

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2024.03.011

# 内波、内潮汐沉积及其沉积矿产意义研究综述

李向东, 魏泽映, 杨敏

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 深水环境中内波、内潮汐沉积研究至今已有 30 多年的研究历史, 且在地层记录中发现了较多的研究实例, 较系统地总结了该类型沉积的鉴别标志, 为其在沉积矿产方面的应用奠定了基础。笔者在已有的内波、内潮汐沉积研究成果的基础上, 从沉积流体演化的角度对已总结的沉积鉴别标志进行了梳理, 对特征性的沉积构造和垂向序列的应用范围进行了限定, 强调特征性鉴别标志与内波、内潮汐沉积一般特征的结合使用。依据内波、内潮汐在沉积过程中的作用, 将内波、内潮汐在海底的作用区域划分为改造海底已有沉积物的改造作用带、与深水其它流体发生交互作用的交互作用带和静水效应带, 分别探讨了三个作用带与常规油气和页岩气勘探的关系。同时认为: ①内波、内潮汐作用在沉积型磷矿成因中可能成为联系“上升洋流”学说和“生物成磷”学说之间的纽带, 并有可能形成再沉积型磷矿; ②目前已发现的地层记录中的内波、内潮汐沉积基本上发育在改造作用带内; ③内波、内潮汐不直接作用于海底的交互作用带和静水效应带的研究非常薄弱, 可能成为今后急需加强的研究方向, 其重点在于探讨和总结内波、内潮汐沉积的微观和地球化学鉴别标志。

**关键词:** 内波、内潮汐沉积; 沉积流体; 沉积型磷矿; 页岩气

**中图分类号:** P512.32 **文献标识码:** A

## 0 引言

内波是一种水下波, 它存在于两个不同密度水层的界面上, 或存在于具有密度梯度的水层之内, 当内波的周期与海面潮汐的周期相同时, 就称这种内波为内潮汐<sup>[1]</sup>。在现代海洋中, 内波、内潮汐是深水海水混合的主要方式, 可在深海区引起热量和溶解物的水平和垂向混合, 素有“深海搅拌机”之称<sup>[2]</sup>。地层记录中的内波、内潮汐沉积研究始于 1991 年对美国弗吉尼亚州芬卡斯尔地区中奥陶统贝斯组的研究<sup>[3]</sup>, 至今已有 30 多年的研究历史, 共发现研究实例 14 例, 其中国内 9 例, 国外 5 例<sup>[4]</sup>。在实例研究中结合现代海洋研究成果, 对内波、内潮汐的演化过程、沉积鉴别标志、垂向序列和沉积模式进行了较为

系统的总结<sup>[4-7]</sup>, 但对内波、内潮汐沉积的矿产意义论述较少, 严重阻碍了该沉积类型研究在沉积矿产勘探中的应用。本文从沉积流体作用的角度对内波、内潮汐沉积及其沉积矿产意义进行综述, 分析深水环境中内波、内潮汐在磷物质富集、脆性矿物富集及砂粒淘洗簸选等方面中的作用, 对于沉积型磷矿成因研究、常规油气及页岩气优质储层研究具有重要意义, 同时对于其它沉积矿产的研究与勘探也具有借鉴意义。

## 1 内波、内潮汐沉积特征

内波、内潮汐发生在水体内部, 在现代海洋中也难以直接观测。最早发现海洋内波现象是在北西伯利亚诺登舍尔德群岛(巴伦支海)附近海域, 源于一

收稿日期: 2024-01-24; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“阿拉善地块东南缘与鄂尔多斯盆地西缘中、上奥陶统浊流演化及其与内波相互作用研究”(编号: 41272119)和中国地质科学院地质研究所基本科研项目“宁夏香山群复杂水动力条件下浊流沉积特征研究”(编号: J1110)共同资助。

作者简介: 李向东(1973—), 副教授, 主要从事沉积学研究及教学工作。通信地址: 云南省昆明市一二一大街文昌路 68 号, 昆明理工大学国土资源工程学院; 邮政编码: 650093。E-mail: Lixiangdong614@163.com

种被当地水手称为“死水”的奇怪现象,即船在穿越“死水”时可遭遇来自海水的某种神秘拖曳力,使航行速度降低<sup>[8]</sup>。在现代海洋探测中,内波、内潮汐引起的内波流或内潮汐流却可以用速度计测度出来(图 1a、c)。图中黑色充填部分为实测的海底峡谷中流体速度,由于地形限制,速度的方向只有 2 个,沿斜坡向上和沿斜坡向下;连续的黑曲线表示海面潮汐的周期与潮差。图 1a 中海底峡谷中流体的交替流动与海面潮汐的周期变化(涨潮和落潮)基本一致,只是在量值方面有出入,考虑到水深为 1600 多米,远超过海面潮汐作用的影响深度,故解释为由海面潮汐作用引起的内潮汐。图 1c 中海底峡谷实测获得沿斜坡向上的单向优势流,沿斜坡向下的流动偶尔出现,且时间短、速度小,同时沿斜坡向上流动与海面潮汐的涨潮周期耦合较好,其量值上较大的出入可能受其它因素影响。经过研究认为,在深水(约 1000 m)环境中产生这种具有潮汐周期的单向优势流的原因可能是在内潮汐或短周期的内波上叠加有高能、长周期的内波所致<sup>[1]</sup>。

内波、内潮汐沉积是受沉积流体作用控制的事件沉积,而非受沉积环境控制的正常沉积,而其引起的双向交替流和单向优势流速度较小,一般为 20~

50 cm/s,多以改造海底已有沉积物的方式在地层记录中保留下来。双向交替流可形成双向交错层理(图 1b),单向优势流可形成单向交错层理(图 1d),其中纹层倾向区域斜坡上方的可以作为内波、内潮汐沉积的鉴别标志,纹层倾向区域斜坡上方的由于无法和低密度浊流形成的单向交错层理区分而不能作为内波、内潮汐沉积的鉴别标志。深水环境中的双向交错层理和纹层倾向区域斜坡上方的单向交错层理是发现最早的内波、内潮汐沉积鉴别标志,也是至今为止发现的最为可靠的鉴别标志。此外,内孤立波形成的短周期内波,以中国南海为例,一般周期为 10~20 min,速度 120~220 cm/s,也可在地层记录中形成沉积。其作用方式有 2 种,除了改造已有沉积物,在深水环境中形成各种类型的浪成波纹层理外<sup>[7,10]</sup>,还可以改造低密度浊流本身,在深水环境中形成复合流,发育各种复合流沉积构造,包括复合流层理、准平行层理、小型似丘状交错层理等<sup>[7,11]</sup>。

由于内波、内潮汐沉积缺少排他性的鉴别标志,其一般的沉积特征也是进行综合鉴别的重要依据,主要包括<sup>[5,7,12]</sup>;形成于深水环境,一般在深水区(如水深大于 200~250 m)易于保存;常伴有脉状、波状和透镜状复合层理,与潮坪环境相比,沉积岩(物)

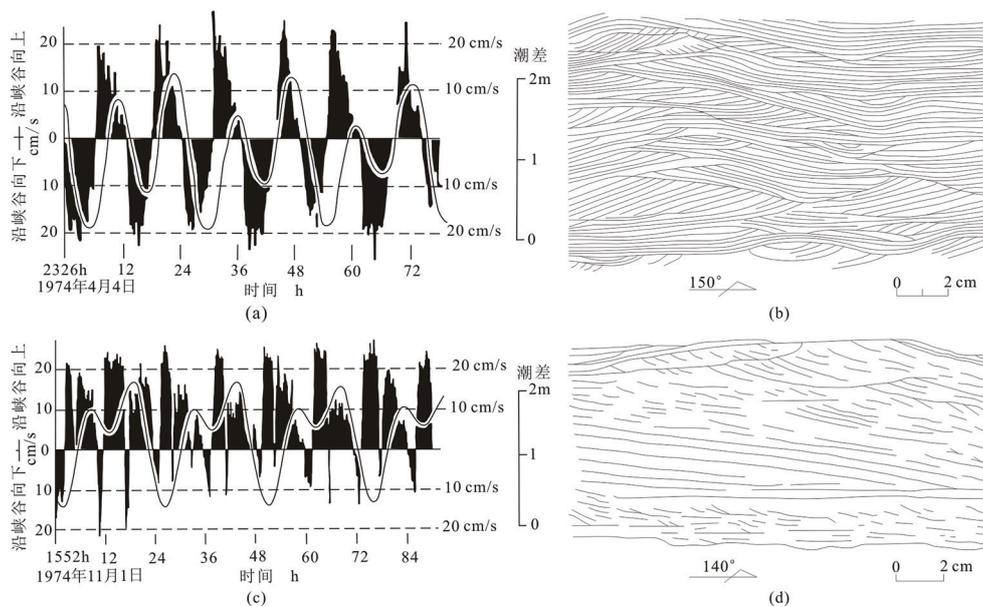


图 1 内波、内潮汐流动特征与沉积构造<sup>[3,9]</sup>

Fig. 1 Internal-wave and internal-tide flow characteristics and sedimentary structures

- a. 表示双向流动的周期与表面潮汐的关系,图中连续曲线表示表面潮汐的周期与潮差,右侧线段为潮差比例尺,圣克里门蒂(San Clemente)裂谷 123 号测站,水深 1646 m,高于谷底 3 m;
- b. 内潮汐沉积中的双向交错纹理素描图,芬卡斯尔地区贝斯组;
- c. 同图 1a,蒙特雷海底峡谷,深度 1061 m,第 58 号测站,距谷底 3 m;
- d. 内潮汐沉积中的单向交错层理素描图,芬卡斯尔地区贝斯组

多为还原色,无暴露标志,发育还原环境下的指相矿物;沉积岩(物)的粒度以极细砂至中砂级为主,少量粗砂,内碎屑可达细砾级,在水道环境中泥质一般以砂级沉积杂基的形式出现,在非水道环境中可发育砂质、粉砂质和泥质沉积,即泥质可以成层出现;一般缺乏生物扰动构造,近底床的双向往复流动、高浑浊度及平潮期较高的悬浮降落沉积速率均不利于底栖生物生存,但是与浊流伴生的短周期内波沉积往往含有较丰富的生物扰动构造(遗迹化石);通常出现于海平面上升时期,其原因在于高海平面时期重力流沉积受到抑制,内波、内潮汐沉积得以保存。

## 2 内波、内潮汐沉积垂向序列

尽管深水环境下特定的沉积构造是内波、内潮汐沉积迄今为止相对可靠的鉴别标志,但是其应用却受到诸多限制。既使在野外露头区,沉积构造也具有“点”状分布的特征,不利于在剖面上对内波、内潮汐沉积进行系统的研究,发现其时空分布规律(通过剖面对比)。在沉积盆地中,岩心资料有限且更不利于沉积构造观察,常规测井资料无法研究沉积构造,在成像测井技术应用有限的条件下,仅靠特定沉积构造研究已无法满足内波、内潮汐沉积研究的系统化。在长期的野外露头区研究中,已逐步总结出了内波、内潮汐沉积的垂向序列(图2),这些特征性的垂向序列一般具有明显的周期性,可作为内波、内潮汐沉积的鉴别标志<sup>[5,13]</sup>,并有利于在剖面上(野外

露头剖面、岩心录井剖面及井筒测井剖面等)对内波、内潮汐沉积进行连续的系统的研究,进而在区域上进行剖面对比,探讨内波、内潮汐的时空发育规律。

内波、内潮汐沉积的垂向序列总体上以双向递变为主,可分为4大类,其中前3类较为成熟,是内波、内潮汐形成的流体对海底已有沉积物进行改造后再沉积形成,第4类尚处于探索阶段,是内波、内潮汐改造低密度浊流沉积形成。

第1类是由内波、内潮汐水动力弱-强-弱的周期性控制的沉积序列,反映了海面潮汐在深水区引发的内波、内潮汐的沉积特征。该类型可细分为2小类:一是向上变粗再变细序列(双向递变序列),以细砂沉积为主,粗粒部分位于序列中部,向上和向下粒度均逐渐变细,泥质含量随之增加(图2a、2b)。其中,图2a以发育双向交错纹理为特征,并与上覆及下伏泥质沉积渐变过渡,指示古流向频繁地反复变换,为典型的内潮汐沉积序列;图2b一般由中型交错层理和小型交错纹理构成,交错层理的方向一般向同一方向倾斜,交错纹理的方向可以是单向的,也可以是双向的,为典型的内潮汐叠加长周期内波沉积,流体的弱-强-弱变化幅度和速度均大于交错纹理砂岩序列。二是向上变细序列(单向递变序列),也以细砂沉积为主,但粒度最大的部分存在于序列的底部(图2c、2d),指示在特定条件下内波、内潮汐活动由弱至强的变化速度很快,导致先期形成的细粒沉积被其后的强烈流动所侵蚀,只保留由强至弱时期的沉积。其中,图2c全序列由交错纹理构

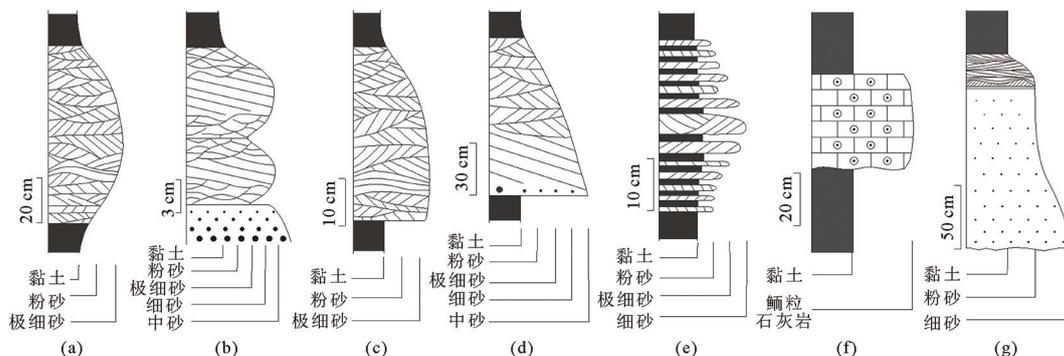


图2 内波、内潮汐沉积垂向序列<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Vertical successions of internal-wave and internal-tide deposits

- a. 由交错纹理砂岩构成的向上变粗再变细序列; b. 由中型交错层理和小型交错纹理砂岩构成的向上变粗再变细序列;  
c. 由交错纹理砂岩构成的向上变细序列; d. 由中型交错层理和双向交错纹理构成的向上变细序列;  
e. 砂岩、黏土岩对偶层构成的向上变粗再变细序列; f. 黏土岩—颗粒石灰岩(其它颗粒岩)—黏土岩序列;  
g. 发育在低密度浊流鲍玛序列中的短周期内波复合流沉积序列

成,层系规模向上逐渐变小,交错纹理方向也为双向型,为内潮汐沉积;图 2d 下部粗粒部分形成低角度中型单向交错层理,上部细粒部分发育双向交错纹理,反映出内潮汐叠加长周期内波沉积向内潮汐沉积的转化。

第 2 类为不同岩性(一般为细砂岩和黏土岩)构成的异岩双向递变对偶序列(图 2e),反映了斜坡非水道环境下,无流体作用的静止期黏土沉积得以保存。其原因可能有 4 种:一是内潮流转向时具有较长的相对静止期;二是受到更大的内波周期控制;三是受天文旋回(米兰柯维奇旋回)控制;四是受到短周期内波的干扰。

第 3 类为黏土岩夹鲕粒石灰岩序列(图 2f),其两者可以不同的比例、不同的形态组合而形成脉状、波状和透镜状复合层理,鲕粒石灰岩中可形成双向交错纹理,反映出内潮汐沉积特征,其中鲕粒石灰岩也可被其它类型的盆地内颗粒岩替代,如具有扁平状和“人”字形组构的砾屑石灰岩,反映出短周期内波引发的深水紊流事件沉积<sup>[13-14]</sup>。

第 4 类是深水复合流沉积序列(图 2g),代表了短周期内波与低密度浊流发生交互作用形成的沉积,并非改造已有沉积物,一般发育在鲍玛序列的 Tc 段,沉积构造多为浪成波纹层理、复合流层理(波痕)和小型似丘状交错层理,当浊流作用较弱时,流体改造较为彻底,也有可能形成类似图 2f 的垂向序列。

### 3 内波、内潮汐作用的沉积矿产意义

由于内波、内潮汐不具备直接可观察性,在现代海洋研究中也很难将一些深海的营养物质运输、碎屑物搬运、沉积现象等直接和内波、内潮汐作用联系起来,使得现代海洋中内波、内潮汐沉积研究薄弱,从而直接阻碍了古代地层记录中内波、内潮汐沉积鉴别标志的总结与研究。这种研究的不平衡,直接造成了一个奇怪的现象,即现代海洋中内波、内潮汐广泛发育,而地层记录中能鉴别出的内波、内潮汐沉积却很少,两者严重不成比例。因此,内波、内潮汐沉积目前的主要任务仍然是发现更多的研究实例,总结和完美鉴别标志。但是,及时地探讨内波、内潮汐作用的沉积矿产意义也非常重要,既可以完善相关的深水成矿(藏)理论,指导某些沉积矿产的勘探,反过来又可以推进内波、内潮汐沉积的理论研究。

目前已涉及到的沉积矿产主要为常规油气、页岩气和沉积型磷矿。

#### 3.1 内波、内潮汐沉积与沉积型磷矿

磷矿是重要的战略性矿产,其中 95% 以上为沉积型,2016 年 11 月我国将磷矿列入战略性矿产目录,是矿产资源宏观调控和监督管理的重点对象<sup>[15]</sup>。海相沉积型磷矿的形成具有事件性的特征,磷物质的富集与大洋磷循环的突变有关,受控于地史时期的气候突变、大氧化事件和生命演化等因素<sup>[16]</sup>。例如,新元古代末期的冰期导致陆源风化强烈,来自陆源的磷质输入量大幅提升,且在冰期内封闭缺氧环境导致磷质不能有效沉降,随后的间冰期上升洋流携带深部富磷海水进入浅水透光层,导致大洋藻类生物的繁盛,促使沉积物中有机质大量沉降,生物降解作用下不断释放磷酸盐,导致海洋磷循环加速,在全球范围内形成磷矿体<sup>[17]</sup>。在沉积型磷矿成因方面,围绕着活性磷成磷作用,即“磷酸盐工厂”,主要形成了“上升洋流”学说和“生物成磷”学说。前者是指上升洋流携带深部富磷海水(来源于深海“磷库”)进入浅水海岸,在生物化学作用或其它地球化学作用下使磷质在浅水海岸进一步聚集形成磷块岩沉积<sup>[17-18]</sup>;后者最早认为是由生物遗体堆积而成,现则指生物对海水中磷质的粘结、富集而间接形成的磷块岩<sup>[18-19]</sup>。

上升洋流可大致分为赤道上升流、海洋冰川边缘上升流和海岸上升流,其中发育磷矿床的碳酸盐岩台地主要受风力驱动海岸上升流体系影响<sup>[20]</sup>。在这样的水动力体系中,上升流与温暖的浅水之间往往具有明显的温盐突变界面,极易在近滨(平均低潮面和正常波基面之间)及正常波基面以下的较深水区形成内波、内潮汐<sup>[21]</sup>。关于内波、内潮汐在磷矿层形成过程中的作用,已有的研究实例<sup>[22]</sup>为意大利平宁山脉中部 Latium - Abruzzi 台地碳酸盐岩序列中的磷矿层(图 3)。

磷矿层主要由粗粒生物碎屑颗粒岩、泥质颗粒岩(泥粒岩)和苔藓虫漂砾岩组成。内波在破碎带(受密度跃层的深度控制)破碎,可产生冲流和回流(图 3a),向岸的冲流可产生剥蚀过程,向海的回流也可剥蚀海底沉积物,并可以底负载或重力流的形式向海搬运这些被剥蚀的物质(图 3b)。由内波形成的沿斜坡向下的重力流可对深水环境中形成的磷化带物质进行剥蚀,产生具有磷酸盐包壳和纹层的磷酸盐砾屑(图 3c)。最终,由于重力流的剥蚀、搬运和沉积作用,向盆地方向的聚集作用以及水动力的筛选作用,

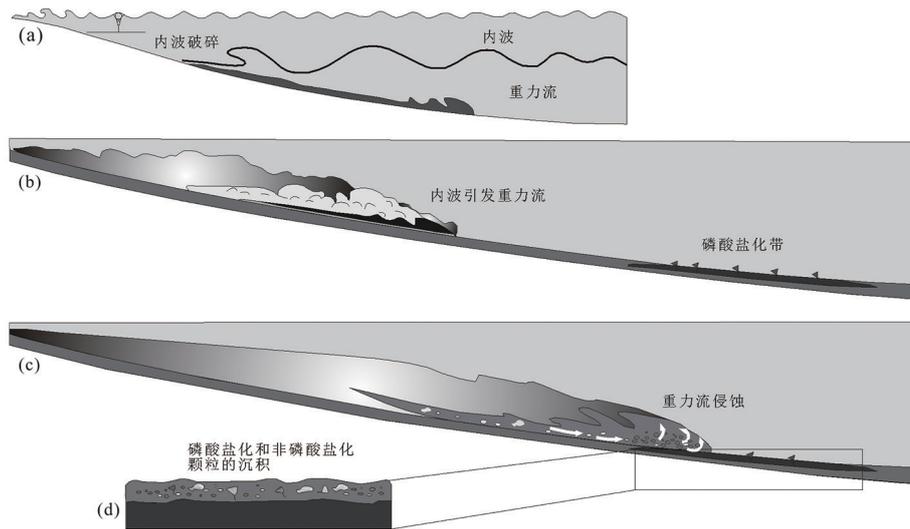


图3 内波、内潮汐作用与含磷颗粒的再沉积<sup>[22]</sup>

- Fig. 3 Internal-waves and internal-tide action VS re-precipitation of phosphorous particles
- 内波破碎产生的紊流状态的回流；
  - 破碎带内波产生的紊流搬运低密度生物碎屑并形成沉积物重力流；
  - 沉积物重力流冲击和剥蚀磷化带具有硬壳和纹层的磷酸盐沉积物；
  - 磷酸盐沉积物包括磷酸盐化岩屑、改造型非磷酸盐化石、磷酸盐硬底剥蚀碎屑和内波从破碎带搬运的非磷酸盐化生物骨架碎屑

磷化岩屑聚集成单层,形成磷矿层(图 3d)。

此外,从理论上讲,内波、内潮汐在海洋中是能量和动量垂向传输的重要载体,普遍具有斜压性质,其垂向运动所引起的混合作用可在斜坡环境中引起上升流,将深部低温、富溶解硅和营养盐(特别是硝酸盐和磷酸盐)的海水带到表层,有效地提高海洋的初级生产力,在条件合适时形成“磷酸盐工厂”。因此,内波、内潮汐沉积对于沉积型磷矿床而言,既可成为“上升洋流”的具体作用方式,也可有效地促进“生物成磷”,有可能成为“上升洋流”学说和“生物成磷”学说之间的联系纽带,从而促进沉积型磷矿成因理论研究。在我国南方,扬子地块埃迪卡拉纪(震旦纪)陡山沱期和寒武纪纽芬兰世梅树村期是我国重要的成磷期,形成广覆型沉积磷矿,而在湖南杨家坪寒武纪磷矿的赋矿地层中已发现了内波、内潮汐沉积<sup>[23]</sup>。由此推测,内波、内潮汐作用有可能在我国南方沉积型磷矿形成中扮演着重要的角色。

### 3.2 内波、内潮汐沉积与常规油气、页岩气

关于内波、内潮汐沉积和油气的关系探讨较早,2000年前后,在塔里木盆地塔中地区中、上奥陶统碎屑岩段内发现了内波、内潮汐沉积,并进行了详细的沉积学研究<sup>[24-25]</sup>和储层性能研究<sup>[26-27]</sup>,可惜未能在内波、内潮汐沉积中取得油气勘探的突破。此后主要从理论的角度对内波、内潮汐沉积和油气的关

系进行了探讨与总结。

在常规油气勘探方面,主要从沉积体的角度将内波、内潮汐分 2 大类 4 小类<sup>[28-30]</sup>。一是基本沉积类型,包括水道型和非水道型 2 小类。水道型可发育在外陆架至海底平原上的内潮汐沟道、海底峡谷和浊积水道环境,主要由较厚(几分米至几米)的粉砂—中砂岩构成,可与深水重力流沉积一起或单独和深水背景泥岩沉积构成有利的地层或岩性油气圈闭,具有重要的潜在油气勘探意义。非水道型可发育在外陆架、陆坡、陆隆、海底平原、(半)深海中的海底平台、海底浊积水道天然堤的背坡和海底扇中扇外缘至外扇等地区,主要由砂泥对偶层,由于单砂层很薄,一般仅为厘米级,故其常规油气地质意义可能不大。二是特殊的沉积建造,包括深水大型沉积物波和内潮汐砂坝 2 小类。深水大型沉积物波可发育在任何有内波、内潮汐流发育的环境,以具有向上坡方向迁移的沉积物波为特征<sup>[31]</sup>,其中粗粒沉积物波中的水道型内波、内潮汐沉积为油气良好储层,并可能为深水地层或岩性油气圈闭的构成要素。内潮汐砂坝分布于海底水道口环境<sup>[32]</sup>,其内部构成应以水道型内波、内潮汐沉积为主,可成为油气良好储层,极易与深水背景泥岩沉积一起形成岩性油气圈闭。

在页岩气勘探方面,主要从内波、内潮汐作用对沉积岩(物)结构的改造和影响及其与页岩气储层的

关系等方面进行分析<sup>[4,33]</sup>。一般认为:

①内波、内潮汐沉积的周期性作用可与静水沉积的黏土层形成不同尺度的韵律层,有可能造成页岩中较大尺度的非均质性,增加页岩气勘探开发中的不确定性。

②内波、内潮汐对已有沉积物的改造作用,通常改善砂岩、粉砂岩的磨圆和分选,增加岩石中脆性矿物含量,有利于增加页岩气储层的粒间孔隙、微裂缝和层间滑移缝等储集空间,改变页岩内部结构,提高页岩的可压裂性。

③内波、内潮汐和低密度浊流、等深流等深水流体的交互作用可造成悬浮物中黏土和粉砂的分离,形成粉砂岩和黏土岩薄互层或极薄互层,且岩层厚度横向变化小(较大范围内的板状形态),有利于形成规模较大的页岩气储层,提高页岩的可压裂性。

④内波、内潮汐在大洋温盐环流过程中的垂向混合作用,可形成上升流,将深部的营养物质输运到表层,提高海洋生产力,有利于页岩中有机质富集,发育有机质孔隙。

⑤内波、内潮汐的静水效应可能使黏土絮凝体破碎、粉砂和黏土絮凝体分离、迟滞黏土沉降及使浮游生物遗体聚集沉积等,从而造成深水原地沉积中的有机质和脆性矿物分布的不均一,形成页岩中较小尺度的非均质性,造成页岩气勘探开发中的不确定性。

从内波、内潮汐流体作用的角度,可将"常规油气"和"页岩气"两者结合起来(图 4)。在图 4 中不再区分水下水道(或海底峡谷)和深水斜坡环境。在水道环境中,由于内波、内潮汐流在侧向上受到地形限制,其流动方向更加集中(沿斜坡向上或向下),流动速度更大;在非水道的斜坡环境,其流动方向较为发散,流动速度也较小。水下水道环境和深水斜坡

环境的差别主要在内波、内潮汐流的流动速度大小上。在图 4 中也不再区分短周期内波、内潮汐和更大周期的内波,短周期内波趋向于产生振荡流,形成浪成波纹层理,内潮汐趋向于产生双向交替流,形成双向交错层理,更大周期内波趋向于产生单向优势流,形成单向交错层理。不同类型的内波沉积的差别主要在内波作用于海底已有沉积物之后所形成的沉积构造类型上。

参照海岸环境中波浪作用带,发育在海水内部温盐跃层附近的内波、内潮汐,按照其是否作用于海底发生波动变形,也可分为起浪带、破浪带和碎浪带<sup>[7]</sup>(图 4)。从破浪带起沿斜坡向上,是内波、内潮汐作用于海底,其较强的水流部分或完全改造海底已有的沉积物,经过内波、内潮汐反复的淘洗和簸选,使得沉积物的磨圆和分选均变好,形成潜在的常规油气优质储层,这一范围可称为内波、内潮汐的改造作用带,目前已发现的地层记录中的内波、内潮汐沉积基本上发育在该作用带内。向海方向,紧邻改造作用带可发育有内波、内潮汐和其它深水流体(常见的为低密度浊流和等深流)交互作用带,由于处于内波作用底面以下,流体不能直接作用于海底沉积物,而是作用于悬浮物,可造成黏土和粉砂的分离,此带可形成粉砂岩和黏土岩薄互层,也可使脆性矿物富集(图 4)。尽管在内波作用底面之上也可发育和内波相关的深水复合流(流体交互作用),但是流体的沉积作用主要表现为对海底已有沉积物的改造,只是沉积构造以复合流层理、小型似丘状交错层理和准平行层理为主,故其沉积仍归为改造作用带,而非交互作用带。交互作用带再向海方向,近海底几乎不受流体作用,加之内波、内潮汐作用可有效地提高海洋的初级生产力,此带内有机质会发生垂直接落沉积,造成有机质富集,该带可称为内波、内潮

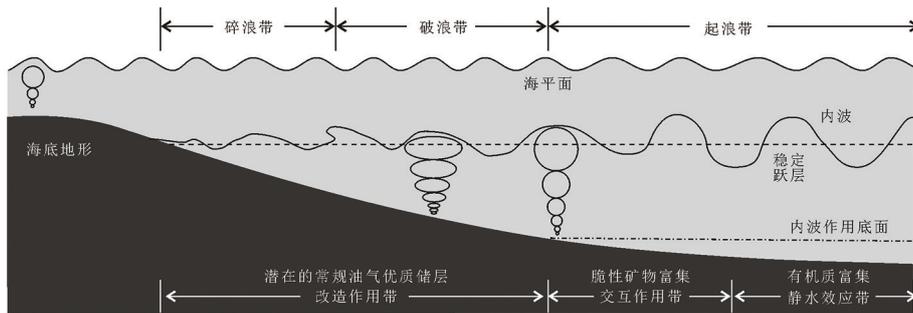


图 4 内波、内潮汐作用与常规油气、页岩气富集示意图

Fig. 4 The sketch showing relation between internal-waves and internal-tides and conventional oil and gas and shale gas

汐静水效应带(图4),有可能形成以有机质孔隙为主的优质页岩气储层。

## 4 结论与展望

(1)深水环境中内波、内潮汐按其在沉积过程中的作用,可分为改造作用带、交互作用带和静水效应带。其中,改造作用带可形成潜在的常规油气优质储层,交互作用带有利于形成规模较大的可压裂性好的页岩气储层;静水效应带,可造成有机质富集,从而形成优质页岩气储层。

(2)内波、内潮汐有可能是沉积型磷矿成因之一的“上升洋流”学说中洋流的具体作用方式之一,是“上升洋流”学说和“生物成磷”学说之间的联系纽带;在适当条件下,内波、内潮汐引起的浊流可形成再沉积型磷矿。

(3)地层记录中已发现的内波、内潮汐沉积实例多为改造作用带的沉积,其有效的鉴别标志主要为各种特征性的沉积构造和垂向序列,但使用时应和一般的沉积特征结合起来。其中沉积构造具有“点”状分布特征,有利于野外露头区研究;垂向序列有利于在剖面上进行连续的系统的研究。

(4)目前对内波、内潮汐不直接作用于海底的交互作用带和静水效应带的研究非常薄弱,但这2个带对于沉积矿产(特别是页岩气及沉积时磷物质的富集)具有重要价值,今后的深水内波、内潮汐沉积研究应在发现更多的研究实例,总结和完美鉴别标志的基础上,侧重于微观和地球化学鉴别标志,及时开展对交互作用带和静水效应带内波、内潮汐沉积作用的研究。

### 参考文献:

- [1] Gao Zhenzhong, Eriksson K A, He Youbin, *et al.* Deep-water traction current deposits—A study of internal tides, internal waves, contour currents and their deposits [M]. Beijing and New York: Science Press, Utrecht and Tokyo: VSP, 1998: 1–122.
- [2] 李丙瑞, 范海梅, 田纪伟, 等. 小振幅海洋内波的演变、破碎和所致混合[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 807–815.
- [3] Gao Zhenzhong, Eriksson K A. Internal-tide deposits in an Ordovician submarine channel: Previously unrecognized facies? [J]. *Geology*, 1991, 19(7): 734–737.
- [4] 李向东. 地层记录中内波、内潮汐沉积研究进展及其页岩气勘探意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(10): 3513–3528.
- [5] He Youbin, Gao Zhenzhong. The Characteristics and recognition of internal-tide and internal-wave deposits [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(7): 582–589.
- [6] Pomar L, Morsilli M, Hallock P, *et al.* Internal waves, an under-explored source of turbulence events in the sedimentary record [J]. *Earth – Science Reviews*, 2012, 111(1): 56–81.
- [7] 李向东. 关于深水环境下内波、内潮汐沉积分类的探讨[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1097–1109.
- [8] 王展, 朱玉可. 非线性海洋内波的理论、模型与计算[J]. 力学学报, 2019, 51(6): 1589–1604.
- [9] Shepard F P, Marshall N F, McLoughlin P A, *et al.* Currents in submarine canyons and other sea valleys [J]. *AAPG Studies in Geology*, 1979, 8: 1–13.
- [10] 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[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 80–83.
- [11] 李向东, 陈海燕, 陈洪达. 鄂尔多斯盆地西缘桌子山地区上奥陶统拉什仲组深水复合流沉积[J]. 地球科学进展, 2019, 34(12): 1301–1305.
- [12] 李向东, 魏泽映, 陈洪达. 鄂尔多斯盆地西缘上奥陶统拉什仲组内波、内潮汐沉积成因分析[J]. 地质学报, 2023, 97(4): 1278–1294.
- [13] Abdi A, Gharaie M H M, Bádenas B. Internal wave deposits in Jurassic Kermanshah pelagic carbonates and radiolarites (Kermanshah area, West Iran) [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 314: 47–59.
- [14] Pomar L, Molina J M, Ruiz-Ortiz P A, *et al.* Storms in the deep: Tempestite and beach-like deposits in pelagic sequences (Jurassic, Subbetic, South of Spain) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 365–381.
- [15] 吴发富, 王建雄, 刘江涛, 等. 磷矿的分布、特征与开发现状[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 82–101.
- [16] Filippelli G M. Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: The deep time perspective [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 759–766.
- [17] Gao Y, Zhang X, Zhang G, *et al.* Ediacaran negative C-isotope excursions associated with phosphogenic events: Evidence from South China [J]. *Precambrian Research*, 2018, 307: 218–228.
- [18] She Z B, Strother P, Papineau D. Terminal Proterozoic cyanobacterial blooms and phosphogenesis documented by the Doushantuo granular phosphorites II: Microbial diversity and C-isotopes [J]. *Precambrian Research*, 2014, 251: 62–79.
- [19] 张伟, 杨瑞东, 毛铁, 等. 瓮安埃迪卡拉系灯影组叠层石磷块岩形成环境及成矿机制[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 186–195.
- [20] Brandano M, Ronca S, Di Bella L. Erosion of Tortonian phosphatic intervals in upwelling zones: The role of internal waves [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2020, 537: 109405. (doi. org/10. 1016/j. palaeo. 2019. 109405)
- [21] Walter R K, Stastna M, Woodson C B, *et al.* Observations of nonlinear internal waves at a persistent coastal upwelling front [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 117: 100–117.
- [22] Brandano M, Ronca S, Di Bella L. Erosion of Tortonian phos-

- phatic intervals in upwelling zones: The role of internal waves [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2020, 537:109405. (doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109405)
- [23] 何幼斌,高振中,郭成贤,等.石门杨家坪下寒武统杷榔组三段内波和内潮汐沉积研究[J].*中国地质*,2005,32(1):62-69.
- [24] 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[J].*沉积学报*,2000,18(3):400-407.
- [25] 何幼斌,高振中,张兴阳,等.塔里木盆地塔中32井中上奥陶统内潮汐沉积[J].*古地理学报*,2003,5(4):14-425.
- [26] 何幼斌,高振中,张兴阳.塔中地区中-上奥陶统内波内潮汐沉积与油气勘探[J].*海相油气地质*,2002,7(4):33-40.
- [27] 王方平,高振中,何幼斌.塔中低凸起中上奥陶统内潮汐成因砂体储集性能研究[J].*江汉石油学院学报*,2004,26(3):35-36.
- [28] 佟彦明,何幼斌,朱光辉.深水内波、内潮汐沉积类型及其油气意义[J].*海相油气地质*,2007,12(2):39-45.
- [29] He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Jinxiong, *et al.* Characteristics of internal-wave and internal-tide deposits and their hydrocarbon potential[J]. *Petroleum Science*, 2008, 5(1): 37-43.
- [30] 蔡俊,吕修祥,焦伟伟,等.内波和内潮汐沉积对深水油气勘探的意义[J].*新疆石油地质*,2012,33(1):52-57.
- [31] 张兴阳,何幼斌,罗顺社,等.内波单独作用形成的深水沉积物波[J].*古地理学报*,2002,4(1):83-89.
- [32] Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 471-491.
- [33] 李向东,魏泽映.中国南方海相页岩气储层和深水牵引流综述[J].*长江大学学报(自然科学版)*,2023,20(4):1-15.

## A review of internal-wave and internal-tide deposits and the significance for sedimentary mineral resources

LI Xiangdong, WEI Zeyi, YANG Min

(School of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

**Abstract:** The research of internal-wave and internal-tide deposits in deep-water environments have been studied for more than 30 years. Many cases of study on internal-wave and internal-tide deposits recorded in strata has been carried out, identification marks of the deposits summarized systematically laying a sound foundation for the application to sedimentary mineral resources. Based on the research results available at present the authors streamline the summarized identification marks according to evolution of the internal-wave and internal-tide sedimentary fluid flow and define the scope of the characteristic sedimentary structure and vertical succession, emphasize the combination of characteristic and general identification marks. The submarine internal wave and internal tide action is divided into reworked action zone, the previous submarine sediments (reworked), interaction zone (the internal wave and internal tide flow interacts with other sub-marine flow) and still water zone. Relation of the three zones to conventional oil and gas and shale gas is discussed and considered that the internal wave and internal tide action would become a genetic link between the rising ocean flow theory and that of biogenetic theory of phosphor ore, the internal wave and internal tide deposits recorded in strata are generally developed in the reworked zone, study on that the internal wave and internal tide are not directly acted on the interaction zone and still water zone is very weak and should be urgently strengthened in future and focus should be on the microscopic and geochemical identification marks.

**Key Words:** internal-wave and internal-tide deposits; sedimentary fluid flow; sedimentary phosphor ore; shale gas