中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 10 期: 1533 ~ 1543
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

南海北部陆坡地震地貌及深水重力流沉积过程主控因素

李磊[①*], 王英民[②], 徐强[③], 赵靖舟[①], 李冬[③]

① 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065;
② 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249;
③ 中国海洋石油总公司研究总院, 北京 100027
* E-mail: lilei002@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-10-12; 接受日期: 2012-05-17
国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB219407)和国家自然科学基金(批准号: 40572067)资助

摘要 南海北部白云凹陷第四系陆坡具有复杂的陆坡地形特征, 发育丰富的深水重力流沉积. 基于近海底的高分辨率三维地震资料和成像技术开展陆坡地震地貌及深水重力流沉积过程研究. 南海北部第四系陆坡发育规模较大的坡内盆地, 属于非均衡陆坡, 侵蚀、滑塌以及沉积作用使陆坡趋于均衡. 上陆坡位于陆坡均衡面之上, 主要以侵蚀和滑塌作用为主, 发育滑块和侵蚀水道. 坡内盆地位于陆坡均衡面之下, 发育的陆坡可容空间为重力流提供大量沉积场所, 发育朵体. 白云凹陷第四系陆坡受重力流供给量、重力流持续时间、海底地形、陆坡均衡面及可容空间因素影响, 发育滑塌-侵蚀水道-朵体沉积体系. 陆坡地形对深水重力流沉积过程及沉积体系分布具有重要的影响, 深水重力流沉积过程及产物也重新塑造了陆坡地形形态. 研究陆坡地形与重力流之间的相互作用有利于预测重力流沉积分布及沉积物品质变化.

关键词
地震地貌
深水
重力流
沉积过程
南海

由于勘探和开发成本的增加以及勘探目标日益复杂, 三维地震数据是降低风险的有用工具之一. 世界深水盆地勘探和开发所获得的高分辨率三维地震资料促进了深水沉积研究. 近 20 多年地球物理成像技术的发展使得对现代海底和近海底的深水沉积体系和沉积过程的观测成为可能[1~5]. 地震地貌学是指利用三维地震成像技术来研究盆地地形及沉积体系的方法[6]. 通过地震地貌分析, 可以对沉积体系进行识别、解释和预测[4,6~11]. 海洋深水沉积一直是沉积学研究的热点领域, 复杂陆坡地形条件下深水重力流沉积过程研究是当前和今后深水沉积研究的热点和难点[5,12~14]. 南海北部陆坡区发育丰富的深水沉积体系[15~17]. 南海北部陆坡区受裂陷期拉张作用的影响具有复杂的陆坡地形, 陆坡地形强烈的影响深水重力流的流动过程和沉积物分布. 本文利用白云凹陷近海底 4500 km^2 的高分辨率三维地震数据对第四系陆坡地形及深水重力流沉积过程主控因素进行研究. 该项研究对南海北部深水沉积地层的油气勘探具有重要的指导意义. 利用高分辨率三维地震资料开展海底古地貌及深水沉积过程主控因素研究, 已成为深水沉积研究的热点和新的分支学科生长点[4~9].

英文引用格式: Li L, Wang Y M, Xu Q, et al. Seismic geomorphology and main controls of deep-water gravity flow sedimentary process on the slope of the northern South China Sea. Sci China Earth Sci, 2012, 55: 747–757, doi: 10.1007/s11430-012-4396-1

1 区域地质背景及地震数据

白云凹陷位于南海北部陆坡区, 是珠江口盆地最大的凹陷. 水深 200~2000 m, 面积约 2.1×10^4 km^2, 沉积厚度大于 11 km(图 1(a)). 白云低凸起将白云凹陷分成白云主凹和荔湾凹陷两部分, 白云主凹宽约 80 km, 荔湾凹陷宽约 70 km(图 1(b)). 白云主凹两边断层活动持续时间较长. 白云凹陷在纵向上具有断陷、断坳、坳陷三层盆地结构[18]. 23.8 Ma 以前, 白云凹陷为浅海陆架环境, 之后转为陆坡深水环境[19]. 23.8 Ma 之后的白云凹陷是南海北部陆坡发育的大规模坡内盆地(intraslope basin)之一. 21 Ma 以来, 白云深水区发育多套深水扇[20~22].

研究区位于白云主凹, 勘探程度较低, 有 2 块三维地震资料, 工区总面积 4500 km^2(图 1(a)). 由于第四系埋藏浅, 沉积地层的地震频带较宽 3~80 Hz, 近海底地震主频 45 Hz. 高分辨率三维地震数据及成像技术为认识和推测第四系陆坡深水沉积体系及其主控因素提供了良好条件. 本文主要利用白云凹陷研究区第四系高分辨率三维地震数据对滑塌-侵蚀水道-朵体沉积体系的主要控制因素进行分析.

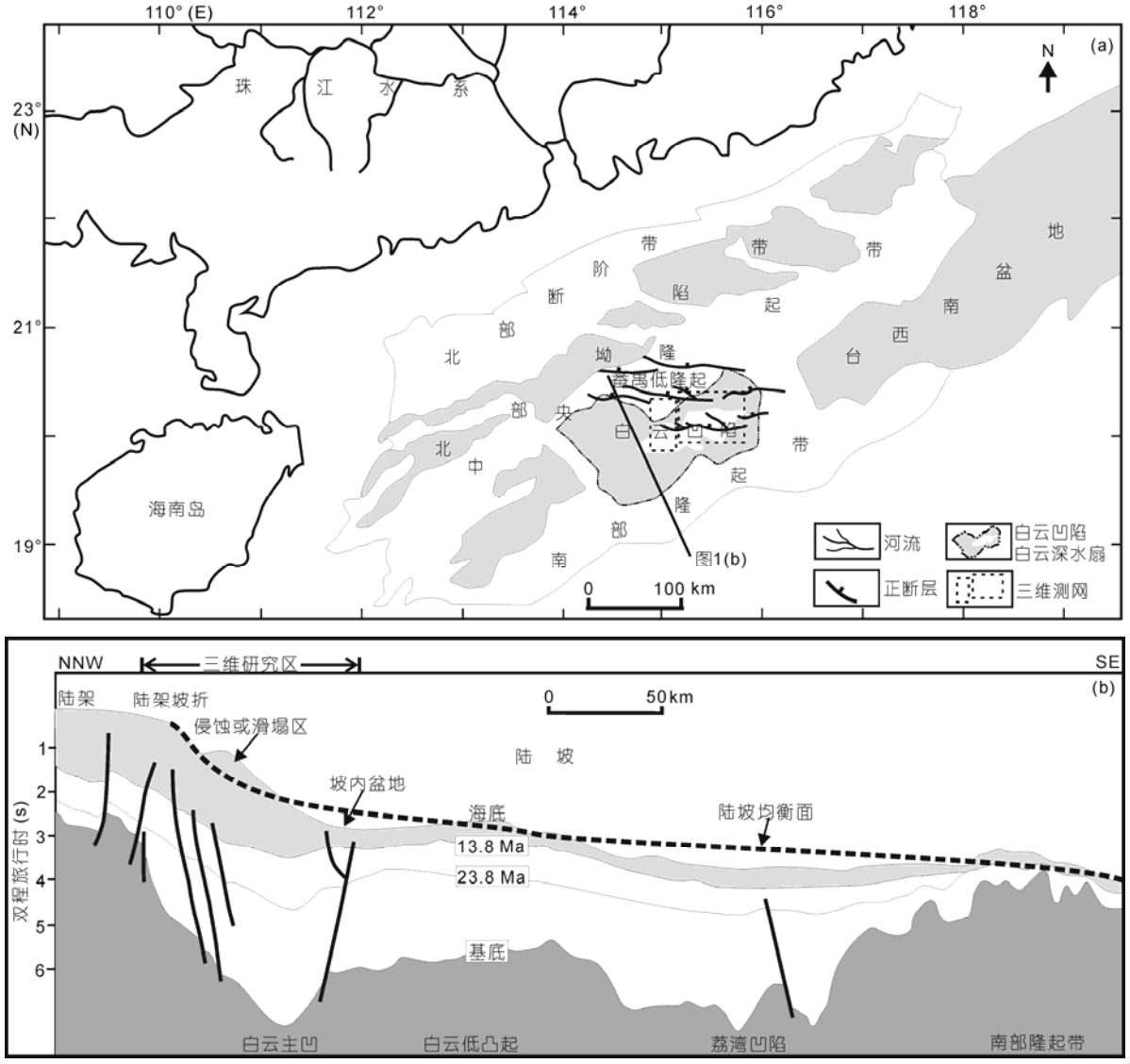


图 1 白云凹陷位置图(a)及区域地质剖面(b)

2　白云凹陷陆坡地形特征

白云凹陷位于南海北部陆坡区, 新近纪以来广泛发育陆坡深水重力流沉积[20~22]. 三维研究区位于白云凹陷的白云主凹(图 1(b)). 受 23.8 Ma 之前断裂活动的影响, 南海北部陆坡发育规模较大的坡内盆地(图 1(b)). 研究区的复杂陆坡地形可以分为侵蚀水道带和坡内盆地带(图 2). 侵蚀水道带发育大量侵蚀水道, 并带伴有大量的陆坡滑塌和水道壁滑塌. 坡内盆地位于侵蚀水道带的下方, 其地形相对较缓, 发育多个相互叠置的朵体. 上陆坡发育多条侵蚀水道, 水道末端发育叠置的朵体, 形成滑塌-侵蚀水道-朵体沉积体系(图 2).

3　陆坡均衡面及可容空间

陆坡均衡面是沉积与侵蚀作用相平衡的一个趋势面, 其下为可容空间, 接受沉积充填, 其上为潜在侵蚀区, 侵蚀强度由重力流强度决定[12]. 陆坡均衡面主要受陆坡海底地形的影响, 随陆坡海底地形的变化而变化, 可以近似看作陆坡海底地形的趋势面, 可以通过对陆坡海底地形进行趋势面分析而获得[23]. 研究区的陆坡均衡面表现为过陆架坡折与南部隆起带下部坡脚的趋势面, 局部地形位于陆坡均衡面之上, 为潜在的侵蚀或滑塌区, 相反, 位于陆坡均衡面之下的区域为潜在沉积区(图 1(b)). 根据陆坡形态, 陆坡可分为均衡陆坡和非均衡陆坡两类[12,24]. 白云

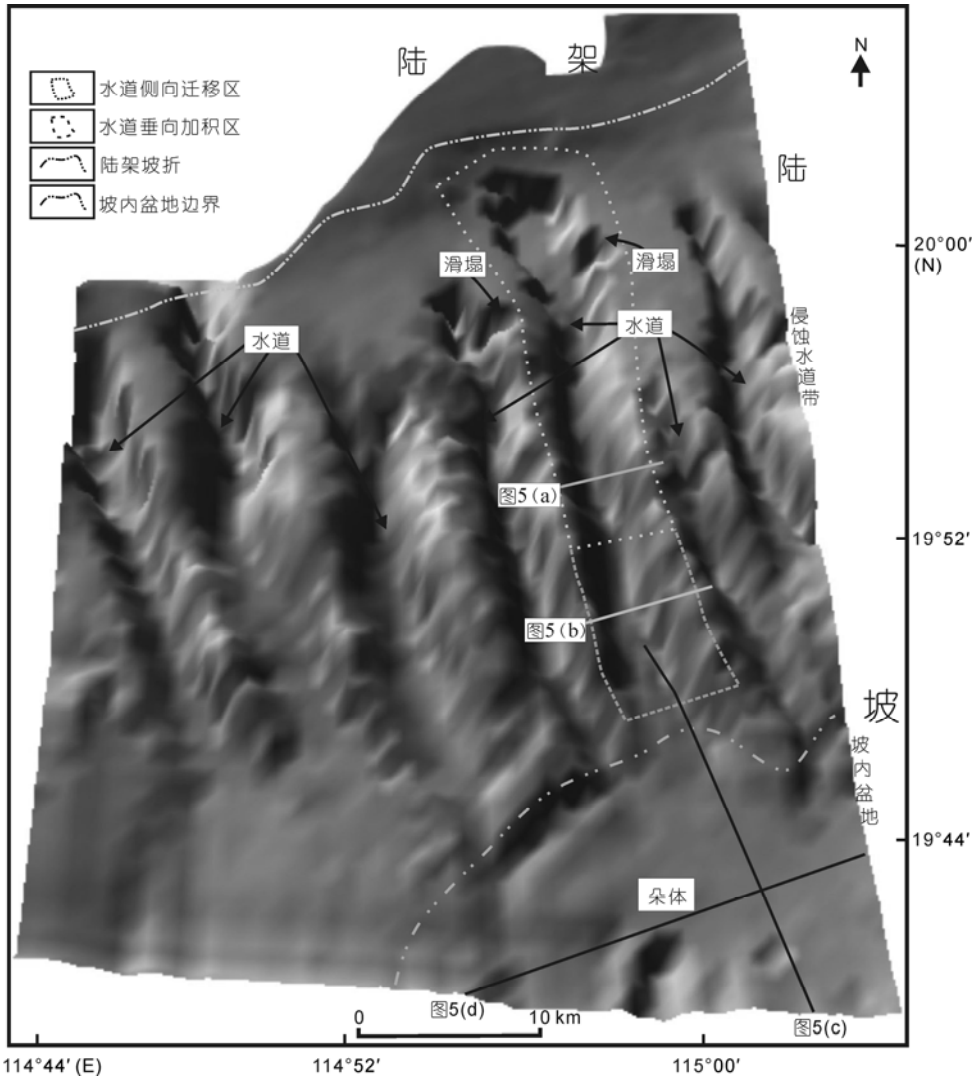


图 2　白云凹陷研究区第四系陆坡地形

凹陷陆坡地形复杂, 为非均衡陆坡, 其上陆坡的海底位于陆坡均衡面之上. 陆坡均衡面之上的区域为潜在的侵蚀或滑塌区, 陆坡均衡面之下的区域为潜在沉积区(图 1(b)). 坡内盆地的海底与陆坡均衡面之间发育规模较大的陆坡可容空间. 非均衡陆坡总是通过陆坡滑塌、侵蚀活动、沉积活动使陆坡地形趋于平缓, 达到均衡. 白云凹陷上陆坡位于陆坡均衡面之上, 重力流侵蚀、陆坡滑塌以及水道壁滑塌使陆坡趋于均衡(图 1(b), 2, 3). 陆坡的侵蚀(滑塌)区位于陆坡均衡面之上, 一部分通过滑塌达到均衡(图 3(b)), 形成大量的滑块, 一部分通过重力流侵蚀活动达到均衡(图 3(c)), 形成大量的侵蚀水道, 重力流在水道内主要以

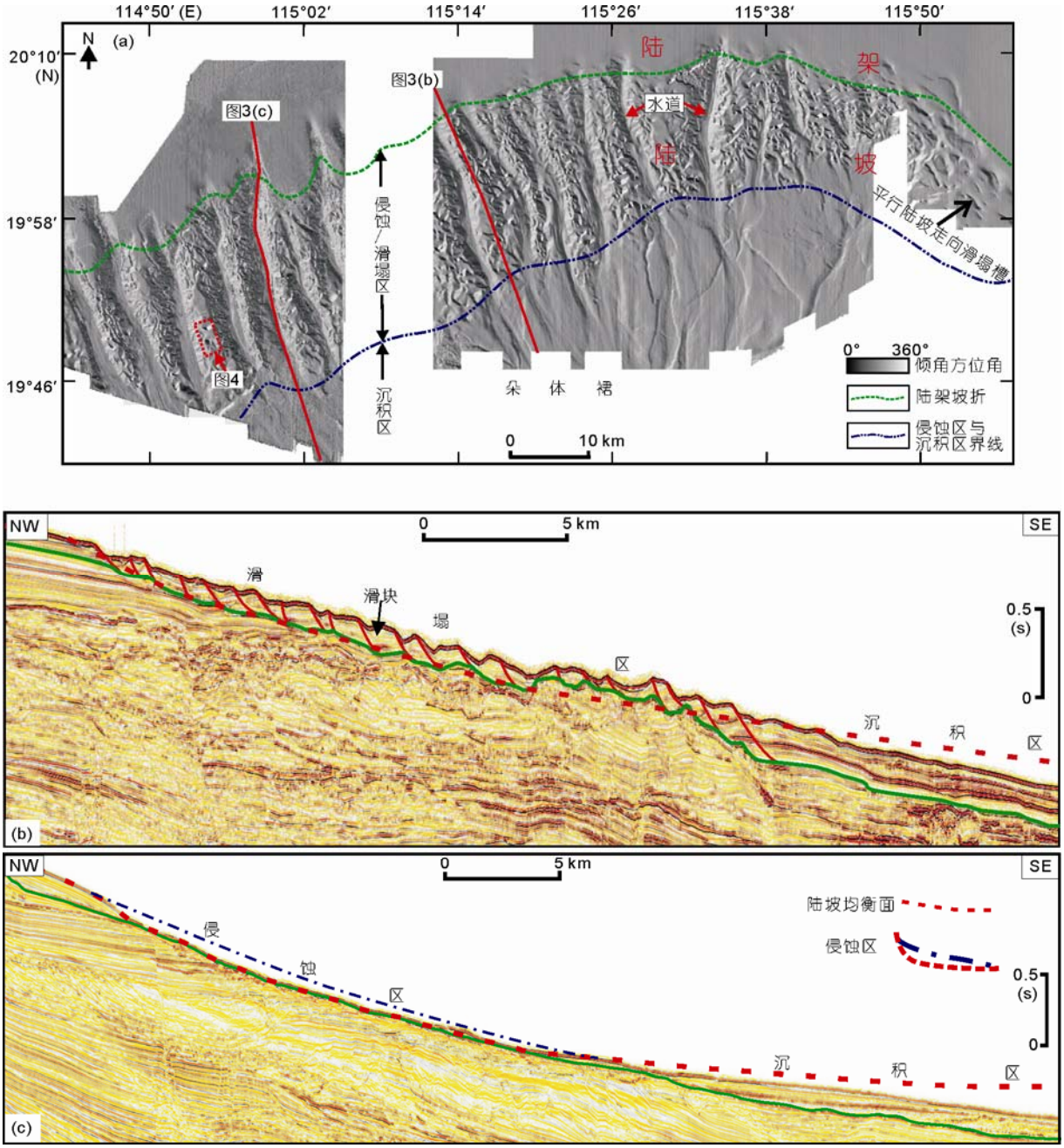


图 3　白云凹陷滑塌-侵蚀水道-朵体沉积体系

(a) 海底倾角方位角图; (b) 顺两水道之间的脊地震剖面; (c) 顺水道地震剖面

沉积过路为主.

随着沉积物载荷的日益增加, 陆坡重力失稳, 形成陆坡滑塌(图 2, 3(a)和(b)). 陆坡滑塌形成的滑块位移方向一般与陆坡倾向一致(图 3(b)). 陆坡滑塌形成的滑塌槽走向一般平行陆坡走向. 在侵蚀水道不发育的区域仍保留这一特征(图 3(a)). 重力流活跃的地区主要发育侵蚀水道. 重力流对水道进行侵蚀导致水道壁过陡, 水道壁失稳发生滑塌. 水道壁形成的滑塌槽与水道走向近于平行(图 3(a), 4). 早期陆坡的滑塌与后期水道壁的滑塌共同作用形成了多边形断层(图 4).

裂陷作用停止后, 仅仅用区域应力场(伸展作用)不能解释地震数据上所观察到的多边形断层现象. 沉积物连续卸载诱使的重力失稳控制了变形[25]. 沉积物卸载和重力滑动是控制变形的主要因素. 白云凹陷第四系陆坡存在的这类变形并不是由于区域构造应力场引起的, 而是由于日益增长的沉积物载荷导致重力失稳形成的. 这种环境下的局部应力场受岩性的不连续性影响, 岩性的不连续性可以使沉积物载荷引起的主应力改变方向. 水道沉积活动与重力滑动之间的相互作用, 不同方向的重力滑动导致陆坡断层多边形的形成(图 4). 这意味着重力流的侵蚀活动和重力滑动作用共同调整不均衡陆坡, 使其趋于均衡.

4　沉积类型及沉积相平面特征

白云凹陷第四系陆坡发育大量的滑塌、水道、朵体(图 3(a)). 陆坡和水道壁重力失稳发生滑塌. 重力滑动作用形成的滑块, 其形状往往不规则, 直径一般小于 2 km (图 3(b), 4). 滑块的岩性取决于陆坡和水道壁的岩性. 南海北部白云凹陷现今陆坡处于高水位期, 陆上物源供给较弱, 陆坡的岩性以细粒沉积为主. 由于重力流在水道内以侵蚀或沉积过路为主, 很少发生沉积作用, 滑块的岩性多以泥质为主.

白云凹陷上陆坡发育多条顺陆坡倾向的侵蚀水道(图 2, 3(a)). 侵蚀水道在地震反射上呈“V”形或“U”形特征(图 5). 水道底部被强振幅粗粒滞留沉积所充填(图 5(a)). 水道边缘被弱振幅杂乱反射的块体搬运沉积和弱振幅平行反射的深海披覆沉积所充填(图 5). 水道壁的滑塌形成滑块(图 5(a)).

侵蚀型深水水道是重力流将粗粒物质搬运到深海平原的通道. 少量粗粒物质滞留在水道底部, 大部分粗粒物质被重力流搬运到下陆坡或深海平原区域. 侵蚀水道内的充填物质多数是重力流静止期的深海披覆沉积. 重力流对水道壁进行长期侵蚀, 导致水道壁失稳, 发生滑塌. 侵蚀型水道内多见滑块沉积. 上倾方向水道壁的滑塌形成的重力流在水道的下倾方向形成沉积或在水道末端形成朵状的块体搬运沉积.

白云凹陷深水区近海底高分辨率三维地震资料清晰的揭示了顺陆坡方向发育的深水水道侧向迁移和垂向加积特征(图 2, 5). 侧向迁移区的深水水道以水道侧向迁移为特征(图 5(a)). 水道内侧的叠瓦反射体与水道演化过程中的连续侧向迁移有关. 水道的侧向迁移导致水道内侧的增生沉积和外侧的侵蚀. 深水水道垂向加积区, 水道内沉积以垂向加积为特征(图 5(b)). 侧向迁移区的深水水道弯曲度比加积区水道弯曲度要大. 一般来讲, 陆坡坡度高, 水道的弯

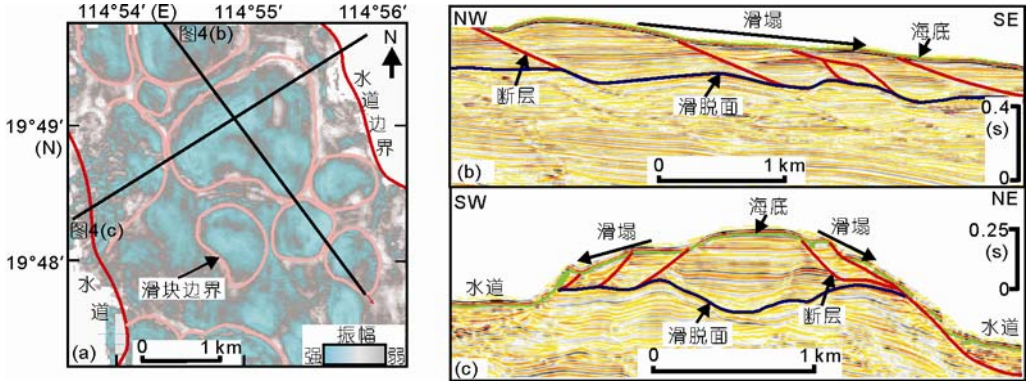


图 4　白云凹陷第四系发育的多边形断层

(a) 海底+40 ms 均方根振幅属性; (b) 顺陆坡的滑塌; (c) 水道壁的滑塌

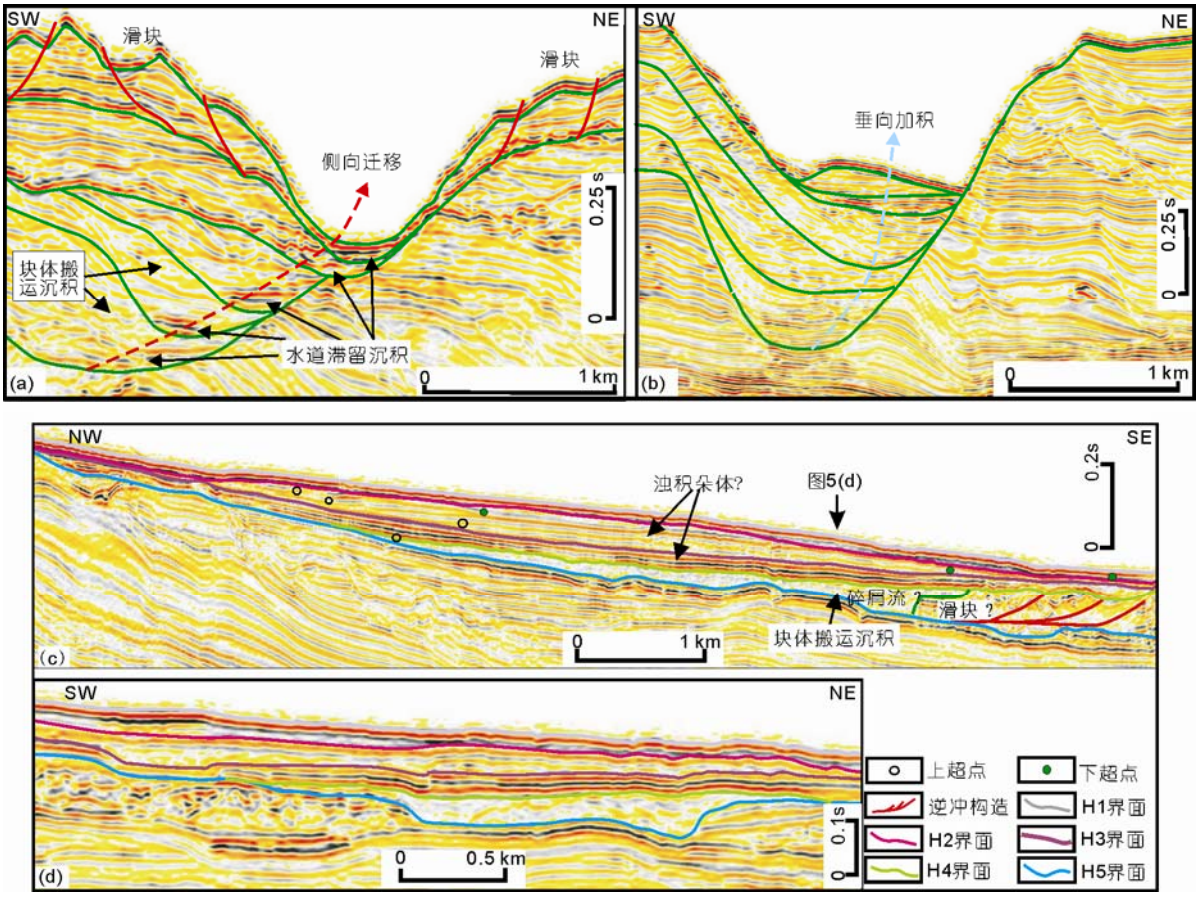


图 5　白云凹陷第四系水道-朵体沉积体系典型地震剖面

(a) 水道迁移典型剖面; (b) 水道加积典型剖面; (c) 顺朵体的地震剖面; (d) 垂直朵体的地震剖面

曲度低, 坡度低, 水道弯曲度高. 分选性好、低能量充填的水道比粗粒的、高能量充填水道的弯曲度高.

在水道末端, 坡内盆地的海底位于陆坡均衡面之下. 陆坡均衡面与海底之间形成陆坡可容空间(图 1(b)). 重力流在上陆坡水道内发生侵蚀和沉积过路, 在水道末端形成朵体, 多个朵体在水道末端的叠置形成朵体裙(图 3(a)). 界面 H1-H5 之间地层的典型地震相特征揭示了一个完整的深水沉积序列(图 5(c), (d)). 下部地层由呈透明杂乱反射以及强振幅杂乱反射特征的块体搬运沉积组成. 块体搬运沉积的前端由于内部变形发育逆冲构造. 块体搬运沉积的岩性取决于陆坡或邻近局部隆起的岩性. 下部块体搬运沉积的地震振幅的前后变化有可能是流态和岩性差异的反映(图 5(c)). 块体搬运沉积被上覆的强振幅平行亚平行地震反射特征的浊积朵体所覆盖. 最上端的朵体则呈中振幅前积反射特征, 陆坡上倾方向见上超特征, 顺陆坡方向见下超特征(图 5(c)).

5　白云凹陷深水重力流沉积体系的演化

5.1　地震相与沉积过程关系

高分辨率三维地震资料地震反射特征不仅反映深水沉积类型, 不同的地震几何形态指示了沉积过程[26]. 研究区第四纪存在活跃的重力流活动, 发育典型的深水水道-朵体沉积体系(图 3(a)). 顺朵体方向的地震剖面(图 5(c))显示: 底部杂乱前积反射代表块体搬运沉积在水道末端的前积沉积(图 6(a)); 上覆的强振幅平行亚平行地震反射推测可能是加积的浊积朵体(图 6(b)); 顶部的中振幅前积反射, 伴有明显的地震同相轴上超特征, 推测可能是浊流能量减弱, 供给减少, 形成退积朵体(图 6(c)). 三套沉积物分布在水道末端的坡内盆地. 从三套沉积物厚度分布来看,

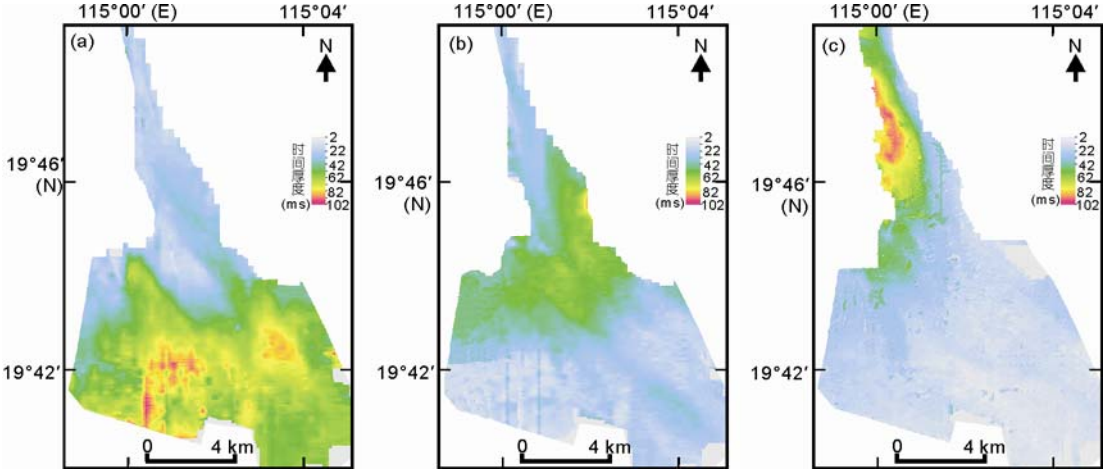


图 6　不同时期朵体厚度图

(a) H4-H5 厚度图; (b) H3-H4 厚度图; (c) H2-H3 厚度图

块体搬运沉积搬运距离最远, 沉积在盆地的最远端. 由于底部块体搬运沉积的起伏地表和重力流供给减少的因素, 上部两套朵体逐渐向水道上方迁移.

5.2　水道-朵体沉积体系垂向演化

受裂陷期断裂作用的影响, 南海北部白云凹陷第四系陆坡地形复杂, 发育大型坡内盆地(图 1(b), 7(a)). 由于陆坡海底与陆坡均衡面不一致, 陆坡为非均衡陆坡(图 7(a)). 侵蚀、滑塌、沉积过路以及沉积作用使非均衡陆坡逐渐向均衡陆坡转化. 上陆坡海底位于陆坡均衡面之上, 上陆坡主要以陆坡滑塌、水道侵蚀和沉积过路为主, 形成大量的侵蚀水道(图 1(b), 3(a)). 而坡内盆地的海底位于陆坡均衡面之下(图 1(b)). 坡内盆地位于陆坡均衡面之下, 发育陆坡可容空间, 可容空间规模远远大于重力流的供给量, 以沉积作用为主. 由于受空间限制而不能全方位流动的重力流称之为限定性重力流[5,27]. 上陆坡水道内的重力流由于受水道壁的限制, 仅能在水道内发生沉积过路、侵蚀、沉积作用, 重力流为限定性重力流. 当重力流到达水道末端的坡内盆地时, 由于研究区坡内盆地规模远大于重力流供给量, 重力流转化为非限定性重力流, 可以在坡内盆地自由流动形成朵体.

陆架边缘或上陆坡的沉积物由于重力失稳发生滑塌, 形成重力流. 陆坡的滑塌或水道壁的滑塌形成的重力流在水道内主要发生侵蚀和沉积过路, 而在水道末端形成朵状的块体搬运沉积(图 7(b), 弯线白色层). 块体搬运沉积前端的逆冲变形指示了块体搬运沉积内部的局部挤压作用(图 5(c)). 块体搬运沉积前积在坡内盆地, 在平面上也具有朵状外形(图 6(a)). 该时期重力流以前积为主, 发育滑块、碎屑流为主的深水水道-朵体裙沉积体系(图 7(b)). 上陆坡海底位于陆坡均衡面之上, 该区域为主要的侵蚀区. 重力流在上陆坡区主要以侵蚀、沉积过路为主. 重力流在水道内不断侵蚀, 导致水道壁过陡, 易发生水道壁滑塌, 形成滑块. 坡内盆地发育的陆坡可容空间为陆坡滑塌形成的滑块、水道壁滑塌形成的滑块以及陆架边缘滑塌形成的重力流提供了沉积场所. 由于坡内盆地发育的陆坡可容空间远远大于重力流体积, 非限定性重力流在坡内盆地形成朵状的块体搬运沉积. 块体搬运沉积来源于陆架边缘、陆坡以及水道壁的滑塌物质. 块体搬运沉积的岩性取决于陆坡岩性以及陆架边缘沉积物的岩性. 整体而言, 块体搬运沉积砂、泥岩混杂, 以泥岩为主. 内部的逆冲构造导致块体搬运沉积的表面起伏不平, 形成一些微盆地.

后期的重力流在块体搬运沉积表面的微盆地内沉积(图 7(c), 点状白色层). 持续的重力流在早期微盆地内形成加积朵体. 重力流将陆架边缘的粗粒沉积物经上陆坡水道搬运到坡内盆地. 重力流在侵蚀水道内发生沉积过路, 而在块体搬运沉积上部的微盆地内沉积下来.

随着重力流活动的逐渐减弱, 重力流沉积溯源

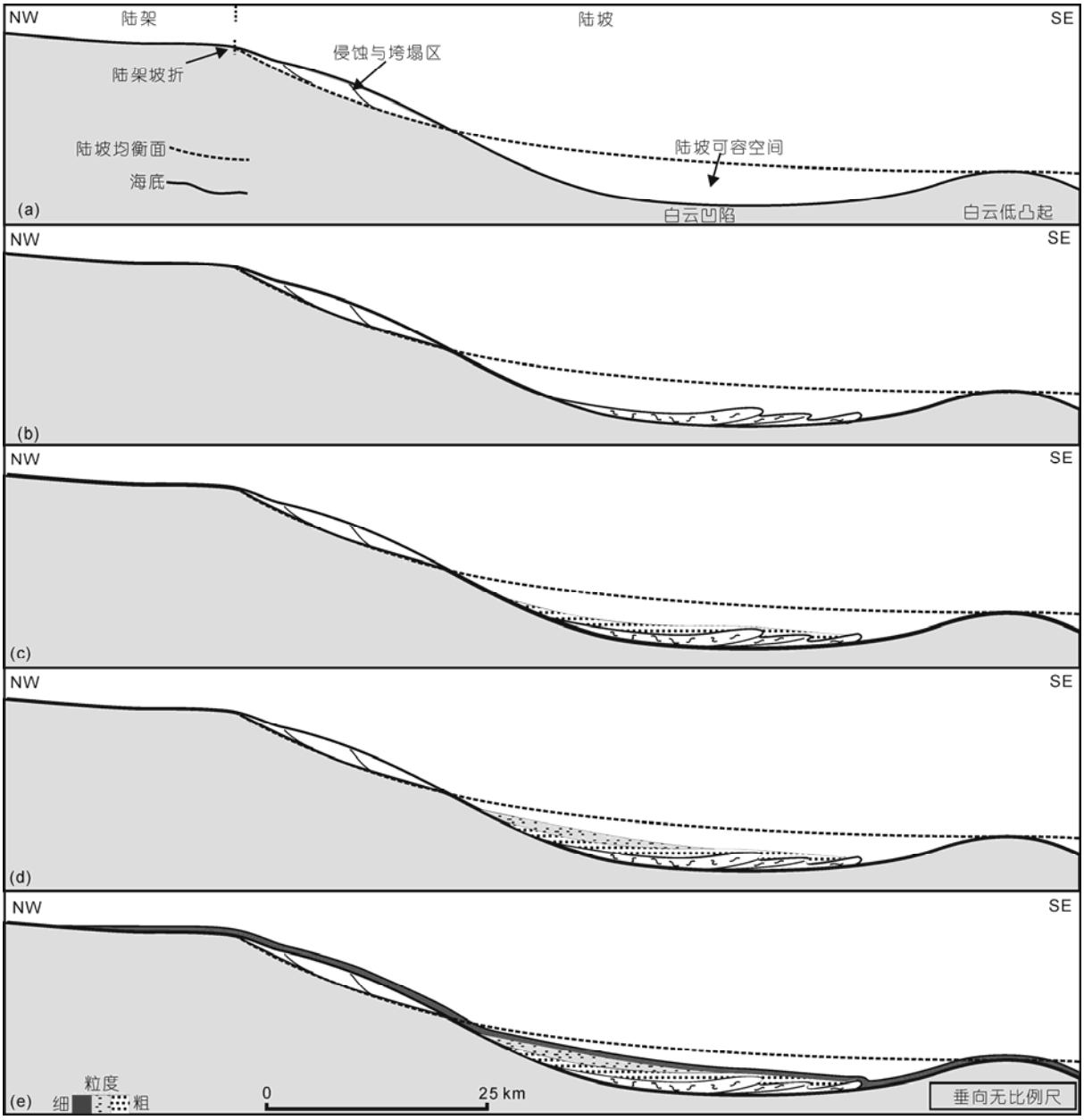


图 7　白云凹陷深水沉积模式的垂向特征示意图

迁移, 形成退积朵体(图 7(d), 短线灰色层). 重力流体积减少、能量减弱, 重力流在水道口形成的朵状沉积, 并超覆在陆坡边缘.

重力流活动静止期, 早期的朵体被深海披覆沉积所覆盖(图 7(e)). 该时期, 重力流活动基本停止. 深海披覆沉积不受陆坡地形、陆坡均衡面以及可容空间的影响, 均匀披覆在整个陆坡地形之上. 在垂向上形成块体搬运沉积-朵体-深海披覆沉积序列.

5.3　水道-朵体沉积体系平面演化特征

上陆坡的陆坡均衡面位于海底之下, 限定性重力流在水道内发生侵蚀和沉积过路. 水道末端相对开阔的坡内盆地发育陆坡可容空间, 限定性重力流在坡内盆地转换为非限定性重力流, 并形成朵状沉积(图 8). 深水重力流沉积演化主要分为 4 个阶段: 前积阶段、加积阶段、退积阶段、重力流活动静止阶段. 重力流活动相对静止期, 陆坡区主要以低沉积速率

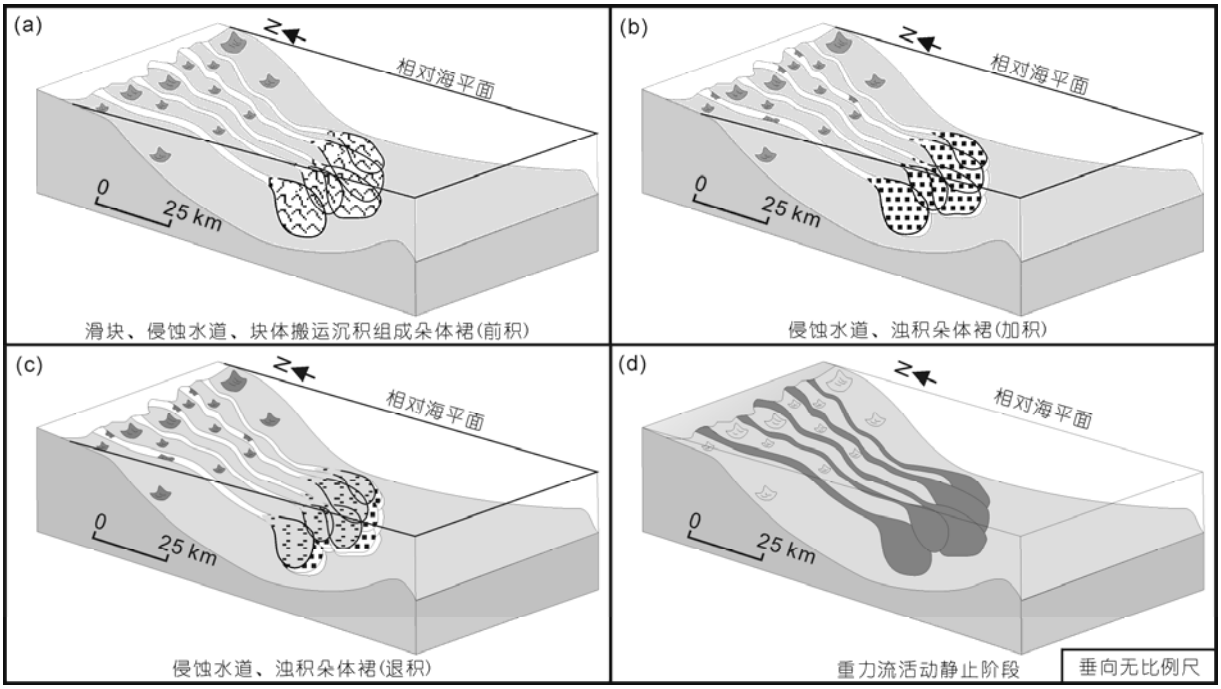


图 8　白云凹陷深水沉积体系的空间特征示意图

的深海披覆沉积为主.

前积阶段(图 8(a)): 白云凹陷第四系陆坡发育坡内盆地. 受陆坡地形及陆坡均衡面的影响, 上陆坡区主要以滑塌与侵蚀为主. 坡内盆地发育的陆坡可容空间为重力流提供了沉积场所. 白云凹陷第四系陆坡发育滑塌-侵蚀水道-进积的朵状块体搬运沉积. 该时期的水道以侵蚀为主, 主要作为重力流的搬运通道. 水道末端的坡内盆地发育陆坡可容空间, 且可容空间大于重力流的体积. 重力流在坡内盆地由限定性流转化为非限定性流, 并在水道末端形成朵体. 该时期的朵体主要由块体搬运沉积(滑块、碎屑流沉积等)组成. 陆坡的滑塌和水道壁的滑塌所形成的块体搬运沉积在坡内盆地形成碎屑流为主的朵状沉积体. 由于上陆坡和水道壁的滑塌所形成的重力流体积小于坡内盆地规模, 重力流在水道末端形成朵状沉积体, 这些沉积体在横向上相互连接形成朵体裙(图 3(a), 8(a)). 块体搬运沉积形成的朵状沉积体, 由于内部变形导致海底地形起伏不平, 发育大量微盆地(图 5(c), 7(b)).

加积阶段(图 8(b)): 由于上陆坡的海底位于陆坡均衡面之上, 上陆坡不发育可供重力流沉积的陆坡可容空间. 陆架边缘粗粒碎屑物质形成的重力流在侵蚀水道内发生沉积过路. 重力流不断对水道侵蚀, 水道壁过陡导致重力失稳, 形成水道壁滑塌. 水道壁的滑塌与早期陆坡的滑塌共同作用形成了多边形断层. 重力流在早期发育的微盆地内沉积下来. 该时期主要发育侵蚀水道－加积的朵体裙沉积体系.

退积阶段(图 8(c)): 早期的滑塌、侵蚀、沉积作用使陆坡地形逐渐变缓, 陆坡均衡面也发生变化. 随着重力流供给量及强度都有所减弱, 重力流沉积超覆在陆坡之上, 在水道口形成退积朵体裙.

重力流活动静止阶段(图 8(d)): 该时期陆坡和深海平原处的重力流活动比较弱, 整个陆坡以深海披覆沉积为主, 泥质沉积均匀披覆在整个深海地形之上.

6　结论

利用高分辨率三维地震资料及地震成像技术来研究南海北部陆坡重力流沉积体系及其演化过程, 这对于预测重力流沉积分布及沉积物品质变化具有重要意义.

南海北部第四系陆坡受裂陷期影响发育规模较大的坡内盆地, 属于非均衡陆坡, 侵蚀、滑塌以及沉

积作用使陆坡趋于均衡. 上陆坡位于陆坡均衡面之上, 主要以侵蚀和滑塌作用为主, 发育滑块和侵蚀水道. 坡内盆地位于陆坡均衡面之下, 发育的陆坡可容空间为重力流提供大量沉积场所, 发育朵体. 受海底地形、陆坡均衡面、陆坡可容空间以及重力流性质的影响, 白云凹陷第四系陆坡发育滑塌-侵蚀水道-朵体沉积体系.

重力流供给量、重力流持续时间、海底地形、陆坡均衡面以及可容空间因素是影响深水重力流沉积体系的主要控制因素, 因此, 在深水沉积研究过程中应加强这些主控因素的研究, 而不是利用一种或几种简单的扇模式对深水重力流沉积进行概括和预测.

致谢 李羊羊博士和匿名评审人给予热心帮助, 并对本文提出宝贵意见, 在此一并致谢.

参考文献

1 Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data. Mar Petrol Geol, 2006, 23: 485–502

2 Saller A, Werner K, Sugiaman F, et al. Characteristics of Pleistocene deep-water fan lobes and their application to an upper Miocene reservoir model, offshore East Kalimantan, Indonesia. AAPG Bull, 2008, 92: 919–949

3 Jackson C A L, Barber G P, Martinsen O G. Submarine slope morphology as a control on the development of sand-rich turbidite depositional systems: 3D seismic analysis of the Kyrre Fm. (Upper Cretaceous), Maloy slope, offshore Norway. Mar Petrol Geol, 2008, 25: 663–680

4 Dunlap D B, Wood L J, Weisenberger C, et al. Seismic geomorphology of offshore Morocco's east margin, Safi Haute Mer area. AAPG Bull, 2010, 94: 615–642

5 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 尼日尔三角洲下陆坡限定性重力流沉积过程及响应. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 1591–1597

6 Posamentier H W, Davies R J, Wood L J, et al. Seismic geomorphology—An overview. In: Davies R J, Posamentier H W, Wood L J, et al, eds. Seismic Geomorphology: Application to Hydrocarbon Exploration and Production. London: Geological Society and SEPM, 2007. 1–20

7 Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. J Sediment Res, 2003, 73: 367–388

8 Wood L J. Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial systems in the northern Gulf of Mexico, U. S. A. J Sediment Res, 2007, 77: 713–730

9 Cross, N E, Cunningham A, Cook R J, et al. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water slope-channel system: The sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt. AAPG Bull, 2009, 93: 1063–1086

10 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 306–316

11 Sarkar S, Marfurt K J, Slatt R M. Generation of sea-level curves from depositional pattern as seen through seismic attributes-seismic geomorphology analysis of an MTC-rich shallow sediment column, northern Gulf of Mexico. Leading Edge, 2010, 29: 1084–1091

12 Prather B E. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings. Mar Petrol Geol, 2003, 20: 529–545

13 Smith R. Silled sub-basins to connected tortuous corridors: Sediment distribution systems on topographically complex sub-aqueous slopes. In: Lomas S A, Joseph P, eds. Confined Turbidite Systems. London: Geological Society, 2004. 23–43

14 Heinio P, Davies R J. Knickpoint migration in submarine channels in response to fold growth, western Niger Delta. Mar Petrol Geol, 2007, 24: 434–449

15 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 771–777

16 Yuan S Q, Wu S G, Thomas L, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. Mar Petrol Geol, 2009, 26: 1441–1451

17 Zhu M Z, Graham S, Pang X, et al. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea. Mar Petrol Geol, 2010, 27: 307–319

18 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. 地学前缘, 2005, 12: 489–498

19 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统-中新统重大地质事件及其意义. 地质论评, 2007, 53: 145–150

20 彭大钧, 陈长民, 庞雄, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现. 石油学报, 2004, 25: 17–23

21 彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 从浅水陆架走向深水陆坡——南海深水扇系统的研究. 沉积学报, 2005, 23: 1–11

22 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究. 地学前缘, 2007, 14: 220–229

23 Steffens G S, Biegert E K, Sumner H S, et al. Quantitative bathymetric analyses of selected deepwater siliciclastic margins: Receiving basin configurations for deepwater fan systems. Mar Petrol Geol, 2003, 20: 547–561
24 Ross W C, Halliwell B A, May J A, et al. Slope readjustment: A new model for the development of submarine fans and aprons. Geology, 1994, 22: 511–514
25 Calassou S, Moretti I. Sedimentary flattening and multi-extensional deformation along the West African margin. Mar Petrol Geol, 2003, 20: 71–82
26 Prather B E, Booth J R, Steffens G S, et al. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico. AAPG Bull, 1998, 82(Suppl 5): 701–728
27 Lomas S A, Joseph P. Confined turbidite systems. In: Lomas S A, Joseph P, eds. Confined Turbidite Systems. London: Geological Society, 2004. 1–8