

文章编号: 1009-3850(2010)03-0053-05

利用砂岩中波痕的物理参数分析沉积环境

冯兴雷¹, 邓宏文³, 马立祥², 林会喜⁴

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;
3. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田有
限公司地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 欧洲学者在 20 世纪 80 年代研究阿尔卑斯地区海相沉积和英国设得兰地区陆相沉积的波痕构造时建立了一系列的数学表达式。本文利用了他们的研究成果, 在大王北洼陷沙河街二段砂岩中进行了应用研究。结果表明, 处于特殊沉积环境下的砂岩的波痕物理参数呈有规律的变化, 反映不同的水动力条件和水体深度; 结合粒度分析认为, 砂质颗粒在水体中主要作跳跃运动, 其次是跳跃运动与悬浮运动的转换运动, 部分质点作悬浮运动, 反映了水体浅、能量较高。计算结果与实际观察较吻合。

关键词: 大王北洼陷; 沙河街二段; 波痕; 物理参数; 沉积环境

中图分类号: P512.2 文献标识码: A

1 引言

用沉积岩的沉积构造再造古沉积环境是沉积地质学研究的重要内容之一。已有一些学者在定量地研究古环境的物理参数方面进行了有意义的探索。实验研究表明, 波痕的波长与摆动流近床底幅度密切相关^[1]。因此, 保存在地质体中的尖峰状摆动波痕为重塑古沉积环境的参数提供了良好的基础^[2]。P. A. Allen^[3]对英国设得兰地区泥盆系湖相沉积物中的波痕作了详细研究; Hamewood 和 Allen^[4]对瑞士西部的海相磨拉石中的波痕特征与沉积环境的关系进行了探讨。P. A. Allen^[5]指出, 在一定的条件下, 古波的周期是沉积物颗粒大小和波痕波长的函数。Dien 选择了瑞士至德国阿尔卑斯前渊盆地中渐新世一早中新世的海相磨拉石作为研究对象, 估算了砂岩波痕形成时的古沉积环境的水体物理参数。国内学者聂逢君^[6]等也对宣化地区的石英砂

岩的波痕进行了定量的物理参数研究, 对古环境进行了判断, 计算结果与地层中的其它环境标志基本一致, 效果较为理想。

2 地质背景

研究区大王北洼陷位于车镇凹陷东北部, 南北分别为义和庄凸起和埕子口凸起, 南以大 1 断层为界, 北以埕南断层与为界, 西以车 3 鼻状构造为界, 东以大 90 断层与郭局子洼陷相隔, 面积约 240 km²。在盆地(凹陷)演化进程中, 沙二段沉积时期的大王北洼陷早期具断拗转换结构, 晚期拗陷结构逐渐明显, 地层向周边凸起逐渐超复减薄。沙二段沉积之后基底抬升, 地层遭受不同程度剥蚀。钻井揭示洼陷内残余地层厚度为 20~460 m。经沉积厚度和差异压实校正恢复后的古地貌显示洼陷形态整体似“碟状”, 仅南缘大 1 断层前缘地形梯度略大, 其余地区均以缓坡形式向边缘凸起过渡(图 1)。沉积相

收稿日期: 2010-08-05 改回日期: 2010-08-10

作者简介: 冯兴雷, (1982-)男, 助理工程师, 主要从事沉积学研究

资助项目: 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司项目: “济阳拗陷滩坝砂体解剖与预测研究”

类型以厚度不等的三角洲和砂质滩坝沉积为主,其中滩坝相分为:坝主体、坝侧缘、滩和坝间四种微相。大王北洼陷沙二段滩坝沙物质的来源以北部发育的三角洲前缘砂为主,在平行和垂直滨岸湖浪的作用下,三角洲前缘砂被改造,向沿岸和湖盆内搬运和沉积,形成远砂坝和分布较广的滩砂。南部滩坝物质一部分来自中北部的远砂坝和滩砂的再搬运,一部分来自南部滨岸先前沉积的碎屑物质经波浪的冲洗回流作用被搬运至沿岸处形成滩坝相沉积。洼陷南部缺乏河流三角洲注入,滩坝相较北部发育,且平行或略斜交滨岸展布。滩坝成因的粉砂岩、粉细砂岩和浅灰色、灰绿色、紫色泥岩呈薄互层,偶见碳酸盐岩,粗砂岩相对缺乏。由于研究区滩坝相砂体沉积物的颗粒都比较细,其粒度概率累积曲线主要为

两段式:即跳跃总体和悬浮总体(图2)。具有跳跃总体十分发育,悬浮总体次之,没有滚动总体段的特点。研究区滩坝的砂体岩石颗粒圆度以次棱角次圆状为主,棱角状少见,结构成熟度较高。砂岩中生物潜穴、扰动构造、浪成波痕、干涉波痕十分发育,电测响应特征清晰^[7-9]。本文主要选取砂岩系列岩石类型(粉砂岩、细砂岩为主)中的波痕,进行精确的现场物理参数测量和波痕应用计算,从而对其沉积环境和水动力环境进行分析。

3 选取波痕的依据

目前对古波痕研究已发展到应用数学表达式来计算古水深及古波痕的形成条件。而古水深及古波痕的特征对研究恢复盆地内沉积相的类型和展布有

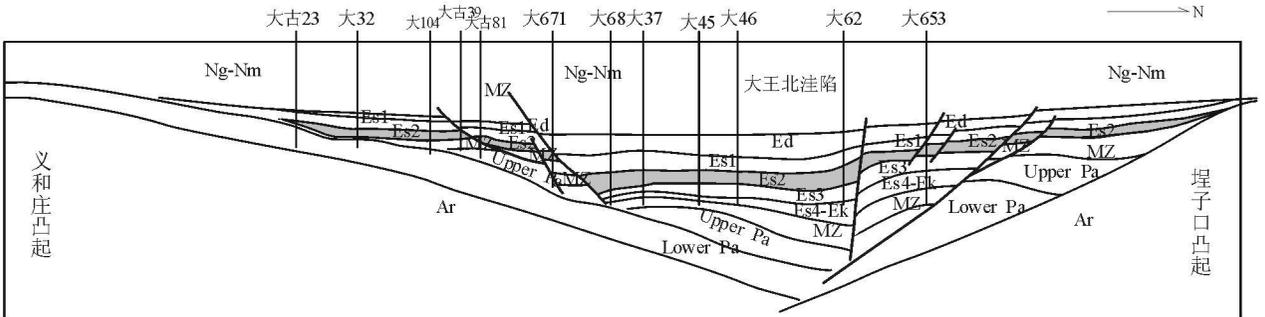


图1 大王北洼陷过大古23井大32井大104井大45井大46井大62井大653井构造剖面图
(图中灰色区域为大王北洼陷坳陷期沙二段的地质分布)

Fig 1 Structural section across the Da-gu-23—Da-32—Da-104—Da-45—Da-46—Da-62—Da-653 well area in the Dawangbei depression

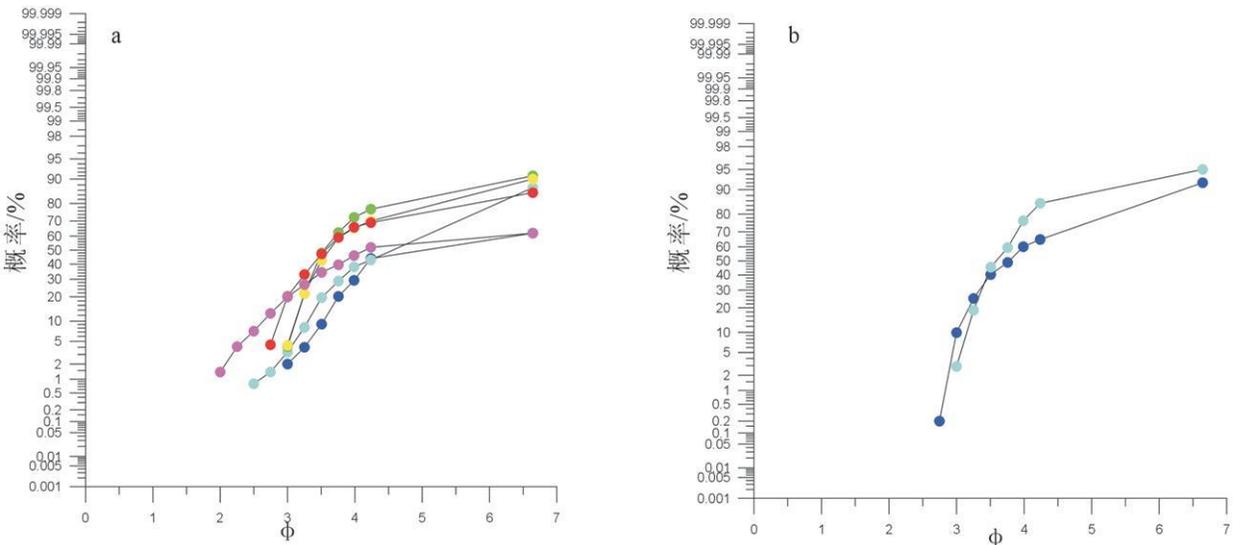


图2 大55井沙二段砂质滩坝沉积粒度概率累积曲线
a 深度: 3028.75—3035.89m b 深度: 3144.1—3157.74m

Fig 2 Grain size probability accumulation curves for the sandy beach and bar deposits through the Da-55 well in the second member of the Shahejie Formation

a Depth 3028.75—3035.89m b Depth 3144.1—3157.74m

着重要的指示意义。用波痕估计出来的古环境的物理参数解释沉积环境的相对变化趋势,将是一种有效的手段。图3是描述波痕与运动水体之间关系术语示意图。为了比较准确地估算形成砂岩波痕其形成的水体特征,所测量的波痕类型需满足一定的条件。

据 Dirm(1985)的研究,在所有的波痕中只有横断面上是尖脊的波痕,其最大的波痕对称指数被限制在 1.5 内,而垂直形态指数不能超过 9。但 Allen 的研究表明,垂直形态指数必须限制在 7.5 以内方可使用。大王北洼陷沙河街二段砂岩没有遭受强烈的变质作用,只是受了一定的后期成岩改造作用,大多数的碎屑颗粒出现了次生加大现象。所以,考虑到后期的压实作用,垂直形态指数在 Allen 的标准上有所展广,本文将限制在 9 以内。

研究区砂岩基本符合上述限制条件。所选的砂岩在一个特定的层位里,沉积构造如波痕和交错层理等均保存完好,又因砂岩中碎屑颗粒的成分成熟度和结构成熟度均较高,除了成岩作用形成了次生加大边以外,碎屑岩成分和结构保持不变,这正是选择本层作参数估算的理由所在。

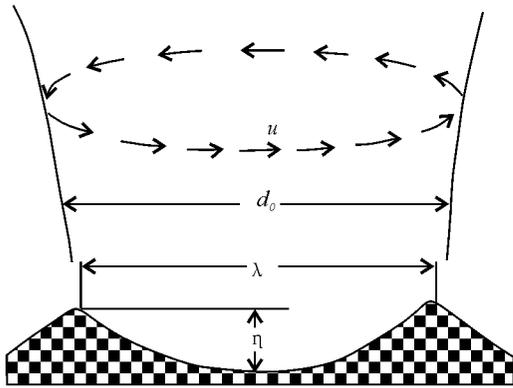


图3 描述波痕术语与水介质运动关系示意图

u 水质点运动轨道速度; η. 波痕高度; λ 波痕的波长; d₀. 近底水质点轨道直径

Fig 3 Schematic diagram showing the relationship between the terminology of ripple marks and water media

u Orbital velocity of Particle motion; η. Height of ripple marks; λ. Wavelength of ripple marks; d₀. Orbital diameter of near bottom particles

4 估算所用数学表达式

在前人研究的基础上,综合现场测量的波痕物理参数以及波痕发育砂岩的岩石学物理性质特征,总结出古水深的公式:

公式①: $d_0 = \lambda / 0.65 \dots \dots$ 近底质点运动轨道直径 d_0

道直径 d_0

式中: d_0 为近底质点运动轨道直径; λ 为波痕的波长;

公式 ②: $U_c^3 = 0.21 (d_0/D)^{1/2} (\rho_s - \rho) gD/\rho \dots \dots$ 启动沉积物的临界速度 U_c ;

式中: D 为沉积物颗粒直径; ρ 为水介质的密度; ρ_s 为沉积物的密度; g 为重力加速度;

公式 ③: $I_r = \frac{\pi g d_0^3}{2 U_c^3}$ 的关系; $\dots \dots$ 临界速度 U_c

与其所对应的水波波长 I_r ;

最后通过 Komar 和 Dirm 分别给出的: 经验公式④: $H_{max} = 0.142 \times I_r$

式中: H_{max} 为最大水波的波高;

经验公式⑤: 在浅水区 $h = H/0.89$

式中: h 为沉积古水深;

可得出最终的沉积古水深计算公式为:

$$h = 0.072 \lambda^{1.5} D^{0.5} \frac{\rho}{\rho_s - \rho}$$

式中: 沉积古水深 h 的单位为 m; 波痕的波长 λ 的单位为 m; 沉积物颗粒直径 D 的单位为 mm; 水介质密度的 ρ 单位为 g/cm^3 ; 沉积物的密度 ρ_s 的单位 g/cm^3 。

5 计算结果

在计算过程中,根据研究区的实际状况,以及运用波痕计算古水深的要求,选取的波痕的波长 λ 为直接测量所得;沉积物颗粒直径 D 为通过沉积岩石的粒度分析数据所得,由于记录波痕的深度为一深度段,因此 D 为平均颗粒直径;因为大 55 井沙二段沉积时期为淡水湖相沉积,所以水介质密度 ρ 取 $1 g/cm^3$,沉积物的密度 ρ_s 数据为密度测井所得,同样,由于记录波痕的深度为一深度段,因此 ρ_s 也为平均密度。通过计算,得出利用波痕所计算出的古水深值,如表 1 中所示。

6 结果解释

(1) 根据观察上面所计算出来的波痕与古水深的关系表,对照岩石的沉积特征,可以得出:较纯砂岩发育的砂体沉积水深一般为 4~6m,砂岩的沉积厚度一般都不超过 4m,而泥质含量较高的砂岩发育的水深较小,一般为 2~4m。在大 55 井沙二段沉积中,以此种砂体居多。由此推测,当时的沉积水体比较浅,且水体条件变化比较反复,每一次沉积的时间过程不长。

表 1 应用波痕计算古水深、相对古水深曲线平均古水深及对应沉积相一览表

Table 1 Fossil water depths and relevant sedimentary facies based on ripple mark parameters

井深度 /m	波痕波高 η /cm	波痕波长 λ /cm	D/mm	密度 ρ_s /g/cm ³	计算古水深 /m	相对古水深 曲线平均值 /m	波痕发育段 岩性	对应段相 类型分析	对应 程度
3087~3097	1	8	0.10	2.2	4.32	5.0	灰白色粉细岩	坝主体	好
3097~3107	1.5	8	0.08	2.5	3.92	4.0	泥质粉砂岩	滩	好
3160.5~3172	1.5	10	0.125	2.2	5.42	7.5	浅灰色粉砂岩	坝侧缘	一般
3187.5~3192.5	1.2	9.5	0.09	2.4	5.03	6	灰白色细砂岩	坝主体	好
3192.5~3214	1	7	0.08	2.6	2.99	3.0	灰白色粉砂岩	滩	好
3340.53~3343.5	1.5	10	0.125	2.2	5.42	7.2	灰白色粉砂岩	坝侧缘	一般

(2)选取的样品共计 6 个,其中与相对古水深曲线的平均值对应程度较好的有 4 个,误差范围在 0.68~0.01m 之间,相对准确度较高。计算的古水深深度与沉积微相对应分析后可以看出,根据岩石学特征、沉积旋回特征和沉积构造等条件,分析出来的相同沉积微相对应的计算古水深相近甚至相同。但也有不同,如 3097~3107m 与 3192.5~3214m 两处的样品,沉积相同为滩相,但所处的古水深相差却有将近 1m,这与滩坝沉积相的沉积微相的组成和分布有关,因为滩相可以在坝体的前方和后方都可以发育,其分布位置不同,沉积水深也就会有较大的差异。

(3)不同的沉积微相的沉积古水深不同。总体来说,坝体(包括坝主体和坝侧缘)的沉积水深相对于滩来说要深,因为坝体是一种比滩厚的沉积砂体,其沉积需要相对较大的可容纳空间。但也不是绝对的,因为在坝体形成后,由于波浪的改造作用,在坝前形成的滩砂体沉积所处的古水深可能要比坝体深。此外,坝主体比坝侧缘沉积的古水深浅,因为坝体最高和最厚的砂体部位应为坝主体,其岩石成熟度最高,说明其受到的水动力能量较坝侧缘大,加上波浪纵向上向下传播能量逐渐减小的水动力特征,就可以说明坝主体的沉积水深要比坝侧缘浅,但其差别有限。这与运用波痕计算得出的相应沉积相的古水深是一致的。

参考文献:

- [1] LORQUIST K E B. Sand ripple growth in an oscillatory flow water tunnel [R]. Tech. Pap. U. S. Coastal Eng. Res. Center, 1978.
- [2] DIEM B. Analytical method for estimating paleowave climate and water depth from wave ripple marks [J]. Sedimentology, 1985, 32: 705-720.
- [3] ALLEN P A. Wave-generated structures in the Devonian lacustrine sediments of SE. Shetland and ancient wave conditions [J]. Sedimentology, 1981, 28: 369-379.
- [4] HOMEWOOD P, ALLEN P A. Wave, tide, and current controlled sandbodies of Miocene Molasse, western Switzerland [J]. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 1981, 65: 2534-2545.
- [5] ALLEN P A. Reconstruction of ancient sea conditions with an example from the Swiss Molasse [J]. Mar. Geol., 1984, 60: 455-473.
- [6] 聂逢君,姜美珠,吴河勇,等.利用砂岩中波痕的特征估算沉积环境的物理参数—以宣化地区长城系下部石英砂岩为例 [J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 255-259.
- [7] 邓宏文,马立祥,姜正龙,等.车镇凹陷大王北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究 [J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 715-724.
- [8] 冯兴雷,马立祥,邓宏文,等.大王北洼陷浅水漫湖砂质滩坝沉积微相特征 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(1): 9-14.
- [9] 马立祥,邓宏文,冯兴雷,等.济阳拗陷三种典型滩坝相的空间分布模式 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 66-76.

Applications of Physical parameters for the ripple marks in sandstones to the analysis of sedimentary environments

FENG Xing-lei, DENG Hong-wei, MA Li-xiang, LIN Hui-xi

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 3. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Research Institute of Geological Sciences, Shengli Oil Field Company, SINOPEC, Dongying 257015, Shandong, China)

Abstract: With the aid of the previous results of research, the present paper focuses on the sandstones from the Da55 well in the second member of the Shahejie Formation in the Dawangbei depression. The physical parameters display regular variations in the ripple marks from the studied sandstones in particular sedimentary environments, suggesting different water depths and energy. The grain size analyses demonstrate that the saltation populations of the sandy grains predominate with subordinate suspension of the sandy grains in the sandstones, indicating shallower water depths and higher energy in the study area.

Key words: Dawangbei depression, second member of the Shahejie Formation, ripple mark, physical parameter, sedimentary environment