

南海西部灾害性地质研究*

李 凡

(中国科学院海洋研究所)

灾害地质学 (hazard geology) 是研究对海底工程, 特别是海洋石油工程能够产生直接危害, 或具有潜在性危害的地质因素的特征及分布规律的科学。在过去几十年的海上石油开发中, 由于事先未能对灾害性地质进行详细调查而造成重大损失的事件不乏其例。1973 年 3 月, 墨西哥湾一钻井平台, 因浅层天然气喷发引起火灾, 数千万美元的仪器设备毁于一旦。1977 年南海莺歌海盆地作业的一架自升式钻井平台, 在水深 75m 处插桩时, 由于埋藏古河道的影响, 地层分布不连续, 两只桩腿插在古河岸上, 至海底以下 3m 即稳定, 另一只桩腿落入古河床, 插入 21m 尚不稳定, 致使钻井平台倾斜, 后被迫移位才免遭于害。灾害性地质问题的研究已成为海洋石油和天然气开发成败的关键问题之一, 因而引起了国内外有关部门的极大重视。1985—1987 年, 中国科学院海洋研究所受南海西部石油公司的委托, 对珠江口以西至北部湾东部的广大海域, 进行了大规模的灾害性地质、工程地质的普查及井位调查。调查中先后使用了“科学一号”科学考察船和“南海 502”、“南海 503”等工程物探及工程地质调查船, 在海上进行了七千余公里的综合性工程物探测量, 为研究调查区灾害性地质问题积累了丰富的资料。

一、仪 器 设 备

调查中使用的仪器设备及其主要性能如下:

1. 回声测深仪。主要使用西德产 ELAC721 型双频测深仪, 其发射频率为 15kHz 和 150kHz, 分辨率为 0.2m。在小部分海区使用美国 RAYTHEON 公司产 PDSS-200 型精密测深仪, 其发射频率为 200kHz, 精度为 $0.5\% \pm 1\text{in}$ 。该仪器带有声速补偿控制, 以补偿海水盐度和温度变化而引起的误差。

2. 地质脉冲剖面仪 (Geopulse), 美国 O. R. E. 公司生产。发射频率 20Hz—15kHz, 任意选择。发射功率 175—450J, 带有涌浪滤波器、时变增益 (T. V. G.) 和自动增益 (A. G. C.) 控制。可获得海底以下 100—200m 的地层记录。

3. 140 浅地层剖面仪, 美国 O. R. E. 公司生产。发射频率数百至 12kHz, 可调, 工作采用 3.5kHz。发射功率 1—10kW, 可调。脉冲长度 0.2—2ms。仪器具有 T. V. G. 和 A. G. C. 控制功能。可获得海底以下 50m 的高分辨地层记录。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1697 号。此项工作由秦蕴珊、钱守易教授领导。工作中得到南海西部石油公司大力支持和热情帮助; 唐宝珏、庄杰早、于建军、杜全胜、范守安、姜佩宗、王少智、王刚、董罗海、李长珍等同志进行海上资料采集, 蒋孟荣、高淑贤、张弘等同志清绘图件, 谨此志谢。

收稿日期: 1988 年 12 月 29 日。

4. 160B 海底旁扫声呐, 美国 O. R. E. 公司生产。发射频率为 100kHz, 波束宽度 28—55°, 可调。每侧量程 40—200m, 可调。

剖面仪、旁扫声呐等仪器在图象记录的同时, 用美国产的 3968 型磁带记录器记录, 可随时回放。

定位工作由南海西部石油公司海洋物探公司承担。主导航系统为 ARGO 定位仪, 精度 < 25m; 辅助导航系统为 SYLEDIS 定位仪, 在 80km 范围内, 精度不大于 5m。

二、灾害性地质因素的特征及其分布

广义的灾害性地质因素, 包括海底表面对石油、天然气开发工程构成危害的各种地貌因素, 和海底以下浅地层中构成危害的各种地质因素。目前对灾害性地质因素尚无统一的分类方法(在后详述), 为了叙述方便, 现就各种因素的特征及其分布规律分述如下(图 1)。

1. 海底沙丘 调查区内海底沙丘主要分布在莺歌海区崖城西南内陆架浅海区内, 分布水深 20—50m。水深小于 20m 的近岸区没有调查。北部湾测区西南端也有少量分布。海底沙丘的高度为 5—10m, 个别大于 10m。(图 2, 3) 其形态常具有一侧缓、一侧陡的明显特征。在莺歌海西北部, 陡坡倾向 NW, 在崖城西南近岸浅水区倾向 NNW, 大致上与从东南部外海传来的波向, 或折射后的海浪方向一致。沙丘表面往往带有大小不等

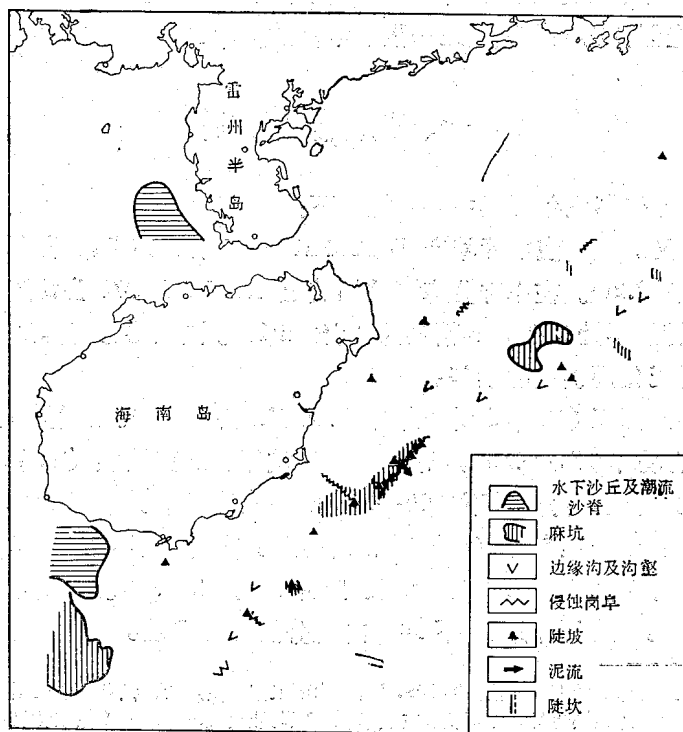


图 1A 灾害性地质因素分布图(地表区)

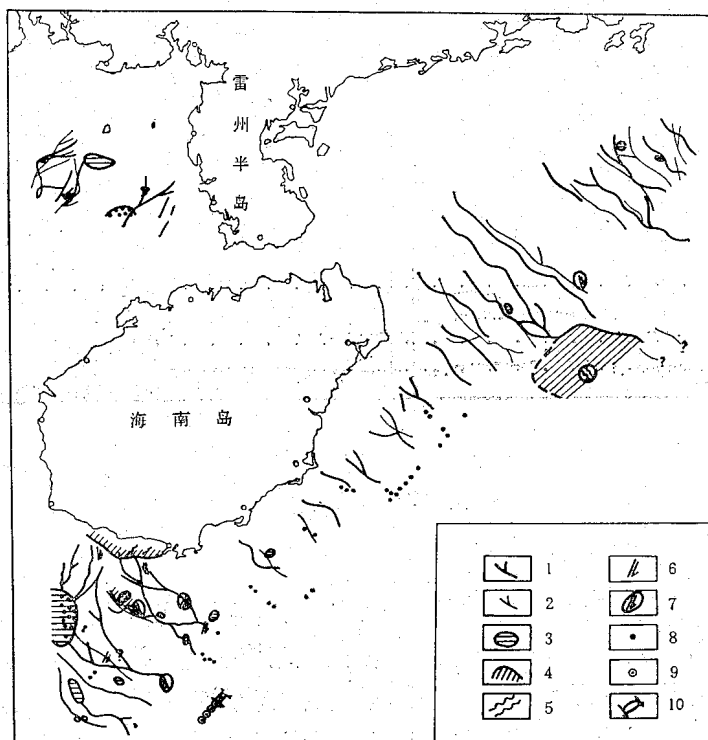


图 1B 灾害性地质因素分布图(地下区)

1. 上层 (<30m) 埋藏古河道; 2. 下层 (>30m) 埋藏古河道; 3. 埋藏古湖泊; 4. 埋藏古三角洲及古陡坡; 5. 埋藏古滑坡; 6. 滑塌断层或次表层断层; 7. 活动性断层; 8. 天然气或沼气及载气沉积层; 9. 浅层高压天然气; 10. 埋藏的地堑洼地

的波痕 (ripples), 有的沙丘一侧有明显的侵蚀陡坎。上述特征说明, 本区海底沙丘的形成与海浪作用有关, 海流在一定程度上起着改造作用。

海底沙丘的存在使海底坎坷不平, 会给海底石油工程, 特别是油气管线的铺设造成困难。与沙丘活动伴随而来的海底的强烈冲刷和淤积, 沙体的群体运动等, 则对海底工程会

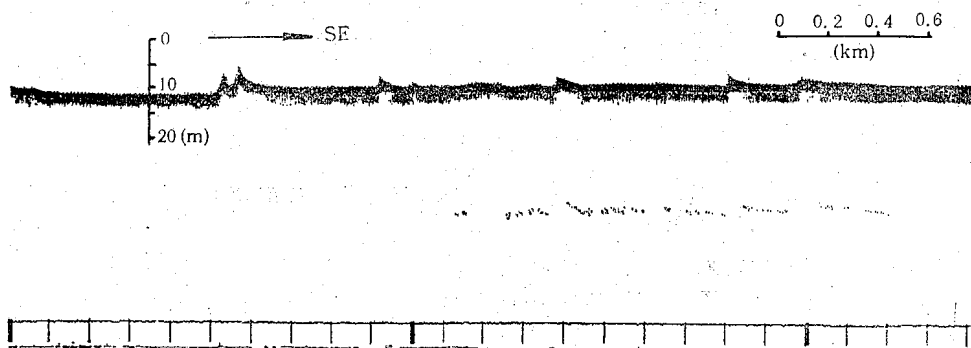


图 2 莺歌海区海底沙丘

测线 K27, 1—3 号测站, 水深 30m

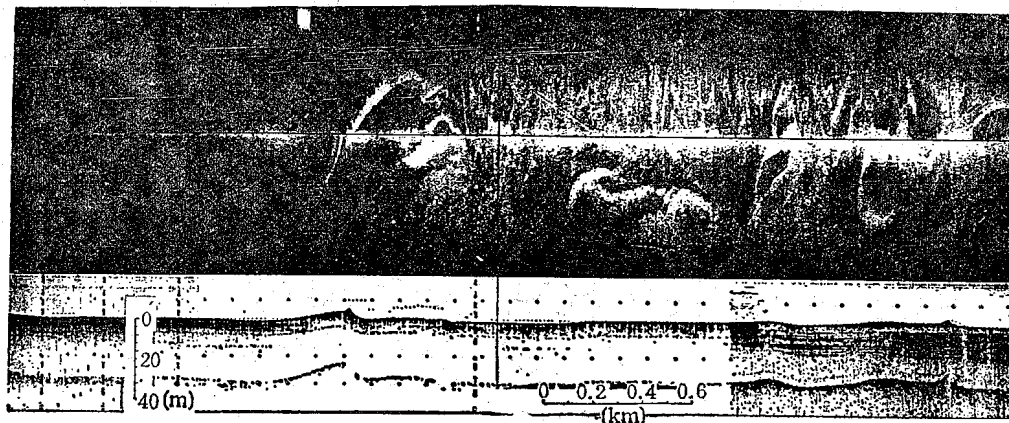


图3 莺歌海区海底沙丘

测线 Y9, 4 号测站

产生更大的威胁。

水下沙丘的活动主要受控于当地的水动力条件，特别是海浪波动引起的底部轨道速度 (orbital speed)。当轨道速度大于底部泥沙的起动流速时，泥沙便开始移动；而大于其扬动流速时，底部泥沙便开始产生跃移或悬浮，并沿着质量输送流的方向向前搬运。显然，水下沙丘的活动与当地海浪的大小及其出现机率有关。目前有多种方法计算海浪作用临界水深。本文采用美国海岸工程研究中心提出的方法 (US. Army C.E.R.C., 1975), 并

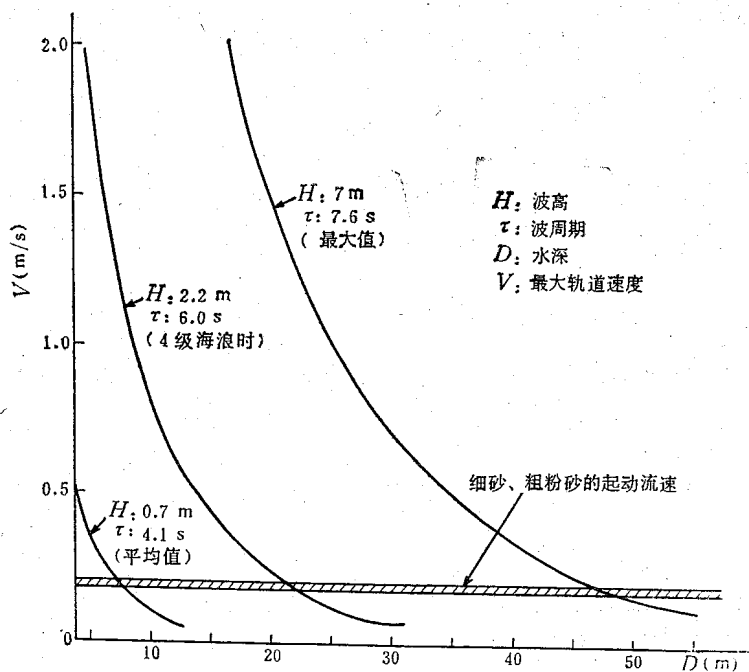


图4 1982年不同水深处因海浪引起的水分子最大轨道速度曲线

参考日本学者佐藤昭二的公式,按照莺歌海区的实测海浪资料,估算了本区海浪作用临界水深。据1982年实测最大海浪要素计算,深水波高(H_0)7m,相应的波周期(τ)7.6s;计算结果,其作用临界水深应为45m(图4)。

在这种海浪条件下,水深小于40m的海底泥沙会发生较为强烈的移动。台风期间产生的巨大波涛会使本区海底沙丘发生强烈活动。如1971年15号台风期间,有效波高 $H_{1/3}$ 为13.2m,相应的波周期 τ 为14.6s,其作用临界水深达141m;水深小于50m的海底轨道速度可达2.75m/s,足以使这里的水下沙丘象内陆的沙漠那样“飞沙走石”,强烈运动。这对海底工程将有巨大的破坏作用。

当然,上述情况仅是极端的例子。根据计算,本区内, ≥ 4 级海浪的作用临界水深为22m,如果单纯从海浪考虑,据海浪要素分布频率资料分析,在水深小于22m的浅水区内,海底沙丘移动的几率 $\leq 3.6\%$,在水深45m的海底则降至 $\leq 0.06\%$ 。如果加上潮流的作用,活动机率将发生变化,因缺实测资料,尚难准确估计。

应当指出,确定海浪沙丘的移动方向,对海底工程来说是非常重要的。实际上,海底沙丘的移动方向主要取决于大浪的波向。调查区内海底沙丘的活动及其与海浪作用之间的关系,尚未进行详细调查。概言之,最大的灾害性海浪主要为台风浪,其次为寒潮浪。同时,各分潮的长轴基本上是NW-SE,而且,最大潮流流向是NW向的较强,SE向的稍弱。这些因素都有利于莺歌海区的水下沙丘向西北方向和近岸方向移动。

2. 潮流沙脊 其主要分布在北部湾调查区的东南侧,即乌石港西部近岸浅水区,它们是琼州海峡“西口三角洲”(金波等,1982)的一部分。三角洲上的潮流沙脊群,脊、槽相间,呈指状延伸,长度为30—70km,相对高度最大可达25m。在调查区内所见之潮流沙脊为该沙脊群的北支。它们由东南向西北延伸,长约50km,东南端宽度约0.3km,西北端增宽至1km;脊背最小水深11m,相邻槽沟内的水深急增至28m。沙脊偏北坡缓,偏南坡陡,后者为海峡涨落潮流的主要通道之一。这里水流湍急,海峡内底层流速大于4kn,至调查区东侧仍有1kn左右,超过了该区沉积物(粗、中沙)的起动临界流速,所以,目前沙脊仍在继续向西北和偏西方向移动。此外,海浪作用对沙脊的活动也有一定影响。

潮流沙脊所形成的强烈对照性地形,给海底石油工程造成了巨大的障碍,而且,潮流沙脊的移动和伴随而来的海底侵蚀与淤积,对油气管线和海底建筑物的稳定性等,都有相当大的威胁。

3. 麻坑 (pockmarks) 麻坑成群地大面积分布,是调查区内海底最为奇特的地貌类型之一,在中国海域是首次发现。它们主要分布在莺歌海调查区的西南部、东南部和海南岛东部陆架区。分布水深的变幅很大,无明显规律。麻坑的规模各地不同。海南岛东部陆架区内的麻坑,数量少,规模小;在莺歌海区则数量多,尺度大。其外形多为圆形或椭圆形,直径10—15m,坑深1—3m(图5)。

本区麻坑的成因目前尚不太清楚。其外形特征类似于墨西哥湾、里海等地的海底泥火山的火山口(cracter),但尺度较小。其大小与爱琴海海底的麻坑群相当(Newton et al., 1980)。据报道,麻坑的成因常与超量的孔隙水(porewater)或浅层气的喷出有关。前者的形成条件往往是,在未固结的松散沉积物层的下面有一个较为致密的粘土质隔水层,同时地形上具有一定的坡度。所谓浅层气,可能是次表层(subsurface, 如20m以内)或

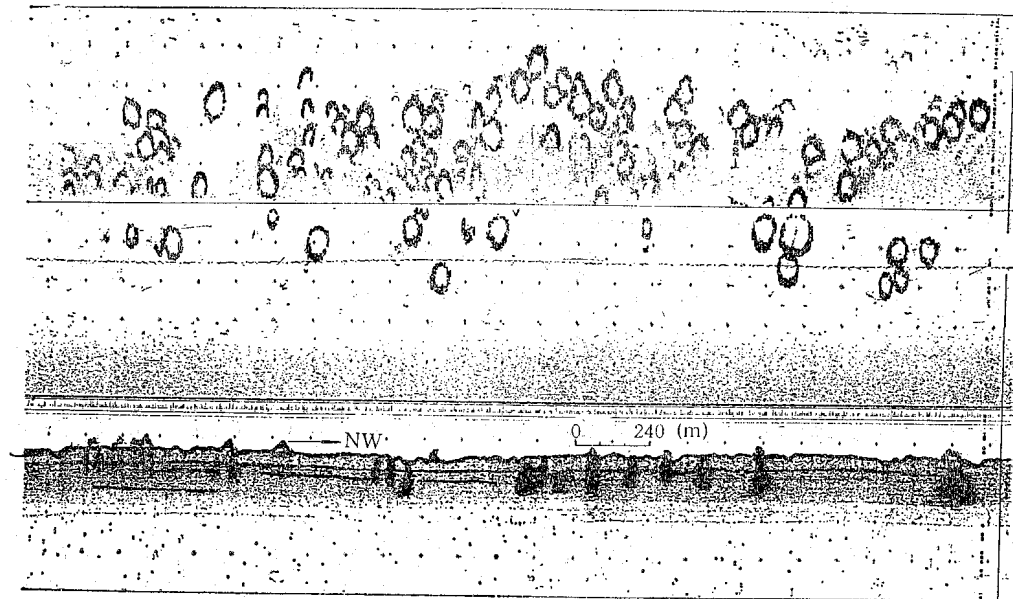


图5 麻坑

测线 Y6, 10 号测站, 水深 100m

较深层的高压气体。此外,麻坑也可能起因于某些泥炭层分解的沼气的外溢,如在白令海等海区。

墨西哥湾、里海、爱琴海等地油、气田内广泛发育有泥火山、麻坑等地貌类型,说明它们有时可与油田或气田伴生。所以,麻坑,特别是规模较大、数量较多的麻坑群的出现,有可能作为油、气资源,或灾害性浅层高压气勘测的地貌标志之一。莺歌海区的麻坑群分布于莺歌海气田的西北部,从声学浅地层记录中发现,海底以下 100 m 以内的地层结构中,少数地段偶见气囊 (gas pockets); 但从整个调查区观察,麻坑的出现区内,在海底以下不同深度的地层中,往往见有载气沉积物 (gassy sediments)。由此推测,该区麻坑的形成,与地下具有一定压力的天然气或沼气的喷发,特别是早期天然气的喷发有关。这种情况,从当地人民所反映的“数十年来这片海区就漂浮油花”中也可得到证实。此外,从地层结构来看,莺歌海区海底以下 1—3m 处,普遍发育一层更新世晚期的黄色硬粘土层,质地致密,透水性极差。调查区地势从陆向海倾斜,特别在水深 50m 和 100m 附近的地区,坡度增大,具备了超量孔隙水外溢的条件;由此推测,那里麻坑的形成可能与超量孔隙水的外溢有关。

从灾害地质的观点看,麻坑的存在无疑对海底石油工程十分不利。不但成群的麻坑使得海底坑洼不平,给施工,特别是油气管线的敷设带来麻烦,坑洼所引起的海底局部涡流侵蚀也威胁着油气管线的稳定;而且,麻坑下面地层的载气沉积物减弱了地基的强度,浅层气的喷发更直接威胁油田的安全。因此,对麻坑分布地区作详细的地质地球物理调查,搞清麻坑的成因是十分必要的。

4. 海底陡坡

从灾害地质的观点看,海底陡坡一般包括海底陡坎 (scarp) 和坡度

较大的斜坡。陡坎对海底工程的影响是不言而喻的。斜坡对平台或管线的危害常常与斜坡有关。Edward 等人对加利福尼亚外陆架边缘的调查表明,对于正常固结度、中等灵敏度的泥质沉积物来说,在海底坡度小于 4° 的斜坡上,可以发生大量的沉积物体的滑动。(Edwards et al., 1980) Lewis 认为,在坡度为 $1-4^\circ$ 的开阔的水下斜坡上便能发生地层的滑塌 (slump) (Lewis, 1971); 而在三角洲沉积环境下,由于沉积物的抗剪强度小,在 $<0.01^\circ$ 的海底斜坡上,也可以产生滑塌地层 (Prior and Coleman, 1977)。从莺歌海测区 Y11 测线上的埋藏古滑坡分析,其滑动面的坡度为 $8-10\%$, 约 $28-36'$ 。调查区内坡度 $\geq 40'$ 的海底斜坡在不少测线上都有发现(表 1, 图 6)。表 1 中所列各地段的坡度不少都大于 1° , 绝大部分都大于 $40'$ 。K11 测线上第 30—40 测点位于最后一期低海面时期的河口三角洲上,其前缘坡度为 $25'$, 远大于上述三角洲沉积环境下产生滑塌地层的坡度。因此,单纯从坡度考虑,表中所列地段都是值得注意的危险地段; 若加上地震或海浪荷载的作用,产生滑坡的可能性是很大的。

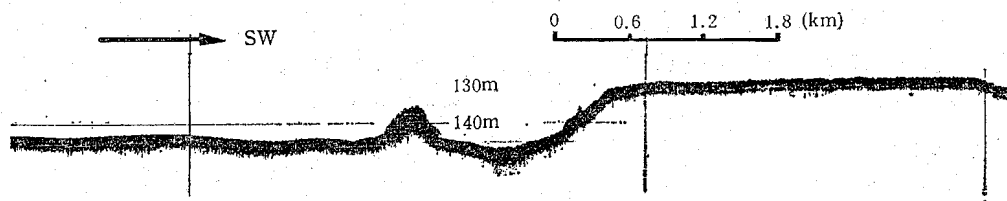


图 6 海底陡坡
测线 L2, 88号测站

表 1 南海西部部分测线上海底坡度

测线号	测点号	平均坡度	地形	测线号	测点号	平均坡度	地形
K11	39—40	$18^\circ 26'$	边缘沟	K24	3	$0^\circ 30'$	边缘沟
	40	$0^\circ 25'$	三角洲前缘斜坡		9	$1^\circ 12'$	边缘沟
K13	1—2	$0^\circ 55'$	斜坡	L2	81—82	$1^\circ 28'$	斜坡
	24—25	$1^\circ 51'$	边缘沟		84—85	$1^\circ 42'$	斜坡
K17	17—18	$1^\circ 40'$	斜坡		87—88	$1^\circ 19'$	斜坡
	19	$6^\circ 40'$	陡坡		160—161	$1^\circ 32'$	斜坡
K19	0—1	$0^\circ 51'$	斜坡		3—4		陡坎
	1—2	$0^\circ 36'$	斜坡				
	5	$3^\circ 52'$	边缘沟				
K20	4—5	$0^\circ 58'$	斜坡				

应当指出,滑坡的产生除了坡度因素以外,也与土层特性有关。根据 Henkel 公式,土体的临界稳定坡度 β , 是土层的不排水抗剪强度 (S_u) 及浮容重 (r') 的函数, 即:

$$\frac{Su}{r'Z} = \frac{1}{2} \sin \beta$$

式中 Z 为滑动面在土层中的深度。当 β 很小时, 该式可简化为:

$$\frac{Su}{r'Z} = \beta$$

不难看出, 若底层土的抗剪强度小, 浮容重大, 则土层的临界稳定坡度小。因此, 若在上述海区进行工程建设, 尚需对其土层的性质进行详细调查。

顺便指出, 调查区内 130—140m 水深附近海底常有大量的陡坎、陡坡, 断续地沿等深线走向分布。它们可能是沉溺的低海面时期的海岸阶地, 与东海晚更新世末期的 130—140m 水下阶地, 台湾浅滩附近 140—150m 水下阶地, 日本海若狭湾 120—140m 水下阶地等相当。

5. 边缘沟 边缘沟指分布在大陆架边缘的沟谷, 宽多为 200—400m, 深度一般不大于 20m, 它们往往沿大陆坡脊的走向延伸。从灾害地质的观点看, 边缘沟的存在破坏了海底地形的连续性, 使油气管线的敷设和维护增加了很大困难。其次, 边缘沟坡度陡峻, 例如, 测线 K7 上之第 39—40 测点, 测线 K18 之 9—10 测点, 其沟坡均大于 5° , 极易产生滑塌。有时, 滑塌地层充填于沟中, 构成软弱地层, 也会给海底工程造成危害。

边缘沟的成因目前尚不清楚, 某些边缘沟的形成可能与断层有关。例如测线 K11 第 39 测点之边缘沟即发育在断层之上(图 7)。从图上可以看出, 边缘沟之下有一个明显的断层。该断层贯穿第四纪沉积层, 并且深入上新世地层中。不难推测, 这个断层至少是在更新世期间形成的, 因而可视为活动性断层。这种活动性断层对海底工程来说是非常危

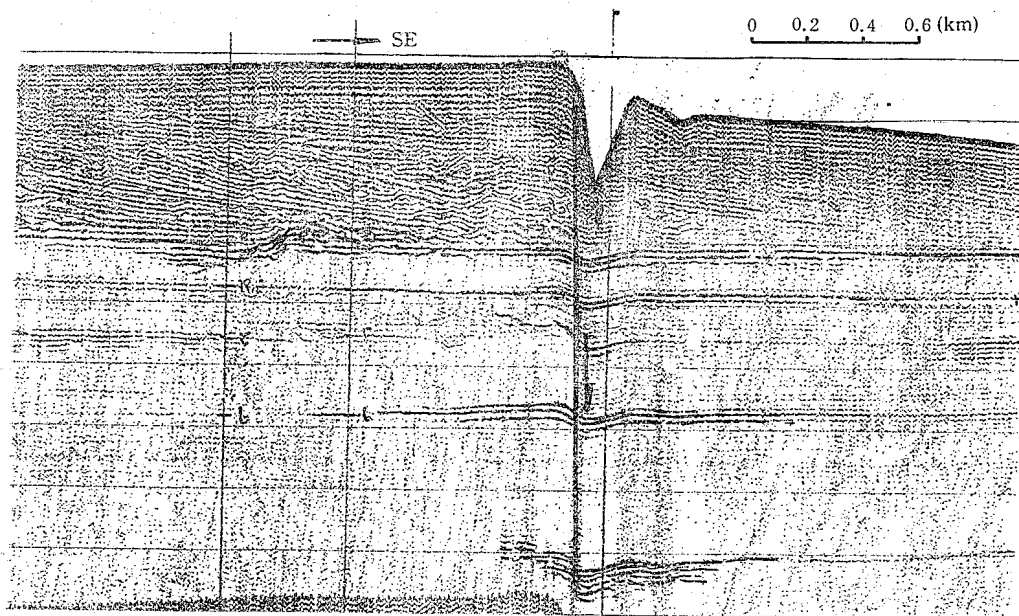


图 7 边缘沟

测线 K11, 39 号测站, 水深 135m

险的。由于边缘沟有时发育在断层线上,所以边缘沟也可以作为寻找活动性断层或次表层断层的线索,应引起注意。

此外,某些边缘沟的形成,推测也可能与大陆架边缘等深流的侵蚀有关。

6. 泥流 (mud flow) 实际上是一种表层沉积物的群体运动,在某种程度上相当于浊流。

调查区内,泥流仅在测线 L2 之第88号测点附近发育(图 8)。其他海区尚未发现。从图上可以看出,第 88 号测点附近有一宽阔的沟形洼地,宽约 1km,深约 7m,沟内表层沉积物为软泥类细粒沉积物。在旁扫声纳记录谱上,记录了明显的流痕。从浅地层剖面记录谱上发现,海底以下并未出现扰动层,由此推测,泥流的厚度不大于 1m,其影响仅限于表层。从泥流的床面形态特征分析,泥流流向东南,与该地海底的总体倾斜方向一致。这里海底平均坡度为 $27'$,局部地段略有增加,有利于泥流的发育。

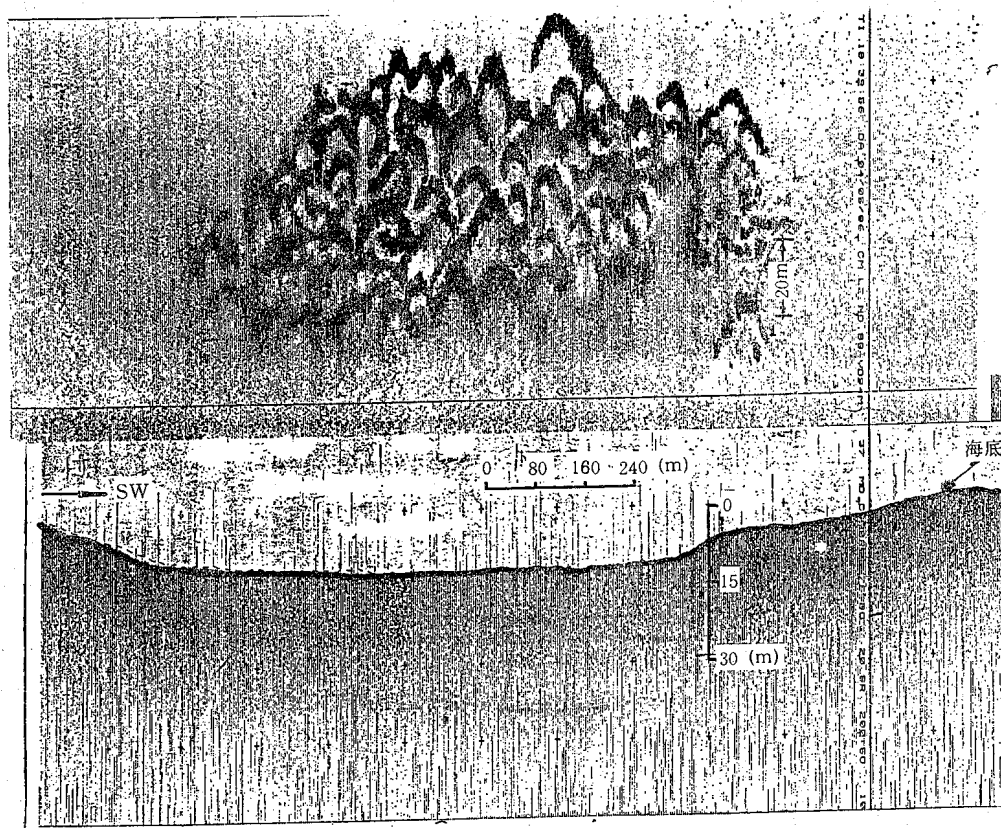


图 8 泥流

测线 L2, 88 号测站, 水深 131m

在 Carpenter 对大西洋外陆架的调查,及 Hunt 石油公司对密西西比河三角洲的调查,皆有关于活动性泥流的报道 (Trabant, 1984), 认为泥流对海洋石油工程具有很大的危险。调查区内泥流的规模、特征、活动性等问题目前尚不清楚,需要进一步观测。

7. 岗阜地形 调查区内不少测线上见有大小不等的岗阜,构成了崎岖不平的地形,

有些相对高差达十几米。其中有些地段呈现强烈的海底侵蚀作用。在该处, 3.5kHz 浅地层记录谱上见有下伏的老地层出露于海底的明显现象, 构成了大小不等的侵蚀残丘, 或平坦, 或陡峭, 形态多样。在旁扫声纳记录谱上可以看出, 由于差异性侵蚀, 老地层出露处呈现出线理状露头 (lineations outcrop), 其中也杂以沙、砾组成的沙波、流痕等沉积床面形态, 构成一种奇特的海底侵蚀景观。(图 9)

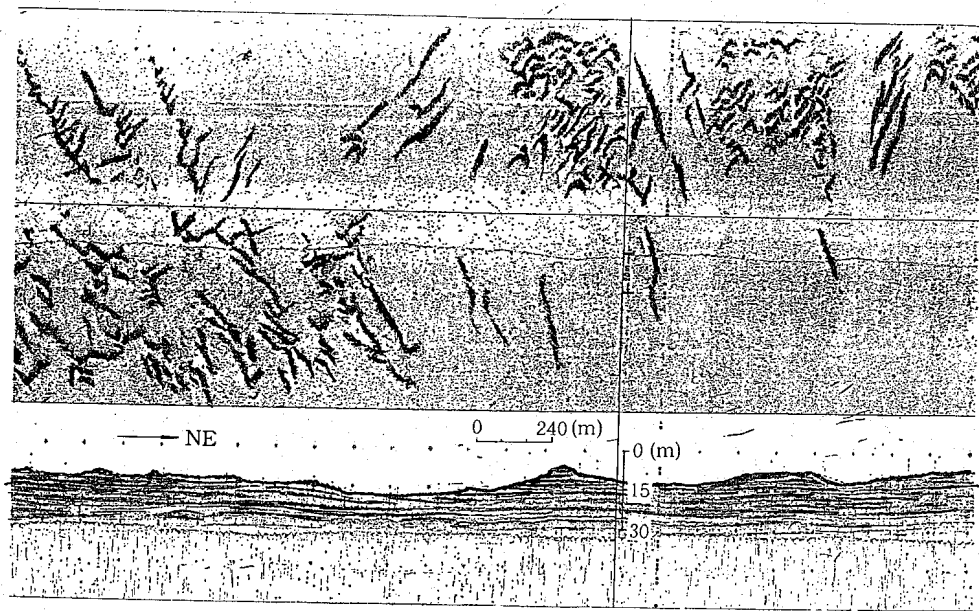


图 9 侵蚀残丘及线理状露头
测线 L1, 77—78 号测站, 水深 103m

海底侵蚀区主要分布在崖城东南外陆架和大陆坡的上部, 琼海东南外陆架边缘等海区。在莺歌海测区内, 主要分布在西北部内陆架海底侵蚀平原区, 那里有粗沙、砾石及海底沙丘分布。更新世末低海面时期之埋藏古河道直接出露于海底。此外, 在文昌测区的老水下三角洲前缘的某些测站上, 也发现海底侵蚀现象。

岗阜地形的凹凸不平, 对海底油气管线的敷设、平台建设等都能造成很大障碍, 而海底侵蚀, 以及伴随而来的沉积物的群体运动, 更增加了这些工程的危险性。

8. 埋藏古河道 晚更新世的玉木冰期, 世界海平面普遍下降, 本区下降最大幅度为 130—140m。现在水深小于 130—140m 的陆架区, 海水退出, 裸露成陆, 其上发育有各种规模的河道和湖泊。全新世以来, 随着海平面的大幅度上升, 早期的河道纷纷沦入海底, 并且绝大部分被埋藏于不同厚度的沉积物层之下。这种埋藏古河道, 在世界各陆架海底都有大量发现, 中国陆架海底也相继有所报道(秦蕴珊等, 1986; 李凡等, 1990)。

河流沉积环境的基本特征是水动力条件能量高, 变化大。从而决定了河流充填沉积物的复杂性和多变性, 即其粒度组分、分选程度、密度、剪切力等一系列物理物质和力学性质, 在几米或几十米的水平距离内可能发生很大变化, 因而对石油平台工程十分不利。

埋藏古河道是调查区内出现最多的灾害性地质因素。由于古河流的特征不同, 测线

与河流相交的角度不同,在高分辨率地质脉冲剖面仪的记录谱上,出现了各种不同的断面特征,可概括分为三类:

(1) 对称型埋藏古河道断面,河道两岸坡度基本相同,呈对称状。它们是顺直河或曲流河之顺直段的特征。本区所见之对称型埋藏古河道数量较少,规模较小,其宽度一般为1km左右。(图10)

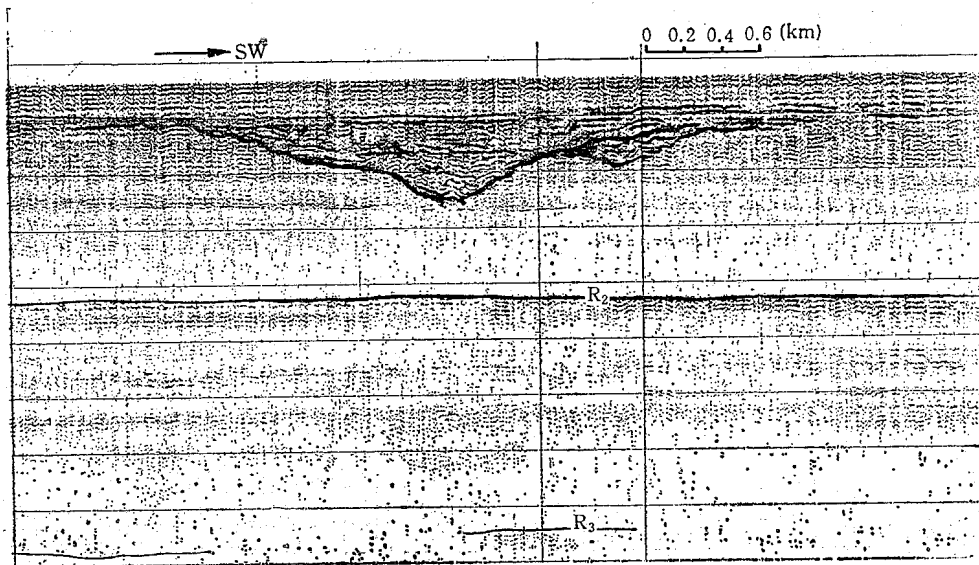


图10 对称型埋藏古河道断面
测线 Y10,-3 号测站(大站),水深 90m

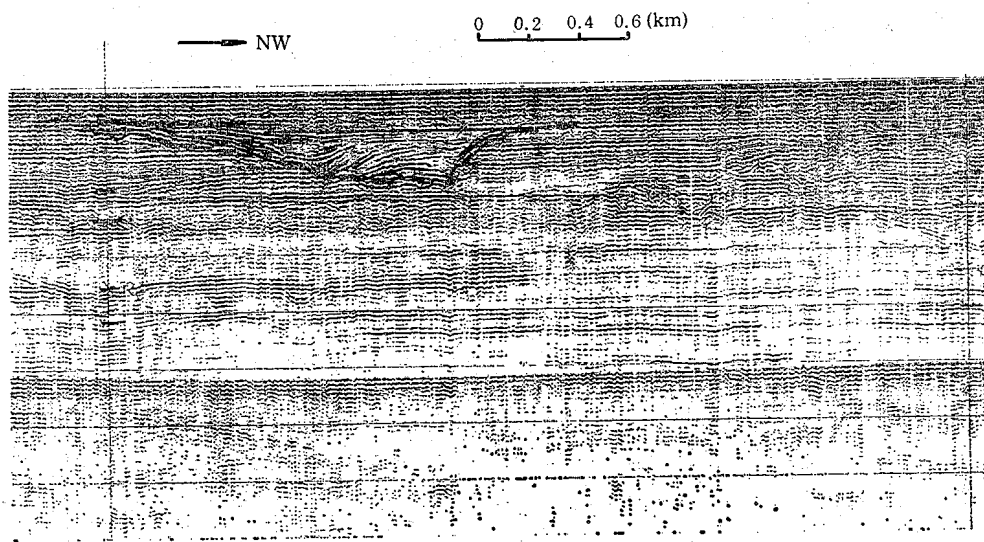


图11 不对称型埋藏古河道断面
测线 K6,33 号测站,水深 80m

(2) 不对称型埋藏古河道断面, 河道两岸一侧陡, 一侧缓, 呈不对称状。与现代河流的断面相同, 陡岸为侵蚀岸, 缓岸为堆积岸。此种河道断面是曲流河的典型断面特征, 在调查区内大量发现, 规模大小不等, 宽度可达数公里。(图 11)

(3) 双层(或多层)埋藏古河道断面, 系指同一地层中, 相同位置的记录谱上有上、下两层或数层埋藏古河道断面(图 12)。上、下层河道断面之间常有一个强的反射界面, 反

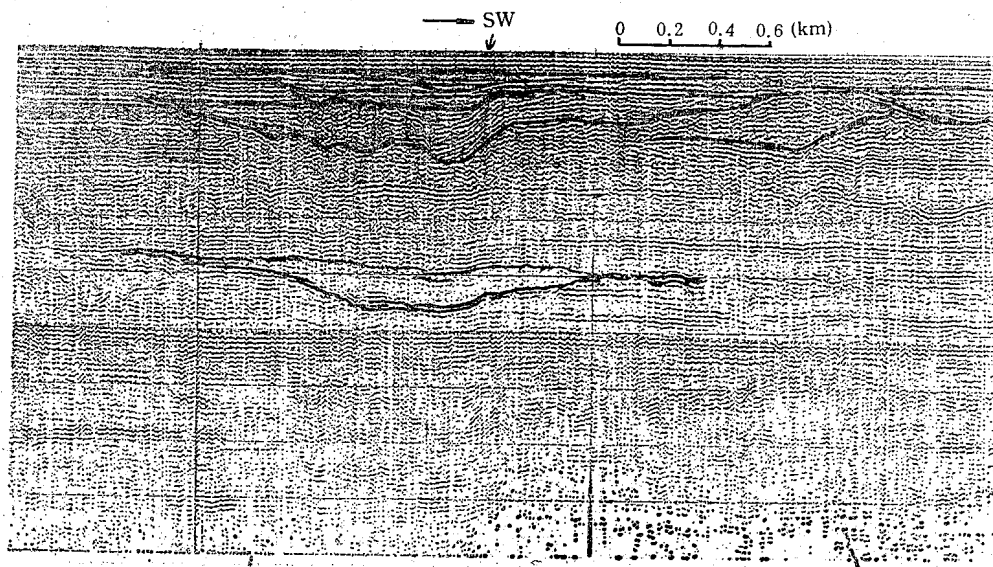


图 12 双层或多层埋藏古河道断面
测线 L2,11 号测站

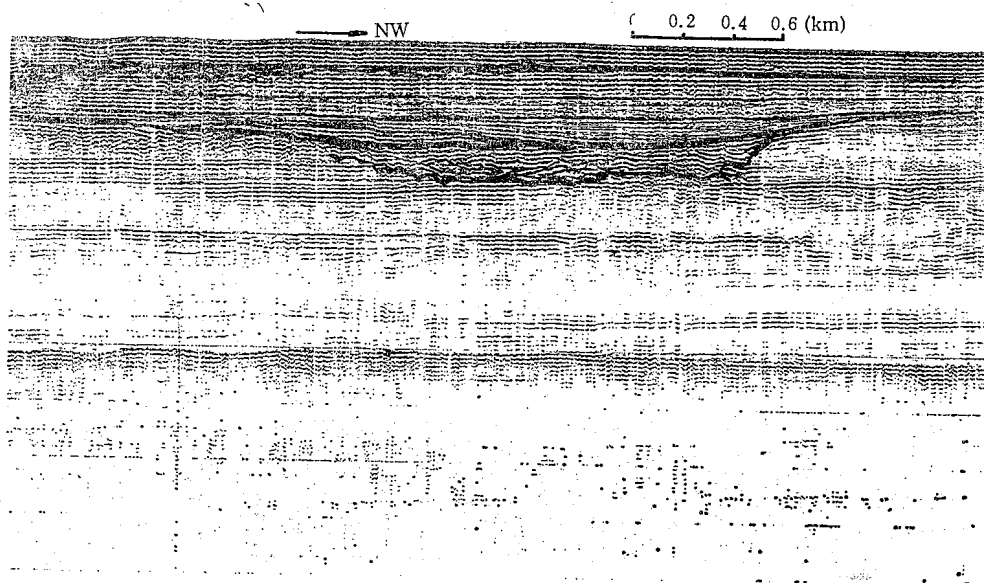


图 13 河-湖-海沉积层序
测线 K6,28 号测站,水深 80m

映了其间存在着一个沉积间断。显然,这是在河流发育过程中河曲摆动形成的。饶有趣味的是,在一些断面中,下层发育有明显的对称或不对称河流断面,充填沉积物之构造也有河流相沉积之特点;但是,在上部则变为宽阔平缓的碟形洼地,充填沉积物之构造具有明显的湖相沉积之特征(在后详述);再上部,则覆盖着全新世之海相沉积物。(图 13)这样一套沉积层序,反映了河流由壮年期发育至老年期的过程。其间、河曲、牛轭湖发育;而后,受海侵影响,河流排水不畅,积水成湖;然后,海侵相继而至,因而构成了一套完整的海侵层序。这种情况在黄海等海区内也有发现(秦蕴珊等, 1986)。它们也反映了全新世以来,世界大洋海平面上升的过程。但是,从灾害性地质的观点分析,不论是壮年期河流还是老年期河流,其充填沉积物之物理、力学性质皆有多变性或软弱性的特点,因而对海底工程的地基或基础都是不利的。

此外,在高分辨率的地质脉冲记录中,发现在某些测线上,海底以下 50m 左右的下部地层也发育有大型的埋藏古河道(图 14),宽数公里至十几公里,最大深度可达 20—30m。从剖面结构分析,这是一个大型的河谷,而不是一个单一的河流断面。在这些河谷内,河流断面发育,沉积构造复杂,地层连续性很差,沉积物的物理、力学性质多变。根据调查区内已建石油平台的情况,其插桩深度一般为 60—70m,与这一古河谷充填沉积层的埋藏深度相当,显然对平台的建设是十分不利的。

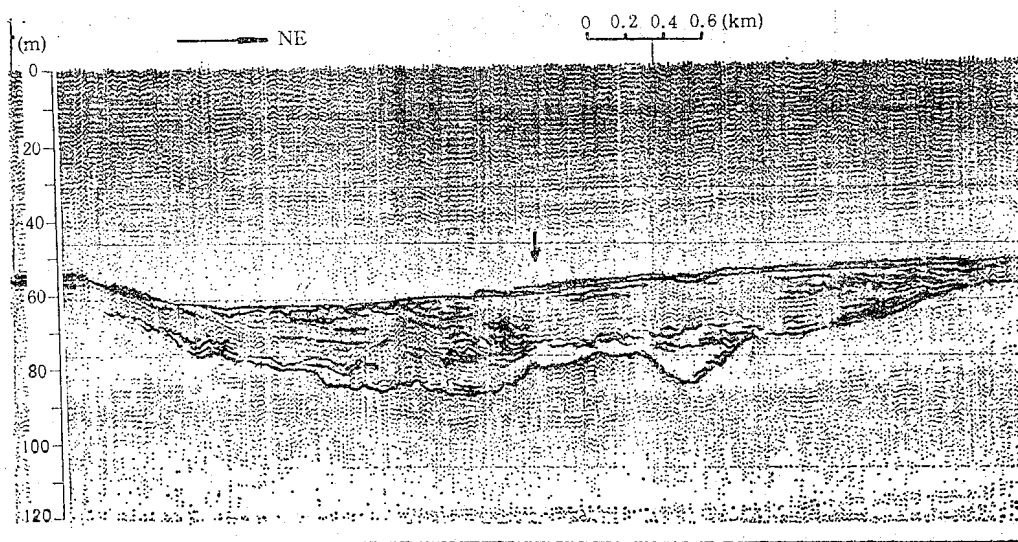


图 14 下层之大型埋藏古河谷

测线 11,9 号测站,水深 90m

根据调查区内埋藏古河道出现的位置及其河道断面特征,可以大致推测出古河流的流向及古水系的分布轮廓。当然,由于测线的密度较小,这些推测尚需新资料的不断补充和修正。

从灾害性地质的观点出发,根据埋藏古河道所影响的客体的不同,大致以 30m 为界,将其分为上、下两层。上层为海底以下 30m 之内的古水系,主要对钻井船的施工及油气

管线的敷设有所影响;下层为海底 30m 以下地层中的古水系, 主要对平台的安全有威胁。从历史地理学的角度来看, 这样划分的缺点是往往把不同时代的古河流划为一层。然而, 在漫长的地质历史过程中, 河流发育往往有明显的继承性, 即后期的河道往往在先期河流的流域内行水, 除了发生少数重大地质历史变化, 或河流袭夺引起河流流向的重大变化外, 其区域性变化一般不太大。并且, 上述划分旨在标明作为灾害性地质因素的古河道的空间分布, 因而是可行的。

根据上述观点, 将本区之上、下两层古水系分别绘于图 15。

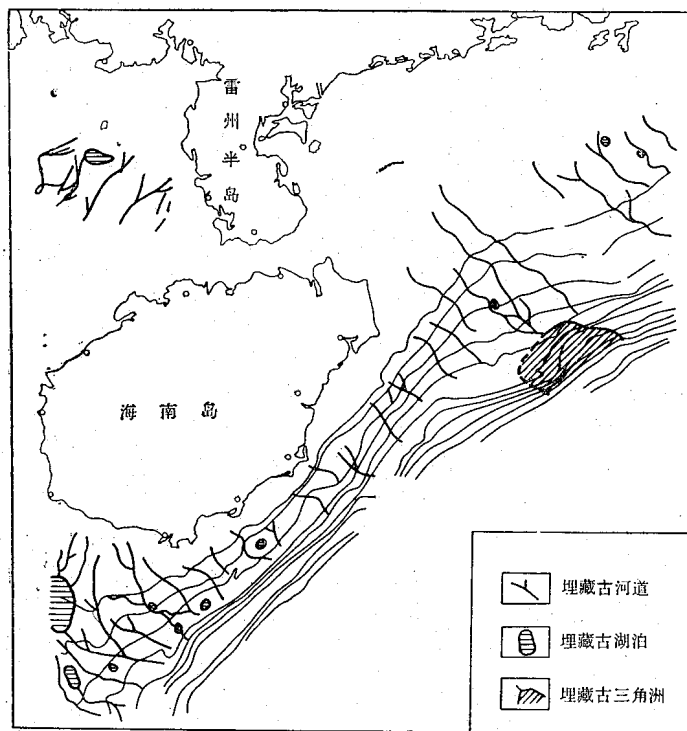


图 15 埋藏古河系分布略图

由图 15 可明显看出, 北部湾测区内古河流多是由东北流向西南; 莺歌海测区内, 崖城西南一部分古河流向西南流入南部之古湖泊(为叙述方便, 暂称“莺南一号古湖”), 其余则向东南方向流向古南海。

本区之古河流, 由于河曲发育, 河畔常见有牛軛湖类的积水洼地。海南岛以东之广大陆架区, 古河流基本是由西北向东南流入古南海。调查区内古河流的流向, 总体上是与陆地的倾斜方向一致的。

调查表明, 水深 110—120m 附近的海底有较多断面特征明显的埋藏古河道(图 16), 从古水系的分布图中发现, 埋藏古河道的终点水深多为 120m 左右, 加上埋藏深度为 125—127m, 最大终点水深为 135m 左右。此外, 在 130—150m 等深线附近, 发现有形态及地层结构明显的埋藏古三角洲。130—150m 水深海底附近, 见有类似海岸阶地的陡坎及超覆地层等; 由此推测, 更新世末期最低海面的位置大约在现在的 130—140m 等深线

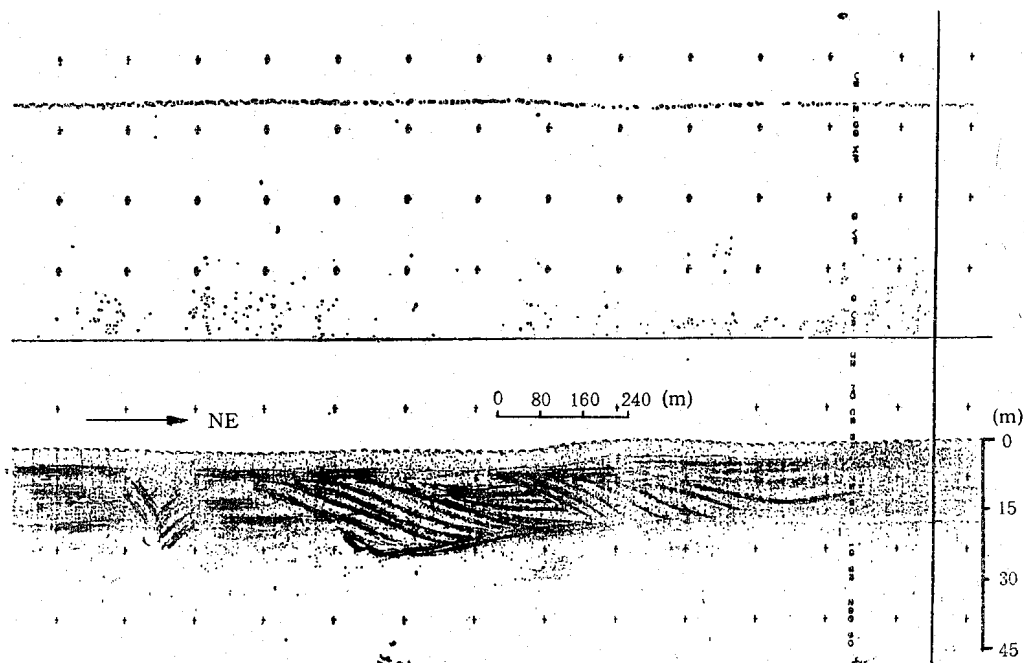


图 16 120m 水深处的埋藏古河道断面
测线 L1,6 号测站,水深 120m

附近,比以前文献所报道的 100m 水深略低些。

古河道切割充填沉积物之物理、力学性质具有多变之特征,对海底工程具有一定的危害性;然而,河流相沉积又有“线形”分布的特点,只要采取回避措施,就可以免遭损失。

9. 埋藏古湖泊 在高分辨率地质脉冲记录谱上表现为一种碟形洼地,其充填沉积物具有平行或亚平行反射结构,反射能量一般较弱,说明基本上是软泥等细粒沉积物,也可能具有粉砂等细粒夹层。埋藏古湖泊在北部湾、莺歌海和海南岛以东各调查区内均有出现,其中以莺歌海测区 K29 测线第 38—39 测点附近的“莺南一号古湖”规模最大。(图

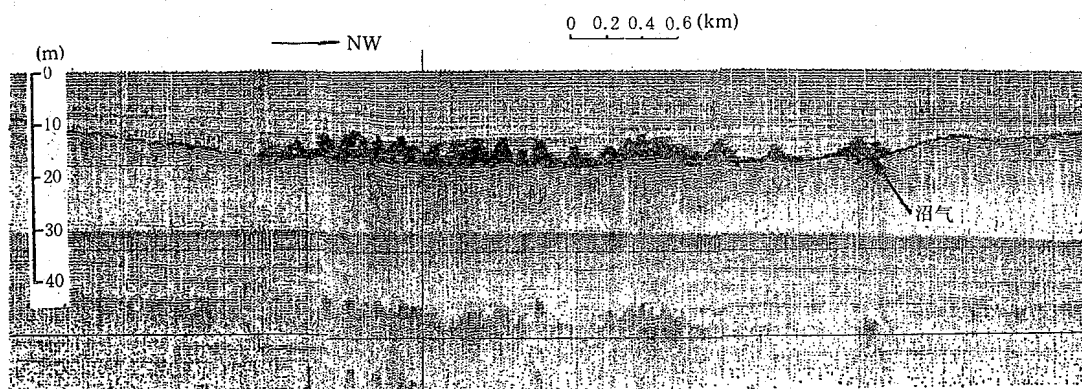


图 17 埋藏古湖泊,底部有大量沼气
测线 K29,39 号测站,水深 70m

17)由于测区面积的限制,其平面形态尚未查明;仅在测区内,湖宽可达 30km 以上,最大深度约 25m;估计当时的面积不小于 400km²。古湖泊的埋藏深度为 5—10m。湖盆底部见有较多的天然气,可能是生物分解的沼气构成载气沉积。沼气外溢可在海底表面产生麻坑。古湖泊充填沉积物由于含水量大、承载力小,特别是空隙中充满沼气,抗剪强度大大减小,会给石油工程带来一定危害。

10. 埋藏古三角洲 调查区内发现的埋藏古三角洲沉积体,以文昌测区内的外陆架和莺歌海测区崖城以南的内陆架外侧较为典型。文昌测区埋藏古三角洲面积约 5000km²,埋藏深度 3—10m。莺歌海区埋藏古三角洲见图 18。典型的三角洲沉积体呈“三元结构”,特别是中间由复杂的斜层系组成的前积层最引人注目。三角洲沉积体内,由于坡度大,沉积速度快,常出现浊流、滑坡等沉积物群体运动,破坏了沉积物的结构、减少了土层的抗剪强度及承载能力。同时,由于三角洲前缘区坡度较大,如前所述 K₁₁ 测线第 30—40 测点之文昌埋藏古三角洲,其前缘坡度为 25',远大于三角洲沉积环境下产生滑塌的临界坡度,因而在地震和大浪荷载作用下,有可能产生新的滑坡。显然,上述情况对海底工程的安全具有较大的潜在威胁。

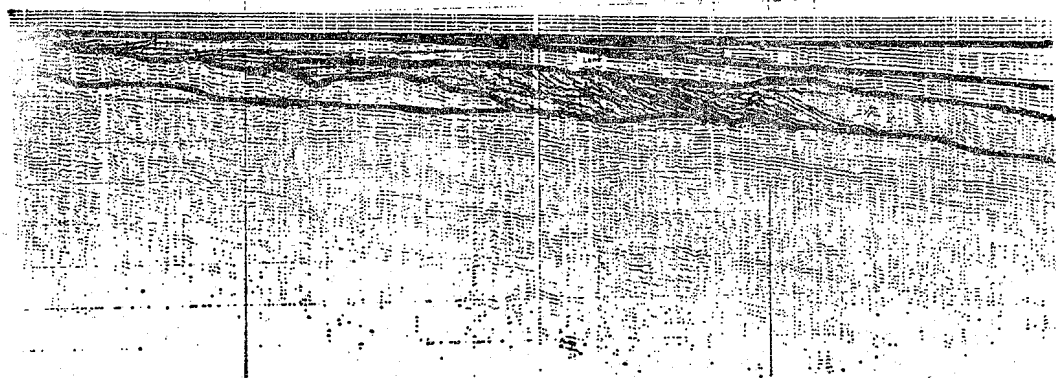


图 18 莺歌海区埋藏古三角洲,局部有滑塌现象

11. 浅层天然气 是危险性最大的灾害性地质因素之一,特别是 500—1000m 地层内的浅层高压天然气,危害性最大。

由于缺少调查区的地震资料,只能根据高分辨率声学地质脉冲记录,对海底之下 100 m 以内地层中的天然气或沼气进行分析,更深地层中的情况有待今后调查。

海底天然气在记录谱上表现为强反射和侧向的突然变化。一部分天然气喷出地表形成气苗,同时冲破上覆之沉积物盖层形成麻坑(图 19)。一部分则聚集在海底以下不同深度,形成顶部呈半圆形的气囊(图 20)。从图 20 分析,此处之天然气位于海底之下至少 150m。这里恰是海南岛南部大陆坡的上部,海底坡度较大;可能受新构造运动的影响,底部的高压天然气不断外溢,所以这里是危险区。在 L5 测线第 28 测点上,天然气富集于海底以下不深的位置,构成所谓“战舰式”地层信号(battleship formation)(图 21),形成局部载气沉积层。在另一些测线上,例如 L2 测线第 80—100 测点, K27 测线第 42—46

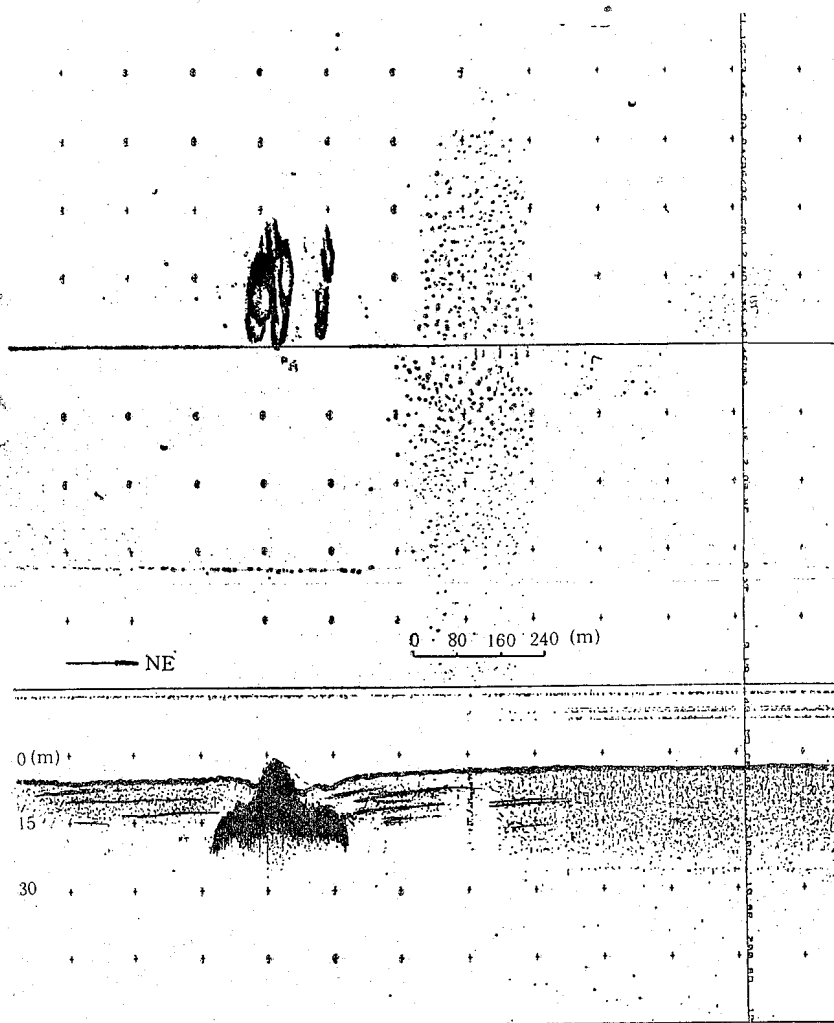


图 19 天然气外溢形成的麻坑

测线 L2, 155号测站, 水深 185m

测点等处, 天然气充填在地表下数米的沉积层中, 构成了大片载气沉积。总体看来, 调查区内浅层天然气的分布, 以莺歌海测区的西部与东南部和琼海以东的外陆架区较多, 而在莺歌海测区的西部与东南部则有可能存在浅层高压天然气。

12. 断层 调查区内发现的断层有两类。一是发育在海底之下 10—20m 以内的所谓次表层断层 (subsurface fault), 在北部湾、莺歌海等测区内均有零星发现 (图 22), 其成因往往与地层的局部滑塌作用有关。这类断层的发育表明那里的地层曾经发生过局部活动。这种局部活动对地层的稳定有一定的破坏作用, 因而对海底工程有不利影响。另一类是与较深部地层 (至少在地质脉冲记录的下部, 即海底之下 100—150m) 有联系的断层, 在调查区内出现不多, 仅在测线 L2 第 35 测点、Y14 第 12 测点等处发现 (图 23)。从图中可以看出, 其断层距已超过 10m, 深度达 150m 以上。从该区地层学分析, 该断层至少起

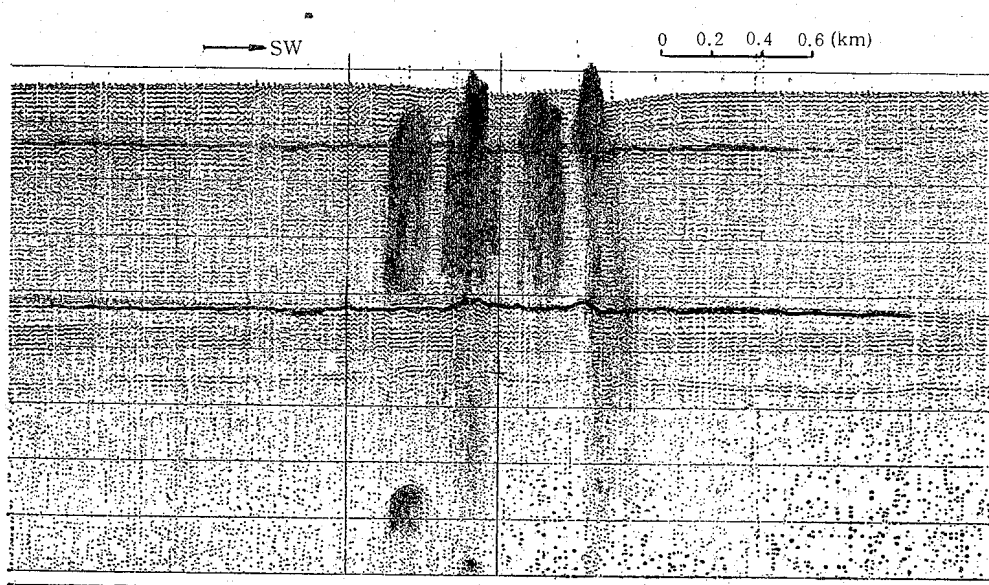


图 20 浅层高压天然气
测线 L2,-27 号测站(大站),水深 180m

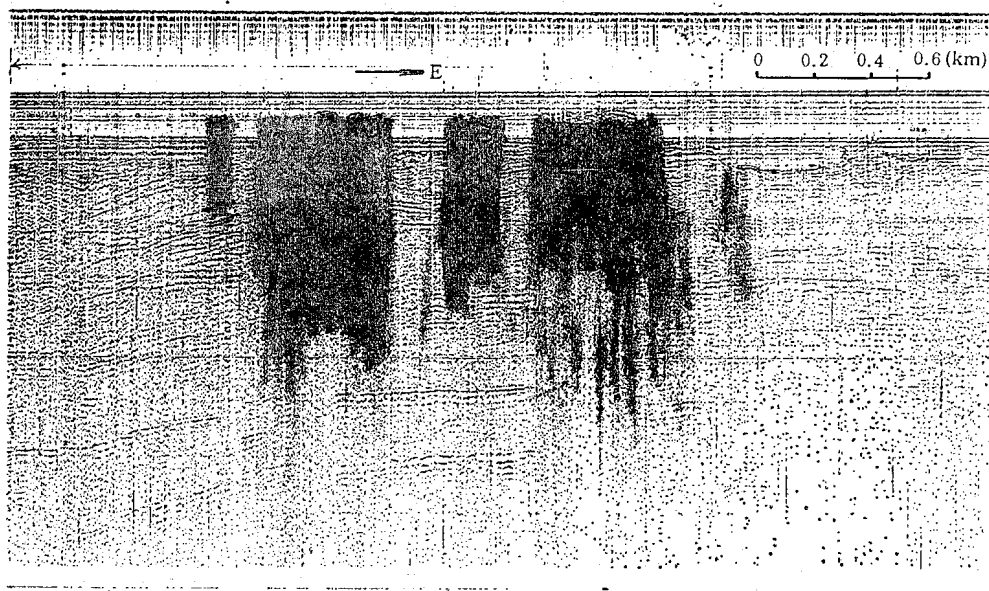


图 21 浅层天然气
测线 L5,28 号测站,水深 27m

源于第三纪地层内,而影响到中、晚更新世地层,晚更新世以来该断层仍在活动。显然,这与本区的新构造运动有关。调查区大部分属雷琼-北部湾拗陷区,晚第三纪时地壳强烈下陷,形成了 3 000 多米厚的沉积物层。第四纪以来,频繁地发生间歇性上升,特别是早更新

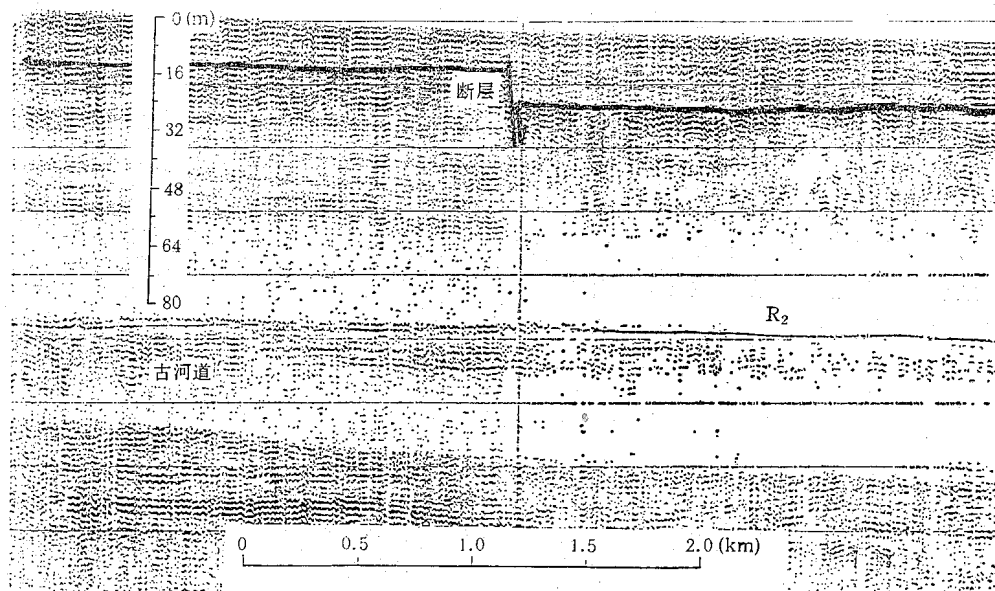


图 22 滑塌断层
测线 Y4,15 号测站,水深 85m

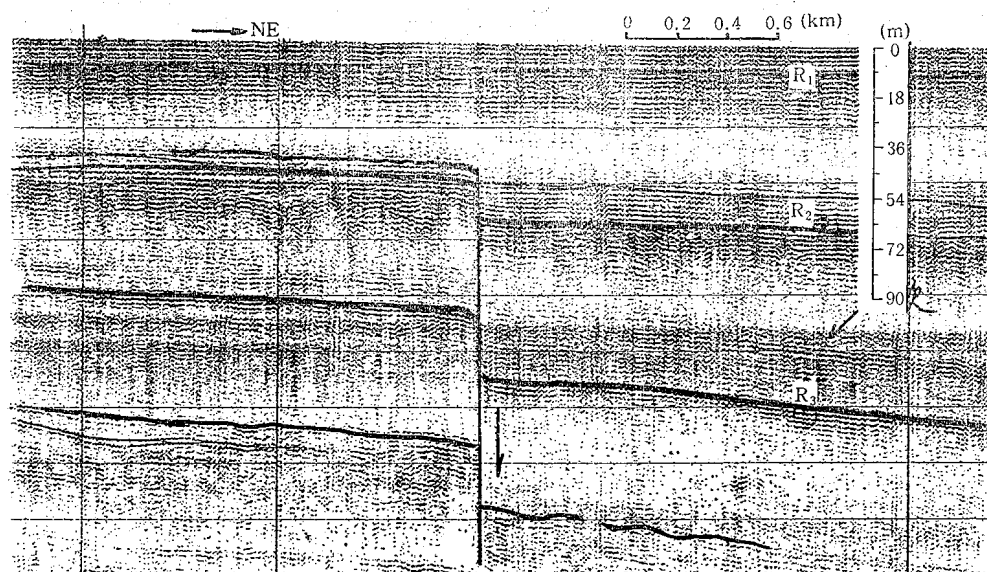


图 23 活动性断层
测线 Y14,12 号测站,水深 60m

世晚期发生一次较弱的地壳活动,形成了许多穹隆构造、平缓的褶皱和轻微的断裂等。如北部湾测区底部更新世地层中的小背斜即是明显的例证(图 24)。从图中所示断层的情况分析,这种构造活动在中更新世或晚更新世早期仍有发展,说明该断层的性质属于活动性

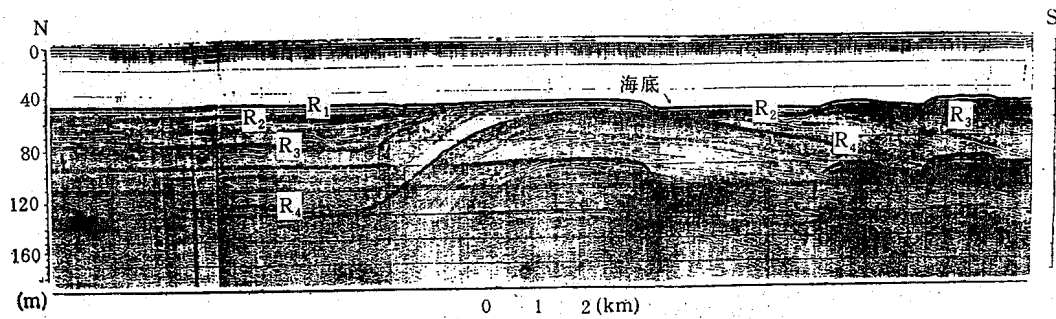


图 24 B1 测线南部背斜构造

断层 (active fault)。这种活动性断层乃是海洋石油工程之大敌。

13. 滑坡 调查区内尚未发现海底表层滑坡现象, 仅在部分测线上发现了埋藏古滑坡(图 25)。如图所示, 埋藏的滑坡内出现扭曲状或杂乱状反射结构, 地层不连续, 不整齐。其下部仍可分辨出具有一定坡度的滑动破裂面。滑坡破坏了地层的原始结构, 形成了抗剪强度很小的软弱地层, 同时它具有不稳定性质, 所以对石油工程建设十分不利。

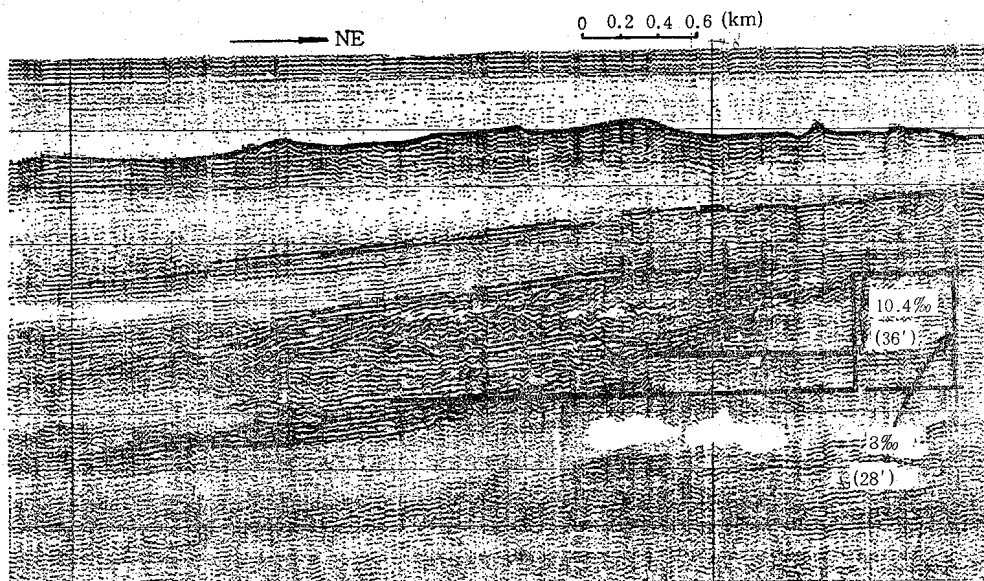


图 25 埋藏古滑坡

测线 Y11,-4 号测站(大站), 水深 74m

如前所述, 海底陡坡是产生滑坡的重要因素, 表 1 中所列皆为可能产生海底滑坡的危险地段。此外, 北部湾测区西南部的第三纪背斜的两翼, 坡度分别为 2° 和 $0^{\circ}30'$, 都超过了埋藏古滑坡滑动面的临界坡度, 因此, 在一定荷载作用下也有可能产生滑坡现象。

估计可能产生滑坡或滑塌的地区绘于图 1。

此外,砂土液化、地震动等也是与海洋石油工程建设安全密切相关的地质因素,将有另文讨论。

三、灾害性地质因素分类

1980年,Carpenter 对大西洋外陆架的各种灾害性地质因素进行了系统分析之后,将它们分为两类(Carpenter and McCarthy, 1980),一是对海底石油、天然气工程具有高度潜在性危险的因素,如浅层高压气、浅层活动性断层、海底滑塌和滑坡等,它们能对海洋石油工程造成意想不到的巨大损失,因而可名副其实地称之为灾害(hazards)。另一类是对海洋石油工程产生一定威胁,给海底施工带来一定麻烦的地质地貌因素,如最常见的埋藏古河道、载气沉积物、海底沙丘、海底侵蚀带等。比较而言,此类因素对海洋石油工程造成的危害性小些,在某些情况下,采取一定措施甚至可以减轻或者避免工程损失,Carpenter 称之为地质障碍(Constraint, 直译为制约因素)。虽然从理论上讲,它们对海洋石油工程的威胁有大小之分,但是,实际上产生的后果却与调查和认识的程度有关。灾害性地质因素的研究是在本世纪40年代之后,特别是近20年间随着海上石油勘探的蓬勃发展而崛起的,尚无统一的分类方法。根据目前报道的各种灾害性地质因素以及本区的实际情况,可从下面三个角度对灾害性地质因素进行分类。

1. 存在部位及可能引起灾害的对象 存在于海底不同部位的灾害性地质因素,可能引起灾害的对象也不相同。例如,活动性沙丘或潮流沙脊,一般情况下影响海底以下地层的深度很小,它主要危害海底油气管线的敷设和安全,而对平台的威胁相对较小。相反,埋藏古河道或古湖泊,位于海底以下数米或数十米,它对平台建设威胁较大,而对海底油气管线的敷设和安全则影响较小。根据存在部位和危害对象的不同,可将灾害性地质因素划分为两类,即地表灾害因素和地下灾害因素。前者主要指能够对海底工程产生灾害性影响的地貌因素,如活动性海底沙丘、活动性潮流沙脊、陡坎及陡坡、麻坑、边缘沟及海底沟壑、岗阜地形等;也包括一些存在于地表的灾害性地质因素,如海底滑坡、强烈的海底侵蚀等。后者包括海底以下不同深度的灾害性地质因素,如埋藏古河道、埋藏古湖泊、浅层高压天然气、活动性断层等。有些尚不易区分的因素,例如沙土液化问题,可暂按其存在部位划分为两类,即海底之下3m以内的,主要影响海底油气管线的敷设和安全,划为前类;埋深大于3m的,主要影响平台安全,归为后类。

2. 可能引起灾害的程度 不同特征的灾害性地质因素所引起的灾害程度也不相同。例如,浅层高压天然气一旦形成灾害,即能使平台化为灰烬,危害极大;而埋藏古河道对平台建设虽有威胁,但它是静止的,只要回避或采取某些工程措施,就可以避免或减轻损失。所以,根据可能引起灾害的程度的不同,又可将灾害性地质因素分为危险性因素和障碍性因素两种。这类似于Carpenter的分类。区别在于,本文除考虑危害程度外,同时也考虑危害对象,例如,大型活动性沙丘、海底侵蚀、泥流等,对海底油气管线的敷设和安全威胁很大,都列入前类。

3. 引起灾害的直接程度 根据对海底工程引起灾害的直接程度,可将灾害性地质因素分为直接的和潜在的两类。前者能够直接对海底工程产生危害或威胁,例如海底沙

丘、麻坑、侵蚀岗丘、沟壑、陡坎和陡坡、埋藏古河道、埋藏古湖泊、埋藏古三角洲、浅层高压天然气或沼气等。后者是在一定的诱发条件下才能对石油工程产生危害,例如海底滑坡、沙土液化等,往往是在地震荷载或海浪荷载的作用下诱发而成的。活动性断层往往与新构造运动有关;活动性沙丘、潮流沙脊、泥流等往往与水动力条件的变化等因素有关。

以上所述,是从不同角度分别反映灾害性地质因素的一个侧面。如果综合起来,对其特征及危害性等就会有较全面的认识。为此,本文以其存在部位和可能引起灾害的对象为基础,初步将本区所见之灾害地质因素分为地表灾害地质因素和地下灾害地质因素两大类,然后再按其引起灾害的严重程度和直接程度划分亚类。具体分类如下:

I. 地表灾害地质因素

(1) 直接危险因素: 大型海底活动性沙丘; 大型活动性潮流沙脊; 泥流(或浊流); 海底滑坡; 强烈的海底侵蚀。

(2) 潜在危险因素: 陡坡; 次表层沙土液化层, 与浅层高压天然气活动有关的麻坑。

(3) 直接障碍因素: 海底沙丘(非活动性); 麻坑; 边缘沟及其他海底沟壑; 岗阜地形; 陡坎及陡坡。

II. 地下灾害地质因素

(1) 直接危险因素: 浅层高压气。

(2) 潜在危险因素: 活动性断层; 深部断层; 沙土液化层; 埋藏古陡坡; 埋藏古滑坡; 埋藏古三角洲。

(3) 直接障碍因素: 埋藏古河道; 埋藏古湖泊; 埋藏古三角洲; 埋藏古滑坡; 沼气及载气沉积层; 埋藏滑塌断层。

应当说明,某些因素的分类位置有所重复,例如陡坡、埋藏古三角洲等,同时列入危险因素和障碍因素。其原因是考虑它们有双重性,即一般情况下只具有障碍因素特征,但是,在一定的诱发因素作用下,例如在地震或海浪荷载作用下,如果土层的物理、力学性质适合,就可以产生滑坡,因而又具有危险因素的特征。

四、灾害性地质区划及评价

根据灾害性地质因素的类型及其分布特征,将调查区的灾害性地质区划如下(图26):

I 地表区	I-1 危险区	I-1-A: 直接危险区, 其中(a)大型活动性沙丘; (b)活动性潮流沙脊; (c)泥流; (d)海底滑坡; (e)强烈的海底侵蚀等。
		I-1-B: 潜在危险区, 其中有(a)陡坡; (b)次表层沙土液化层; (c)与浅层高压天然气活动有关的麻坑等。
	I-2 障碍区	I-2-A: 直接障碍区, 其中有(a)海底小沙丘; (b)麻坑; (c)边缘沟; (d)海底沟壑; (e)岗阜地形; (f)陡坎; (g)陡坡。
		I-2-B: 潜在障碍区(?)
	I-3 无害区	海底比较平坦开阔、无强烈的对照性地形及泥沙群体运动。

- II-1 危险区
- II-1-A: 直接危险区, 其中有(a)浅层高压天然气;(b)活动性断层。
 - II-1-B: 潜在危险区, 其中有(a)活动性断层及深部断层;(b)埋藏古陡坡;(c)埋藏古三角洲;(d)埋藏古滑坡;(e)沙土液化层。
- II 地下区
- II-2 障碍区
- II-2-A: 直接障碍区, 其中有(a)埋藏古河道密集区;(b)埋藏古湖泊;(c)埋藏古三角洲;(d)埋藏古滑坡;(e)沼气及载气沉积层;(f)滑塌断层。
 - II-2-B: 潜在障碍区(?)
- II-3 基本无害区
- 区内地层性质良好, 但是尚有较少的埋藏古河道, 其具体位置据灾害性地质因素分布图确定。

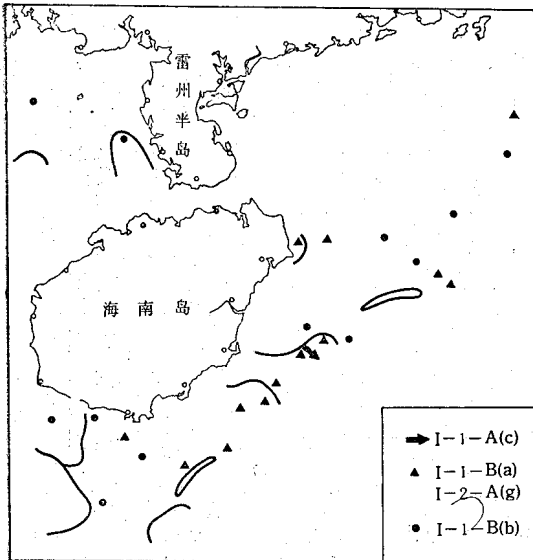


图 26A 南海西部灾害性地质分区图(地表区)

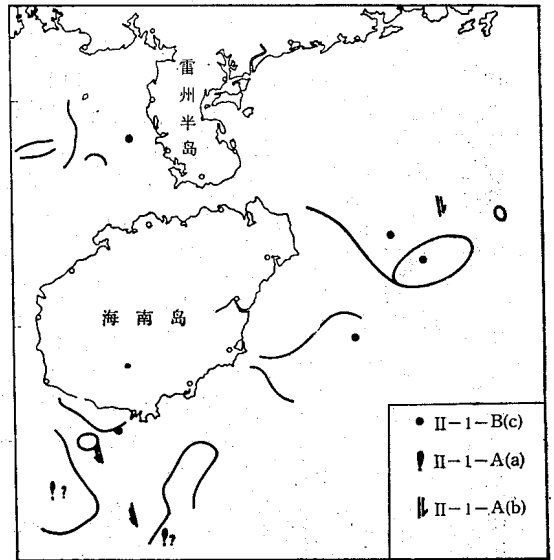


图 26B 南海西部灾害性地质分区图(地下区)

如前述,本次调查使用的地质脉冲剖面仪穿透深度仅 100—150m 左右,因此图中不包括海底 150m 以下地层中的灾害性地质因素,例如 500—1000m 深度的高压天然气,中、深部断层等。

对海底油气管线的敷设和安全能产生直接危害,而且危险性较大的地区(I-1-A),主要分布在琼州海峡西口的现代潮流沙脊区,和莺歌海南部内陆架侵蚀平原的活动性沙丘区。潜在性危害较大的区域(I-1-B)散布于图中各沙土液化点、陡坡区及部分麻坑分布区,如莺歌海测区内崖城以南的麻坑分布区及内陆架向陆一侧陡坡区;在海南岛以东的测区内,多在外陆架外缘,文昌以东外陆架水下埋藏三角洲区。对海底油气管线构成障碍性威胁的地区(I-2-A),主要分布在莺歌海以南的大型麻坑分布区,莺歌海西南外陆架边缘,和万宁以东的陆架区,那里有大量的沟壑、岗阜、陡坎、陡坡等。无害区(I-3)占调查区的大部分。所谓无害,系指海底起伏较小,不存在强烈的海底侵蚀和堆积等灾害性地质因素,对海底管线的建设不存在直接的或潜在性威胁。

由于仪器穿透深度的限制,对石油平台建设构成直接危险的区域(II-1-A)很少发现;就现有资料推测,可能仅散布于莺歌海测区东南外陆架外缘坡折带。潜在性危险区(II-1-B),崖城以南测线 Y13 第 12 测点,文昌测区之测线 L2 第 35 号测点附近,见有活动性断层。其余则见于北部湾测区西南部埋藏背斜的两翼,崖城以南内陆架近岸斜坡区,和文

昌测区之埋藏三角洲区。对平台工程产生直接障碍的地区(II-2-A)分布较广,如北部湾测区西部和文昌测区东北部陆架区,主要是埋藏古水系较为密集。莺歌海测区西部及西南部陆架,主要发育有埋藏古湖泊、埋藏古河道,以及沼气和载气沉积层。莺歌海东南外陆架边缘、万宁以东的陆架区,主要发育天然气(沼气?)及载气沉积层。无害区(II-3)一般地层比较简单、平整,无灾害性地质因素发育。(图27)但是,如图1所示,那里也发育有较为稀疏的埋藏古河道、小型埋藏湖泊以及零散的滑塌断层。若进行平台建设,尚需结合图1和图15确定其概位,以便进一步详查。

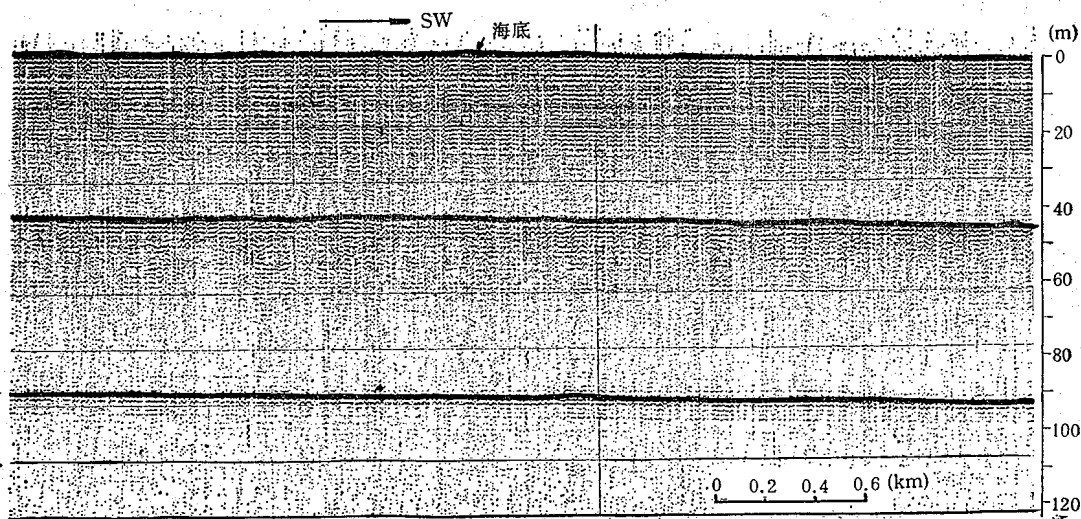


图 27 无害区内的平整地层
测线 L2, 130—132 号测站, 水深 170m

五、结 束 语

灾害性地质的调查研究与海洋石油开发等海洋工程建设休戚相关。南海西部海底存在着多种类型的灾害性地质因素,如活动性沙丘、潮流沙脊、麻坑、陡坎、边缘沟、泥流、海底侵蚀、埋藏古河道、埋藏古湖泊、埋藏古三角洲、浅层天然气、滑塌断层、活动性断层、滑坡等等。它们的存在形式和特征不同,对海洋工程威胁的程度各异。按其存在部位及可能引起灾害的对象的不同,可分为地表灾害因素和地下灾害因素两大类;再按引起灾害的严重程度和直接程度的不同,每一大类又可进一步划分为直接危险因素、潜在危险因素、直接障碍因素等三类。虽然这些灾害性地质因素性质、特征各不相同,但是在成因上,某些因素常常互相关联,互相伴生;在分布上,往往也有一定规律可循。因此,只要事先进行精确详细的调查,科学的分析判断,就可避免其害,化险为夷,保证海洋石油开发及其他海洋工程建设的顺利进行。

参 考 文 献

- 中国科学院南海海洋研究所, 1976. 华南沿海第四纪地质调查研究报告. 科学出版社。
- 李凡等, 1990. 南海莺歌海区埋藏古河道及海平面变化. 海洋与湖沼 21(2)。
- 金波、鲍才旺、林吉胜, 1982. 琼州海峡东、西口地貌特征及其成因探讨. 海洋地质研究 2(4): 94—101。
- 秦蕴珊、李凡、唐宝珏, 1986. 南黄海埋藏古河系. 科学通报 24: 1887—1890。
- Carpenter, G. B. and J. C. McCarthy, 1980. Hazards anylysis on the Atlantic outer continental shelf. 12th Annual O. T. C. Proceedings 1: 419—424.
- Edwards, B. D., M. E. Field and E. C. Clukey, 1980. Geological and geotechnical anylysis of the submarine slump, Carifornia borderland. 12th Annual O. T. C. Proceedings, 1: 399—410.
- Lewis, K. B., 1971. Slumping on a continental slope inclined at 1° — 4° . *Sedimentology* 6: 97—110.
- Newton, R. S., R. C. Cunningham and C. E. Schubert, 1980. Mud volcanoues and pockmarks seafloor engeneering hazards of geological curiosities: 12th Annual O. T. C. Proceedings. 1: 425—436.
- Prior, D. B. and J. M. Coleman, 1977. Disintegration retrogressive landslide on very low-angle subaquous slops, Mississipi delta. *Marine Geotechnology*. 2: 45—77.
- Trabant, P. K., 1984. Applied High-resolution Geophysical Methods—Offshore Geoengineering Hazards. D. Reidel Publishing Company, pp. 208—210.
- U. S. Army C. E. R. C., 1975. Shore Protection Manual. 1: 4—61.

STUDY ON HAZARD GEOLOGY IN WEST PART OF THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA*

Li Fan

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

During 1985—1988, characteristics, distributions, genesis and correlation between some geohazards factors were investigated in west part of the northern South China Sea. There are various geohazards factors or unstable factors on sea floor in west part of the northern South China Sea, such as submarine active sand dune, tidal current sand ridge, pockmark, submarine steep-slope and scarp, continental shelf marginal valley, mud flow, submarine erosion and erosional residue hill, buried paleo-channel, buried paleo-lake, buried paleo-delta, marsh-gas and shallow high pressure gas, slump fault and active fault, submarine landslide. According to their locations and hazardous effect, geohazards factors can be divided into two categories: sea floor geohazards and underground geohazards. The former is of geomorphological and geological nature, endangering submarine constructions on sea floor. The latter is exclusively of geological nature. Based on the latency and dangerous degree of hazards, each category of geohazards factors could be divided into three types: immediate hazard factors, latent hazard factors and constraint hazard factors. The investigated area can also be divided into various geohazard zones as follows: immediate sea floor hazard zone, latent sea floor hazard zone, immediate sea floor constraint hazard zone, sea floor basically no hazard zone, immediate underground hazard zone, latent underground hazard zone, underground constraint hazard zone and basically no hazard zone.

* Contribution No. 1697 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.