

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2008.06069

# 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征

孙运宝<sup>1</sup>, 吴时国<sup>1</sup>, 王志君<sup>2</sup>, 李清平<sup>2</sup>, 王秀娟<sup>1</sup>, 董冬冬<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1 中国科学院 海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

2 中国海洋石油总公司 北京研究中心, 北京 100029)

**摘要:** 利用二维、三维地震资料, 结合多波束水深测量, 在南海北部白云凹陷发现大型海底滑坡。白云大型海底滑坡可分为滑坡根部、滑坡主体和滑坡前缘 3 个主要部分, 广泛发育滑坡陡壁、滑塌沟谷、滑移面、滑坡台阶等典型滑坡地貌。地震相特征表现为楔状弱振幅杂乱地震相, 块状平行或波状弱振幅中连续地震相, 席状亚平行/波状弱振幅连续地震相, 谷状水平充填中振幅、中连续地震相和丘状/透镜体状前积地震相等 5 种典型地震相特征。初步估算白云海底滑坡范围约为 13 000 km<sup>2</sup>, 滑坡分布受地形和海底沉积物岩性控制, 晚期活动在中更新世。白云大型海底滑坡位于深水油气和天然气水合物的富集区, 对油气和天然气水合物成藏作用和勘探开发具有重要的影响。

**关键词:** 海底滑坡; 变形特征; 大陆坡; 南海北部

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2008)06-0069-09

海底滑坡是将沉积物从陆架坡折带, 经大陆坡向深海盆地运移的最重要的地质过程之一<sup>[1-6]</sup>。陆架边缘和大陆坡区一般具有较大的坡度, 当经历强烈的构造作用时, 极易形成海底滑坡<sup>[7-11]</sup>。随着国内外深水油田开发和深水工程项目的不断增加, 海底滑坡研究已经引起国内外科学家的广泛关注<sup>[12-14]</sup>。一方面, 海底滑坡是一种重要的自然灾害, 它可以改造大陆坡构造环境, 对海洋工程环境造成巨大影响, 严重危害深水油气勘探开发平台、管线、海底电缆等海底设施, 还可能诱发海啸, 对近海地区的生命财产造成威胁<sup>[15-17]</sup>; 另一方面, 海底滑坡又与天然气水合物成藏过程密切相关<sup>[18-23]</sup>, 对水合物富集和分布具有重要的控制作用<sup>[23]</sup>。海底滑坡是大陆坡最重要的一种地质过程, 受滑移块体和碎屑流影响, 其海底地形和内部构造明显不同于其他区域<sup>[24-29]</sup>。

本文采用向中国海洋石油总公司和广州海洋地质调查局申请的白云凹陷高分辨率二维、三维地震资料, 对南海北部陆坡大型海底滑坡(白云海底滑坡)的几何形态和变形特征进行分析, 进而厘定其分布范围。由于我国南海关于海底滑坡的研究尚未展开, 而且本区又是天然气水合物和深水油气的分布区, 地质构造十分复杂, 对其成因机制等问题研究尚不成熟。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876032); 国家高技术研究开发计划项目(2006A A09Z349)

作者简介: 孙运宝(1983—), 男, 博士生, 主要从事海洋地质研究, E-mail: sunyh\_1ocas@163.com

收稿日期: 2008-06-12; 改回日期: 2008-10-23. 周立君编辑

## 1 区域地质背景

白云海底滑坡位于南海北部大陆边缘深水区, 构造上属于珠江口盆地, 大部分位于白云凹陷。该区地处陆架到深海的陆坡过渡带, 水深约 200 ~ 2 000 m, 大部分在 500 ~ 1 500 m 之间, 凹陷面积超过 20 000 km<sup>2</sup>, 是珠江口盆地面积最大、沉积厚度最厚的凹陷。白云凹陷在新生代经历了裂陷期、热沉降期和新构造期 3 个构造演化阶段, 形成了三隆两坳的构造格局, 地形起伏大, 坡度陡<sup>[30-31]</sup>。在裂陷期, 白云凹陷雏形形成, 热沉降期白云主洼快速大幅度沉降, 古珠江三角洲向凹陷搬运沉积, 物源充分<sup>[32]</sup>, 新构造期(上中新世—上新世—第四纪), 构造沉降速度和幅度、沉积速率和幅度继承发育, 且受菲律宾板块新构造期北西西向俯冲影响, 在白云凹陷及其邻区发育大量的晚期断层, 具有海底滑坡发育的构造条件<sup>[33-37]</sup>。通过对白云凹陷地层压力演化研究发现, 现今白云凹陷地层压力在浅水区为常压, 深水区为弱压, 但凹陷内广泛出现的明显底辟构造表明, 该区在晚期很可能经历过超压释放作用<sup>[38]</sup>, 具有海底滑坡发育的压力条件。珠江为珠江口盆地提供了充足的物源, 沉积速率高达 160 cm/ka<sup>[39-41]</sup>, 具有重力负荷触发滑坡的地质条件; 区内重力流、底流侵蚀发育, 有利于滑坡碎屑的运移, 同时, 塑造了白云深水陆坡区独特的海底地貌, 特别是陆坡区向海盆方向水深急剧变化, 峡谷纵横, 水道复杂, 形成非常崎岖的海底地形地貌(图 1)。

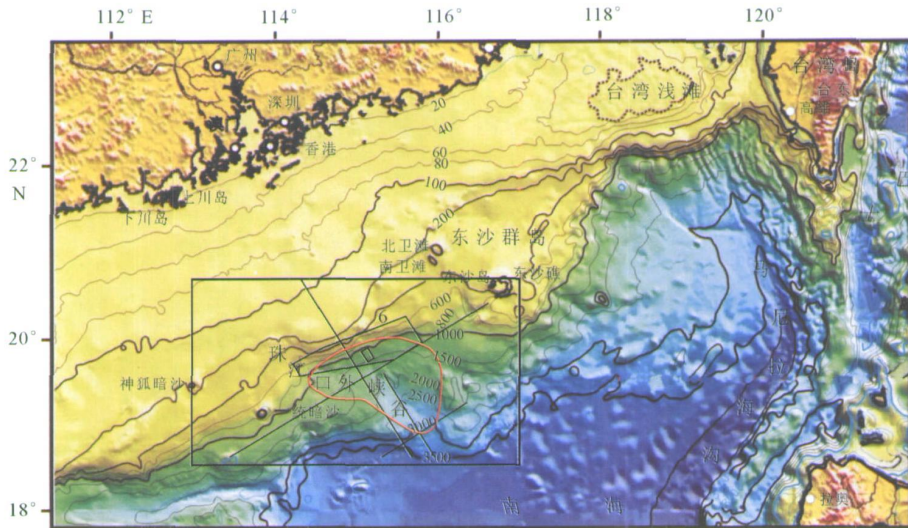


图1 南海北部陆坡海底地形地貌及白云海底滑坡分布范围  
(外方框指示图2的位置, 直线代表测线, 内框分别代表二维工区和三维工区)

Fig. 1 The submarine morphology of north continental slope and the distribution of Baiyun landslide in South China Sea

董冬冬等结合珠江口盆地深水区现有的地震层序资料, 并参考 2004 年国际地层表, 重新编制了珠江口盆地的综合地层年代表(表 1)<sup>[42]</sup>, 认为白云凹陷所在的珠江口盆地共发育 8 套地震层序, 由上到下依次为第四系、万山组、粤海组、韩江组、珠江组、珠海组、恩平组和文昌组。文昌组和恩平组分别发育河湖相沉积和大型湖盆沉积, 是主要的烃源岩层<sup>[43-44]</sup>。珠海组发育了大型的浅海陆架沉积, 珠江组和韩江组发育陆坡深水沉积。粤海组受东沙运动影响呈现多处海侵现象, 该时期陆架坡折带向北迁移到番禺低隆起北侧, 只有很少量的细粒或泥质沉积物通过白云凹陷西北缓坡进入到深水区, 白云凹陷的沉积速率大大降低<sup>[45]</sup>。由于引起深水钻井灾害的海底滑坡多发生于深水区浅部地层, 因而本文主要对研究区浅层地质特征进行了分析。分析认为白云海底滑坡主要存在于渐新世以来的地层中, 本文对此开展了细致的研究。

## 2 几何形态和变形特征

结合由多波束精密测深获取的白云凹陷海底地形图, 白云海底滑坡可分为 3 个明显的部分: 滑坡根部、滑坡主体和滑坡前缘(图 2)。2007 年 4—6 月, 中国地质调查局首次组织实施了南海天然气水合物钻探工程, 为白云凹陷神狐海区海底滑坡的研究提供了大量的三维地震资料。

### 2.1 滑坡根部

表 1 珠江口盆地综合地层年代表<sup>[42]</sup>

Table 1 Cenozoic stratigraphical timetable in Zhujiangkou(Pearl River Mouth) Basin

| 地层                 | 组                   | 年代   | 地震反射层          | 构造运动   | 珠江口海平面变化曲线 | 全球海平面变化曲线 |
|--------------------|---------------------|------|----------------|--------|------------|-----------|
| 第四系                | 更新统 Q               |      |                |        |            |           |
|                    | 上新统 N <sub>1w</sub> | 2.6  | T <sub>0</sub> |        |            |           |
| 新近系 N              | 万山组 N <sub>1w</sub> | 5.3  | T <sub>1</sub> | 东沙运动   |            |           |
|                    | 粤海组 N <sub>1y</sub> | 10.5 | T <sub>2</sub> |        |            |           |
|                    | 韩江组 N <sub>1y</sub> | 16.5 | T <sub>1</sub> |        |            |           |
|                    | 珠江组 N <sub>1z</sub> | 23   | T <sub>0</sub> | 白云运动   |            |           |
| 渐新统 E <sub>3</sub> | 珠海组 E <sub>3z</sub> | 32   | T <sub>7</sub> | 南海运动   |            |           |
|                    | 恩平组 E <sub>3e</sub> | 40   | T <sub>8</sub> | 珠琼运动二幕 |            |           |
| 始新统 E <sub>1</sub> | 文昌组 E <sub>1w</sub> | 50   | T <sub>0</sub> | 珠琼运动一幕 |            |           |
| 前新生代基底             |                     |      |                |        |            |           |

滑坡根部是滑坡开始形成的部位, 为变形薄弱带, 当遭受地震或天然气水合物分解等因素触发时, 地质体便开始沿该带发生破裂, 并向下滑移, 与触发机制相适应, 此部位多发育张性构造, 如滑坡陡壁、滑塌沟谷、滑坡台阶、犁式断裂等。

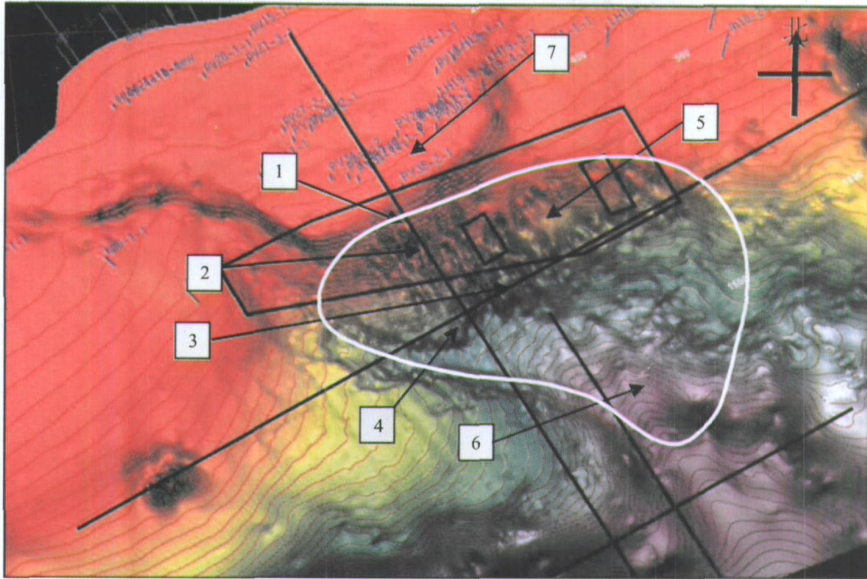


图 2 南海北部白云海底滑坡的地貌形态与构成<sup>[46]</sup>

1. 滑坡陡壁; 2. 滑塌沟谷; 3. 发生变形滑坡体; 4. 未变形滑坡体; 5. 滑坡台阶; 6. 沉积物流; 7. 陆架坡折  
 Fig. 2 Morphology and constitution of Baiyun landslide in the north of the South China Sea

滑坡陡壁指滑坡后留下的断层崖, 在多波束测深获取的海底地貌图和地震剖面图像上可以很清楚地看到。这些断层崖是上陆坡常见的地貌特征, 滑坡陡壁根据其位置可分为滑坡后壁和侧壁。滑坡后壁位于滑坡的后侧, 大致平行于陆坡, 高约数米到数十米(图 3a), 而侧壁位于滑坡的两侧, 大致垂直于陆坡延伸, 长达数千米至数百千米不等(图 4a)。

滑塌沟谷指滑坡后壁和滑坡体之间的不对称沟谷, 靠滑坡后壁较陡, 靠滑坡体一侧较缓, 且呈弧形

分布, 谷深几米至几百米不等。常发育海沟、冲蚀谷、海丘等微地貌(图 2, 图 4)。

滑坡台阶是受滑坡体张性拖曳产生的多级台阶构造, 台阶顶面多与陆坡平行, 内部构造一般未发生变形。发育冲刷海槽、海底断块等微地貌(图 2, 图 4)。

犁式断裂是一种向下倾角变缓, 以至倾角变平, 总体上呈上陡下缓的犁式形态的断裂, 多发育于滑坡根部(图 3)。犁式断裂的存在表明滑坡产生时具有张性特征, 牵引着上部碎屑物向下滑动。

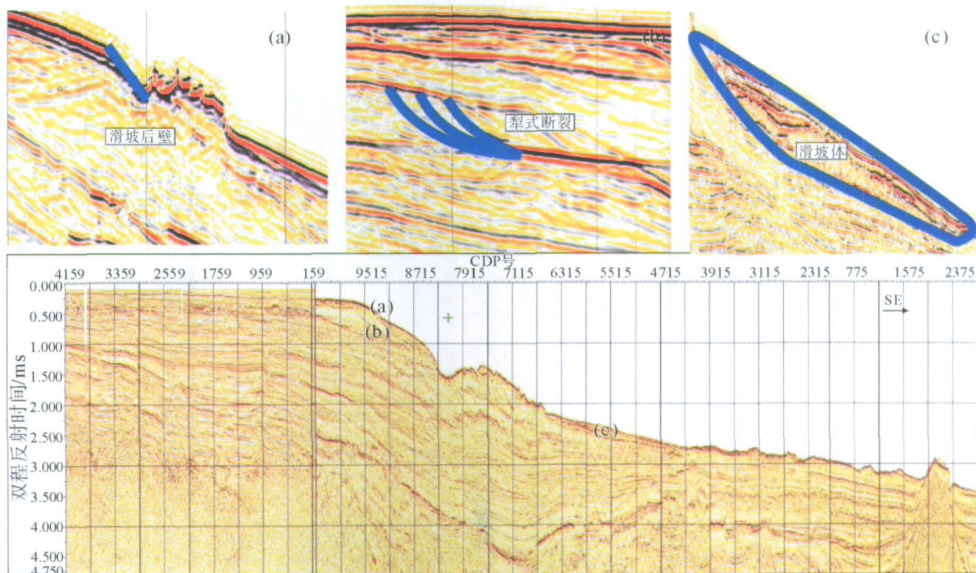


图 3 南海北部白云海底滑坡根部及其滑坡体地震剖面(平行滑坡方向)

Fig. 3 Profile section along the landslide in the north of the South China Sea

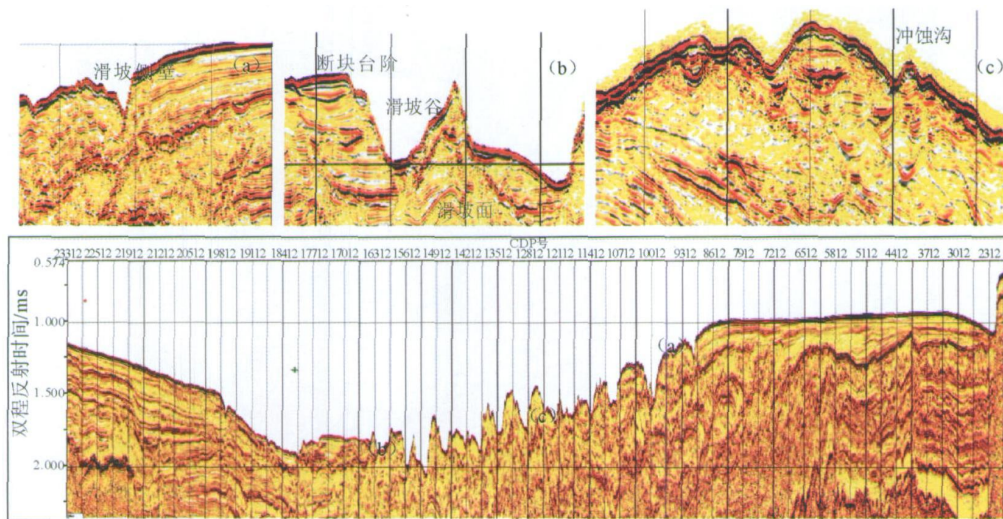


图 4 南海北部白云滑坡根部地震剖面(垂直滑坡走向)

Fig. 4 Profile section across the Baiyun landslide in the north of the South China Sea

地震资料显示滑坡根部具有极为复杂的内部构造,坡度约为  $6^{\circ} \sim 14.5^{\circ}$ 。主要有以下 4 种地震相:  
 (1)楔状弱振幅杂乱地震相,位于斜坡下部,外形呈丘状,以杂乱反射结构为重要特征,反映不稳定杂乱堆积的产物;  
 (2)块状平行或波状弱振幅中连续地震相,与滑坡体内部滑脱断层发育有关,受滑脱断层的切割沿斜坡呈明显的阶梯状下滑,外形呈块状或丘状,内部以平行、波状或丘状反射结构为特征,反映不稳定块体的快速滑动;  
 (3)丘状/透镜体状前积地震相,大型前积反射结构特征,透镜状或丘状外形,多出

现于早期的滑坡体,反映滑坡体形成后的后期沉积;  
 (4)谷状水平充填中振幅、中连续地震相,剖面上以顶平底凸的谷状外形为特征,内部为水平充填反射结构,反映滑坡体对海底沟谷的填充掩埋作用(图 5)。

### 2.2 滑坡主体

滑坡主体是白云海底滑坡的主要部分,呈丘状展布(图 2)。在靠近滑坡根部的部位一般遭受强烈的变形,但也存在内部层序完整的区域,这主要是由于当滑坡根部的滑块迅速滑至该部位时,局部压实

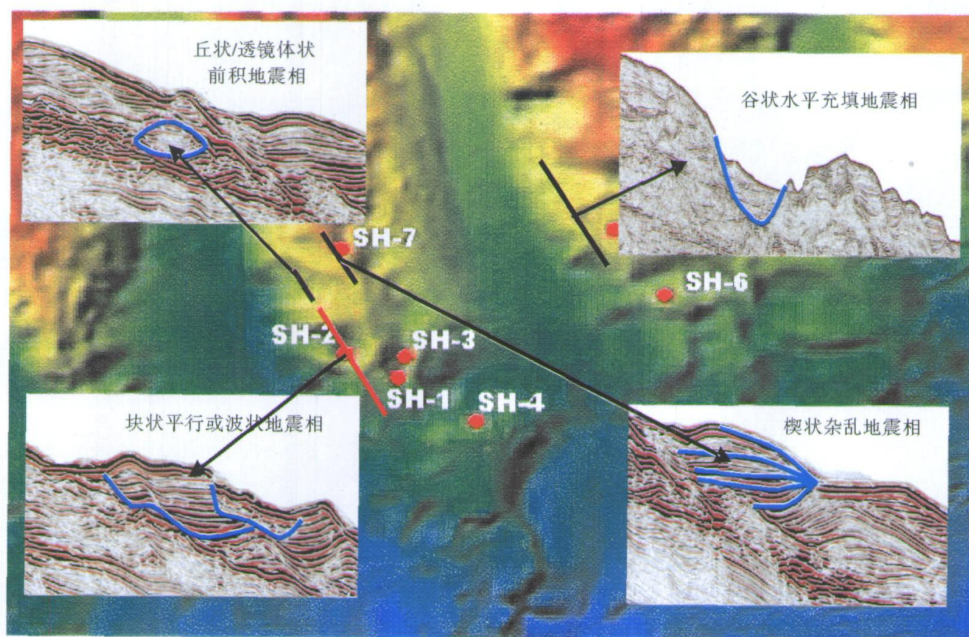


图 5 三维地震资料显示的南海北部白云滑坡体地震相特征(图 1 中三维区域)<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Seismic facies character of Baiyun landslide in the north of the South China Sea

较好的地质体未来得及变形便迅速下滑至前端, 导致地质体内部层序来不及发生变形, 在地震剖面上, 该部位反射杂乱, 呈强振幅, 推测主要由混杂沉积物组成。在靠近深海盆地一侧, 地层几乎未发生变形, 反射波波形稳定, 连续性较好, 呈中振幅反射, 推测该部位主要为滑坡作用推进的陆源碎屑物质和连续沉积的深海沉积物(图 5)。

贯穿滑坡主体底部存在一条明显的分界面, 称之为滑移面, 其为位于滑坡下部的一套沉积物液化和饱含流体活动的地层, 是海底滑坡体向下运动的滑脱构造面, 它贯穿整条地震剖面, 将滑坡体与下部未变形底层分开(图 3), 是判断滑坡存在的重要依据。在白云滑坡滑移面下面, 地层未受影响, 而上部滑坡体则发生严重变形或保持原有层位, 变形程度与其压实程度有关。垂直于测线方向的块体迁移非常小, 具有相似振幅特征的地震体沿测线收敛, 滑移面为不整合面, 呈 NE—SW 走向, 据此推断滑移面处大多数缺失的地层很可能沿 NE—SW 向消亡于深海盆地。

滑坡主体处坡度较滑坡根部明显降低, 小于  $6^{\circ}$ 。地震相继承了滑坡根部的楔状弱振幅杂乱地震相, 谷状水平充填中振幅、中连续地震相, 丘状/透镜体状前积地震相特征, 部分发育有席状亚平行/波状弱振幅连续地震相。席状地震相以波状-亚平行反射结构为特征, 外形呈丘状、席状, 反映了滑坡体逐渐向深水区的不断推进(图 5)。值得一提的是, 在滑坡中部发育有大量侵入体, 该现象在 Storage 地区也被发现, 很可能为滑坡形成的一种诱因。

### 2.3 滑坡前缘

沉积物流堆积体是滑坡体向深海盆地推进、挤压, 转变至沉积物流后形成的, 常呈串珠状向深海延伸, 一般距离滑坡体较远, 单个堆积体往往呈丘状或舌状展布, 受挤压作用影响, 沉积体内部多发育正断层、泥火山等各种复杂的挤压构造(图 6)。

在地震剖面上, 滑坡前缘深入到深海盆地, 外部形态最为简单, 是坡度最小的部分, 坡度一般小于  $3^{\circ}$ 。地震相以席状亚平行/波状弱振幅连续地震相为主, 以平行、亚平行反射结构为特征, 外形呈席状、丘状, 反映了滑坡体逐渐向深海平原消亡的过程。

## 3 分布范围和形成时间

### 3.1 分布范围

白云大型海底滑坡位于南海北部陆缘, 跨越陆架边缘、陆坡和深海平原, 海底地形较为复杂, 总体由北向南倾斜, 水深从 200 m 逐渐加深到 1 700 m 以上, 整体坡度变化较大。调查区地形以 1 350 m 等深线为界, 可分为南北两部分, 1 350 m 水深线以北地区, 水体较浅, 地形较缓, 海底坡度一般在  $2^{\circ}$  左右, 调查区北部从西向东发育 3 个近南北向的海底沟槽, 深度较大; 1 350 m 以南地区水体较深, 地形较陡, 海底坡度最大可达  $14.5^{\circ}$ , 水深最深达 1 750 m, 海底等深线较调查区北部相对密集, 走向近东西向, 逐渐进入深海平原。

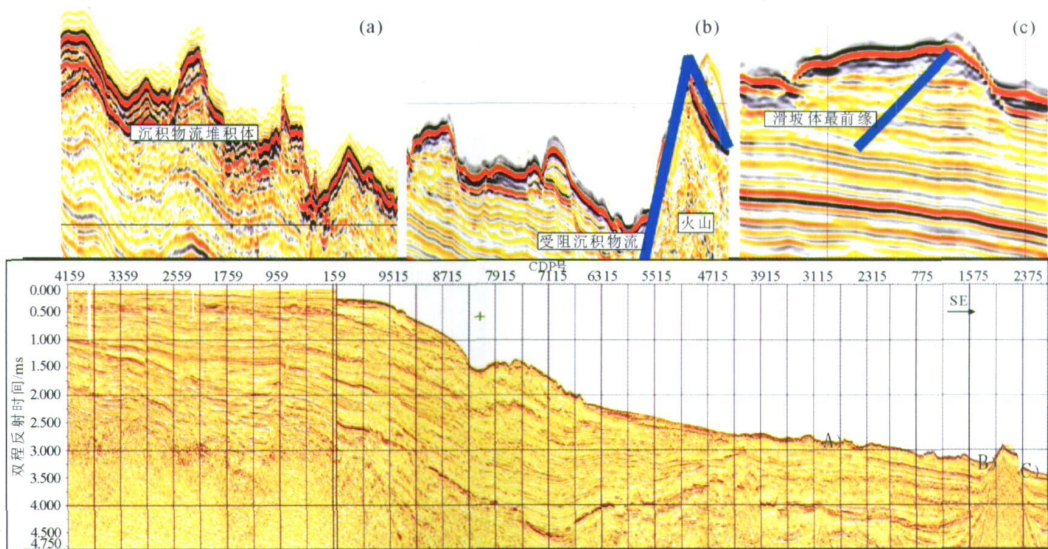


图 6 南海北部白云滑坡前缘地震纵剖面(平行滑坡走向)

Fig. 6 Seismic facies character of the front of Baiyun landslide in the north of the South China Sea

白云大型海底滑坡受构造、沉积等综合因素的影响,主要在水深700~1300 m的陆架陆坡过渡带开始形成,沿构造薄弱带(陡崖、滑坡面)由北西向东南发生滑移,在深海平原消亡。结合上文提到的海底滑坡各识别特征,再参考区域地质资料,圈定了白云大型海底滑坡的范围,推测可能存在滑坡的范围达13000 km<sup>2</sup>。滑移过程主要受地形和海底沉积物岩性控制,外形呈马蹄形,通过地震剖面解释圈定的滑坡区域与地形地貌图上的水深剧变区、地形急转区具有很好的对应关系。滑坡根部位于白云海域西北部的陆坡过渡带,沿多条海底沟谷向东南方向延伸,总体坡度约6°~14.5°;滑坡中部分布于白云凹陷内部及其邻近海域,受两侧陡峭地形控制,向东南方向收拢,总体坡度约3°~6°;滑坡前缘为滑坡体的堆积、消亡处,在此处由上游堆积的滑塌体向深海平原汇集,坡度小于3°,由于重力作用的消失,海底滑坡消亡于深海平原。

### 3.2 形成时间

由于缺少岩心精确的测年资料,本文利用高分辨率的层序地层学资料对白云海底滑坡形成时间进行初步的讨论。由地震剖面不难看出,白云凹陷曾经历过多次海底滑坡现象,二维地震资料显示白云海底滑坡自中新世晚期便开始广泛发育,在粤海组多处可见明显的滑坡遗迹,而该时期恰逢东沙运动,构造运动很可能导致了滑坡体的形成;三维高分辨率地震资料也揭示了类似的现象,另外,三维地震资料还显示上新统滑坡构造多形成于中新统的水下三角洲沉积体系之上,高渗透率砂体的存在很可能产生异常超压,异常超压的释放很可能导致了该时期海底滑坡的形成。晚期滑坡广泛发育于第四系,这一时期白云海域并未发生过大的构造变动,但最新研究资料表明,该区存在大量的水合物资源,且在滑坡构造广泛发育的神狐海域已成功钻取天然气水合物样品,推测该时期的海底滑坡极有可能与水合物分解相关。综上所述,本文认为白云海底滑坡自中新世便开始形成,中间有多次中断,最新的滑坡体形成于第四纪,具体的时间还需要采集滑坡体的岩心资料来加以断定。

## 4 结论

(1)白云海底滑坡位于南海北部陆坡区,呈北西-南东向消亡于深海平原,外形呈马蹄形,坡度范围为1°~14.5°,由滑坡根部至滑坡前缘逐渐变缓。

(2)白云海底滑坡具有独特的地形地貌及地震相特征。在滑坡根部,构造复杂,变形强烈,滑坡陡壁、滑坡台阶、滑塌谷、犁式断裂等张性构造发育,并伴随有冲蚀沟、海底沟谷、冲刷海槽、反坡向台坎、海丘等微地貌,地震相特征以楔状弱振幅杂乱地震相、块状平行或波状弱振幅中连续地震相,谷状水平充填中振幅、中连续地震相和丘状/透镜体状前积地震相为主;滑坡中部主要发育丘状滑坡体,构造变形程度相对较低,在海底出现冲刷海槽、断块台阶、陡坡、冲蚀沟、海丘等复杂微地貌;地震相特征以楔状弱振幅杂乱地震相、块状平行或波状弱振幅中连续地震相、席状亚平行/波状弱振幅连续地震相为主;在滑坡体变形前缘,构造相对简单,主要发育沉积物流堆积体和逆冲断层,地震相特征以席状亚平行/波状弱振幅连续地震相为主。另外,在整个滑坡区还存在明显的沉积物的薄弱或破坏带、滑移面,滑移面一般起始于犁式断裂,下部为大范围未受滑坡影响底层,在剖面上为强振幅波阻抗界面。利用海底滑坡的识别特征,再结合区域地质资料,圈定了白云大型海底滑坡的范围,推测可能存在滑坡的范围达13000 km<sup>2</sup>。

(3)白云海底滑坡分布在我国天然气水合物和深水油气资源十分富集的白云凹陷,从国外深水油气勘探和开发的进程来看,海底滑坡作为一种重要的地质灾害不容忽视。最新研究表明,海底滑坡还与油气成藏、水合物成矿具有密切的关系。白云大型海底滑坡的研究必将会引起工业界和科研工作者的广泛关注。

### 参考文献(References)

- [1] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides[J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34(1): 33-59.
- [2] Locat J, Lee H J. Submarine landslide: advances and challenges[J]. *Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 193-212.
- [3] Kristoffersen Y, Coakley B J, Hall J K, et al. Mass wasting on the submarine Lomonosov Ridge, central Arctic Ocean[J]. *Marine Geology*, 2007, 243: 132-142.
- [4] Vanneste M, Mienert J, Bünz S. The Hinlopen Slide: A giant submarine slope failure on the northern Svalbard margin, Arctic Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245: 373-388.
- [5] Imbo Y, Batist M D, Canals M, et al. The Gebra Slide: a submarine slide on the Trinity Peninsula Margin, Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2003, 193: 235-252.
- [6] Haflidason H, Sejrup H P, Nygard A, et al. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development[J]. *Ma-*

- rine Geology, 2004, 213: 201-234.
- [7] Bünz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 209: 291-307.
- [8] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project [J]. Marine Geology, 2004, 213: 9-27.
- [9] Wilson C K, Long D, Bulat J. The morphology, setting and processes of the Afen Slide [J]. Marine Geology, 2004, 213: 149-167.
- [10] Urgeles R, Leynaud d, Lastras G, et al. Back-analysis and failure mechanisms of a large submarine slide on the Ebro slope NW Mediterranean [J]. Marine Geology, 2006, 226: 185-206.
- [11] Sultan N, Voisset M, Marsset B et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta [J]. Marine Geology, 2007, 237: 169-190.
- [12] 吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 693-714. [WU Shi-guo, YUAN Sheng-qiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693-714.]
- [13] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区-南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域 [J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21. [ZHANG Gong-cheng, MI Li-jun, WU Shi-guo, et al. Deep-water area- the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21.]
- [14] 何仕斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水区储层类型及沉积演化 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 51-56. [HE Shi-bin, ZHANG Gong-cheng, MI Li-jun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 51-56.]
- [15] 刘锡清, 刘守全, 王圣洁, 等. 南海灾害地质发育规律初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 12-16. [LIU Xi-qing, LIU Shou-quan, WANG Sheng-jie et al. Preliminary study on the distribution of hazardous geology in South China Sea and its formation regulations [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 12-16.]
- [16] 吴时国, 赵汗青, 伍向阳, 等. 深水钻井安全的地质风险评价技术研究 [J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 77-80. [WU Shi-guo, ZHAO Han-qing, WU Xiang-yang. The research of geohazards estimation technique on deep-water wells [J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 77-80.]
- [17] 董冬冬, 赵汗青, 吴时国, 等. 深水钻井中浅水流灾害问题及其地球物理识别技术 [J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 114-120. [DONG Dong-dong, ZHAO Han-qing, WU Shi-guo et al. SWF problem in deepwater drilling and its geophysical detection techniques [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(1): 114-120.]
- [18] Thiem R, Berntsen J, Eldevik T, et al. Gas exploration beyond the shelf break: An oceanographic challenge [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21: 136-141.
- [19] Brown H E, Holbrook W S, Hornbach M J, et al. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga Slide, offshore Norway [J]. Marine Geology, 2006, 229: 179-186.
- [20] 张树林. 珠江口盆地白云凹陷天然气水合物成藏条件及资源量前景 [J]. 中国石油勘探, 2007(6): 23-27. [ZHANG Shu-lin. Accumulation conditions and prospect for natural gas hydrate resources in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2007(6): 23-27.]
- [21] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲, 等. 南海北部陆坡海底异常地貌特征与天然气水合物的关系 [J]. 南海地质研究, 2003(14): 29-34. [SHA Zhi-bin, YANG Mu-zhuang, LIANG Jin, et al. The characteristics of the abnormal physiognomys of seabed related to gas hydrate in north slope South China Sea [J]. Geological South China Sea, 2003(14): 29-34.]
- [22] 吴时国, 姚根顺, 董冬冬, 等. 南海北部陆坡大型气田天然气水合物的成藏地质构造特征 [J]. 石油学报, 2008, 29(3): 324-328. [WU Shi-guo, YAO Gen-shun, DONG Dong-dong, et al. Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field of the northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 324-328.]
- [23] 吴时国, 姚伯初. 天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 16-20. [WU Shi-guo, YAO Bo-chu. Analysis of Geology Tectonic and Evaluation to Gas Hydrate Resources [M]. Beijing: Science Press, 2008: 16-20.]
- [24] Gee M J R, Uy H S, Warren J, et al. The Brunei slide: A giant submarine landslide on the North West Borneo Margin revealed by 3D seismic data [J]. Marine Geology, 2007, 246: 9-23.
- [25] Haflidason H, Lien R, Sejrup H P, et al. The dating and morphometry of the Storegga Slide [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 123-136.
- [26] Hjelstuen B O, Eldholm O, Faleide J I. Recurrent Pleistocene mega-failures on the SW Barents Sea margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 258: 605-618.
- [27] Mohn D, Marr J G. Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 883-899.
- [28] Silva A J, Baxter C D P, LaRosa P T, et al. Investigation of mass wasting on the continental slope and rise [J]. Marine Geology, 2004, 203: 355-366.
- [29] Solheim A, Berg K, Forsberg C F, et al. The Storegga Slide complex: repetitive large scale sliding with similar cause and development [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 97-107.

- [30] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. [GONG Zai-sheng, LI Si-tian. Preliminary Analysis of Basins and Petroleum Accumulation in the Northern Continental Margin Basin of South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [31] 朱伟林, 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质 [M]. 北京: 石油工业出版社 2007. [ZHU Wei-lin, ZHANG Gong-cheng, YANG Shao-kun, et al. Gas Geology in the Northern Continental Margin Basin of South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.]
- [32] 米立军, 张功成, 沈怀磊, 等. 珠江口盆地深水白云凹陷始新统一下渐新统沉积特征 [J]. 石油学报, 2008, 29(1): 29-33. [MI Li-jun, ZHANG Gong-cheng, SHEN Huai-lei, et al. Eocene-lower Oligocene sedimentation characteristics of Baiyun Sag in the deep water area of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 29-33.]
- [33] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析 [J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 52-61. [CHEN Han-zong, WU Xiang-jie, ZHOU Di, et al. Mesozoic faults in Zhujiang River mouth basin and their geodynamic background [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 52-61.]
- [34] 吴能友, 曾维军, 宋海斌, 等. 南海区域构造沉降特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 56-65. [WU Neng-you, ZENG Wei-jun, SONG Hai-bin, et al. Tectonic subsidence of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(1): 56-65.]
- [35] 李文勇, 李东旭. 中国南海不同板块边缘沉积盆地构造特征 [J]. 现代地质, 2006, 20(1): 19-29. [LI Wen-yong, LI Dong-xu. Tectonic characteristics on the sedimentary basins with different plate margins in the South China Sea [J]. Geoscience, 2006, 20(1): 19-29.]
- [36] 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 489-498. [SUN Zhen, PANG Xiong, ZHONG Zhi-hong, et al. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 489-498.]
- [37] 孙龙涛, 陈长民, 詹文欢, 等. 珠江口盆地断层封堵特征及其影响因素 [J]. 石油学报, 2007, 28(4): 36-40. [SUN Long-tao, CHEN Chang-min, ZHAN Wen-huan, et al. Characteristics and influencing factors of fault sealing in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 36-40.]
- [38] 石万忠, 陈红汉, 陈长民, 等. 珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(2): 229-236. [SHI Wan-zhong, CHEN Hong-han, CHEN Chang-min, et al. Modeling of pressure evolution and hydrocarbon migration in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(2): 229-236.]
- [39] 柳保军, 袁立忠, 申俊, 等. 南海北部陆坡古地貌特征与13.8 Ma以来珠江深水扇 [J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 476-482. [LIU Bao-jun, YUAN Li-zhong, SHEN Jun, et al. Northern continental slope palaeogeomorphology and deep-water fan system response of Pearl River since 13.8 Ma, South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 476-482.]
- [40] 邵磊, 庞雄, 陈长民, 等. 南海北部渐新世末沉积环境及物源突变事件 [J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1022-1031. [SHAO Lei, PANG Xiong, CHEN Chang-min, et al. Terminal Oligocene sedimentary environments and abrupt provenance change event in the northern South China Sea [J]. Advances in Earth Science, 2007, 34(6): 1022-1031.]
- [41] 谭文化. 海南岛周边海域底质碎屑矿物分布及其物源分布 [D]. 中国地质大学(北京), 2007. [TAN Wen-hua. Study on the distribution and origin of the seafloor detrital minerals in the offshore water of Hainan Island [D]. China University of Geosciences(Beijing), 2007.]
- [42] 董冬冬, 吴时国, 张功成, 等. 南海北部深水盆地的裂陷过程及裂陷期延迟机制探讨 [J]. 科学通报, 2008, 53(19): 2342-2351. [DONG Dong-dong, WU Shi-guo, ZHANG Gong-cheng et al. Rifting process and formation mechanisms of syn-rift stage prolongation in the deepwater basin, northern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19): 2342-2351.]
- [43] 傅宁, 米立军, 张功成. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因 [J]. 石油学报, 2007, 28(3): 32-38. [FU Ning, MI Li-jun, ZHANG Gong-cheng. Source rocks and origin of oil and gas in the northern Baiyun Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 32-38.]
- [44] 米立军, 张功成, 傅宁, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡-番禺低隆起油气来源及成藏分析 [J]. 中国海上油气, 2006, 18(3): 161-168. [MI Li-jun, ZHANG Gong-cheng, FU Ning, et al. An analysis of hydrocarbon source and accumulation in Panyu low-uplift and north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(3): 161-168.]
- [45] 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 167-177. [PANG Xiong, CHEN Chang-min, SHI He-sheng, et al. Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 167-177.]
- [46] Totland A, God O R. Beam: an interactive GIS application for acoustic abundance estimation [C]//Proceedings of the 1st international symposium on GIS in fishery science. 2001: 195-201.
- [47] Zhang H, Yang S, Wu N. GMGS-1 Science team: China's first gas hydrate expedition successful. Fire in the Earth [J]. Methane Hydrate Newsletter, 2007(1): 4-8.



## THE GEOMETRY AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BAIYUN SUBMARINE LANDSLIDE

SUN Yun-bao<sup>1</sup>, WU Shi-guo<sup>1</sup>, WANG Zhi-jun<sup>2</sup>, LI Qing-ping<sup>2</sup>,  
WANG Xiu-juan<sup>1</sup>, DONG Dong-dong<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 CNOOC Research Centre, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Using the recent seismic data and multi-beam bathymetric map, a large-scale landslide is discovered in Baiyun depression in the north margin of South China Sea, which is called “Baiyun landslide”. Baiyun landslide is composed of three obvious parts, namely landslide root, landslide body and landslide front. This landslide shows five seismic facies: wedge weak-amplitude disorder facies, massive weak-amplitude parallel/wavy facies, drape low-amplitude parallel/wavy facies, filling medium-amplitude facies and mound/lens foreset facies. According to geography and lithology characters of seafloor sediments, the distribution of Baiyun landslide which is about 13 000 km<sup>2</sup> is delineated. Because of the location in the area of deep-water hydrocarbon and gas hydrate, Baiyun landslide is significant to the exploration and development of oil, gas and hydrate.

**Key words:** submarine landslide; sedimentary deformation; continental slope; South China Sea