

文章编号: 100020550(2005)0220255205

# 内波沉积中指向沉积构造的形成机理<sup>1</sup>

王青春<sup>1</sup> 鲍志东<sup>1</sup> 贺 萍<sup>2</sup>

1(石油大学资源与信息学院 北京 102249) 2(华北油田物探研究院 河北任丘 062552)

**摘 要** 深海大型沉积物波的发现,引起了国内外内波成因理论的兴起和发展。研究认为,内波作用于海底时可对海底沉积物进行改造,形成指向沉积构造,这种指向沉积构造可为单向、双向或多向,而其中与内波传播方向相反的反向沉积构造可能是内波沉积所特有的。对于这种反向沉积构造的形成,以 LaFond 的理论为代表,认为内波引起的底流水平流速反比于密度界面距海底的高度,波谷接近海底,因而可形成反向沉积构造。经研究分析,发现内波与表面波在本质上具有一定的相似性,因而认为用一般意义上的波动理论来解释内波沉积中指向沉积构造的形成机理更加易于理解。明确指向沉积构造的形成机理对于内波沉积的识别具有重要意义。

**关键词** 内波 指向沉积构造 表面波

**第一作者简介** 王青春 男 1977 年出生 博士研究生 沉积地质学及沉积盆地流体矿产

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 1 引言

随着深海钻探计划 (DSDP) 和大洋钻探项目 (ODP) 的实施,一些大型沉积物波在现代深海海底被发现了。沉积物波可以发育在陆坡到深海平原的任何位置,面积从几平方千米至数十万平方千米,波长 1~15 km,波高 5~100 m。地震剖面中沉积物波横向上具有波状叠复特征,纵向上常常呈现波状上攀现象。由于沉积物波经常与底流(等深流、溢流)、浊流或水下坍塌沉积单元相伴生,所以多数学者常常将其成因归结于这三者的作用。但是 Flood<sup>[1]</sup> 和 McCave 及 Tuchoke<sup>[2]</sup> 经研究认为,内波在沉积物波的形成过程中也起着相当重要的作用,后来高振中<sup>[3]</sup>、何幼斌<sup>[4,5]</sup> 等又进一步对内波在形成大型沉积物波过程中的作用及内波的沉积特征等方面做了详细的研究。目前内波理论已经受到了不少学者的关注,对于内波的形成机理和沉积特征也有了比较明确的认识。通过对地质记录中和现代海洋中内波沉积的详细研究,高振中、何幼斌等认为,内波沉积具有特征的指向构造))) 双向(多向)沉积构造,而向上方向的交错纹理或层理等指向构造似乎是内波沉积所特有的沉积构造<sup>[3,4]</sup>。这种内波沉积所特有的沉积构造,亦表现为内波沉积物中的波状上攀现象,实际上是前进内波在传播过程中将沉积物向反方向搬运而形成的,故可称反向沉积构造。

## 2 研究现状

内波是一种水下波,它存在于两个密度不同的水层的界面上,或存在于具有密度梯度的水层之内<sup>[3]</sup>。内波在海洋内部普遍发育,一般表现为两种形式))) 内驻波和前进波,前者在比较封闭的水体环境中比较容易形成,后者则易于发育于开阔水体。地质记录及现代海洋中的内波沉积实例表明,在浅水区,内波的前进方向大多是向岸的,而内波沉积物却大多表现为向海搬运<sup>[2,4]</sup>;在海底峡谷内,向上坡方向传播的内波,其沉积物搬运的总趋势与内波的前进方向相反,即向下坡方向搬运。关于内波传播方向和沉积物搬运方向的关系,LaFond<sup>[6]</sup> 的理论分析和 Shepard 等<sup>[7]</sup> 的实际资料也表明了同样的观点,即内波可以形成反向沉积构造。目前已发现的内波沉积体中也大多都发育有这种反向沉积构造。

在广阔的海洋中,由于水体开阔,因而内波一般表现为前进波。前人研究认为,密度界面上行进内波的运动情况如图 1 所示。由图 1 可知,在波峰处和波谷处水质点的运动方向是相反的,在密度界面之上,波谷处水的运动方向与内波传播方向相同;波峰处水的运动方向与内波传播方向相反。而在密度界面之下,情况则相反,波峰之下水的运动方向与内波传播方向相同,波谷之下则相反。许多学者认为行进内波作用于海底时可搬运海底沉积物<sup>[3,4,8]</sup>。由于内

<sup>1</sup> 国家自然科学基金项目(批准号:40272060)资助和石油科技中青年创新基金项目(批准号:2002F70102)资助  
收稿日期:2004202224 收修改稿日期:2004207210

波引起的底流水平流速反比于密度界面距海底的高度,而且波谷相对于波峰更接近于海底(图 1)<sup>[6]</sup>,故波谷下方的流速较波峰下方的流速大。而波谷下方水流流向与内波传播方向相反,故内波引起的优势流动方向与内波传播方向相反,因而沉积物搬运的总趋势与内波的前进方向相反。

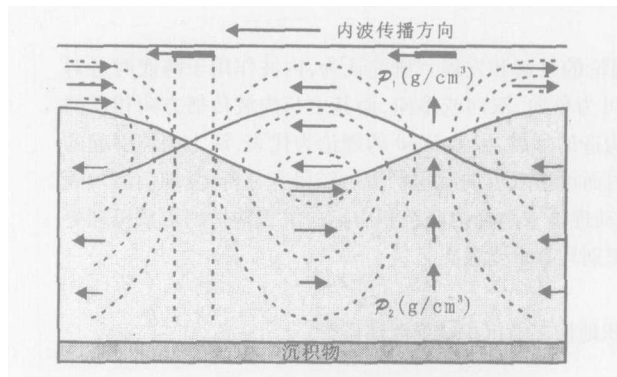


图 1 密度界面上前进内波的运动情况  
(据 LaFond, 1962 略有修改)

Fig 1 Progressive internal wave on the density interface between two water (after LaFond 1962)

关于这种反向优势流能否形成反向沉积构造,还应该考虑内波波动界面(密跃面)与海底沉积物之间的距离。内波波动界面距离海底沉积物距离很大时,内波对于沉积物的改造作用是微乎其微的;但随着内波波动界面越接近于海底沉积物,内波引起的底流水平流速越大,水平流动的非对称性越强,越容易形成与内波传播相反方向的单向优势流动,并且这种优势流动对于海底沉积物的改造作用也是随着与海底距离的减小而增强的<sup>[9]</sup>。在此流动的持续作用下,即可形成迁移方向与内波传播方向相反的非对称性沉积物波,这种沉积物波中的沉积构造所指的方向与内波的传播方向是相反的。

### 3 反向沉积构造的成因分析

#### 3.1 内波与表面波运动特征的比较

一般情况下表面波波动曲线可以看作是海水质点持续作匀角速圆周运动留下的轨迹,这种曲线并不是正弦曲线,而是波峰较陡波谷较缓的不对称曲线(如图 2)<sup>[10]</sup>。

由于内波是存在于不同密度的水层界面之上或具有密度梯度的水体之内的,所以如果把海水内部的密跃层看作密度不连续面处理<sup>[6,11]</sup>,内波与表面波的主要差异就仅仅在于单位海水质点的回复力了,表面

波海水水质点回复力为  $g$  而界面内波则为  $(Q - Q')g/Q$  ( $Q, Q'$  为密度界面上下水体的密度)<sup>[12,13]</sup>。如果再把表面波看作是发生在水与空气界面之间的界面波,我们会发现内波与表面波的水动力学特征极为相似。

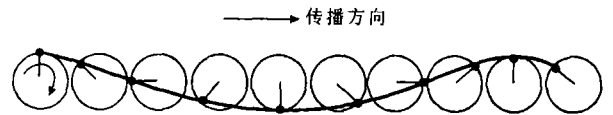


图 2 表面波的运动特征(据杭桂生, 1995)

Fig 2 The movement of the surface wave (after Hang Guisheng 1995)

根据波动理论,表面波波动曲线可以看作是海水质点持续作匀角速圆周运动留下的轨迹。内波作为一种特殊的波动形式同样遵循着一般意义上的波动规律,因而也具有相似于表面波的运动特征,只是由于密跃层上下水体的密度差不如空气和水的密度差那样明显,所以这种不对称性并不是那么强烈,但依旧存在,而且内波波要素覆盖的尺度范围要比表面波宽得多<sup>[9]</sup>,因而内波形成的沉积物规模可以很大。低频内波具有几十甚至几百公里的波长,传播速度可达每秒几米;短周期内波的波长为几百米到几千米,传播速度则有每秒达几十厘米的量阶;低频内波的振幅可达 100 m 甚至以上;短周期内波的振幅也有 10 ~ 20 m<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 反向沉积构造的形成

根据杭桂生对于水面波波形的研究<sup>[10]</sup>以及前文述及的内波与表面波波动特征的可比性,本文运用一般意义上的波动理论对于内波的搬运和沉积作用做了进一步的研究。

如图 3A 所示,当内波在海水中传播时,海水质点同时完成水平方向和垂直方向的同频同幅简谐振动,每个质点都在做匀角速度圆周运动;在匀角速运动过程中,每个海水质点在一个周期内的运动轨迹可以用经过位置 1~9 的曲线表示。很显然,当质点处于位置 1~3 之间时,质点的水平运动方向与内波的传播方向相同;当质点处于位置 3~7 之间时,质点的水平运动方向与内波传播方向相反;而当质点处于位置 7~9 之间时,质点的水平运动方向再次同样与内波传播方向相同。显而易见,在一个波动周期中,内波在波谷处的作用时间要比波峰处略长一些,也就是

说内波在前进过程中,海水水质点向内波传播方向的反方向运动的趋势大一些,因而形成的优势流流动方向与内波前进方向相反。当这种前进内波接近海底时,就会对海底沉积物产生侵蚀和搬运作用,这种侵蚀和搬运作用持续进行,就形成了如图 3B、图 3C 的沉积形态。在内波的长期作用下,最终会形成一种与内波波形相匹配的具有典型向内波传播方向相反一侧迁移特征的大型沉积物波,如图 3D 所示。

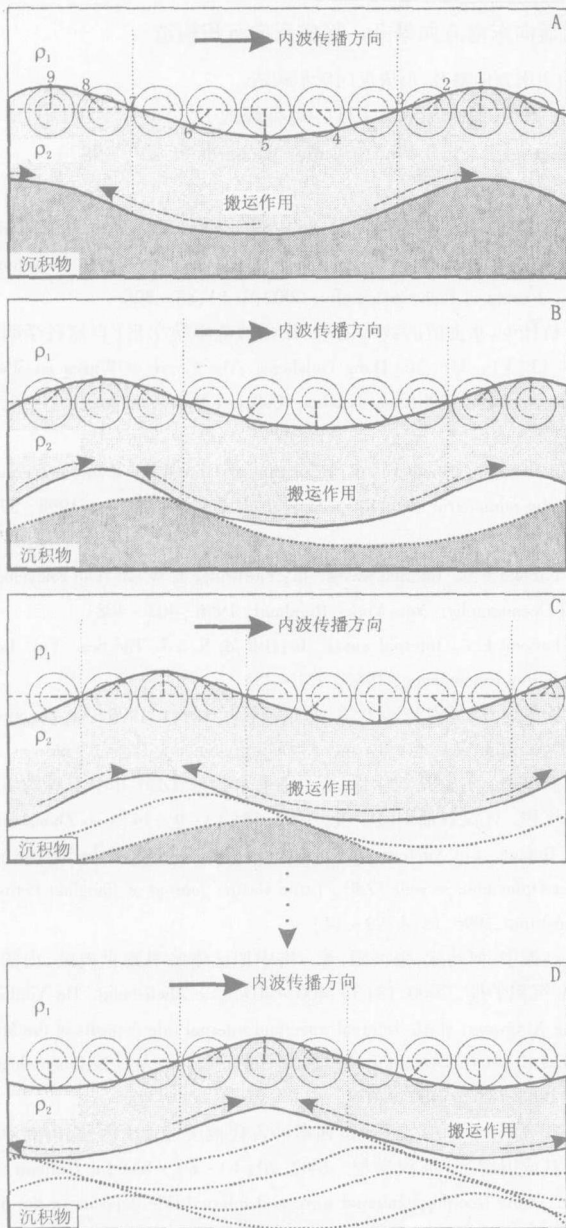


图 3 密度界面上内波的运动及其对沉积物的影响 ( $Q > Q_1$ )  
A、B、C、D 分别为时间  $t_0$ 、 $t_0 + \nu t$ 、 $t_0 + 2\nu t$  和  $t_0 + n\nu t$  时的内波波形及相应的沉积物形态,  $Q_1$ 、 $Q_2$  为密度界面上下水体的密度

Fig 3 The migration of internal wave on the density interface and its influence on sediments ( $Q > Q_1$ )

值得注意的是,当内波的周期变化与日潮或半日潮相近时,就会形成内潮汐。内潮汐是内波的一种特殊形式。研究表明,内潮汐还是内波的一种重要表现形式,内波沉积中的双向(多向)沉积构造就是这种特殊形式的内波作用的结果。

由此可见,一般意义上的理论应该能够很好的适用于内波沉积作用,至少在解释内波沉积中的反向沉积构造方面是成功的。因而,部分研究者认为有广义内波和狭义内波之说,广义内波应该包括表面波及一切介质中存在的波动,通常所说的内波为狭义内波,具有一定的道理。

## 4 研究意义

海洋学调查的成果说明,内波在海洋内部普遍存在,海底峡谷、沟道和海底斜坡、平台上均可以形成内波沉积。自 20 世纪 90 年代初期,高振中和 K A Ersson 在美国阿巴拉契亚山脉中段芬卡斯尔 (Finncastle) 地区奥陶系进行研究时首次提出/内潮汐沉积 (这一术语之后,众多学者又先后在国内的塔里木盆地 TZ30 井<sup>[15]</sup>、浙江桐庐<sup>[5]</sup>、塔中地区<sup>[16]</sup>、西秦岭<sup>[17]</sup> 以及国外的北大西洋洛克海槽东北部<sup>[8]</sup> 等地区的古代地层中发现了内波、内潮汐沉积。内波、内潮汐沉积在地震反射中一般都表现为明显的向上坡方向前积、叠瓦状上攀等与内波前进方向相反的沉积构造 (图 4)。由此可见,研究内波沉积中指向沉积构造的形成机理,对于识别现代海洋和古代地质记录中的内波沉积均具有非常重要的意义。

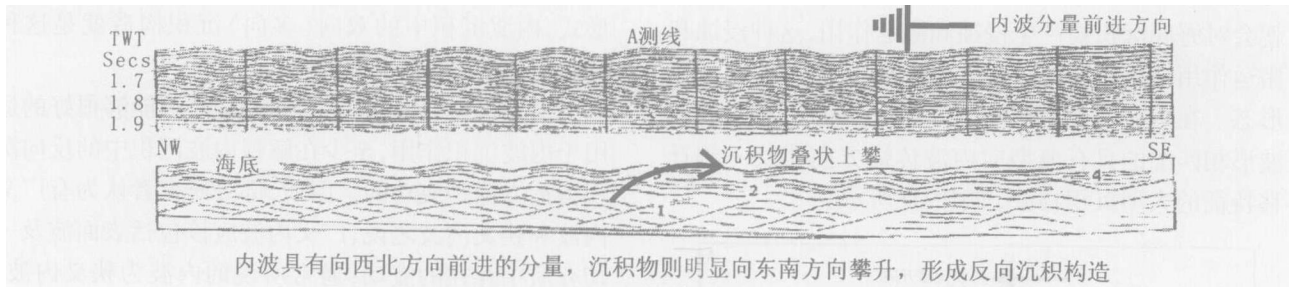
内波沉积体的识别具有重要的油气勘探意义。内波沉积物一般为细粒)极细粒岩屑石英杂砂岩、岩屑砂岩、粉砂岩、灰岩与深色泥岩、页岩薄互层,其中砂质沉积物大部分都经历了较长时间的簸选和淘洗作用,分选和磨圆都很好,结构成熟度相当高,储集物性相当好。另外内波沉积物中的砂岩和灰岩沉积体一般与深水泥岩和页岩具有良好的空间配置,可以形成极好的生、储、盖组合。大尺度内波单独作用或内波与其它底流共同作用时,具有形成大型沉积体的可能性,因而可以形成大型的油气储集体。

## 5 结论

内波沉积中的反向沉积构造应该可以作为内波沉积特有的指向构造。发生在海水密度界面上或具有密度梯度的水体之内的内波与发生在海面上的表面波在本质上具有一定的相似性,内波与表面波之间

存在着内在的联系,其波动过程同样都遵循着一般意义上的波动理论,因而内波沉积物中的指向沉积构造的形成机理可以用波动理论进行解释。内波沉积物

可以作为良好的油气储集体。明确内波沉积中指向沉积构造的形成机理对于内波的识别具有重要意义。



内波具有向西北方向前进的分量,沉积物则明显向东南方向攀升,形成反向沉积构造

内波具有向西北方向前进的分量,沉积物则明显向东南方向攀升,形成反向沉积构造

图 4 洛克尔海槽东北部大区沉积物波 A 地震剖面(据 Richards 等., 1987, 略有修改)<sup>[5]</sup>

Fig 4 Seismic profiles A of sediment waves of large area in northeastern Rockall Trough (after Richards et al., 1987)

### 参考文献 (References)

- 1 Flood R D. Studies of Deep2sea sedimentary microtopology in the North Atlantic ocean. Unpublished Doctoral Thesis. WHOIMI, Woods Hole, MA, 1978
- 2 McCve IN, Tuchoke B E. Deep current controlled sedimentation in the western North Atlantic Region. GSA, The Geology of North America 1986, Vol 1, 593~ 610
- 3 高振中,何幼斌,罗顺社,郭建华.深水牵引流沉积))内潮汐、内波和等深流沉积研究.北京:科学出版社,1996[Gao Zhenzhong He Youbin, Luo Shunshu, Guo Jianhua. Deep2water Traction Current Deposits a study of internal tides, internal waves, Contour Currents and their deposits. Beijing: Science Press 1996]
- 4 何幼斌,高振中.内潮汐、内波沉积的特征与鉴别.科学通报, 1998, 43(9): 903~ 908[He Youbin, Gao Zhenzhong. The characteristics and recognition of internal tide and internal wave deposits. Science Bulletin, 1998, 43(9): 903~ 908]
- 5 何幼斌,高振中,李建明,等.浙江桐庐晚奥陶世内潮汐沉积.沉积学报, 1998, 16(1): 1~ 7[He Youbin, Gao Zhenzhong, Li Jianming et al. Internal tide deposits of the Late Ordovician in Tonglu, Zhejiang. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 1~ 7]
- 6 LaFond E C. Internal Waves. In: Hill M N, ed. The sea, Vol 1: London: Wiley Interscience, 1962. 731~ 751
- 7 Shepard F P, Marshall N F, Mcloughlin P A, Sullivan G G. Currents in submarine canyons and other seavalleys. AAPG Studies in Geology 1979, 8: 1~ 13
- 8 张兴阳,高振中,姚雪根.北大西洋洛克尔海槽东北部内波沉积.沉积学报, 1999, 17(3): 464~ 472[Zhang Xingyang, Gao Zhenzhong, Yao Xuegen. Internal wave deposits in the Northeast Rockall Trough, North Atlantic Ocean. Reinterpretation of deep water sediment wave formation. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 464~ 472]
- 9 张兴阳,何幼斌,罗顺社,别必文.内波单独作用形成的深水沉积物.古地学报, 2002, 4(1): 83~ 89[Zhang Xingyang, He Youbin, Luo Shunshu, Bie Biven. Deep water sediment wave formed by internal wave. Journal of Paleogeography, 2002, 4(1): 83~ 89]
- 10 杭桂生.水面波的波形曲线.徐州师范学院学报(自然科学版), 1995, 13(3): 34~ 36[Hang Guisheng. The Curve of Waves on Water Surface. Journal of Xuzhou Teachers College(Nature Science), 1995, 13(3): 34~ 36]
- 11 Benelli D, Sommeria J. Excitation and breaking of internal gravity waves by parametric instability. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 374: 117~ 144
- 12 LaFond E C. Internal waves. In: Fairbridge R W, ed. The Encyclopedia of Oceanography. New York: Reinhold, 1966. 402~ 408
- 13 LaFond E C. Internal waves. In: Hill M N, ed. The Sea, Vol. London: Wiley Interscience, 1962. 731~ 751
- 14 徐肇廷.海洋内波动力学.北京:科学出版社,1999[Xu Zhaoting. The Ocean Internal wave dynamics. Beijing: Science Press 1999]
- 15 高振中,彭德堂,刘学锋,等.塔里木盆地 TZ30井中上奥陶统内潮汐沉积.江汉石油学院学报, 1996, 18(4): 9~ 14[Gao Zhenzhong, Peng Detang, Liu Xuefeng et al. Internal tide deposits of the Middle and Upper Ordovician in well TZ30, Tarim Basin. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1996, 18(4): 9~ 14]
- 16 高振中,何幼斌,张兴阳,等.塔中地区中晚奥陶世内波、内潮汐沉积.沉积学报, 2000, 18(3): 400~ 407[Gao Zhenzhong, He Youbin, Zhang Xingyang et al. Internal wave and internal tide deposits of the Middle and Upper Ordovician in the Center Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 400~ 407]
- 17 晋慧娟,李育慈,方国庆.西秦岭古代地层记录中内波、内潮汐沉积及其成因解释.沉积学报, 2002, 20(1): 80~ 84[Jin Huijuan, Li Yucei, Fang Guoqing. Internal wave and internal tide deposits in the paleostratigraphic record of the West Qinling Mountains and their origin. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 80~ 84]

# The Generation Mechanism of Orientating Sedimentary Structure by Internal Waves

WANG Qingchun<sup>1</sup> BAO Zhidong<sup>1</sup> HE Ping<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(University of Petroleum, Beijing 102249)

<sup>2</sup>(Research Institute of Petroleum Exploration, Huabei Oilfield, Renqiu Hebei 062552)

**Abstract** The discovery of the large sedimentary waves in deep water caused the generations and the developments of internal waves both home and abroad. The study shows that internal waves can shape the sediments on seafloor and form orientating sedimentary structure. This kind of structure includes single direction, double directions and multiple directions. Maybe the returning structure is the special character of internal waves. LaFond's theory about the generation of this kind of structure is widely accepted. The theory indicates that the velocity of bottom currents formed by internal waves is reverse ratio to the distance between the density interface and the seabed. Returning transport is the main trends of internal waves because the trough of wave is close to the seafloor. The research concludes that internal waves are similar homology of surface waves and the generation of the orientating sedimentary structure formed by internal wave can be explained clearly by the general fluctuation theory successfully. The generation mechanism of orientating sedimentary structure is very important to the recognition of the internal waves sediments.

**Key words** internal waves; orientating sedimentary structure; surface waves