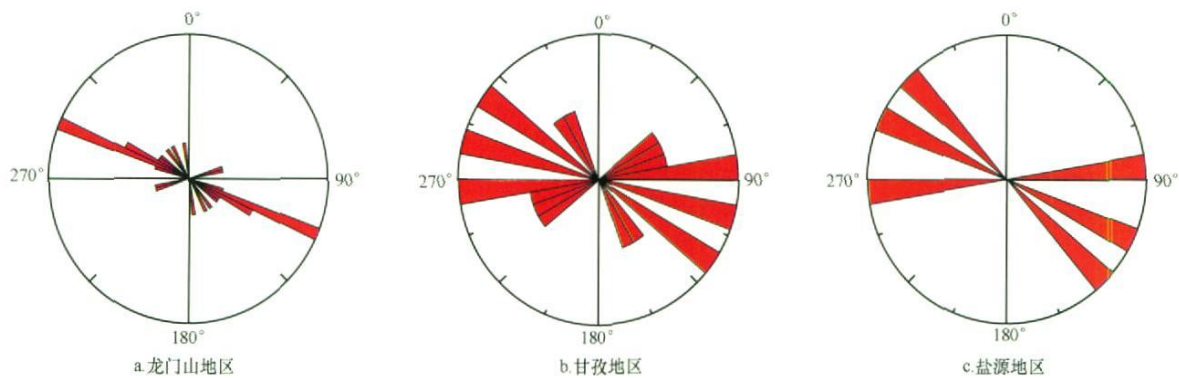


图 2 川西坳陷天然地震 P 轴方向玫瑰花图

Fig 2 Rose diagrams showing the P-wave direction of natural earthquakes in the West Sichuan Depression

以上天然地震所反映最大主应力方向的 P 轴方向与中科院地质力学所近 10 年 GPS 测定的地块位移方向有一定的吻合性^[3], 这也说明了通过天然地震 P 波方位来反映最大主应力的方向是具有一定的参考依据的。

2.2 相邻构造上的地应力方向

相邻构造上地应力状态往往具有一定的相似特征, 通过对新场构造、洛带构造、马井构造、新都构造、苏码头构造、白马庙构造、丰谷构造、平落坝构造的蓬莱镇组、沙溪庙组、须家河组的地应力方向研究成果进行汇总, 统计结果表明 (图 3): ①所统计构造上各地层的地应力的方向均为北北西向; ②蓬莱镇组的最大地应力优势方向为 110°左右, 沙溪庙组为 120°左右, 须家河组为 140°左右, 随着地层由浅到深最大主应力方向有向北偏转的趋势。

3 地应力方向的实验测试与分析

由于盐井沟构造上钻井取心时均未做定向,

因此本次对地应力的实验室分析首先需要采用古地磁实验进行岩心定向, 然后通过波速各向异性实验的测定来对研究层段地应力方向进行判断。其中岩心的古地磁实验定向主要是通过现代粘滞剩磁的获取来进行的^[11~13]。由于粘滞剩磁是岩石或沉积物在当前或最近地磁场方向的长期作用下, 因颗粒发生磁性弛豫而获得的一个剩磁组分, 较大的多畴颗粒具有较短的弛豫时间而较易获得粘滞剩磁; 而对沉积岩而言, 样品的天然剩磁 (NRM) 中都含有粘滞剩磁成分, 而且其强度约占 NRM 的 50%, VRM 记录的是现代地磁场的方向, 因此只要准确地测定出岩心 VRM 的磁化方向就能够得到岩心相对于现代地磁极的方位, 进而可以得到岩心的原始方位。波速各向异性对地应力方向的分析是由于在地层中岩石处在三向应力作用状态下, 当钻井取心时岩心脱离原来的应力状态, 自身将产生应力释放; 在应力释放过程中岩石会形成许多微小裂隙, 这些裂隙被空气所充填, 而岩石与空气波阻值相差很大, 于是岩心中优势微小裂隙的存在使得声波在岩心的不同方向上传播

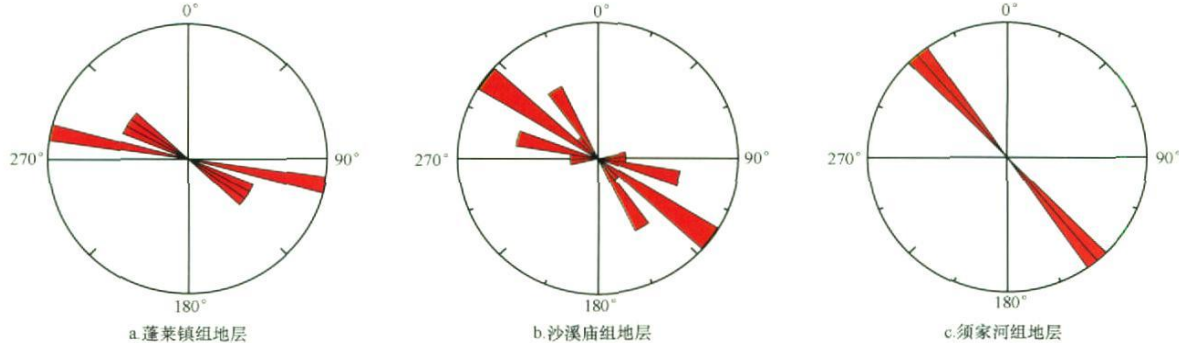


图 3 统计局部构造最大主应力方向玫瑰花图

Fig 3 Rose diagrams showing the maximum principle stress direction of regional structures

速度不同,存在明显的各向异性,而微裂缝又是沿垂直最大主应力方向优势分布的^[3 14],因此可以借助波速各向异性的实验测定结果来确定最大主应力的方向。

本次研究取样主要集中在构造核部的盐浅 6 井沙溪庙组取心段,按垂直深度依次取了 3 组样品(表 2),每个深度段对应的样品组考虑了不同方位取小样 6 次,共计 18 个样品进行室内实验室分析。由于古地磁定向实验的加热容易造成岩石内部结构的变化,影响声波各向异性实验的结果,因此在实际的实验操作步骤先对所取样品标画基准线,并测其各个方向上小样的波速各向异性,确定出最大主应力与基准线之间的夹角关系,然后进行古地磁实验确定基准线的原始方位,最后通过计算获得现今最大主应力的方向。

3.1 波速各向异性实验

通过 ZBL—U520 多通道超声波仪对盐井构造核部盐浅 6 井沙溪庙组钻井岩心进行波速各向异性实验,测量步骤如下。

1) 选择岩性、结构较为简单的岩心,尽量消

除岩性不均一的影响,标画基准线,作为测量基准方位,然后选相对较均匀的岩段标画水平基线,作为声波测量平面;

2) 以基线为起点,在其周围不同方向布置测点(发射点和接受点)组成监测网络;

3) 使用专用声波仪器向岩体中发出声波,并在各接受点接受声波;

4) 测量发射点至各接受点的声波传播速度,绘制速度分布椭圆,椭圆长、短轴的方向即代表了岩体中最大和最小主应力的方向。

试件径向声波各向异性测试结果见图 4 其中声波测试最大水平主应力与基线夹角为 60°。

3.2 古地磁岩心定向实验

实验样品的系统剩磁测试是在中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室美制立式 2G—755R 超导磁力仪上进行的,样品的系统热退磁处理使用美制 TD—48 热退磁炉完成。热退磁温度间隔为 40℃,一直加热到 340℃,样品的剩磁组分均利用主向量法分析获得。古地磁测试数据的分析结果表明(表 3)6 块样品均能分离出较可靠的剩磁分量,并计算出了每块样品标志线的方向和每个岩心段标志线 Fische 的平均值(表 3)。

3.3 实验结果

根据声波各向异性和古地磁定向结果,可计算出实验试样所处位置的现今最大和最小主应力方向,其具体结果见表 4。

表 2 取样位置及深度分布

Table 2 Location and depth of core sampling

样品号	取样井号	深度 /m	岩性
1	盐浅 6 井	1 292~1 296	细砂岩
2	盐浅 6 井	1 390~1 396	细砂岩
3	盐浅 6 井	1 544~1 548	细砂岩

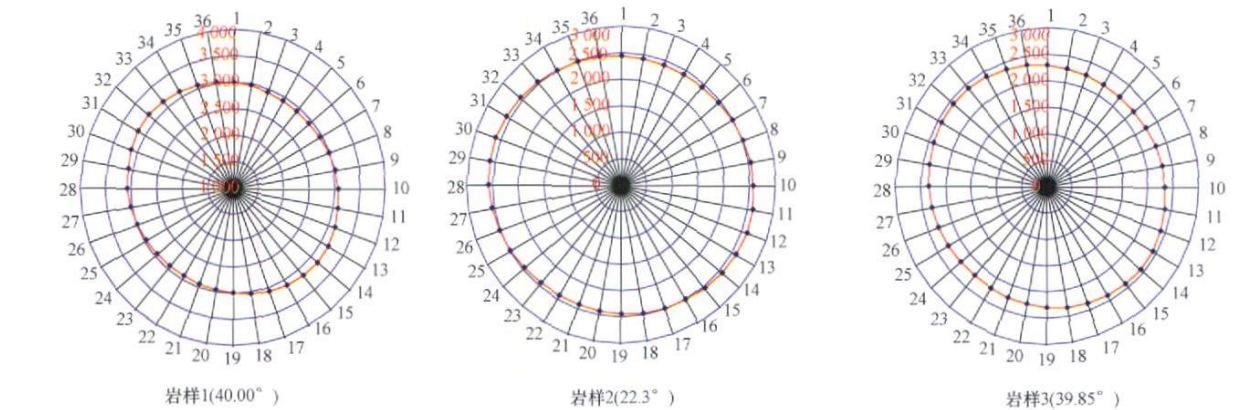


图 4 各组实验试样声波各向异性雷达图

Fig 4 Radar charts showing velocity anisotropy from different groups of samples

表 3 实验试样古地磁测试结果

Table 3 Paleomagnetic testing results of various samples

样品号	地理坐标		α_{95}	平均 $D/(^{\circ})$
	$D/(^{\circ})$	$I/(^{\circ})$		
1-1A	269. 6	-41. 7	3. 7	315. 0±26 1
1-1B	349. 9	-61. 6	5. 5	
1-1C	346. 7	-56. 7	4. 6	
1-2A	281. 6	-19. 7	3. 9	
1-2B	329. 3	-43. 4	5. 3	
1-2C	5. 1	-66. 4	8. 7	
2-1A	217. 6	-46. 9	4. 5	289. 6±15 5
2-1B	278. 3	-60. 8	6. 8	
2-1C	305. 4	-50. 6	7. 9	
2-2A	292. 9	-31. 8	3. 8	
2-2B	280. 9	-25. 9	3. 9	
2-2C	290. 3	-49. 5	8	
3-1A	54. 0	-84. 6	4. 6	261. 3±9. 3
3-1B	219. 5	-81. 8	4. 8	
3-1C	173. 9	-76. 3	4. 9	
3-2A	297. 5	-77. 3	3. 9	
3-2B	276. 6	-74. 3	5. 5	
3-2C	281. 6	-75. 5	7. 1	

注: D 磁偏角; I 磁倾角; α_{95} 置信圆锥半顶角。

实验测定岩石声波波速在 2 211. 18 ~3 163. 03 m/s 之间变化, 变异系数 1. 64 ~2. 38 数据变化中等。古地磁试验使用的是波速各向异性试验后的试样, 故各向异性试验对古地磁试验的结果有影响, 这样古地磁的测试结果有一定的误差范围, 偏差在 9. 3° ~26. 1°。

通过实验测定确定的三组样品最终最大水平主应力方位角平均为 375. 0° ±26. 1°, 311. 9° ±15. 5°, 300. 2° ±9. 3°, 从样品测试的结果来看, 第二、第三两组样品测试最大主应力方向与前文中天然地震分析确定的应力方向一致, 而第一组样品测试最大主应力方向相对向北偏离, 且误差范围也比第二和第三组样品大, 达到了 26. 1°。

表 4 实验试样最大、最小主应力方向

Table 4 The maximum and minimum principle stress directions of samples

试样编号	古地磁测试基线方位角 / (°)	声波测试最大水平主应力与基线夹角 / (°)	最大水平主应力方位角 / (°)	最小水平主应力方位角 / (°)
1	315. 0±26. 1	60. 0	375. 0±26. 1	85. 0±26. 1
2	289. 6±15. 5	22. 3	311. 9±15. 5	41. 9±15. 5
3	261. 3±9. 3	38. 8	300. 15±9. 3	30. 2±9. 3

3. 4 现今地应力方向综合确定

综合上述各种资料和方法的分析, 天然地震资料与第二、第三组样品实验分析结果以及相邻构造上地应力方向的情况具有一致性, 差异大的主要是第一组样品实验分析结果, 而第一组样品的实验误差范围偏大, 加上局部构造应力的可能偏转的都会造成测试结果的不一致。因此综合各项资料, 认为盐井沟构造沙溪庙组现今地应力方向应该为北西向, 取值以第二、第三组样品实验分析平均结果为准, 方向为 306. 0° ±12. 4°。该结果虽然有一定的区间范围, 但足以满足如压裂方案设计、布井方向, 水平钻井方位等需求。

4 结论与认识

- 1) 天然地震是地层应力集中的一种体现形式, 其地震波传播的 P 波方向是可以得到现今最大主应力方向的, 通过对川西坳陷天然地震的追踪分析获得了研究区现今应力方向为北西向。
- 2) 川西坳陷盐井沟构造相邻构造区应力方向的统计表明了区域上地应力方向为北西方向, 与天然地震资料获得最大主应力方向具有一致性。
- 3) 古地磁定向结合波速各向异性实验是进行地应力方向研究的主要实验手段, 通过三组 18 个小样进行了实验分析, 其中第二、第三组样品分析结果与天然地震和相邻构造上地应力方向趋势一致, 而第一组样品分析最大主应力方向相对向北偏转。
- 4) 综合各项资料, 认为实验分析第二、第三两组样品分析结果可以作为盐井沟构造上正常的最大主应力方向, 该方向为 306. 0° ±12. 4°, 而第一组样品应力发生偏转可能受局部构造变形所致。

5 结论

源内组合主要发育在中央构造稳定区和东部凸起带,以致密低渗岩性油藏为主,油藏具有面积大、油柱高度小、储量大而产量低的特点;远源组合主要发育在西缘冲断带和东部凸起带,以断块油藏和断背(鼻)油藏为主,油藏具有面积小,油柱高度在西缘冲断带较东部凸起大、储量小而产量高的特点;源外组合在西缘冲断带和东部凸起带均有发育,是远源组合遭到破坏后形成的次生油藏,储量少、但产量高。从源内组合—远源组合—源外组合,随着离烃源岩距离的增大,储层物性变好,储量依次减小,产量依次增高。

参 考 文 献

1 长庆油田石油地质编写组.长庆油田石油地质志[M].北京:石油工业出版社,1987

2 罗群.鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区冲断带断裂特征及其控藏模式[J].地球科学,2008 29(5): 619~627

3 赵俊兴,陈洪德.鄂尔多斯盆地侏罗纪早中期陕甘古河的演化变迁[J].石油与天然气地质,2006 27(2): 152~159

4 赵重远.鄂尔多斯地块西缘构造演化及板块应力机制初探[A].见:内蒙古石油学会编.鄂尔多斯盆地西缘地区石油地质论文集[C].内蒙古 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1983

5 谭俊敏,刘丽峰,许云书,等.麻黄山西区块二维地震资料综合解释与圈闭评价[J].石油与天然气地质,2007 28(1): 92~100

6 孙家振.前陆盆地逆冲断层类型与形成机制——以鄂尔多斯地块西缘和塔里木盆地北缘为例[J].石油与天然气地质,1991,12(4): 406~416

7 Jansa L F, Noguera urea V H. Geology and diagenetic history of overpressured sandstone reservoir Venture gas field offshore Nova Scotia, Canada[J]. AAPG 1990 74(10): 1 640—1 658

8 Luhanzaido M, Goult N R, Swabrick R E. Dependence of sonic velocity on effective stress in North Sea Mesozoic mudstones[J]. Marine and Petroleum Geology 2006 23(6): 647—653

9 李延钧,陈又才,杨远聪,等.板桥凹陷古流势与油气运移聚集史研究[J].沉积学报,1996 14(4): 94~101

10 邓秀芹,刘新社,李士祥.鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密史与油藏成藏史[J].石油与天然气地质,2009 30(2): 156~161

11 何自新.鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社,2003

12 Yongtai Yang Wei Li, Long Ma. Tectonic and stratigraphic controls of hydrocarbon systems in the Ordos basin: a multicycle tectonic basin in central China[J]. AAPG 2005 89(2): 255—269

13 丁晓琪,张哨楠.鄂尔多斯盆地西南缘延安组层序地层分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008 35(6): 681~685

(编辑 高 岩)

(上接第 725 页)

参 考 文 献

1 谢润成,周文,高雅琴,等.应用偏相关+灰关联方法进行致密砂岩气藏压裂地质选层[J].石油与天然气地质,2008 29(6): 797~800

2 张明利,金之钧,万天丰,等.柴达木盆地应力场特征与油气运聚关系[J].石油与天然气地质,2005 26(5): 674~679

3 周文,闫长辉,王世泽,等.油气藏现今地应力场评价方法及应用[M].北京:地质出版社,2007 3~5 17~25 48~72

4 周志军,李菁,刘永建,等.低渗透油藏渗流场与应力场耦合规律研究[J].石油与天然气地质,2008 29(3): 391~396 404

5 邓莉.川西坳陷沙溪庙组气藏成藏主控因素探讨[J].断块油气田,2003 10(5): 26~28

6 肖富森,李正文,徐明华,等.川西盐井沟构造沙溪庙组砂体分布特征浅析[J].天然气工业,2004 24(11): 42~44

7 王二七,孟庆任.对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论[J].中国科学(D辑:地球科学),2008 38(10): 1 221~1 233

8 张兴权,安玉玲.天然地震与构造裂缝、油气运移的关系研究[J].石油勘探与开发,2000 27(4): 106~108

9 国家地震科学数据共享中心.专题数据——中国震例[DB/OL].http://data.earthquake.cn/data

10 董树文,张岳桥,龙长兴,等.四川汶川 8 级地震的发震机理分析[DB/OL].http://www.geotech.ac.cn/wenchuanzhizhen

11 李学森,吴汉宁,张小浩,等.钻井岩心重定向的古地磁方法及其可靠性研究[J].油气地球物理,2006 27(4): 106~108

12 曾联波,漆家福.利用岩石磁组构恢复沉积盆地古构造应力场方法的探讨[J].石油实验地质,2007 29(6): 628~632

13 李天本,吴柏志,贾耀勤,等.桩西油田桩 104 块地应力测量技术及应用[J].油气地质与采收率,2001 8(4): 48~50

14 宛新林,席道瑛,叶青,等.岩石各向异性实验研究及对工程勘探的影响[J].中国煤炭地质,2008 20(8): 39~41

(编辑 董 立)