

长江三角洲海区的浅层地震层序

袁迎如

(地质矿产部海洋地质综合研究大队, 上海)

前 言

海洋浅层地震调查方法不同于陆地,它是运用换能器在海水中激发声波,声波在浅层沉积中传播,在存在波阻抗差异的界面上,产生反射波,并利用换能器接受反射波,再进行连续自记;在当前,其记录形式主要为模拟。过去,在海洋地质调查中对浅层地震剖面的应用,多偏重于海底岩性的解释,而对于解释地层和沉积相尚处于探索阶段。通过浅层地震获得海底面下几十米的记录,与石油地球物理几千米深的地震记录分析对比可以看出,由于浅层地震记录剖面上几十厘米厚的高分辨率,时间剖面垂直比例的放大,因而记录剖面清晰度高,较易辨认地震层序,可解释浅部地层和沉积相,为将今论古提供了依据,为浅层地震的运用开辟了新的广阔领域。

地震层序为在地震剖面上所得出的沉积层序。它的底部和顶部都被角度不整合或与之相应的整合地层间的沉积间断所限定,其间由整合的连续地层所组成。这一套为地震所获得的连续地层构成了一个地震层序^[1]。从1981—1982年中、美联合调查的长江口海区1,300km的浅层地震剖面资料可以看出,虽仅获得厚40m以内的反射资料,但地震层序却比较复杂。现根据:(1)地震剖面上下界面的特征;(2)层内反射结构形态、产状的一致性;(3)结合沉积物的岩性岩相等,将地震层序自上至下,划分出四个主要类型:①水平状地震层序;②倾斜状地震层序;③近水平状地震层序;④谷状地震层序。

一、水平状地震层序

该层序的浅层地震记录以产状成水平为主要特征。分布范围较广。由现代长江水下三角洲沉积层组成,次为其下或附近海区的滨岸、浅海相沉积层。

在长江水下三角洲,于水平状地震层序的下部,反射结构的线条偏粗而稀,向上逐渐变细,在舟山海区则相对较粗。经对比解释,相当于舟山群岛南侧DC-1孔^[2]19.4—19.8m的含砂贝壳层和11.2—19.4m的泥质粉砂、粉砂质泥层。含砂贝壳层产近岸滨海

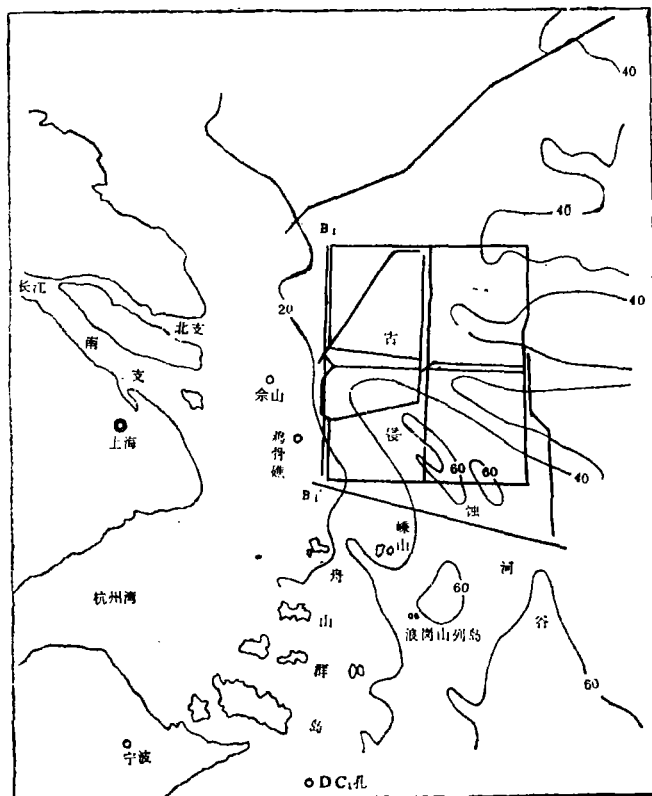


图1 测线位置图

Fig. 1 Position of surveying lines

sp.)、兰蛤属 (*Aloidis* sp.)；11.2—19.4m的泥质粉砂和粉砂质泥层，产软体动物红带织纹螺 [*Nassarius Succinctus* (*A. Adams*)]，属浅海环境。结合孢粉分析和 C^{14} 测定，它们是晚更新世末期以来，海面上升形成的滨岸、浅海沉积物。在舟山群岛附近海域，由于岛屿物的加入，加之海底地形较高，因而出现砂层，并具有薄层贝壳砂。在水平状地震层序的上部，反射面明显，反射线条细而密，以至于互相连接，成一片灰黑色。从取样和钻探岩心可知，该层沉积物多为粉砂质泥，含水量高，近于流塑状，薄层理、微层理发育，层厚1—1.2cm，在该薄层中，又可分成8—10层，其间为0.1mm厚的粉砂层所隔，这些特点与反射结构一致，实际上是现代长江三角洲高速沉积和洪、枯水不均匀输砂的结果。根据这一特征，长江水下三角洲的东界在嵊山列岛以东的 $123^{\circ}E$ 附近，北部在余山岛以北，近 $32^{\circ}N$ ，南部由于舟山群岛地形复杂和杭州湾水体的加入，因而使边界复杂化，大体在 $30^{\circ}30'N$ ，即浪岗山列岛一带。面积约 $1.5 \times 10^4 km^2$ ，构成了以长江口为中心向东南偏斜的水下扇体。经对比，上述范围与根据海底表层沉积物所确定的长江水下三角洲分布地区近乎一致[3]。表明现代长江水下三角洲沉积物

物类型，具强的声反射，声波不易穿透，因而，水平状地震层序的浅层地震记录上，只见有极稀的反射线条，且穿透深度很小。水下三角洲中部，由于沉积物偏细，含水量高达60—70%，因此，浅层地震穿透深度较大，厚约40m，有的记录剖面可见到其底界。在水下三角洲外缘等处，其水平状地震层序很薄，但仍具有下粗上细的二元结构。在尖灭处，往往形成下层直接出露于海底，上层西缩的特点。

在浅层地震记录剖面上，有时见有浅层气囊，个别并刺穿海底（图版 I，1）。长江三角洲为建设型三角洲，沉积速率较高，每年以厘米计，从河口区的5.4cm/a（厘米/年）到远岸泥质区的0.3cm/a〔6〕；重要的是沉积物中有机质含量较高，有的达2%，样品中具有钙质生物壳体，有的见有植物残片，甚或薄的泥炭层，这些为浅层气囊的形成创造了有利条件。

舟山群岛和杭州湾等处，由于陆源岛源供给物丰富，水下地形差异明显，因而产生了重力滑动构造。由于沉积物的滑移，打乱了正常的沉积结构，因而沉积层序特殊，具有滑坡体、重滑断层（图版 I，2）、前缘挤压构造和滑阻隆起等。这些特点只有用浅层地震剖面法才能获得较为满意的结果。

在调查区东北和东部，水平状地震层序与西部水下三角洲等处明显不同，为不明显的粗平行层，地震层序的表面为粗而黑的线条，层内反射结构基本缺失，仅有时具模糊的短线，因而在总体上成一片灰白。该地震层序为明显的砂层，有的海底表面具有对称型的砂波。样品分析表明，该砂层具有较多的介壳，C¹⁴测年为0.6—1×10⁴a。从上述特征来看，为晚更新世晚期的残留砂，经后期的水动力作用所致，即全新世的改造砂。

二、倾斜状地震层序

分布面较广，主要位于调查区的东北部，次为舟山群岛海区一带。地震层序的特征为明显的倾斜状反射层，它与上覆层序或下伏层序的界面不平行。顶部由于受到后期的侵蚀，为一剥蚀面。倾斜状地震层序与上覆地层为明显的顶超，即使较差的记录剖面也可看出。根据反射结构和沉积物成因，倾斜状地震层序可分为两种：

（1）**叠瓦状结构** 反射面稀疏，倾斜状短反射段依次叠置，倾角小，一般0°20′，大的也只有1°30′。在短反射段的后部往往出现较强的反射，表明物质分选堆积，后部沉积物较粗，这一沉积层和其它沉积层岩性差异明显，因而能够产生强反射（图版 II，3）。这种强反射代表了距河口砂坝位置较近。根据测线资料，在调查区东北部的大部分地段，该层视倾向SW，仅在东北角倾向SE。在视倾向SW和SE之间，有一大型砂坝，在测线上的宽度为10km。综合上述特点，表明它是一个大型三角洲沉积体。根据沉积物微体古生物分析，为毕克卷转虫（*Ammonia becarii*）-中华丽花介（*Sinocytheridea*）组合，壳体小，相当于现水深30m以下的沉积环境〔4〕。叠瓦状结构沉积层序之上，为全新世的水平状地震层序的改造砂；该层序之下为晚更新世玉木冰期中的亚间冰期滨海和湖沼河流沉积层，因此，古三角洲为晚更新世晚期所形成〔4〕。结合地形地貌和沉积物特征，该三角洲为晚更新世晚期的长江水下三角洲。

（2）**充填结构** 主要分布于舟山群岛海区。沉积物充填在下伏地震层序的下凹

处。其特点为反射结构粗细相间,河谷形态明显(图版 I, 4)。有些地方受原始地形的影响,形成一些丘形结构;有时则发育有“S”形结构,表明该处属于水下扇的边侧或前积地段。在充填结构的上部,有的地方见有湖泊充填结构,湖泊充填结构由泥质粉砂等组成;在地形相对偏高处,则为强反射,界面粗而黑,线条密实,在记录剖面的下部,具有多次反射。该层植物根系发育,有时上部有薄的泥炭层,孢子花粉多草本,喜冷的柏科(*Cupressaceae*)、冷杉(*Abies*)、落叶松(*Larix*)等百分比比较高,盛产较特征的淡水型盘星藻(*Pediastrum*)。结合上下层的沉积物特征和 C^{14} 测年资料,该充填结构为晚更新世末期寒冷期所形成。而顶部强反射的暗绿色硬土层也就成为上更新统和全新统地震层序的良好分界面。

倾斜状地震层序中的充填结构与叠瓦状结构为同一时期不同地段、不同沉积环境条件下所形成。叠瓦状结构是大型三角洲中前三角洲所在处,而且古长江河口不断外伸,前三角洲叠覆外沿。舟山群岛海区则以小型河流堆积为主,后期多小湖泊,因此在低洼处形成充填结构的沉积层,反映了不同地貌景观条件下的沉积结果。

三、近水平状地震层序

多出露于调查区外侧陆架,少量位于嵎山列岛东北部古侵蚀河谷的较高部位;在长江海区三角洲水平状地震层序的下部,也有部分记录。该层序以层次不明显的近水平状反射为特征,整个记录面貌多呈灰白色,反射界面不密实,内部的反射结构粗,多为细砂、砂质粉砂,夹泥质粉砂,层理不明显,这些特征与反射结构相吻合,是沉积物物理性质在浅层地震剖面上的反映。沉积物中见有钙质生物壳体,壳厚,粗纹饰,多为牡蛎属、竹蛎属,表现为滨海相沉积。

四、谷状地震层序

广布于现代长江水下三角洲和舟山群岛以东的大片地区内,产于近水平状地震层序之下,它在各层序中形成时间最早,为晚更新世中期。浅层地震横剖面上,呈明显的河谷及小型湖泊形态,河谷多,成群分布。谷状地震层序的眼球状反射结构是它的主要特征(图版 I, 5)。眼睛的下凹面为河道冲刷面,分界面明显。谷状地震层序内,下部多尖窄的河谷形态,眼睛内的反射层与分界面具有类同的椭圆圆心,因而形成了内碟形态,上部以相对开阔而平坦的反射结构为主,推测属多湖泊阶段。表明了气候转暖,雨量充沛,构成一片温湿地带。

从前述四种主要的地震层序,结合有关资料,可以看出:

(1) 层序年代地层 沉积物中产生的反射层,主要是具有速度-密度差异的界面,而对于层序时代有意义的,即物性上层速度和密度乘积差值大的,则为不整合面。本区具有两个剥蚀面,分别位于谷状地震层序和倾斜状地震层序的顶部。上下的地层成因、产状、岩性都不一样,无疑是两个不整合面。根据 C^{14} 资料,倾斜状地震层序之上的地层年龄为距今一万年之后。说明其上的水平状地震层序为全新世。根据微体古生物、

孢粉资料与地震层序对比, 近水平状地震层序为滨海相沉积, 是晚更新世晚期海水作用的结果, 时代为 Q_3^2 , 而其下的谷状地震层序为 Q_3^2 的陆相沉积层。

(2) 海平面变化 根据海平面相对于某一地面的视上升或视下降, 本区具有两个海平面相对变化的周期。在两次相对上升的海进期间, 都形成各自的海进层序。在晚更新世中期陆相沉积物构成的谷状地震层序之上, 海平面上升, 形成了晚更新世晚期的近水平状地震层序。晚更新世末到全新世中期的海平面相对上升更为明显, 它在1.5—0.6万年的9,000年中, 上升了约140m, 上升速率1.56cm/a。其结果是在大面积的原始基面上产生了海岸上超, 沉积了水平状地震层序下部的滨海相、浅海相沉积层。这些沉积层的反射面向海倾斜, 反射面的向陆方向与下伏层序成低角度的斜接。6,000年以来, 由于海平面相对静止, 在长江高输砂量的加积下, 陆源碎屑物质高速注入, 其结果形成了非海相海岸沉积, 覆盖在原生的滨海相沉积物之上的顶超现象, 而这一现象正是长江等高输砂量河口的重要特征。

(3) 长江水下河道的变迁 在嵊山列岛东北部, 有一南东向的水下古侵蚀河谷, 古侵蚀河谷相对高差超过20m, 最大水深超过60m, 河谷底部缺失了水平状地震层序和倾斜状地震层序, 只见有暗绿色硬土层及上覆的泥炭层裸露海底, 泥炭层的 C^{14} 年龄为 1.2×10^4 a, 说明了晚更新世晚期和全新世, 该处为一侵蚀河道。这一河谷作用较大, 它限制了晚更新世晚期的古长江三角洲倾斜状地震层序的南伸, 成为不可逾越的鸿沟; 同时, 现代长江三角洲的东界也在古侵蚀河谷谷底终止, 古侵蚀河谷两侧的沉积环境和沉积物明显不同。从这些结果来看, 表示了该侵蚀河道原始地形差异悬殊, 水动力作用强劲, 对沉积物、地层层序起着控制作用。

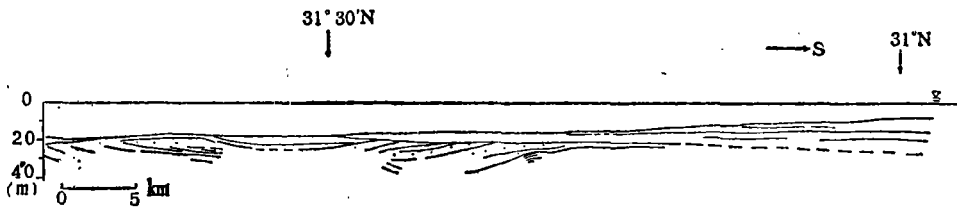


图2 B_1-B_1' 和浅层地震解释剖面

Fig. 2 B_1-B_1' section of shallow-seismic interpretation

现代长江水下河道变化明显: 在南北向的 B_1-B_1' 剖面上(图2, B_1-B_1' 剖面图), 在余山的东偏北部, 具有一大型碟状沉积层, 碟口宽60km, 在大型碟的中偏北部, 有一粉砂质、砂质的河口砂坝沉积层, 厚度较大的达12m, 宽7.5km, 向两侧逐渐变细, 这一粉砂质、砂质沉积物已被“中国近海及其沿岸大陆第四纪对比计划”的海上钻探岩心所证实^[5]。中南部具有一更大的粉砂质砂的砂坝沉积层, 最厚处18m, 宽17.5km, 形态不对称, 北部窄, 南部宽, 从中心部位向两侧变细, 因而层理逐渐明显。是一大型碟状沉积层和长江口外侧牛皮礁附近的前缘斜坡亚相宽度差不多, 因此, 是较早时期以长江北支为主的入海主流在其外部形成的结果。随着长江主泓由北支逐渐转向南支, 北支外侧供水泄砂减少, 碟状沉积层宽度也逐渐收缩。在此大型碟状沉积层之上, 又被南部大型碟状沉积层所覆盖, 这一最新的碟状沉积层中心偏南, 它正与现在长江主泓的南支

南槽延伸方向一致,因此,它是以长江南支南槽为主泄水输砂沉积的结果。

根据上述长江水下河道的变化,结合由叠瓦状组成的长江水下三角洲可以得出,晚更新世晚期的古长江水下河道在调查区东北部,现代河道则由北向南迁移,这一特点是长江位于北半球,地球由西向东旋转,河水物质具有向东南运移,致使河口逐步向南偏斜,物质不断堆积的结果。

本文的调查资料是中、美等国的许多海洋地球物理学家共同调查获得的;图2由陈庆、向正才同志初编;陈庆、华乐荪等同志提供了部分照片;本文承中国科学院学部委员刘光鼎先生审阅,并提出了宝贵的修改意见。在此一并致谢。

收稿日期 1985年1月7日

参 考 文 献

- [1] C. E. 佩顿编,牛毓荃等译,1980,地震地层学,石油工业出版社。
- [2] 秦蕴珊等,1983,东海钻探DC-1孔地质柱状岩心的研究,第二次中国海洋湖沼科学会议论文集,科学出版社。
- [3] 袁迎如,1982,地质论评,28卷1期,21—27页。
- [4] 袁迎如、陈庆,1983,海洋地质与第四纪地质,3卷3期,49—60页。
- [5] 杨光,1983,海洋地质与第四纪地质,3卷4期,82页。
- [6] David DeMaster et.,1983,Rates of Particle mixing and Sediment accumulation based on radionuclide profiles from continental shelf deposits in the East China Sea, Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea,China Ocean Press, P.581—589.

SHALLOW SEISMIC SEQUENCES IN THE SEA AREA OF YANGTZE RIVER DELTA

Yuan Yingru

(Research Party of Marine Geology, Shanghai Ministry of Geology
and Mineral Resources)

Abstract

In the past, marine shallow seismic profiles are mainly applied or interpreting sea bottom lithology, now due to the enlargement of high resolution of seismic shallow profiles and vertical proportion of time scale, profiles can be used for determining the seismic sequence and interpreting shallow strata and depositional facies.

According to the features between upper and lower bound aries of seismic sequences, uniformity of occurrence and reflecting textures of inner layers, lithology and facies of sediments, the seismic sequence can be divided into 4 types from surface to bottom:

1. Horizontal seismic sequence: Its occurrence is horizontal, thick in the west and thin in the east. The reflecting textures in layers are fine and compact, but in the lower part tend to be coarse. It is mainly composed of underwater-delta sediments of the modern Yangtze River. Occasionally shallow gas pockets are found in the sequence and there are some gravity-sliding structures in Zhoushan Islands and Hangzhou Gulf etc..

2. Tilted seismic sequence: It has distinctly tilted reflecting layers, and is not parallel with the boundaries of overlying or underlying sequences. Imbricated structures, belonging to the sediments of the ancient Yangtze River delta, are extensive while reflecting planes are sparse. Behind the weak reflecting sections there are relatively strong reflecting ones. Filled-in structures distribute in the hollows of the underlying seismic sequence. Coarse and fine reflecting textures are interbedded with each other and the forms of valley and lake are easy to see. Imbricated and filled-in structures take shape in different depositional environments and areas in the end of Late Pleistocene.

3. Subhorizontal seismic sequence: Most of the sequence are exposed at outshelves of the investigation area, characterized by subhorizontal reflection of faint laminae. There are intermittent coarse reflecting textures in the inner part of the sequence, whose sediments are offshore sands of Late Pleistocene.

4. V-shaped seismic sequence: It has a wide distribution and is characterized by

eye-shaped reflecting textures. The main reflecting textures in the upper part are relatively wide and flat. This sequence, being the earliest one among the 4 sequences formed in the middle period of Late Pleistocene.

There are two erosional planes in the study area. They are located in the upper parts of the V shaped and tilted seismic sequences respectively. In fact, they represent two unconformities. There are two cycles of the relative change of sea level in the area according to the study. After the formation of the continental V-shaped seismic sequence, sea level rose, then subhorizontal seismic sequence of the end of Late Pleistocene deposited, and the relative rise of the sea level at the end of Late Pleistocene was more great. A large horizontal seismic sequence of Holocene deposited on the primary base of the tilted seismic sequence. The data of shallow seismic sequences indicate that the action of the southeast-underwater ancient erosional valley in the northeast of Chengshan Islands is strong, and the valley blocks the south extension of the tilted seismic sequence of the ancient Yangtze River delta of Late Pleistocene. In addition, the east end of the horizontal seismic sequence of the modern Yangtze River delta also terminates at the valley. There are dish-shaped seismic sequences outside the north and south underwater channels of the modern Yangtze River as well. The south dish-shaped sedimentary layers are overlying on the north dish-shaped ones. All this indicates that the Yangtze River estuary has continuously shifted towards south.

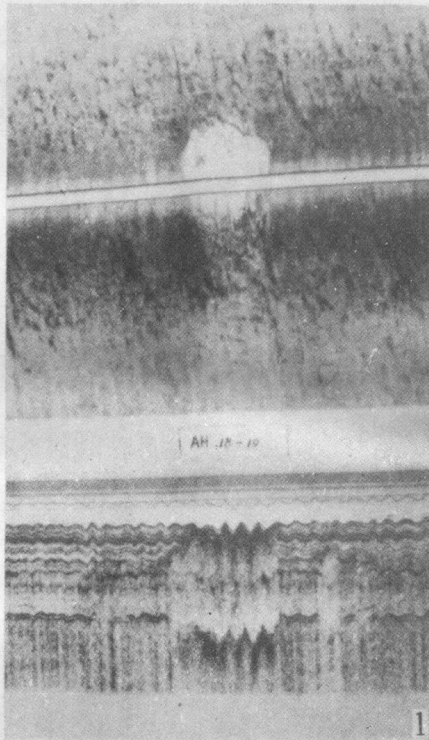
SHALLOW SEISMIC SEQUENCES, YANGTZE RIVER DELTA

袁迎如

长江三角洲海区的浅层地震层序

图版I

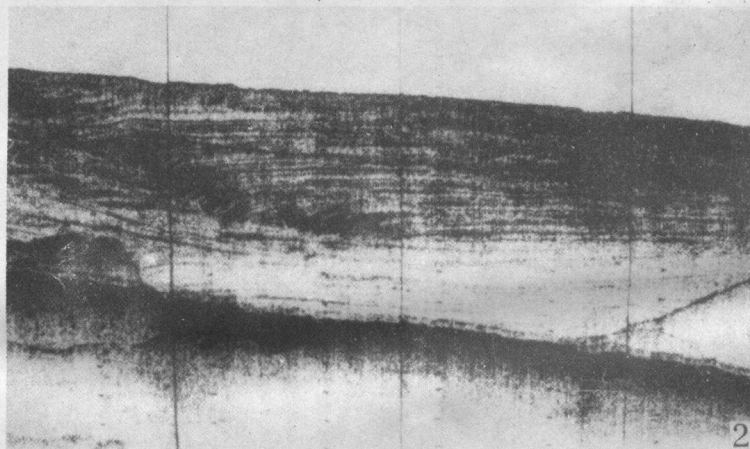
海底面
水平状地震层序



旁侧声纳扫描记录，中部近圆形的亮处为浅层气

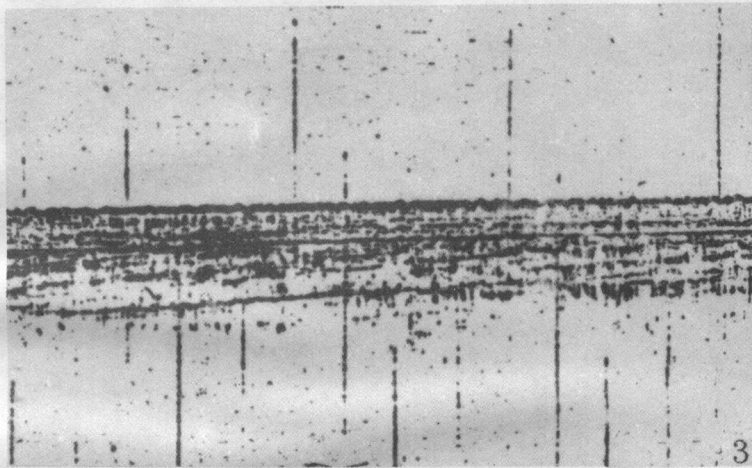
浅地层剖面记录，中部为浅层气

海底
海底面二次反射
硬土层顶面



滑坡体

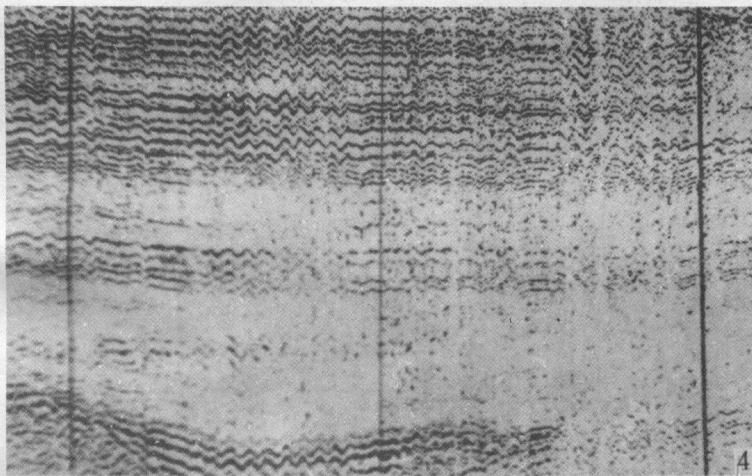
1. 浅层气囊在海底出露的情况 2. 重力滑动构造。滑坡体的左中部具有重滑断层



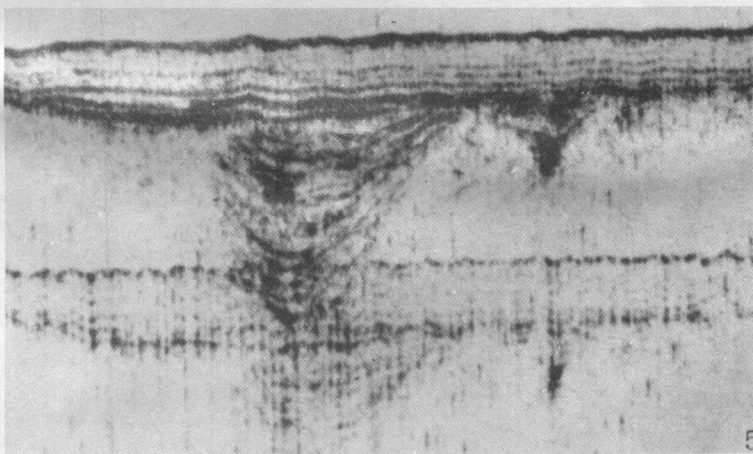
海底面

叠瓦状结构

二次反射



近水平状地震层序



二次反射

3. 叠瓦状结构。海底面与叠瓦状之间为水平状地震层序 4. 充填结构 5. 谷状地震层序。剖面中部为眼球状反射结构