

文章编号: 1000-0550(1999)03-0464-09

# 北大西洋洛克尔海槽东北部内波沉积<sup>①</sup>

## ——深水大型沉积物波成因的再解释

张兴阳<sup>1</sup> 高振中<sup>1</sup> 姚雪根<sup>2</sup>

1(江汉石油学院地质系 湖北荆州 434102) 2(川鄂边区天然气勘探项目经理部 四川万县 634000)

**摘要** 北大西洋洛克尔海槽东北部水深约1 000~1 000 m处有两个大型沉积物波发育区。波长1~2 km, 波高18~20 m, 分布面积分别为350 km<sup>2</sup>与20 km<sup>2</sup>。沉积物波向上坡迁移, 内部包括上攀床形单元、不对称波形单元及正弦波形单元。前人提出的大区沉积物波挪威海底层水溢流成因及小区沉积物 Lee 波迁移模式都存在许多问题。根据古气候及古洋流资料, 研究区内沉积物波各单元形成时具备内波形成的条件, 内波的发育与等深流的活动密切相关。运用内波理论可对沉积物波各构成单元作出合理的水动力学解释。研究区内两列同向内波的叠加、单列内波及内驻波先后作用海底, 可分别形成大型上攀床形、不对称波形及正弦波形单元。

**关键词** 洛克尔海槽 内波沉积 深水沉积物波 等深流 冰期

**第一作者简介** 张兴阳 男 1973年出生 硕士 沉积学

中图分类号 P736.213 文献标识码 A

### 1 引言

60年代末期以来, 随着深海钻探计划(DSDP)及大洋钻探项目(ODP)的成功实施, 许多学者对发育于各大洋底的沉积物波进行了不同程度的研究<sup>[1-4]</sup>。研究表明: 沉积物波可发育于由陆坡至深海平原上的任何位置; 分布面积几平方公里到数十万平方公里; 波长1~15 km, 波高5~100 m; 多数向上坡迁移, 少数向下坡迁移, 还有些呈对称状, 无侧向迁移。一般认为沉积物波有以下三种成因: 底流(等深流、溢流)成因; 浊流成因; 滑塌成因。Lee波及内波成因也为不同的学者提出<sup>[4,5]</sup>。高振中等<sup>[4]</sup>在《深水牵引流沉积—内潮汐、内波及等深流沉积研究》一书中论述了内波在形成沉积物波过程中的重要作用。

研究区位于洛克尔海槽东北部(图1及图2), 区内深约1 000~1 100 m处有两个沉积物波发育区(大区及小区)(图3)。波长1~2 km, 波高18~20 m, 分布面积分别为350 km<sup>2</sup>与20 km<sup>2</sup>。沉积物波波脊线近于平行斜坡。Richard等<sup>[2]</sup>对大区沉积物波的形成机理、Howe<sup>[3]</sup>对小区沉积物波的迁移机理分别进行了解释。另外对分布于南洛克尔海槽其它地区的沉积物波, 前人都做过研究<sup>[3]</sup>。本文在 R-

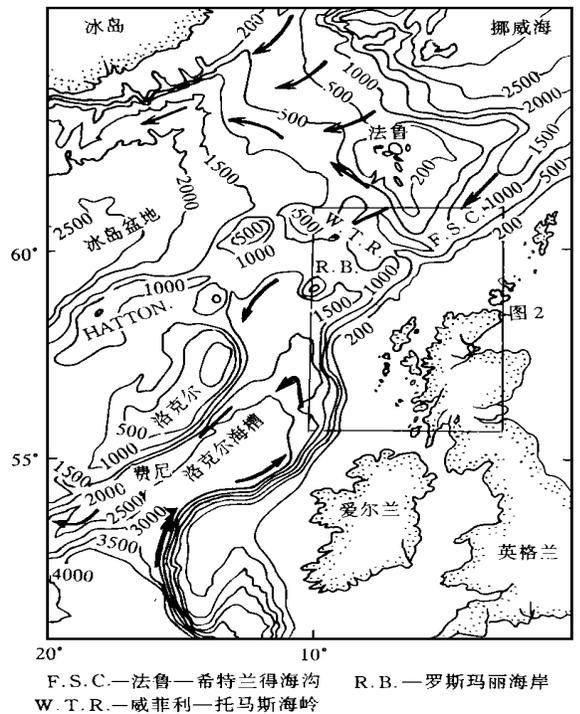


图1 洛克尔海槽环流样式(据 Van Weering, 1991, 略有修改)  
Fig. 1 Circulation style of Rockall Trough  
(after Van Weering, 1991)

① 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49872050)

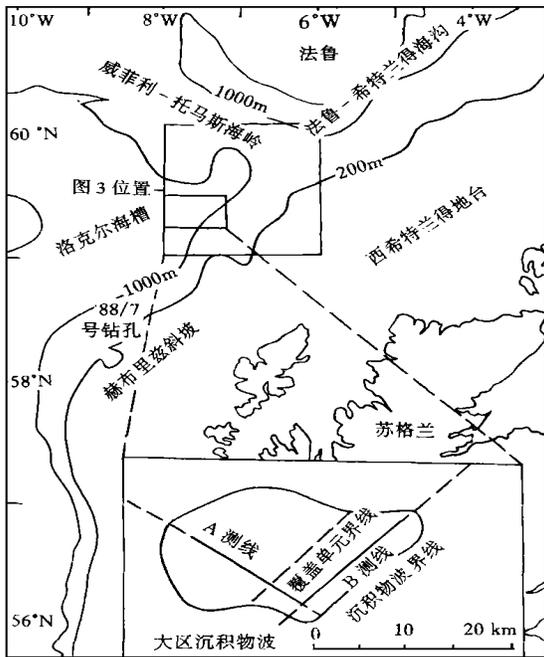


图 2 研究区及 A、B 地震测线位置(据 Richards *et al.* 1987)  
Fig. 2 Location of study area showing position of seismic line A and B. (after Richards *et al.*, 1987)

Richard 等<sup>[2]</sup>与 Howe<sup>[3]</sup>研究的基础上,综合古洋流及古气候资料,利用内波理论,将对洛克尔海槽东北部沉积物波的成因做出较为合理的解释。

## 2 地质背景

洛克尔海槽是分隔赫布里兹陆架与洛克尔海底平原的深水盆地,呈东北走向。其东北方的威菲利—托马斯海岭将其与法鲁—希特兰得海沟分隔开。费尼等深岩丘沿海槽西缘分布,东岸斜坡扇局部堆积到盆底上<sup>[3]</sup>。

海槽的轮廓自白垩纪以来没有大的变化,盆地中沉积了白垩纪、第三纪及第四纪沉积物。海槽东北部中新世沉积物已被改造成沉积物波<sup>[6]</sup>。洛克尔海槽东北部赫布里兹斜坡上的上第三系及第四系被划分为四个单元:(1)下 MacLeod 序列,上新世至中更新世非冰川斜坡至盆地沉积;(2)上 MacLeod 序列,中-晚更新世斜坡冰川裙,主要为块体流沉积;(3、4)Gwaelo 及 MacAulay 序列,晚更新世至全新世斜坡至盆地沉积,主要为覆盖在冰成块体流序列上的远源冰海及海洋沉积<sup>[7]</sup>。现在讨论的序列包括中新统、下、上 MacLeod 序列及 MacAulay 序列。

现代洛克尔海槽深水区存在许多分散的水体(图 1)。挪威海底层水(NSDW)越过威菲利—托马斯海岭的西端进入海槽后,与拉布拉多海水及南极底层水混合形成北大西洋深层水(NADW),又称作北部底层边界流(DNBC)<sup>[7,8]</sup>。NADW 沿洛克尔海槽西边缘向南流动并在海槽的南部区域形成环流<sup>[8]</sup>。海槽的东部边缘受沿斜坡向北的水流的影响,斜坡水流向下可延伸到水深 1 000 m 处<sup>[9,10]</sup>。这可能是北大西洋深层水在海槽南部环流的延续,较高的含盐量表明其可能含有中—上陆坡地中海溢流形成的东北大西洋水团(NEAW)的成分<sup>[23]</sup>。沿陆坡流动的流体继续向北流动,在赫布里兹斜坡与威菲利—托马斯海岭结合处偏转向西流动<sup>[6]</sup>。斜坡流沿威菲利—托马斯海岭基部向西流动最后受 NSDW 溢流影响而沿海槽西边缘流回。世界大洋环流自中新世开始就形成的目前的环流形式<sup>[12]</sup>,可以假定自中新世以来洛克尔海槽中海流形式与目前类似。

## 3 大区沉积物波成因研究现状及存在问题

### 3.1 沉积物波成因研究现状

整个波状体系位于 Roberts 等研究的两个不整合面(形成时间分别定为渐新世—早中新世及晚中

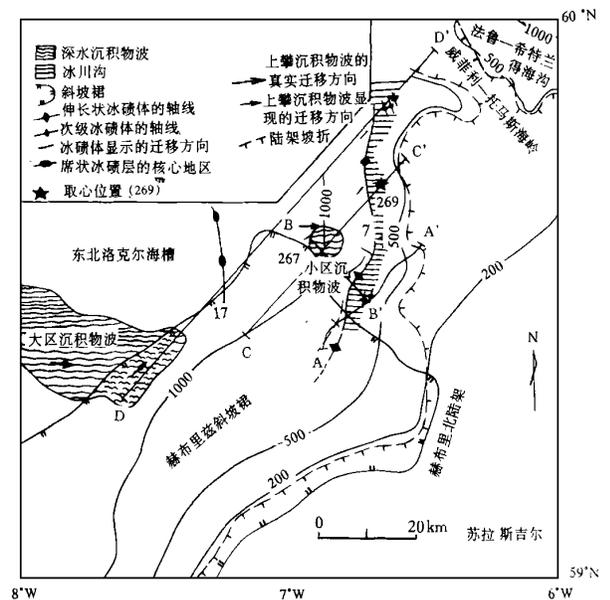


图 3 洛克尔海槽东北部大区及小区沉积物波分布位置(据 Howe *et al.* 1994)

Fig. 3 Sediment wave fields of large and small area in the northeastern Rockall Trough. (after Howe *et al.* 1994)

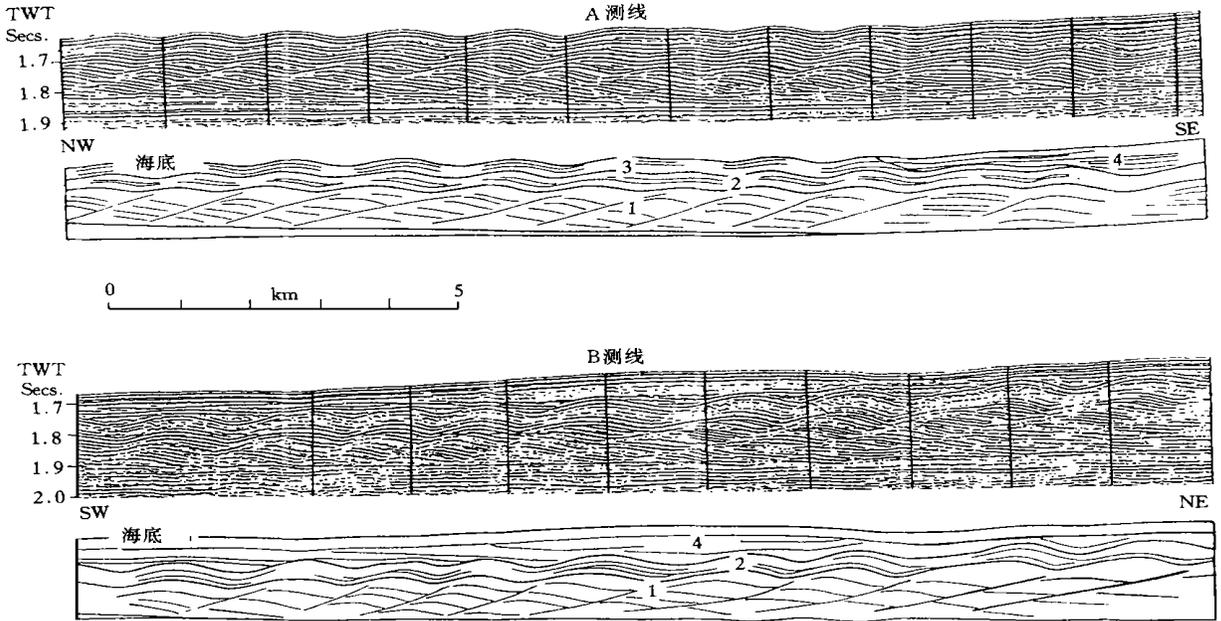


图 4 洛克尔海槽东北部大区沉积物波 A、B 地震剖面(据 Richards *et al.*, 1987)

1. 底部上攀床形单元; 2. 中部过渡床形单元; 3. 上部正弦波形单元; 4. 上覆滑坡单元

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

新世中期)之上<sup>[15]</sup>。Richard 等<sup>[2]</sup>据此推断波状体系形成时间为晚中新世或更近的时期,并将其分为 4 个单元:底部的单元 1 为上攀沙丘组成的序列;单元 2 是由爬升沙丘向正弦床形的过渡类型;单元 3 呈正弦波形;单元 4 为上覆滑坡单元。单元 1、2、3 形态上类似于 Jopling 及 Walker<sup>[13]</sup>划分的几种爬升沙纹层理。悬浮负载与牵引负载的相对沉积比率控制了由单元 1 向单元 3 的转变,随着底流能量的减弱,悬浮沉积作用加强,而先后发育单元 1、单元 2 与单元 3<sup>[2]</sup>。这种强度随时间变化的底流被 Richard 等<sup>[2]</sup>解释为挪威海底层水越过威菲利—托马斯海岭的溢流。挪威海冷的底层溢流水与上覆的海水之间的界面位于水深约 500 m 处<sup>[4]</sup>。Miller 与 Tucholke 认为晚中新世威菲利—托马斯海岭不是溢流的障壁<sup>[14]</sup>。而 Roberts 提出晚中新世冰岛—法鲁海岭沉降明显,分流了从威菲利—托马斯海岭的溢流量<sup>[15]</sup>, Richard 等据此推断波状体系是此溢流成因,随着溢流流量减小,先后形成 1、2、3 单元。并从图上得出沉积物波向南迁移,与溢流方向一致<sup>[2]</sup>。

### 3.2 沉积物波溢流成因解释中存在的问题

Richard 等<sup>[2]</sup>关于本区沉积物波的溢流成因解释,笔者认为存在以下两大问题:沉积物波迁移方向

与溢流方向的不一致性;沉积物波形成时,溢流不能满足形成沉积物波所需的底流强度。

#### 3.2.1 沉积物波迁移方向与溢流方向的不一致性

由图 4 明显可见, A 线剖面单元 1 中上攀层形向东南方向爬升,细层倾向东南,层系界面倾向西北,说明形成该层的底流具有东南方向的流动分量; B 线剖面中上攀层形向东北方向爬升,细层倾向东北,层系界面倾向西南,说明形成该层的底流具有东北方向的流动分量。如不存在底流主流向的多向性,考虑到两剖面中上攀层形规模的相似性,东南方向的视流向与东北方向的视流向合成的真正底流方向应向东,即沉积物波向东迁移。这与 Howe 等<sup>[6]</sup>提供的沉积物波迁移方向(东)相符合(图 3)<sup>[6]</sup>,为上坡方向;这种流向与沉积物波的延伸方向一致。Richard 等<sup>[2]</sup>从图 4 上得出沉积物波迁移方向向南、与溢流方向一致的结论是很值得怀疑的,向南迁移的沉积物波如何能形成东北向的迁移分量(B 剖面中)?溢流能形成向上坡迁移的沉积物波也是值得怀疑的。

#### 3.2.2 沉积物波形成时,溢流不能满足形成沉积物波所需的底流强度

整个沉积物波体系位于晚中新世中期不整合面

之上, 故其形成时间在中新世末期或更近的时期。据 Howe 等<sup>[6]</sup>, 大区沉积物波单元 1 为中新世沉积; 单元 2 与下 Macleod 序列对应; 单元 3 与上 Macleod 序列对应<sup>[6]</sup>。即大区沉积物波单元 1 形成于中新世末期; 单元 2 形成于上新世-中更新世; 单元 3 形成于中更新世-晚更新世, 上覆全新世 MacAulay 序列沉积。

中新世的威菲利—托马斯海岭还没有成为挪威底层水溢流的完全障壁<sup>[14]</sup>; 而在晚中新世, 由于冰岛-法鲁海岭的下沉<sup>[15]</sup>, 分流掉了绝大部分本来越过威菲利—托马斯海岭回到北大西洋的溢流水体<sup>[14]</sup>, 且溢流发生时, 溢流的主体是从威菲利—托马斯海岭西端进入海槽, 并沿洛克海槽西边缘南进(进而形成费尼等深岩丘)<sup>[8]</sup>, 而研究区仅位于海槽的东边缘(图 2), 在威菲利—托马期海岭东端南侧发育的一组脊线平行于海岭的斜坡冰碛体(波长 3 km)无疑也会降低越过海岭的溢流(少量)的流势。Richard 等<sup>[2]</sup>认为本区沉积物波形成在晚中新世晚期或更近时期, 这就使人怀疑溢流能否满足形成沉积物波所需的水动力强度。况且, 整个沉积物波实际形成于中新世末期-全新世, 用一期强度逐渐减弱的溢流来解释约 5 百万年内形成的沉积体, 是很难令人信服的。进一步说, 如果真存在如此强度的挪威海底层水溢流, 也很难解释为什么沉积物波仅发育于研究区内, 而在海槽北部其它地方不发育沉积物波?

## 4 小区沉积物波研究现状及问题

### 4.1 研究现状

#### 4.1.1 沉积物波特征

如图 5, 沉积物波由下 MacLeod 序列及 MacAulay 序列组成, 地震剖面没有显示出下伏中新世地层。波区下 MacLeod 序列声波特征为中等强度的连续近平行的反射界面。反射界面在波脊的北西翼向上、下发散, 在东南翼收敛<sup>[3]</sup>。上覆的 MacAulay 序列主要为声波特征透明单元, 在单元的底部也可见非整合、不规则、半连续的反射界面。MacAulay 序列的顶部也是强反射的, 而且沉积物波上较大的沉积厚度出现在波脊的东南翼上, 对着赫布里兹斜坡。这种沉积物厚度的变化在下 MacLeod 序列中得到了响应。这种声波成层单元的不对称性表明沉积该序列时波非常活跃。

#### 4.1.2 成因机理

Howe 认为晚更新世—全新世, 向北流动的斜坡底部的 NADW 及斜坡中上部 NEAW 的强度减弱, 主要发育半远洋及冰川洋沉积, 形成 MacAulay 序列声波特征透明的单元; 而发育于 MacAulay 序列顶部的密集半连续平行反射层, 表明早全新世底流强度有所加强<sup>[3]</sup>。

#### 4.1.3 迁移机理

在波状地形上, 由具水体密度梯度的底流流过时形成的 Lee 波可形成沉积物波, 同时产生不对称的水流速度; 由于迎流面的低流速而形成较大的沉积速度、背流面的高流速引起的侵蚀, 沉积物波向上游的迁移是这种水流形式的自然结果(图 6)<sup>[5]</sup>。Howe<sup>[3]</sup>运用此模式解释了该沉积物波的上坡迁移机理: 沿斜坡(或与斜坡成一定夹角)流动的流体流过波形区时, 迎流面上水流速度低, 对底床的剪切力小, 沉积速度高; 反之, 背流面上沉积速率低, 并由此可产生沉积物波的上坡迁移<sup>[3]</sup>。

### 4.2 沉积物波成因及迁移机理解释中存在的不足和问题

#### 4.2.1 成因机理解释中的不足

对于本区沉积物波成因的确切形成机理还没有学者提出过。Howe<sup>[3]</sup>只提出 MacAulay 序列的成因与沿斜坡流动的 NADW 及 NEAW 有关, 而对于形成机理, Howe 承认“尽管波区正弦波地形上产生的 Lee 波可导致沉积物波的上坡迁移, 而沉积物波的形成机理仍不得而知”<sup>[3]</sup>。

#### 4.2.2 迁移机理解释中存在的问题

本区沉积物波 Lee 波迁移模式<sup>[3]</sup>, 笔者认为存在的问题是: 研究区缺少形成 Lee 波(斜)向下坡流动的具密度梯度的底流。Howe<sup>[3]</sup>只提出沿斜坡(或与斜坡成一定夹角)流动的流体, 并没明确是哪类型的底流。由前述可知, 研究区内底流(等深流)向北流动, 与沉积物波迁移方向(东)相垂直(图 3)。用等深流作为向下坡流动产生 Lee 波的底流, 是说不通的。另一方面, 即使存在向下坡流的所谓等深流, 也很难断定其在波区上流动时具有稳定的密度梯度。

浊流向下坡流动虽可导致沉积物波的上坡迁移, 而多种资料表明, 研究区内浊流并不发育<sup>[3, 16]</sup>。沿斜坡延伸的斜坡冰碛体及冰川沟也会阻挡偶然发生的源于上陆坡的浊流而使其不能影响到波区(图

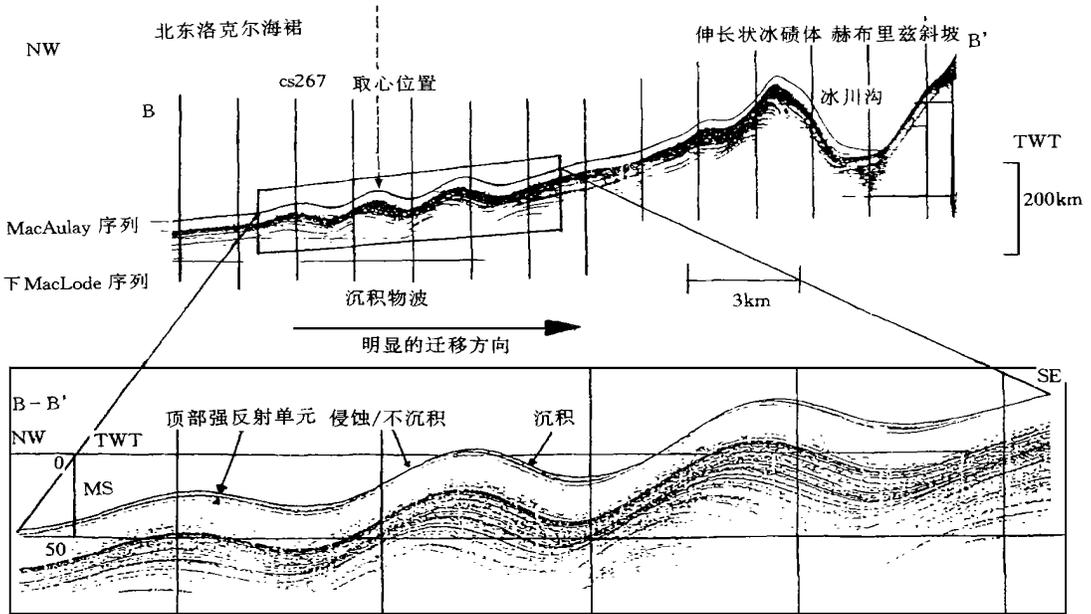


图 5 洛克海槽东北部小区沉积物波 B-B' 高分辨率地震反射剖面(据 Howe, 1996)

Fig. 5 High-resolution seismic reflection profile B-B' from the sediment waves of small area in northeastern Rockall Trough. (after Howe, 1996)

5)。

## 5 研究区沉积物波成因的再解释

由 3、4 分析可知,由单元 1 的上攀床形、下 MacLeod 序列的不对称波形到单元 3 及大区 MacAulay 序列的正弦波形,这似乎是一期逐渐减弱的底流作用的结果。但研究区内不存在一期延时约 5 百万年,向上坡流动并能形成大型沉积物波的底流。用溢流、等深流及 Lee 波模式解释研究区沉积物波的形成及迁移机理,都存在各种问题与疑问。浊流的不发育,滑塌又形成不了如此规则的波形,要解决本区沉积物波的形成及迁移机理问题,须运用新的理论,寻求新的底流形式,而内波理论及内波引起的底流可满足此需求。

### 5.1 研究区沉积物波成因的水动力学基础

内波是存在于两个不同密度水层界面之上或具有密度梯度的水体之内的水下波<sup>[17]</sup>。内波的振幅由厘米级到超过百米;波长由远小于 1 米到超过数公里;它引起的底流速度一般在 5~70 cm/s 范围内,最大可达 300 cm/s,而 15~40 cm/s 的流速常见的。这种内波作用于海底时形成规模与其相当的各

种沉积物波是非常自然的<sup>[4]</sup>。

密度界面上内波的传播速度  $c$  由:

$$c = \frac{g(\rho - \rho')hh'}{\rho(h + h')} \quad (1)$$

确定<sup>[18]</sup>,式中  $\rho, \rho'$  分别为上部水层与下部水层的密度,  $h, h'$  分别为上下水层的厚度。密度界面之下,内波引起的平均水平流动速度  $u'$ :

$$u' = (a/h)c \cdot \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

式中  $a$  为内波的振幅,  $(kx - \sigma t)$  为相位角<sup>[17]</sup>。由 (1), (2) 可知,当  $(\rho - \rho')$  增大时,内波能量加强,内波传播速度及内波引起的底流水平速度均增大。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。据 LaFond<sup>[17]</sup>,内波引起的底流水平流速反比于密度界面距海底的高度  $z$ :

$$z = h - a \cos(kx - \sigma t) \quad (3)$$

其中  $h$  为下部水层的平均厚度,  $a$  为内波的振幅。由于波谷更接近于海底,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,故内波引起的沉积物搬运方向与内波传播方向相反<sup>[17]</sup>。

当密跃面距海底的高度 ( $z$  或  $h$ ) 较大时,内波引起的流速较小,且水平流动的时间—流速曲线是

近对称的, 内波引起的底流形成不了或只能形成小规模床形。当密跃面接近海底, 内波引起的底流水平流速较大, 且时间一流速曲线是不对称的, 密度界面越接近海底, 这种不对称性越强; 结合内波的波长及振幅, 这种底流作用于海底时, 结合内波的波长及振幅, 可形成向内波传播相反方向迁移的大型不对称沉积物波(图7A)。如两列同向传播的内波相互叠加, 可形成与内波传播方向相反、更明显的单向优势流动, 它作用于海底沉积物时, 可形成向内波传播相反方向迁移的大型上攀床形(图7B)。内波、内潮汐形成的单向交错层理也已在古代地层中被识别出来<sup>[19, 20]</sup>。

除前进内波外, 湖泊及半封闭的水体中的内波可呈现为驻波<sup>[17]</sup>。当内驻波强度较弱, 内驻波形成的底流不至于使泥质沉积物搅起呈悬浮状态; 但持续的作用可使沉积的底形与内驻波波形相匹配, 从而形成对称的泥波<sup>[4]</sup>, 即正弦泥波(图7C)。

与表面波主要作用于滨岸带、对波基面以下的海底沉积物作用微弱类似, 深水中某个特定内波的海底作用带也限制在特定范围内。其范围决定于密跃面的深度、内波的波长及底床的坡度。内波作用于海底的宽度可由内波的波长推测出来(对于小斜坡)<sup>[1]</sup>。沉积物波发育区类似于海底峡谷的出口(图1, 图2), 而峡谷的出口有利于内波能量的集中<sup>[21]</sup>。内波的这些特性可解释研究区沉积物波发育的位置。

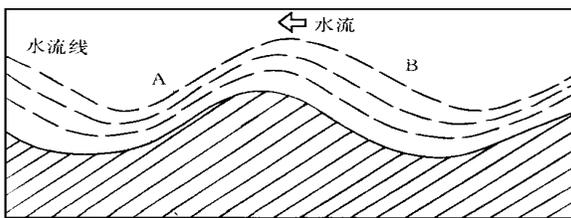


图6 Lee波模式。(据(Flood 1988)

A: 背流面 高流速 低沉积速率/侵蚀

B: 迎流面 低流速 高沉积速率

Fig. 6 Lee-Wave model. (after Flood, 1988)

## 5.2 研究区沉积物波内波成因解释

越来越多的证据表明, 最大冰期时广泛的海洋冰层将减少深层冷水的产生, 同时阻止表层水的注入, 不利于温盐环流的发育, 相反气候不稳定或危机时期可导致底流活动增强<sup>[22]</sup>。同时, 在冰期向间冰期过渡时, 大洋浮冰、冰川的消融可形成大洋表面的

低密度淡水层。内波可由存在密度差异的流动相互撞击、而在具密度梯度的水体产生<sup>[17, 23]</sup>。这样在气候不稳定、温盐环流(等深流)加强时, 由高密度的温盐环流与上覆低密度正常海水或冰融淡水之间的相互撞击在其密跃面上可产生内波, Kolla's等估计在温盐环流界面上佛罗德数可达到0.91<sup>[14]</sup>。

而就世界各大洋大规模温盐环流来说, 北大西洋是温暖的表层水向北流向高纬度地区、高密度的深层水团向南流向低纬度地区的传送带, 是关键地区<sup>[22]</sup>。洛克尔海槽赫布里兹斜坡中上部存在地中海溢流形成的高盐度北大西洋水团, 斜坡中下部发育冷的高密度北大西洋深层水。温盐环流加强时, 上述两水体与上覆正常海水或冰融淡水之间的密度界面上均可产生内波。内波可由波源向海及向岸传播<sup>[24]</sup>。由于受斜坡中上部等深流活动的影响及浅水区表面波浪的影响, 研究区内向岸传播的内波不易形成沉积床形或形成后也不易保存。而向海传播的内波在本区等深流影响不大的斜坡下部可形成一定的床形, 且易保存。由于特定内波有一定的作用范围, 一般情况下, 只有斜坡中下部北大西洋深层水与上覆正常海水或冰融淡水之间产生的内波可作用于斜坡下部; 而斜坡中上部北大西洋水团与上覆水体之间产生的内波(由于斜坡下部位于此内波波基面'之下)影响不到斜坡下部或影响较小, 除非此内波特别强烈。

中新世晚期发生两大重要事件: 一是南极冰盖发展, 发生了大规模海退; 二是地中海与世界大洋隔离, 发生盐度危机, 成为一系列大的内陆盐湖, 沉积了巨厚的、广泛分布的蒸发岩地层。而上新世早期为一高海面、温暖湿润时代<sup>[12, 25]</sup>, 中新世末期气候强烈波动, 存在着关于海洋环流加强的大量证据<sup>[25]</sup>。海平面上升使得由一系列内陆盐湖构成的地中海重新与世界大洋沟通, 形成超盐度的地中海溢流, 从而使北大西洋水团密度超高。赫布里兹斜坡中上部北大西洋水团与上覆正常海水或冰融淡水之间密度差异较大, 由5.1可知, 在其密度界面上可产生强烈的内波。正如同表面风暴浪可作用于正常基面以下的海底沉积物上一样, 此强烈的内波可影响到斜坡下部。这样, 斜坡中上部及中下部产生的两内波向海传播时叠加作用于斜坡下部, 据5.1图7B可形成明显的与内波传播方向相反(上坡)的单向优势流动, 从而可形成向上坡方向迁移的单元1大型上攀床形。

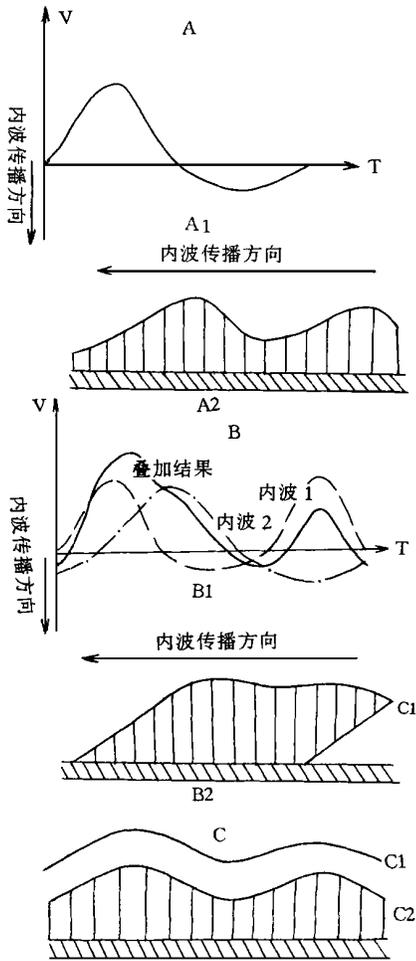


图 7 研究区深水沉积物波不同床形单元的内波成因解释示意图

A: 单列内波接近海底时所形成底流的不对称时间—流速曲线(A1)及其形成的不对称波形单元(A2)

B: 两列同向传播的内波叠加作用于海底时所形成底流的时间—流速曲线(B1)及其形成的上攀床形单元(B2)

C: 内驻波波形(C1)及内驻波作用于海底时形成的正弦波形单元(C2)  
Fig. 7 Schematic diagrams of different bed forms of deepwater sediment waves formed by internal waves in study area

世界气候变冷大约开始于 3.0 百万年前, 大约 2.8 百万年前加剧, 约在 2.4 百万年达到顶峰<sup>[12]</sup>。这样从上新世开始, 气温逐渐下降, 最终形成第四期冰期的到来。从早更新世至中更新世, 北大西洋与西北欧发生频繁的冰期—间冰期旋回, 每一冰期旋回约  $10^5$  a, 每一间冰期约维持  $10^4$  a<sup>[12]</sup>。气候波动时温盐环流加强, 由于此时期地中海溢流盐度较单元 1 形成时的溢流盐度低, 赫布里兹斜坡中上部北大东

西洋水团与上覆水体之间(密度差异较小)产生的内波能量有限, 不足以影响到斜坡下部。因此, 只有斜坡中下部北大西洋深层水与上覆正常海水或冰融淡水之间产生的内波可作用于斜坡下部, 据图 7A, 该内波向海传播可形成单元 2 及下 MacLeod 序列向上坡迁移的不对称波形单元(图 7A)。

对于晚更新世,  $1.28 \times 10^5$  a 以来的绝对年龄比较可靠, 而从距今  $115 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$  a 为末次冰期, 晚更新世为末次冰期的盛冰期<sup>[12]</sup>。盛冰期阶段温盐环流不发育, 厚层的大洋浮冰限制了表面波浪的产生, 加上洛克尔海槽东北部相对局限的海底地形, 使研究区内形成相对安静的半封闭水体, 容易形成具稳定密度梯度的水体。具稳定密度梯度的半封闭水体可形成内驻波<sup>[17]</sup>, 激发内波的因素不再是流体的碰撞或表面风浪的作用, 而可能是潮汐力。内驻波作用于底床, 据图 7C, 可形成单元 3 及 MacAulay 序列声波透明的正弦泥波。

全新世早期, 北半球大冰盖迅速融化<sup>[12]</sup>, 温盐环流加剧<sup>[3]</sup>, 形成内驻波的环境被破坏, 北大西洋深层水与上覆水体之间产生的前进内波, 形成单元 3 及 MaxAulay 序列顶部发育的反射界面(图 4 及图 5)。小区沉积物波顶部波脊东南侧沉积、西北侧侵蚀现象是波区上内波向海传播时作用的响应, 而不是 Lee 波模式作用的结果。可以推测, 如继续发生频繁的气候波动, 内波将使这种声波特征透明单元改造成单元 2 及下 Maxleod 序列类似的不对称波形单元。

由上述分析可知, 从中新世末期至全新世, 叠加的内波、单个内波及内驻波的先后作用, 形成了研究区沉积物波内由单元 1 上攀床形单元、下 MacLeod 序列非对称波形单元向单元 3 及 Macleod 序列正弦泥波单元的过渡。

白令海 Navarinsky 峡谷口发育一向上坡迁移的大型沉积物波体系, 也包括正弦波形单元、非对称波形单元及上攀床形单元<sup>[1]</sup>。Karl 等<sup>[1]</sup>推测其为内波成因, 并运用海洋波动理论得出: 形成沉积物波的内波的波长与沉积物波波长相当。这可作为本文沉积物波内波成因的佐证。但 Karl 等<sup>[1]</sup>对于内波如何形成上述各单元、内波为何能使沉积物波向上坡迁移、内波的产生与古气候及古洋流间的关系、内波如何产生等问题未能或未加以探讨。

#### 参 考 文 献

1 Karl H A. Internal-wave currents as a mechanism to account for large

- sand waves in Navarin sky Canyon Head, Bering Sea [ J ]. *J. Sediment. Petrol.*, 1983, 56(5): 706 ~ 714
- 2 Richard P C, Ritchie J D, Thomson A R. Evolution of deep-water climbing dunes in the Rokall Trough—implications for overflow currents across the Wyville-Thomson Ridge in the Late Miocene [ J ]. *Mar. Geol.*, 1987, 76: 177 ~ 183
  - 3 Howe J A. Turbidite and contourite sediment waves in the northern Rockall Trough, North Atlantic Ocean [ J ]. *Sedimentology*, 1996, 43: 219 ~ 234
  - 4 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 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996
  - 5 Flood R D, Shor A N. Mud waves in the Argentine basin and their relationship to regional bottom circulation patterns [ J ]. *Deep sea Res.*, 1988, 35: 943 ~ 971
  - 6 Howe J A, Stoker M S, Stow D A V. A late cenozoic sediment drift complex, north-east Rockall Trough [ J ]. *North Atlantic Paleooceanography*, 1979, 6: 989 ~ 999
  - 7 Stoker. A record of Late Cenozoic stratigraphy, sedimentation and climatic change from the Hebrides Slope, NE Atlantic Ocean [ J ]. *J. geol. Soc. London*, 1994, 151: 235 ~ 249
  - 8 Dickson R, Kidd R B. Circulation in the southern Rockall Trough—the oceanographic setting of site 610 [ C ]. In: Ruddiman WF, Kidd R B, Thomas E, *et al.* eds. Reports of the DSDP, 1986, Vol XCIV Washington
  - 9 Huthnance J M. Rokall slope current and shelf edge processes. *proc [ J ]*. Roy. Soc. Edinburgh, 1986, 88: 83 ~ 101
  - 10 Kenyon N H. Evidence from bedforms for a strong poleward current along the upper continental slope of NW Europe [ J ]. *Mar. Geol.*, 1986, 72: 187 ~ 198
  - 11 Harvey J G. Theta-s relationships and water masses in the eastern North Atlantic [ J ]. *Deep-Sea Res.*, 1982, 29: 1021 ~ 1033
  - 12 杨怀仁. 第四纪地质 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1987
  - 13 Jopling A V, Walker R G. Morphology and origin of ripple-drift cross lamination, with examples from the Pleistocene of Massachusetts [ J ]. *J. Sediment. Petrol.*, 1968, 38: 971 ~ 984
  - 14 Normark D B. Contourite drifts [ A ]. In: Pickering K T, *et al.* eds. *Deep-Marine Environments [ C ]*. 1988, Char. 9: 219 ~ 245
  - 15 Roberts D G. Marine geology of the Rokall plateau and Trough [ J ]. *Philos. Trans. A Soc. London, Ser. a*, 1975, 278: 447 ~ 509
  - 16 Leslie A. Shallow Pleistocene contourites on the Hebrides Slope northwest U.K. continental margin [ J ]. *Sedimentary Geol.*, 1993, 82: 61 ~ 78
  - 17 LaFond E C. Internal waves [ A ]. In: Hill M N, ed. *The sea [ C ]*. Volumel. London, Wiley Interscience, 1962. 731 ~ 751
  - 18 Muench R D. On some possible interactions between Internal Waves and Sea Ice in the marginal ice zone [ M ]. 1983, 88( c5): 2 819 ~ 2 826
  - 19 Gao Zhenzhong, Eriksson K A. Internal-tide deposits in an Ordovician submarine channel; Previously unrecognized facies? [ J ]. *Geology*, 1991, 19: 734 ~ 737
  - 20 高振中, 何幼斌, 李建明, 李维峰, 罗顺社, 王泽中. 我国发现内潮汐沉积 [ J ], *科学通报*, 1997, 42( 13): 1 418 ~ 1 421
  - 21 Hotchkiss F S, Wunsch C. Internal waves in Hudson Canyon with possible geological implications [ J ]. *Deep-Sea Research*, 1982, 29: 415 ~ 442
  - 22 Dowling L M. Sedimentation on the Feni Drift and Late Glacial bottom water production in the northern Rokall Trough [ J ]. *Sedi. Geol.*, 1993, 82: 79 ~ 87
  - 23 LaFond E C. Internal Waves [ A ]. In: Fairbridge R W, ed. *The encyclopedia of oceanography [ C ]*. New York, Reinhold, 1966. 402 ~ 408
  - 24 Cacchione D A, Wunsch C. Experimental study of internal waves over a slope [ J ]. *J. Fluid Mechanics*, 1974, 66: 223 ~ 239
  - 25 J. 肯尼特. 海洋地质学 [ M ]. 成国栋等译. 北京: 海洋出版社, 1992

# Internal-wave Deposits in the North-eastern Rockall Trough, North Atlantic Ocean ——Reinterpretation of deep-water sediment waves formation

ZHANG Xing-yang<sup>1</sup> GAO Zhen-zhong<sup>1</sup> YAO Xue-gen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Geology Department of Jiang han Petrdeum Institute, Jingzhou Hubei 434102)

<sup>2</sup>(Manager Department of Nature Gas Exploration Project of Sichuan and Hubei Wanxian Sichuan 634000)

## Abstract

Tow sediment wave fields are developed in a depth zone of about 1 000-1 100m in the north-eastern Rockall Trough. Their wavelengths vary from 1 to 2 km and waveheights from 18 to 20 m, covering area of 350km<sup>2</sup> and 20km<sup>2</sup> respectively. Sedment waves migrate upslope and include generally an upslope climbing, asymmetry upslope and sinusoidal shape in stratigraphic section. The conclusions proposed by former scholars that sediment waves of large area were formed by the overflow moving from the Norwegian Ses and the Lee-Wave modle has caused the upslope migration of the sediment waves of small area have many problems. Considering the paleoclimate and paleocirculation, internal waves could be generated in study area while every unit of the sediment waves was being formed. The formation of internal waves is related to contour currents closely. Resonnable hydrolic mechanism of sediment waves fomation can be obtained accord-ing to the theory of internal wave. Generated under different paleoclimatic and paleocirculative conditions, the combining of two internal waves propagating toward the same direction, unique internal wave and internal stand wave which intersected sea floor successively would form a general basal climbing, intermidiate asymmetric and upper sinusoidal shape in stratigraphic section.

**Key words** Rokall Trough internal-wave deposits deep-water sediment waves contour current ice age