

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.01.008

珠江口盆地海底滑坡发育特征及成因机制

刘科^{1,2,3}, 王建华^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 岩土工程研究所, 天津 300072; 3. 华北理工大学, 河北 唐山 063009)

摘 要: 海底滑坡属于海洋地质灾害的一种主要类型。国内外海洋领域学者对不同地理位置的海底滑坡做过一些建设性的研究工作, 国内学者在南海北部海底滑坡的研究中主要关注的是灾害分区和成因分析, 而对南海北部珠江口盆地海底滑坡的形态、类型、规模、分布特征等方面的基础性工作还缺乏系统的科学分析。通过 2012 年以来对珠江口盆地滑坡区海洋土的静力触探试验、十字板剪切试验及室内分析试验, 揭示出珠江口盆地海洋土的垂直分布特征, 根据不同深度海洋土的工程性质差异可将该区土体自上而下划分为 5 层。按照海底滑坡所处的地貌单元不同, 把珠江口盆地水深 160~1280 m 范围内发育的滑坡分为 4 处规模较大的滑坡带, 均呈 NE-NEE 向展布, 主要为顺层型滑坡、圆弧型滑坡和崩塌型滑坡 3 种基本类型, 规模从 4 km² 到 800 km² 不等, 集中分布在北纬 19°-22°, 东经 113°-117° 范围内。通过海底地质环境、水文气象环境及力学平衡分析, 指出了影响海底滑坡稳定性的主要因素包括地震活动、海流影响及沉积物质的快速堆积 3 个方面。

关键词: 珠江口盆地; 海底滑坡; 发育特征; 成因

中图分类号: P714.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2017)01-0060-07

Development characteristics and cause mechanism of the submarine landslides in Zhujiang River Mouth basin

LIU Ke^{1,2,3}, WANG Jian-hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: Submarine landslide belongs to a main type of marine geological disaster. Domestic and overseas scholars have made some constructive works on the submarine landslide in different locations. Domestic scholars focused on the study of disaster partition and cause analysis in the north of the South China Sea. However, the basic work of the shape, type, size, distribution characteristics about submarine landslide is lack of scientific analysis in the Zhujiang River Mouth basin in the South China Sea. Through the cone penetration test, vane shear test and laboratory analysis test in the marine soil in 2012, this paper has revealed the vertical distribution characteristics of the soil. The marine soil can be divided into 5 layers by the different properties of different depths from top to bottom. According to different units in submarine geomorphic locations, the landslide has been divided into 4 large zones. The distribution of landslide zones is NE-NEE, and the types of landslides are bedding landslide, circular arc landslides and collapse landslides, and the size range is from 4 km² to 800 km². They are located in 19°-22°N, 113°-117°E. Through meteorological, hydrological environment and mechanical equilibrium analysis, the article has pointed out the main factors influencing the stability of submarine landslides are the seismic activity, currents and sediment quality rapid accumulation.

Keywords: Zhujiang River Mouth basin; submarine landslides; development characteristics; cause mechanism

收稿日期: 2015-03-24; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金 (41466001)。

作者简介: 刘科 (1976-), 男, 博士生, 副教授, 主要从事海洋工程地质研究。电子邮箱: liuke1976@163.com。

通讯作者: 王建华, 博士, 教授。电子邮箱: tdwjh@tju.edu.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

从目前中国石油、天然气资源的勘探及开发利用区划来看,南海已经成为中国深水海洋石油、天然气勘探开发较有前途的一个区域。在 2010 年 7 月 17 日举行的“地球生物学国际研讨会”上,时任中国海洋研究委员会主席、中国著名的海洋地质学家、中国科学院院士汪品先先生就曾经指出,“就中国开发的石油、天然气资源来源而言,未来 40 % 的石油、天然气资源将来自海洋”。汪先生同时指出,虽然海洋石油、天然气资源丰富,但是在海上勘探石油、天然气资源出现的风险也相对巨大,引发风险的主要原因在于人类不能够很好地查明海上石油、天然气的勘探现状、勘探的特点,也不能很好的认识到石油、天然气赋存环境的复杂性。从某种意义上讲,当前海上石油、天然气资源勘探开发活动仍然存在着诸多的盲目性和不确定性。在中国深入贯彻落实国务院 2012 年 9 月印发的《全国海洋经济发展“十二五”规划》,中国将在领海进行的深水环境下的石油、天然气资源开发和深海工程活动也会日益增多。与此同时在海洋资源开发中遇到的地质灾害问题也会逐渐增多。

海底滑坡是海洋地质灾害的主要组成部分,国内外一些学者对不同地理位置的海底滑坡的形成原因做过一些研究。Elverhoi 等(1997)应用 Johnson (1970) 提出的表达式对挪威巴伦支海深海陆坡边缘海底滑坡进行研究,认为不同来源的海底沉积物有着不同的屈服强度,滑坡的发生与否与海底沉积物质的来源有关。Maslin 等(1998)认为引起海底发生滑坡的根本原因是海底的地震,分解水合物的存在、洋面波动、海底松散沉积物的沉积速率等因素。Rothwell 等(1998)在海洋浊积岩的形成过程中,发现海底分解的水合物会对这类岩石形成产生很大的影响,从而认为海底大多数的大型滑坡都是与分解的水合物有一定的联系。Locat 等(2002)按照海底滑坡的运动阶段,将海底滑坡的活动形式分为 5 个阶段,分别是蠕动、岩土崩塌或岩土碎屑崩塌、平移滑动、碎屑流和泥流。Fiorillo (2003)在意大利亚德里亚海岸的海底地质地貌调查基础上,分析了海底滑坡的成因,提出了引发海底滑坡的主要作用是坡体土层孔隙水压力的变化;当沉积土层厚度增大时,固结系数和排水条件也随之改变,由其引起海洋陆坡沉积土层的孔隙水压力变化对海底陆坡稳定性有重要影响。Flemings 等

(2008)在墨西哥海湾深水陆坡海底滑坡研究中也提出了孔隙水压力增加引起海底滑坡的机理。

国内,吴庐山等(2000)根据“汕头幅(F50) 1:100 万海洋区域地质调查与编图”项目的大量地质及地球物理实测资料,分析研究了南海东北部海底潜在的灾害地质因素的类型,分布特征、形成机制及危害性。刘锡清(2006)对南海区域的海洋地质灾害进行了分区研究,提出了分区的方案,并且提出了海洋地质灾害的评估模型,在此基础上研究了海洋地质灾害的定量分析方法。吴时国等(2008)认为在众多的海底滑坡诱发因素中,有两个要素起关键性作用,这两个要素分别是地震作用和天然气水合物的分解。地震活动激发周期性的循环剪应力可以引起海底松散沉积物发生液化、进而沉积物的抗剪强度减小,引发海底松散沉积物滑坡出现;水合物的分解形成的天然气也可以降低海底松散沉积物的抗剪强度而引起海底滑坡。在海底滑坡出现的地方,常常存在可以释放天然气的水合物,水合物的分布带底部边界通常与海底松散沉积物容易发生滑动的位置相一致。

从以上分析可以看出国内外的许多学者在不同的海区对不同海洋底部的滑坡进行过富有建设意义的研究,多数学者认为海底的滑坡与水合物分解及地震活动有关。这些研究工作对海底滑坡灾害分布及成因的理论分析起到积极的推动作用。国内学者对南海北部海底滑坡的研究工作主要集中于灾害分区和成因分析方面,而对于南海北部海底滑坡的类型、分布范围、影响程度、规模特征等方面的基础性工作还缺乏细致的、系统性的分析。

在前人工作的基础上,结合本课题组 2012 年以来在珠江口盆地获得的现场勘察数据,本文将珠江口盆地的海底滑坡进行了较为全面的分析研究,丰富了该区海底滑坡的基础性资料和数据。

1 珠江口盆地构造特征及土层分布

南海珠江口盆地是南海石油、天然气资源富集的地区之一,该区域位于北纬 18°-22°,东经 110°-120°范围内,处于香港东南约 160~240 km 处,海水水深为 150~3 000 m,在陆架与陆坡平台周围区域自 NE 向 SW 延伸,长度大约 1 340 km, NW-SE 向宽度大约 220 km。

珠江口盆地位于南海北部，是南海北部分布范围最大的海洋深水盆地，总体形态呈自 NE 向 SW 向展布，东西长度约 800 km，面积约 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。珠江口盆地同时也是南海北部以新生代 (K_2) 沉积为主的大陆边缘最大的中新世沉积盆地 (图 1)。新生界地层 (K_2) 厚度达到 10 km，其中早第三系 (E) 地层大于 6 km，古新统 (E_1) 地层与始新统 (E_2) 的地层都属于河湖相沉积地层，晚第三系 (N) 的地层厚度达 3.5 km。早第三系至中新统 (N_1) 属于海滨海岸三角洲沉积，中新统 (N_1) 到上新统 (N_2) 属于海相沉积地层 (王洁等, 2012)。

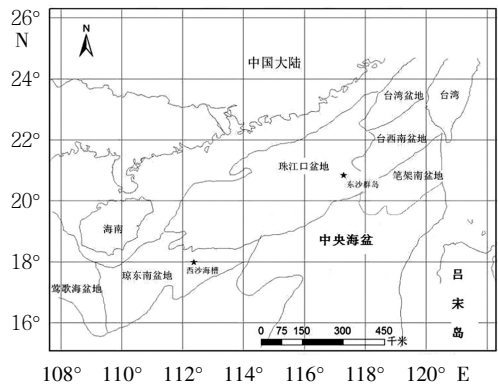


图 1 研究区位置图 (王洁等, 2012)

珠江口盆地内海底沉积物为全新世 (Q_4) 海流沉积，这些海底沉积物质主要来自于邻近海底的晚更新世 (Q_3) 沉积土层，经海流的剥蚀、搬运、沉积等一系列外动力地质作用后沉积下来。由于现代海流携带的松散沉积物物质主要来自晚更新统 (Q_3)，沉积后的海底沉积物中保留了许多与现代沉积环境不相符的残留特征。按照 2012 年课题组在珠江口盆地海域海底进行的静力触探试验 (CPT)、十字板剪切试验 (VST) 等现场勘察试验，发现该区海底表层的细到中砂饱和容重为 $12.7 \sim 14.9 \text{ kN/m}^3$ ，含水量为 $164.9\% \sim 87.7\%$ (表 1)。

表 1 珠江口盆地表层海洋土性质

测点	位置/E/N	水深/ m	探测深 度/m	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	含水量/%	静探孔 压系数
1	114°54'54" /19°31'23"	1 190	0~18	13.1~14.8	146.2~93.4	0.9~1.2
2	114°55'02" /19°31'37"	1 134	0~18	13~14.6	164.9~87.7	0.4~0.6
3	114°54'43" /19°31'05"	1 258	0~18	12.7~14.9	158.3~88.6	0.4~0.6

依据珠江口盆地的地质资料数据、海底沉积物取样和海底钻孔所得资料分析，可以将该区域的地层进行铅直分层。该区海洋土层从垂直方向可分为 5 套地层层序，自上而下分别是 I 层以上表层、I 层、II 层、III 层及 III 层以下底层 (图 2)。

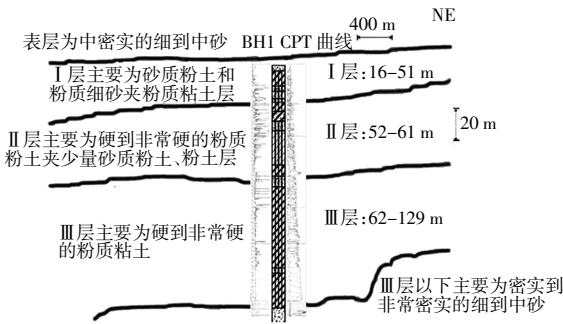


图 2 珠江口盆地综合地层层序图

I 层以上表层厚约 0~16 m，海底底质类型为中等密实的细到中砂，含贝壳等生物遗迹。

I 层为全新世 (Q_4) 冰后期以来由于海侵作用，海底逐渐堆积的在海底表层形成的沉积物，这样的沉积环境应该为全新世海相的沉积，I 层内土层以斜层理为主，土层呈水平分布，构造较简单，土层沉积物连续性强，对声学入射能量反射中等。该层沉积物处于海底以下 16~51 m 范围内，海洋土的类型为砂质粉土和粉质细砂夹粉质粘土层，表层沉积物中含有生物残骸。

II 层的海底沉积物的沉积特征与 I 层沉积物的特征较为相似，沉积物形成的地质时代为晚更新世 (Q_3) 物质。该层沉积物处于海底以下 52~61 m 范围内，海洋土的类型为粉质粉土含有少量砂质粉土、粉土层。

III 层为一倾斜的、没有间断的海洋土沉积层，土层较密实。处于海底以下 62~129 m 范围内，III 层的海洋土是粉质粘土。

III 层以下底层埋深在 129 m 以下沉积物是密实到非常密实的细到中砂。

2 珠江口盆地海底滑坡的类型

海底滑坡是海底松散沉积物在自重、海流、波浪或突发的振动等自然力推动下整体由高位势向低位势运移的一种现象，是海底不稳定性的一种常见的表现形式，通常发生在地形坡度大、坡面开阔、

坡体组成物质的颗粒较细且含水量较高的陡坡部位。

海底滑坡的类型按照滑移面与沉积物层理的交错切割特征, 能够归纳成为顺层型滑坡、圆弧型滑坡和崩塌型滑坡 3 种基本类型。

顺层型滑坡是由于海底滑坡体土质松散的地层覆盖于土质相对密实地层之上或松散土层夹于密实土层之间而引发, 这种类型的滑坡滑动后的规模往往比较大。圆弧型滑坡主要发生在组成海底滑坡体的松散沉积物物质成分组成单一、均匀的大陆坡上。崩塌型滑坡是由崩塌块体在重力作用下沿陡峭坡面自由下落而形成的滑坡体。

3 珠江口盆地滑坡分带

在南海北部众多的海底滑坡中珠江口盆地的海底滑坡最为典型。按照海底滑坡的分布地貌单元部位不同, 可将该区在水深 160~1 280 m 处发育的滑坡划分为 4 处规模较大的滑坡带, 这些坡体均呈 NE-NEE 向展布 (图 3)。

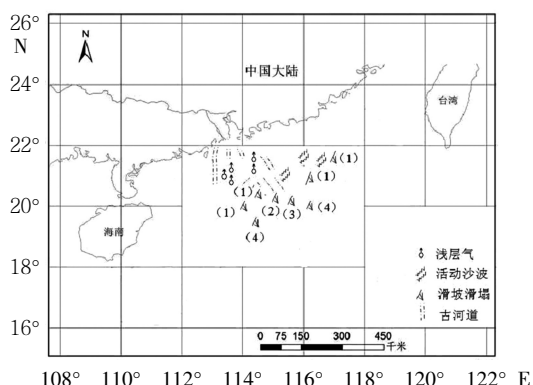


图 3 南海北部地质灾害分布图

(图中 1、2、3、4 分别代表 4 处滑坡带)

第 1 处滑坡带位于大陆架与大陆坡交界的坡折线附近, 是研究区内最壮观最典型的滑坡带, NE-NEE 向延伸。第 1 处滑坡带由 4 个滑坡区组成 (陈俊仁 等, 1992), 分别是西部滑坡一块、西部滑坡二块、中部滑坡块和东部滑坡块。

西部滑坡一块: 该块滑坡体主要分布于海水水深 190~250 m 范围内, 坡体长度在 55 km 左右, 宽度在 1~3 km 左右, 呈弧状弯曲, 后壁及侧壁高差可达 10~35 m, 地形坡度为 $15^{\circ}10'$ ~ $21^{\circ}50'$; 底部谷宽 200~600 m, 滑块北坡相对高差 10~35 m, 南坡相对高差 5~15 m, 属于第一种基本类型的滑坡。

西部滑坡二块: 该块滑坡体主要分布于海水水深 210~230 m 范围内, 坡体长度在 75 km 左右, 宽度在 2 km 左右, 坡体高度达 10~20 m, 可见到后壁或洼地, 从坡体上的台阶可见到坡体内海洋沉积物层理出现挠曲的现象, 说明该块的滑坡属于第二种基本类型的滑坡。

中部滑坡块: 该块的滑坡体主要分布在海水水深在 150~200 m 范围内, 坡体宽度在 1.5~2 km 左右, 东西两段为顺层型的滑动, 滑坡后壁为陡坎, 倾角可达 30° ~ 40° , 陡坎的高差为 25~37 m。中段为圆弧滑坡, 在该滑坡块中现代滑坡和古滑坡均有出现, 滑坡体沿着滑动面向 SE 方向呈块状滑动, 高度在 20~50 m 左右, 外形呈鼓丘状, 应该归为顺层与圆弧组合的复合型。

东部滑坡块: 该块的滑坡体呈带状分布, NEE 向延伸约 52 km, 宽度为 3~4 km, 分布在海水水深 150~250 m 之间。滑坡体的后缘为长条形滑坡壁, 并和崩塌谷相伴而生, 滑坡壁高差达 10~26 m。该滑坡体为鼓丘状, 滑动面呈弧形, 属圆弧型滑坡, 具有多期活动的特点。

第 2 处滑坡带位于上陆坡, 海水深度为 420 m 处, 北东向延伸, 长度在 55 km 左右, 宽度在 5 km 左右。该滑坡体发育于海相沉积带上部, 是浅层的坡体, 纵向入深为 10~20 m, 坡体后壁的形态明显, 一般高差为 15 m 左右, 最大可达 40 m, 从地震剖面上分析滑坡体沉积物层理, 有挠曲现象, 可能是滑坡作用的初始阶段, 属于活动性滑坡。

第 3 处滑坡带位于上陆坡, 海水水深 650 m 处, 长度在 50 km 左右, 宽度在 16 km 左右, 是经过多期活动的数个滑坡体交叠而成的规模较大的滑坡带, 内部可见到丘状、块状滑动的特征, 属于切割深度较大的一种, 最大坡体上海底沉积物入深可达 200 m。该海底滑坡体典型, 滑动面清晰, 崩塌形成的峡谷呈 V 型, 谷底没有沉积物充填, 表明是现代形成的滑坡或正在生成的滑坡。同一滑坡存在多期活动的特征, 新老滑坡相互交叠组合形成一起, 构成规模较大的滑坡带, 大致为 NEE 向呈条带状展布, 规模巨大 (鲍才旺 等, 1999)。

第 4 处滑坡带处在珠江口盆地的白云凹陷, 滑坡带主要部分处在东经 $114^{\circ}28'$ ~ $116^{\circ}10'$, 北纬 $18^{\circ}50'$ ~ $20^{\circ}13'$ 之内珠江口盆地第二凹陷内, 它的北端有峡谷分布 (吴时国 等, 2011), 陡谷两边存在有

规模不等的多个海底滑坡体, 陡谷南端有一个规模大的滑坡体, 该滑坡体主体部分处在凹陷里 (图 4), 总面积约 4 km²。滑坡体呈北东、南西展布, 形态为扇形, 地形起伏变化较大从 1°~14.5°之间。滑坡体上部区域构造特征明显为正断层展布区域, 各个要素较清晰。

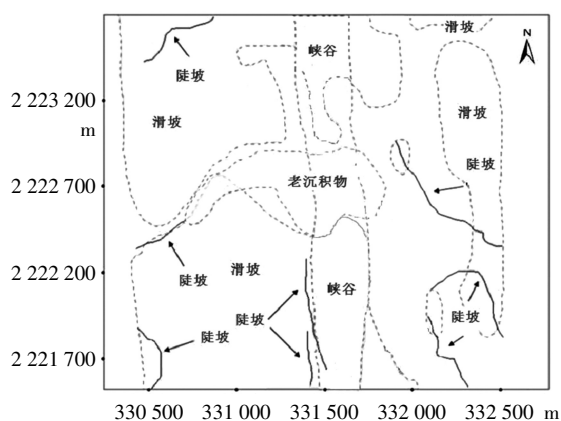


图 4 白云凹陷南北向峡谷周围滑坡分布图

第 4 处滑坡带内滑坡主要发育在海底峡谷两翼陡坡地段, 主要地貌特征为 2 条近南北走向的海底峡谷, 海底峡谷中古滑坡体可见。陡谷两侧的坡度不同, 东部和北部较陡, 坡度较高, 而西部和南部较缓, 坡度较低 (杨敬红 等, 2014)。陡谷的 SN 方向最大坡度落差约 105 m, 陡谷的 EW 方向最大坡度落差约 40 m, 在珠江口盆地的白云凹陷区域海水水深为 1 280 m, 地形起伏大, 坡度约为 4°~10°, 某些部位坡度在 12°以上, 陡谷下部宽度在 350~400 m 之间。顺着海底表面从 S 往 N, 地形较陡在 4~5°之间 (图 5)。陡谷上部的滑坡带从图中明显可以看出为 NNW 高而 SSE 低的三级阶梯状展布 (图 6)。

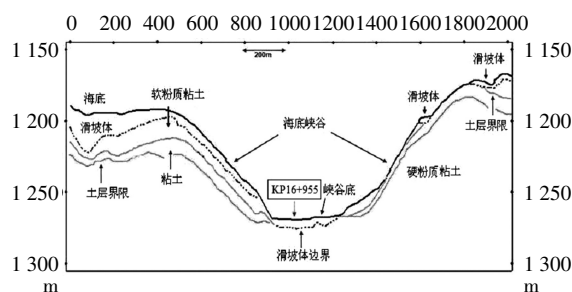


图 5 KP16+955 测点处海底峡谷及土层剖面图

通过以上分析可以看出, 珠江口盆地 4 处滑坡带由于分布在不同的地理位置, 所处的海底地质环

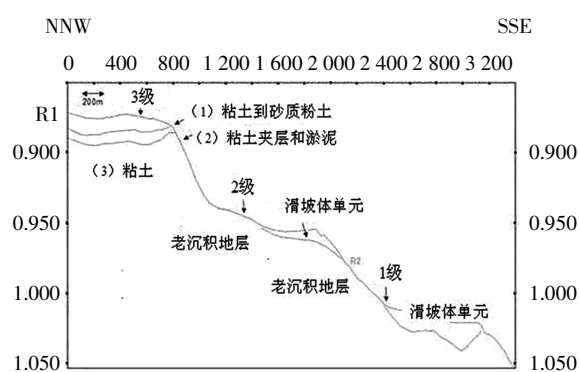


图 6 陡坡上部滑坡形态图

境有一定的差异, 海底滑坡的类型和滑坡体的物质组成性质也出现不同的情况。但总的来说, 可以认为南海珠江口盆地的滑坡大多分布在地形坡度变化较大的陡坡地段附近、大陆架与大陆坡交界的坡折线附近、大陆架外缘部位、内陆河流在海底形成的三角洲前缘陡坡带、海底大陆坡上部区域以及海底峡谷的陡谷两侧等部位。

4 滑坡形成原因

珠江口盆地海底的海洋沉积物形成于全新世 (Q₄), 滑坡也形成于这个时代。研究区海底的地质构造和海底松散沉积物的沉积历史都比较复杂 (李志强 等, 2015), 这种复杂的地质构造和沉积历史造成了南海北部海底的地形地貌形态多样, 也是引发包括海底滑坡在内的各种海洋地质灾害容易形成的根本原因。对于海底滑坡, 本文认为珠江口盆地海洋底部滑坡形成的主要原因有地震活动、海流影响和沉积物质的快速堆积作用。

4.1 地震作用引起的滑坡

地震作为内动力地质灾害对海底沉积物的稳定性影响较大。强烈地震活动时由于水平向地震力的作用, 常引起海底出现滑坡等海洋地质灾害。此外地震在砂土、粉土分布广泛的区域还可能引起砂土液化, 进一步形成海底浊流等地质灾害。

地震活动具有瞬时、突发的特点, 它引发的海底滑坡地质灾害, 作者已经于 2014 年做过分析研究。Liu 等 (2014) 详细阐述了包括滑坡体的物质组成, 海底沉积物的物理力学参数, 地震加速度等相关内容, 并形成了地震可能引发海底滑坡的分区图。

4.2 海流影响引发的滑坡

南海北部的海洋水文环境气象因素非常复杂,热带气旋、寒潮、大风等气象灾害性天气出现频繁(杨阳等, 2014; 陈子桑等, 2015)。海洋水文环境气象条件的剧烈变化将会对海底沙波、沙丘、潮流沙脊等海底地貌单元造成显著的影响,同时也可能会诱发海底滑坡。

利用船载声学多普勒流速剖面仪 ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), 国家海洋局于 2010 年进行了连续的走航式海流剖面测量, 在调查与测量期间获得了大量南海北部海流流场的分布数据。同时将海水分为 4 层, 分别是表面层、中间层、次底层和底层, 并对各层进行了流速和流向统计, 结果显示不同层流场的海流流速是不同的, 总体的流速特点表现为上层和下层的流速高、中间层的流速低, 而且各层的流向也不尽相同。本文课题组 2012 年 3 月份珠江口盆地荔湾凹陷区海流进行测量, 发现海流流向 275°, 海流流速为 14.6 cm/s, 最小流速为 6.1 cm/s, 走向 NE-SW。同年 8 月对珠江口盆地底层的海流流向以 W 向至 SE 向之间居多, 监测到的底层海流流速最大值达到 90 cm/s, 最小值 20.3 cm/s, 方向 SE。

珠江口海底滑坡区为季风型气候, 夏季以西南季风为主, 冬季以东北季风为主, 同时研究区的季风最为稳定。从时间上来说, 西南和东北季风期间, 珠江口盆地海面风应力分别以 8 与 12 月份最强(方文东等, 1998)。冯文科等(1994)与王尚毅等(1994)在对南海海底沙波活动的研究中, 几位学者确定了南海北部海底沉积物表层的细砂、中细砂与中砂的启动流速分别为 19.8 cm/s, 29.2 cm/s 和 36.2 cm/s。该海区的最大流速可达 90 cm/s, 且成 SE 方向, 显而易见如此大流速的海流完全能够使得海底表层的物质发生运移形成滑坡。这种较大流速海流的活动也是造成滑坡体主要呈 NE 向展布, 而呈 SE 向延伸的主要原因。因此, 夏季的海流活动对海底滑坡的影响值得关注。

4.3 海底沉积物的快速堆积作用

从力学平衡角度考虑海底滑坡的成因, 滑坡体能否平衡主要依赖于下滑力与抗滑力的关系。当与坡体倾向相同的剪应力值大于海底沉积物的抗剪强度时, 就容易形成海底滑坡, 其原理遵循摩尔-库伦破坏准则:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: τ_f 为剪切强度 (相当于发生滑坡时的应力); c' 为有效凝聚力; φ' 为摩擦角; σ 为作用在滑坡面上的总应力; u 为孔隙水压力; $\sigma - u$ 为有效应力。

凝聚力是海洋土的主要力学指标之一, 由于海底沉积物极其松散、含水量高、粘土矿物占比大, 对提供抗滑力的凝聚力 c' 可以不予考虑, 然而海洋土的内摩擦角常常在 20°~38°之间, 对抵制海底沉积物滑动起到了主要的作用。

2012 年本课题组采用十字板剪切试验 (VST) 在珠江口盆地 3 个不同水深测点进行了土层强度测试。获得在海底表层以下深度为 0.5 m 和 1.0 m 处海底沉积物的实测不排水抗剪强度值 (表 2)。

表 2 3 个海底测点土层的剪应力

取样站位编号	水深/m	海水重度 /kN·m ⁻³	土层深度/m	不排水抗剪 强度/kPa
KP33	330	10.3	0.5/1.0	2/2.5
KP28	400	10.3	0.5/1.0	1.7/2.8
KP23	539	10.3	0.5/1.0	1.6/2.8

由表 2 可见海底沉积物的抗剪强度值比较低。

在珠江口盆地海底海洋土的不间断快速堆积作用中可以激发海底水合物形成天然气。受海洋温度、压力作用及海底沉积物质来源的影响, 海底沉积物携带的大量有机物质在海底地形较陡的陡坡区域堆积, 当有机质分解形成的天然气聚集到沉积物中, 导致海底沉积物中孔隙内的压力升高, 使得 (1) 式中的 $(\sigma - u)$ 减小, 从而降低了海底沉积物的剪切强度 τ_f 。

5 结论

(1) 珠江口盆地海底表层的细到中砂饱和容重为 12.7~14.9 kN/m³, 含水量为 164.9%~87.7%。

(2) 珠江口盆地的地层层序从垂直方向可分为 5 套地层层序, I 层以上表层为中等密实的细到中砂; I 层为砂质粉土和粉质细砂夹粉质粘土层; II 层为粉质粉土含有少量砂质粉土、粉土层; III 层为粉质粘土; III 层以下底层为密实到非常密实的细到中砂。

(3) 珠江口盆地海底滑坡大多分布在地形坡度变化较大的陡坡地段附近、大陆架与大陆坡交界的

坡折线附近、大陆架外缘部位、内陆河流在海底形成的三角洲前缘陡坡带、海底大陆坡上部区域以及海底峡谷的陡谷两侧等部位。

(4) 按照海底滑坡的分布地貌单元部位不同, 可将珠江口盆地在水深 160~1 280 m 处发育的滑坡划分为 4 处规模较大的滑坡带, 滑坡带均呈 NE-NEE 向展布。海底滑坡的类型按照滑移面与沉积物层理的交错切割特征, 能够归纳成为顺层型滑坡、圆弧型滑坡和崩塌型滑坡 3 种基本类型。

(5) 珠江口盆地海洋底部滑坡形成的主要原因有地震活动、海流影响和沉积物物质的快速堆积作用。而抵制海底沉积物滑动的主要因素是海洋土的摩擦角。

参 考 文 献

- Elverhoi A, Norem H, Andersen E S, et al, 1997. On the origin and flow behavior of submarine slides on deep-sea fans along the Norwegian-Barents Sea continental margin. *Geo Mar. Lett.*, 17: 119-125.
- Francesco F, 2003. Geological features and landslide mechanisms of an unstable coastal slope. *Engineering Geology*, 255-267.
- Johnson A M, 1970. *Physical Processes in Geology*. Freeman, Cooper. San Francisco, CA, USA, 557.
- Liu K, Wang J H, 2014. A continental slope stability evaluation in the Zhujiang River Mouth Basin in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 33 (11): 155-160.
- Locat J, Lee H J, 2002. Submarine landslides: advances and challenges. *Can. Geotech. J.*, 39: 193-212.
- Maslin M, Naja M, Bilal H, et al, 1998. Sea-level and gas hydrate controlled catastrophic sediment failure of the Amazon Fan. *Geology*, 26 (12): 1107-1110.
- Flemings P B, Long H, Dugan B, et al, 2008. Erratum to "Pore pressure penetrometers document high overpressure near the seafloor where multiple submarine landslides have occurred on the continental slope, offshore Louisiana, Gulf of Mexico". *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 269-283.
- Rothwell R G, Thomson J, Kahler G, 1998. Low-sea-level emplacement of a very large Late Pleistocene megaturbidite in the western Mediterranean Sea. *Nature*, 393 (66): 377-380.
- 鲍才旺, 姜玉坤, 1999. 中国近海海底潜在地质灾害类型及其特征. *热带海洋*, 18 (3): 24-31.
- 陈俊仁, 李廷桓, 1992. 南海北部区域工程地质填图. 第四届工程地质大会论文集 (一). 北京: 海洋出版社, 59-66.
- 陈子桑, 高时友, 陈玲舫, 2015. 珠江口磨刀门水道盐度变化对水文气象要素的频率响应特征. *海洋通报*, 34 (1): 14-20.
- 方文东, 方国洪, 1998. 南海南部海洋环流研究的新进展. *地球科学进展*, 13 (2): 166-167.
- 冯文科, 黎维峰, 1994. 南海北部海底沙波地貌. *热带海洋*, 13 (3): 40-43.
- 李志强, 朱雅敏, 2015. 华南海岸岬间海滩地形动力状态类型研究. *海洋通报*, 34 (2): 181-189.
- 刘锡清, 2006. *中国海洋环境地质学*. 北京: 海洋出版社, 425-435.
- 王洁, 张登荣, 徐瑞松, 2012. 南海北部临震前海表增温异常与油气藏区分布的关系. *国土资源遥感*, 93: 79-84.
- 王尚毅, 李大鸣, 1994. 南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙波动态分析. *海洋学报*, 16 (6): 122-131.
- 吴庐山, 鲍才旺, 2000. 南海东北部海底潜在地质灾害类型及其特征. *南海地质研究*, 12: 87-101.
- 吴时国, 陈姗姗, 王志君, 等, 2008. 大陆边缘深水海底滑坡及其不稳定性风险评估. *现代地质*, 22 (3): 430-436.
- 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等, 2011. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制. *地球物理学报*, 12: 3184-3195.
- 杨敬红, 吴秋云, 周杨锐, 2014. 荔湾 3-1 气田深水段管线路由区工程地质分区与评价. *中国海上油气*, 26 (2): 82-87.
- 杨阳, 李锐祥, 朱鹏利, 等, 2014. 珠江冲淡水季节变化及动力成因. *海洋通报*, 33 (1): 36-44.

(本文编辑: 袁泽轶)