

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0043-07

山东惠民凹陷古近系风暴岩沉积特征及沉积模式

袁 静

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘 要 利用钻井取心、薄片鉴定、粒度分析及测井解释等资料和手段,对惠民凹陷古近系风暴岩进行研究。结果表明,该凹陷风暴岩岩石类型丰富,包括各类碎屑岩、生物灰岩和火山碎屑岩。粒度分布具有“高斜多跳一悬式”、多段式和高斜一段式等多种样式。沉积构造也反映出重力流和牵引流兼有的水动力机制,发育渠模、冲刷面和截切构造等底层面侵蚀构造,递变层理、块状层理、丘状层理、洼状层理、平行层理等层理构造,波痕和各种同生变形构造、生物逃逸构造等。研究区风暴岩理想的垂向层序从下至上可抽象为“似鲍玛序列”: Sa 递变层理段, Sb 较大型浪成交错层理段, Sc 平行层理段和丘状交错层理粉砂—细砂岩段, Sd 波状纹层段, Se 泥岩段和 Sf 正常半深湖泥页岩段。主要根据风暴岩的垂向序列类型、沉积构造特点和原地沉积物特征等总结出九种风暴岩序列和原地风暴岩、A 型近源风暴岩、B 型近源风暴岩和远源风暴岩等四种风暴岩沉积模式。

关键词 风暴岩 沉积特征 沉积模式 古近系 惠民凹陷

作者简介 袁静 女 1972 年出生 副教授 博士 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

风暴沉积研究始于对古代地层中风暴岩的探讨。自从 G Kelling 和 P R Mullin^[1] 提出, T Aigner^[2] 重新定义风暴岩 (Tempestites) 后, 风暴岩一度成为国内外沉积学界的研究热点。国内学者从 20 世纪 80 年代开始对风暴事件沉积进行研究, 但主要集中于海相地层中的风暴沉积, 对陆相湖盆风暴岩报道较少^[3~6]。

1 区域地质背景

惠民凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷最大的一个次级凹陷, 西与临清拗陷中的莘县凹陷相连, 东与东营凹陷相通, 南以齐河—广饶断裂与鲁西隆起相接, 北以陵县—阳信断裂与埕宁隆起为邻。凹陷长轴大致呈 NNE 走向, 面积约 7 000 km²。根据其构造特点及地层发育情况, 本区又可进一步划分为临南、滋镇、阳信、里则镇和肖庄等次一级洼陷以及中央隆起带和南斜坡八个次级构造单元 (图 1)。惠民凹陷古近纪沉积时期, 构造运动强度相对较低, 湖盘面积较小, 水体相对较浅且较稳定, 深湖区范围较小, 半深湖区 (正常浪底—风暴浪底之间的湖底范围) 相对较广, 发育有丰富的风暴沉积。下面将着重阐述该凹陷古近系风暴岩的沉积特征及沉积模式。

2 沉积特征

2.1 岩石学特征

惠民凹陷古近系沙河街组和东营组与风暴层序有关的岩性主要有含砾砂岩、中细砂岩、粉细砂岩、泥页岩、生物灰岩、含生物碎屑砂岩和火山碎屑岩等。部分砂砾岩和泥页岩中含有泥砾, 粒径 0.5~3.0 cm, 颜色可深可浅, 以灰色为主, 有时为棕红色, 并保存良好的水平纹层。生物灰岩中富含灰绿色泥晶灰岩砾屑、生物灰岩砾屑, 为风暴成因的内碎屑。据镜下统计, 粉细砂岩中岩屑含量高, 平均为 25%, 最高达 35%, 成分有陆源多晶石英、燧石、中酸性喷出岩及泥岩岩屑等。杂基含量低, 一般小于 15%。

2.2 粒度特征

由于风暴流以牵引流为主, 又具有某些重力流的特点, 因此其沉积物粒度图有反映牵引流和重力流成因的多种类型^[7]。

第一种类型是“高斜多跳一悬式” (图 2A), 即粒度曲线由多个 (2~3) 跳跃次总体和一个悬浮总体组成, 斜率均较高, 反映多组水流的影响和较好的分选, 如商 67 井 2355.15~2357.30 m、田 5-7 井 2950.5 m 风暴沉积物跳跃总体两分, 含量为 10%~30%, 斜率

40% ~ 55%; 悬浮总体含量 60% ~ 90%, 斜率 50° ~ 70° 。跳跃和悬浮总体交截点在 3.5Φ 土。此种类型曲线反映风暴衰退时能量较弱的牵引流性质。

第二种类型是多段式, 曲线有多个交截点, 由多个

次总体组成的跳跃总体粒度区间跨度大 ($1.5 \sim 3.5\Phi$), 斜率较低 ($50^{\circ} \sim 10^{\circ}$), 分段不明显, 悬浮总体含量较高 (可达 90%), 反映小型风暴强盛期的重力流特点, 如商 67 井 2371.68 m 处的风暴沉积物 (图 2B)。

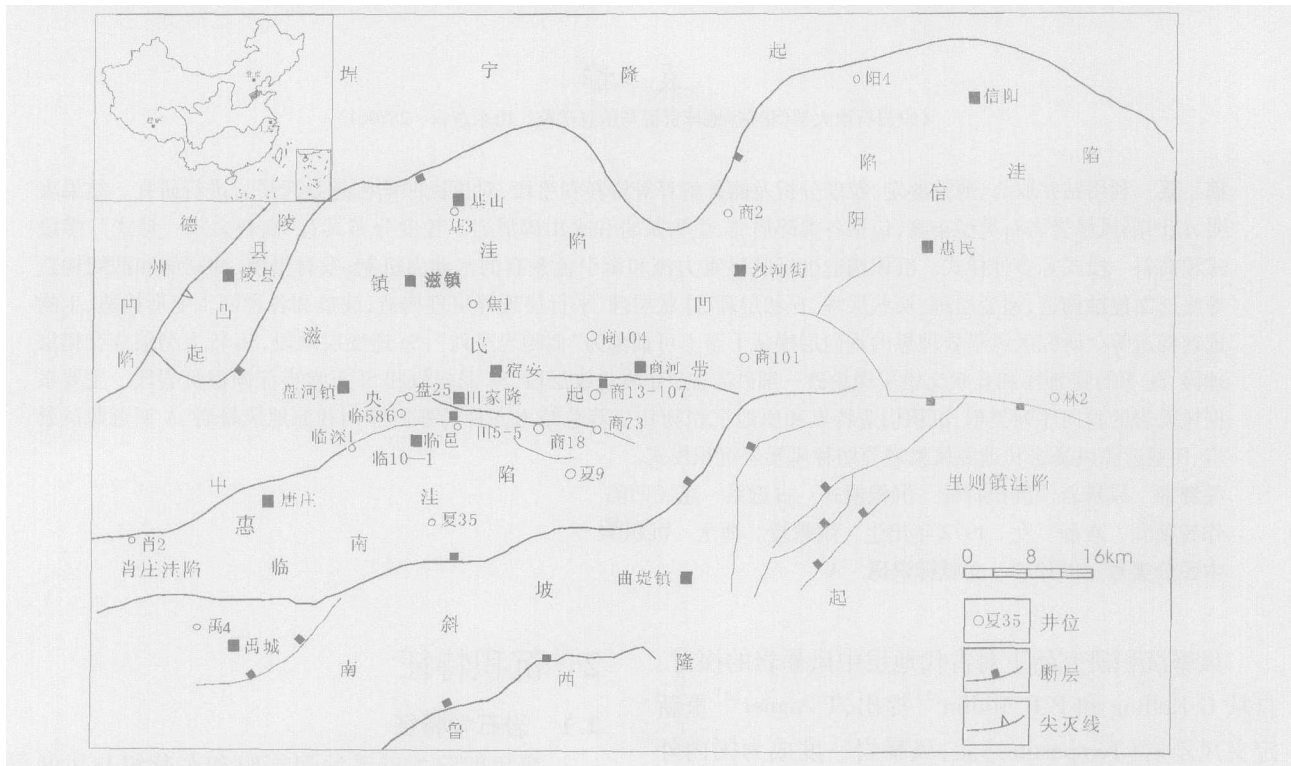


图 1 惠民凹陷区域地质概况

Fig 1 The regional geology map of Huimin in Sag

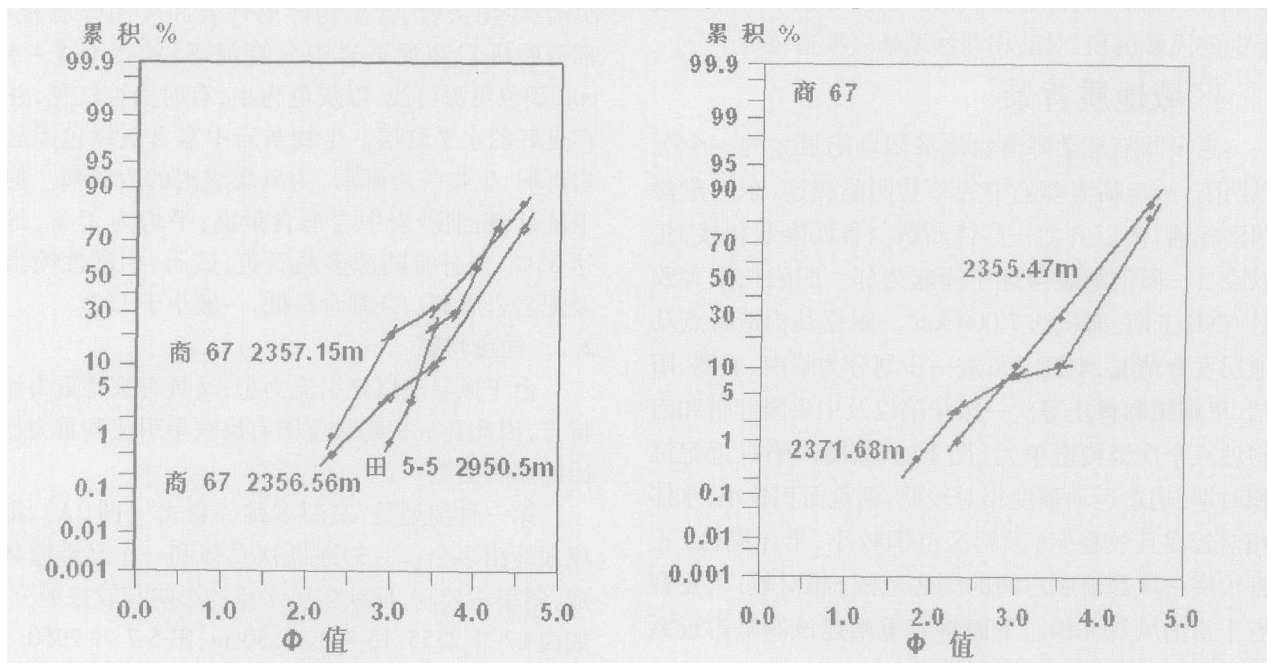


图 2 惠民凹陷古近系风暴沉积粒度概率图

Fig 2 Cumulative probability plots of Paleogene tempestites in Huimin in sag

第三种类型是“高斜一段式”, 曲线基本由一条斜率较高(60°~70°)的直线段组成(即使有分段, 各段斜率相似而且均较高), 悬浮沉积特征不同于牵引流, 以其高斜率分选好而有别于一般的重力流沉积, 正是风暴流沉积的典型特点(图 2B, 商 67 井 2 355~47 m)。

2.3 沉积构造特征

岩心观察表明, 研究区古近系反映风暴流沉积的沉积构造十分丰富, 类型多样(图 3)。其中, 渠模、截切等侵蚀构造、丘状和洼状交错层理是风暴沉积的特定构造; 递变层理和块状层理、生物逃逸迹、浪成波痕、准同生变形构造等虽可成由于其它环境, 但和典型风暴成因构造伴生者无疑形成于风暴流和风暴浪。

2.3.1 底面侵蚀构造

强流体流经沉积物表面时, 便形成各种侵蚀构造。保存于沉积物底面的侵蚀构造是识别风暴岩的重要标志^[8]。本区常见的侵蚀构造有渠模、冲刷面和截切构造等。

渠模也称钵模, 是在风暴高峰期风暴浪引起的涡流及风暴退潮流强烈地侵蚀湖底而形成的扁长状侵蚀充填构造(图 3A), 是风暴流环境的良好指相构造。渠模不同于重力流沉积环境中的槽模, 渠模具有深且陡的渠壁, 不具有方向性, 也不一定成组出现, 并且侵蚀冲刷下来的下伏细粒沉积物往往以同生泥砾、砂球、撕裂屑的形式充填在渠模附近。

冲刷面是强烈的风暴流冲刷沉积基底形成的槽状凹陷或波状起伏的不平坦面, 其凹凸程度反映了风暴作用的大小。研究区冲刷面呈平缓的波状、槽状, 其内充填的砾岩或砂砾岩具有递变层理或块状层理, 顶部具有丘状交错层理。

截切是造成研究区砂岩顶面不平整的构造之一, 如田 9 井(图 3B), 块状层理的砂岩一侧高出, 一侧变平, 截切角度较大, 并被泥质充填, 表现为泥质冲刷砂质, 它是由于风暴底部回流有很强的剪切力, 使先期沉积的砂质遭到侵蚀, 并被部分切去, 形成了不规则的剪切面。毫无疑问, 截切构造是风暴流影响湖底有利证据。

2.3.2 层理

惠民凹陷古近系风暴岩层理类型多样, 特征各异。下面介绍与风暴作用及风暴重力流作用有密切关系的几种层理类型。

2.3.2.1 丘状、洼状交错层理和平行层理

丘状交错层理在临邑、田家、商河、临南一带风暴岩中均有发现, 其内部纹理清晰, 丘高 1~7 m, 层系上

部细层凸起呈圆丘状, 下部细层与下界面平行(图 3G, H, I, J), 在商 13~107 商 67 田 9 夏气 1 井中均有发育, 一般发育在灰色粉细砂岩中, 但有发育在红色细砂岩中的(图 3I), 推测是形成于风暴期间的激浪带^[9]。另外在商河地区见有少量的洼状交错层理, 层面与细层均下凹呈洼状, 纹层与层系界面平行(图 3K)。

本区丘状交错层理常与平行层理共生, 位于块状层理、递变层理之上, 多数研究者认为它是风暴浪减弱时由弱振荡水流和多向水流形成的孤立沙波迁移造成的, 是风暴作用的重要标志。平行层理(图 3F)见于中细砂岩中, 顶部常被泥岩截切, 砂岩剥开面上可见剥离线理构造。

2.3.2.2 递变层理和块状层理

位于冲刷面之上, 一般厚约 10~20 m。岩心中所见递变层理多为粗砂、细砾或生物介壳粒度向上变细的正粒序, 是风暴回流触发重力流在较深水区形成的。夏气 1 井沙一段发育的逆粒序(图 3E)与下伏泥岩呈突变接触, 可能与风暴流的动力筛选作用有关(米德尔顿, 1970), 也可能成由于分散压力对颗粒的分选作用(巴格诺尔德, 1954, 1968)。当递变层理不发育时, 常形成块状层理, 顶部有时被截切构造削顶。

2.3.3 波痕

除了截切构造, 波痕也是造成风暴砂岩顶面不平整的构造之一。尽管波痕与风暴岩没有必然关系, 但形成于半深湖环境的波痕无疑代表了比正常波浪具有更大波及深度的风暴浪的活动。本区所见波痕为直脊、曲脊或音叉状, 略对称, 有时见浪成干涉波痕。波长约 3~5 cm, 波高 0.3~0.6 cm(图 3M), 音叉状波痕表面发育了生物的水平蛇形迹, 反映其形成于较深水环境。波痕是波浪活动最常见的鉴别标志, T. Agner^[8]所提出的理想风暴层序与浊流层序的区别主要就在于这一点。

2.3.4 生物成因构造

本区与风暴作用有关的生物成因构造最重要的莫过于生物逃逸迹(图 3N, O, P)。它一般位于风暴层序的下部, 是一种较细长的垂直潜穴, 不具回填构造, 代表了事件沉积作用的发生: 当快速的沉积作用发生时, 生物为了不被埋葬便向上逃逸或为避免被风暴流卷裹而向下逃逸。

2.3.5 准同生变形构造

虽然准同生变形构造可能起由于多种沉积迅速的环境, 但一般来说, 它们在牵引流中较少出现, 多出现在事件沉积中。风暴形成的砂泥互层沉积由于堆

积速度快,来不及排水,从而形成超孔隙压力,随后便形成一系列变形构造。本区准同生构造非常发育(图 3C, D),主要有重荷构造、火焰状构造、球枕构造、包卷层理、泄水构造等。早在 1986 年刘宝

等^[10]就在四川下二叠统碳酸盐岩风暴岩介壳层中发现了包卷层理。田 5-5 井中砂岩球枕构造直径 2~5 cm,具有纹层,但已变形,变形的纹层呈槽状向下弯曲,下伏的泥岩呈舌状伸入砂层中,形成火焰状。

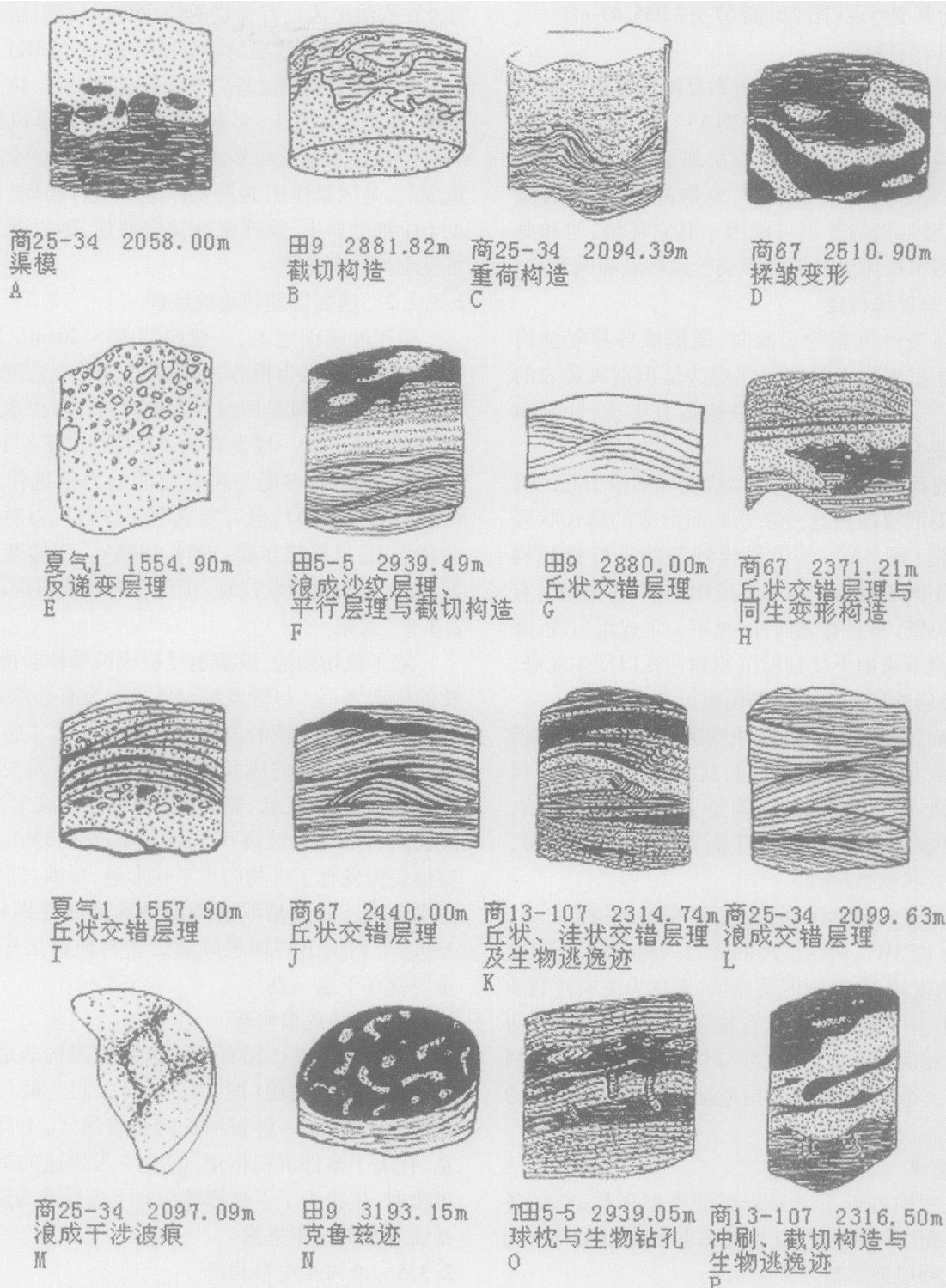


图 3 惠民凹陷古近系风暴岩主要沉积构造类型

Fig 3 Main sedimentary structures of Paleogene ten pestites in Huimin sag

3 风暴岩垂向序列类型和沉积模式

3.1 风暴沉积单元

一次完整的风暴过程引起的流体动力条件变化,

塑造了与风暴各发展阶段相对应的沉积层序和沉积特征。根据大量的岩心观察,总结出惠民凹陷古近系风暴岩所具有的理想沉积单元序列——“似鲍玛序列”(图 4)。

厚度/cm	层序	序号	沉积特征
10-30		Sf	正常半深湖泥/页岩段
10-20		Se	泥岩段;底部有截切构造;内部有砂球、泥砾生物潜穴;泥质粉砂岩~泥岩
20-30		Sd	波状纹层段;发育缓波状~爬升层理,有时见包卷层理;粉砂岩~泥质粉砂岩
10-30		Sc	平行层理和丘状交错层理段;粉砂岩~细砂岩,凝灰岩
0-10		Sb	较大型浪成交错层理段;细砂岩~粉砂岩
		Sa2	块状层理段;砂砂岩~含砾砂岩
10-30		Sa1	递变层理段,底部具冲刷面、渠模等侵蚀痕;砂岩~含砾砂岩,生物介壳灰岩,火山角砾岩

图 4 惠民凹陷古近系风暴岩理想垂向层序

Fig 4 Perfect sequences of Paleogene tempestites in Huimin sag

Sa1 递变层理段——厚度 10~20 m,底面具有明显的冲刷面、渠模等侵蚀构造,侵蚀面之上含有砾级颗粒杂乱分布,岩性可以是砂岩—含砾砂岩、火山角砾岩及凝灰岩等。

Sa2 块状层理段——厚度 0~20 m,与下伏正常湖泊沉积突变接触,底面具有明显的冲刷面、渠模等侵蚀构造,与 Sa1 段渐变接触,岩性以粗砂岩、含砾砂岩、生物介壳灰岩或是凝灰岩较常见。

Sb 较大型浪成交错层理段——厚 0~10 m,岩性为细砂岩—粉砂岩,也可能为中砂岩。此段在有的层序中可不发育。

Sc 平行层理段和丘状交错层理粉砂~细砂岩段——厚度约 20 m,是风暴流沉积中特有的一段。岩性为粉砂岩—细砂岩或细凝灰岩,见生物逃逸迹和岩脉。

Sd 波状纹层段——厚度 20~30 m,岩性为粉砂岩—泥质粉砂岩,可见角度平缓的波状层理和断续的水平纹层以及平缓的爬升层理,包卷层理等也常出现在该段。

Se 泥岩段——厚度 10~20 m,主要岩性为泥质粉砂岩—泥岩。底部可以有截切构造,内部见砂条、砂球、泥砾及生物觅食迹,是风暴后期悬浮物质在低流态下形成的。

Sf 正常半深湖泥页岩段——约 10~30 m,代

表了正常半深湖的细粒沉积。

上述沉积层序反映风暴流密度降低、风暴浪作用能量衰减,从具有明显的重力流特征向牵引流转化的过程。

3.2 风暴岩垂向序列类型

惠民凹陷古近系风暴岩的沉积序列和沉积特征在不同层位、不同地区有所差异,主要根据风暴岩的垂向序列类型、沉积构造特点和原地沉积物特征等总结出以下几种风暴岩序列,各序列反映的产出环境和成因过程各不相同,图 5 是研究区古近系风暴岩产出环境、水动力条件和沉积模式图。

3.2.1 原地风暴岩

序列 1 见于商 25-34 商 67,临 10-1 沙三中,田 9 沙三上和唐 4 井沙一段,由两个沉积单元组成: A 具渠模的递变层理 块状砂砾岩、生物介壳层段, B 水平层理或块状层理杂色泥质岩段,底部具有明显的生物扰动。

上述 Sa1-e 和 Sa2-e 序列代表强烈的风暴流作用—风暴过后的快速悬浮沉积和缓慢悬浮沉积,反映风暴流于滨湖区将原地沉积物打碎、卷起、再沉积的过程,属原地风暴岩。

3.2.2 A 型近源风暴岩

序列 2 见于商 25-34 沙三中,由三个沉积单元组成。A 具冲刷面的块状介壳层段, B 浪成砂纹层理粉

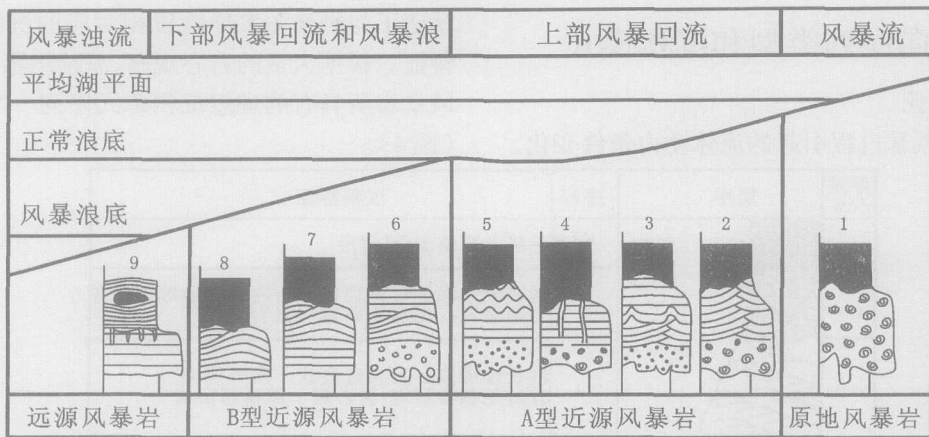


图 5 惠民凹陷古近系风暴岩产出环境、水动力条件和沉积模式图

Fig. 5 Sedimentary environments, hydrodynamic conditions and model of Paleogene tempestites in Huimin sag

细砂岩段, C 均质层理泥岩段, 即发育 Sa2-b-e

序列 3 见于田 5-5 沙三上, 由四个沉积单元组成。A 具重荷构造和球枕构造的块状砂岩段, B 具浪成砂纹层理和包卷层理的粉细砂岩段, C 平行层理粉细砂岩段, D 均质层理泥岩段, 即发育 Sa2-b-e。

序列 4 见于商 13-107 沙三上, 由三个沉积单元组成。A 具冲刷面的块状层理砂砾岩、生物介壳层段, B 平行层理粉细砂岩段, 有岩脉贯穿其中, C 水平层理或块状层理泥质岩段, 即发育 Sa2-c-e。

序列 5 见于田 5-5 沙三上, 由四个沉积单元组成。A 具重荷构造和球枕构造的块状砂岩段, B 平行层理粉细砂岩段, C 小型波状层理粉砂岩段, D 均质层理泥岩段, 即发育 Sa2-c-d-e。

以上四个序列的共同点是 Sa2 段发育, 反映较强烈的风暴流侵蚀作用, 砂岩层面常见波痕, 均为风暴回流和风暴浪沉积或风暴回流改造原地沉积物而成, 位于正常浪底之上。

3.2.3 B 型近源风暴岩

序列 6 见于夏气 1 东营组, 商 13-107 沙三下, 由三个沉积单元组成。A 具渠模的递变层理/块状层理砂砾岩、生物介壳层段, B 丘状、洼状交错层理和平行层理粉细砂岩段, C 水平层理或块状层理泥质岩段, 即发育 Sa1(或 Sa2)-c-e。

序列 7 见于田 9 沙三上, 由两个沉积单元组成。A 具平缓冲刷面的丘状交错层理粉细砂岩段, B 块状层理泥质岩段, 即发育 Se-e。

序列 8 见于商 67 沙三中, 田 5-5 沙三上, 由三个沉积单元组成。A 具冲刷面的平行层理粉细砂岩段, B 丘状交错层理粉细砂岩段, C 块状层理泥质岩段,

即发育 Se-e。

上述各序列的共同点是丘状交错层理发育, 砂岩层面常见波痕, 反映风暴回流和风暴浪越过滩坝发生的侵蚀和沉积作用, 代表风暴流作用—风暴浪作用—风暴过后的快速悬浮沉积和缓慢悬浮沉积过程。

3.2.4 远源风暴岩

序列 9 见于临深 1 沙三上, 由两个沉积单元组成。A 平行层理粉细砂岩段, 顶部与泥页岩突变接触, B 具扁平红色泥砾的水平层理粘土岩段, 底部有较强的生物扰动。

上述不具丘状交错层理的 Se-e 序列反映风暴回流在靠近风暴浪基面附近能量衰减, 已不足以对原地沉积物产生强烈侵蚀, 风暴流向风暴浊流转化并向牵引流转化, 从滨湖区被携带来的泥砾与细粒悬浮沉积物一起沉积, 属远源风暴岩。

4 结论

惠民凹陷古近纪沉积时期发育有丰富的风暴沉积。该凹陷风暴岩岩石类型丰富, 粒度分布和沉积构造反映出重力流和牵引流兼有的复杂的水动力机制。研究区风暴岩理想的沉积单元从下至上可抽象为“似鲍玛序列”: Sa1 递变层理段, Sa2 块状层理段, Sb 较大型浪成交错层理段, Sc 平行层理段和丘状交错层理粉砂—细砂岩段, Sd 波状纹层段, Se 泥岩段和 Sf 正常半深湖泥页岩段; 共发育出九种风暴岩序列和原地风暴岩、A 型近源风暴岩 (Sa 段发育)、B 型近源风暴岩 (HCS 发育) 和远源风暴岩等四种风暴岩沉积模式。

参考文献 (References)

- 1 Kelling G, Mullin P R. Graded limestone and limestone quartzite couplets: possible storm-sediments Pleistocene of Massachusetts. *Petrology* 1975, 38: 971~984
- 2 Aigner T. Schill-tempeste in Oberen Muschelkalk (Trias SW-Deutschland). *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 1979, 157: 326~343
- 3 张金亮. 东濮凹陷沙三段的风暴沉积. *沉积学报*, 1988, 6(1): 50~57 [Zhang Jiliang. The tempestites sediment in Dongpu depression. *Acta Sedimentologica Sinica* 1988, 6(1): 50~57]
- 4 姜在兴, 赵澄林, 刘孟慧. 东濮凹陷西部湖相风暴沉积的初步研究. *沉积学报*, 1990, 8(2): 107~113 [Jiang Zaixing, Zhao Chenglin, Liu Menghui. The preliminary study of lacustrine tempestites of western Dongpu depression. *Acta Sedimentologica Sinica* 1990, 8(2): 107~113]
- 5 杨剑萍. 惠民凹陷中央隆起带西部下第三系沙河街组三段上部的风暴重力流沉积. *石油大学学报*, 2000, 24(1): 27~30 [Yang Jianping. Storm deposits in the upper Sha-3 member of Eogene system in western central uplift belt of Huimin depression. *Journal of the University of Petroleum, China* 2000, 24(1): 27~30]
- 6 杜远生, 周道华, 龚淑云, 等. 甘肃靖远—景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义. *矿物岩石*, 2001, 21(3): 69~73 [Du Yuansheng, Zhou Daohua, Gong Shuyun, et al. Tempeste and its paleogeographic significance of Devonian in Jingyuan and Jingtai counties, Gansu province. *Journal of Mineral Petrology*, 2001, 21(3): 69~73]
- 7 袁静, 杜玉民, 李云南. 惠民凹陷古近系碎屑岩主要沉积环境粒度概率累积曲线特征. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 103~106 [Yuan Jing, Du Yumin, Li Yunan. Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of the Paleogene in Huimin Sag. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(3): 103~106]
- 8 Aigner T. Calcareous tempestites: Storm-dominated stratification in upper Muschelkalk limestones (Middle Trias SW-Germany). *Cyclic and Event Stratification*, 1982: 181~195
- 9 Greenwood B, Sherman D J. Hummocky cross-stratification in the surf zone: flow parameters and bedding genesis. *Sedimentology*, 1986, 33(1): 33~45
- 10 刘宝, 张继庆, 许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩. *地质学报*, 1986, 6(1): 55~67 [Liu Baojun, Zhang Jiqing, Xu Xiaosong. Carbonate tempeste in lower Permian of Silong Xingwen in Sichuan province. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(1): 55~67]

The Sedimentary Characteristics and Models of Paleogene Tempestites in Huimin Sag, Shandong Province

YUAN Jing

(College of Earth Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061)

Abstract The tempestites of Paleogene in Huimin sag was discussed based on cores, rock thin section, granularity analysis and log data. It can be seen that the tempestites in the area studied exist lots of rock types, such as clastic rocks, bioclastic limestone and volcanoclastic rock. The cumulative probability plots and sedimentary structures reflect that the transportation medium has characters of tractive current and gravity flow synchronously. The former has “high slope-multi-bouncing population-1 suspension population” pattern, multi-segments pattern and “high slope 1 segment” pattern. The latter has gutter cast, surface of scour, graded bed, massive bedding, hummocky cross stratification (HCS), parallel bedding, ripples, contemporaneous deformation and Fugichnia. The vertical sequence of the tempestites in the study area is Sa1-graded bed segment, Sa2-homogeneous bedding segment, Sb-big gish wave-ripple bedding segment, Se-parallel bedding and HCS segment, Sd-wavy bedding segment, Se-mudstone segment and Sf-natural lake facies clay rock segment upwards. There are four sedimentary models including autochthonous coarse grain rocks, near source tempestites A, near source tempestites B and distal tempestites.

Key words tempestites, sedimentary characteristics, sedimentary models, Paleogene, Huimin sag