https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.014



琼东南盆地华光凹陷大型海底重力滑动 系统特征及其成因机制

李 林1,张 成2,3*,闫 春1,杨涛涛1,解习农2,王少凯2,储生明2

1. 中国石油杭州地质研究院,浙江杭州 310023

2. 中国地质大学海洋地质资源湖北省重点实验室,湖北武汉 430074

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室,广东广州 511458

摘 要:海底重力滑动系统研究对认识海底斜坡稳定性和深水沉积过程具有重要意义.南海北部琼东南盆地华光凹陷上 中新统及其以上地层中发育一个大型的自南向北滑动的海底重力滑动系统.利用区域二维地震资料,查明了该大型海底 重力滑动系统的地震相和发育特征,探讨了其可能的形成原因.该海底重力滑动系统由伸展域、过渡域、收缩域、滑动面 和软弱层等5个要素构成;其发育演化可划分为晚中新世前重力滑动、上新世同重力滑动和第四纪后重力滑动等3个阶 段:前重力滑动为物质准备阶段,水道复合体沉积于半深海泥质斜坡之上,为重力滑动提供物质基础;同重力滑动为重力 滑动系统发育的主体阶段,沉积物披盖在强烈变形而产生的地形上,同时也发生一定程度的变形;后重力滑动为重力滑 动系统萎缩阶段,沉积物逐渐将重力滑动产生的凸凹地形填平,并继续沉积.斜坡地形和高沉积物供给是海底重力滑动 系统发育的基础;基底断层活化和底辟作用可能是触发其发育的动力源.

关键词:海底重力滑动系统;块体流;地震反射特征;触发机制;琼东南盆地;油气.

中图分类号: P736.12 **文章编号:** 1000-2383(2021)10-3707-10 **收稿日期:** 2020-11-24

Characteristics and Genetic Mechanism of a Large-Scale Submarine Gravity-Driven System in Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin

Li Lin¹, Zhang Cheng^{2,3*}, Yan Chun¹, Yang Taotao¹, Xie Xi'nong², Wang Shaokai², Chu Shengming²

1. PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

2. Hubei Key Laboratory of Marine Geology Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

Abstract: The study on submarine gravity-driven system (SGDS) is of great significance to understand the stability of submarine slope and the deep-water sedimentary processes. A large-scale SGDS sliding from south to north developed in the upper Miocene and above strata in the Huaguang depression of the Qiongdongnan basin, northern margin of the South China Sea. Based on regional 2D seismic data, in this paper it describes the characteristics of seismic facies and development of this large-scale SGDS and discusses its genetic mechanism. The development of the SGDS, composed of five elements including extensional domain, transitional domain, contractional domain, sliding surface and weak layer, could be divided into three stages as follows: the Late Miocene pre-gravity-sliding stage, the Pliocene syn-gravity-sliding stage, and the Quaternary post-gravity-sliding stage. During the fore-gravity-sliding stage, the channel complex was deposited on the bathyal argillaceous slope, and served on the material basis for

引用格式:李林,张成,闫春,等,2021.琼东南盆地华光凹陷大型海底重力滑动系统特征及其成因机制.地球科学,46(10):3707-3716.

基金项目:国家科技重大专项(No. 2017ZX05026-005).

作者简介:李林(1970-),男,高级工程师,博士,主要从事油气地质与勘探方面研究工作. E-mail: lilin_hz@petrochina.com.cn

^{*} 通讯作者:张成, ORCID: 0000-0003-0610-5148. E-mail: zhangch@cug. edu. cn

gravity sliding. During the syn-gravity-sliding stage, which is the main stage of the SGDS development, the sediments were draped on the topography caused by intense deformation, and at the same time, there was also a certain degree of deformation. During the post-gravity-sliding stage, meaning the shrinking of the SGDS, the sediments gradually filled up the topography caused by gravity sliding and continued to deposit. It is indicated that the slope topography and high-speed sediment supply is the basis for the development of the SGDS, and the activation of basement faults and diapirism may be the trigger for its development.

Key words: submarine gravity-driven system; mass transport deposit; seismic reflection characteristics; trigger mechanism; Qiongdongnan basin; hydrocarbon.

重力驱动(Gravity-driven)是深水斜坡背景沉 积物搬运和迁移的重要机制,可产生不同尺度和层 次的重力滑动构造(索书田,1983)和地质体,在塑 造许多大陆边缘斜坡的构型中具有重要作用(Butler and Turner, 2010).陆缘塌陷、海底滑坡、深水峡 谷/水道和海底扇等都是深水斜坡背景重力驱动物 质搬运和迁移的重要产物(Shanmugam and Wang, 2015; Chen et al., 2020; 任金锋等, 2020), 与之相伴 也产生了断层、揉皱或褶皱、塌陷和侵蚀等一系列 的构造变形(Alsop et al., 2021).因而,海底重力滑 动系统可理解为深水斜坡背景下重力驱动物质搬 运和迁移所形成的地质体及一系列构造变形的总 称.大型的海底重力驱动系统在深水环境普遍发 育,尤其是在深水斜坡区,甚至可顺坡形成迁移数 百千米的块体流沉积体(Huhn et al., 2020).大型海 底重力滑动系统的研究不仅有助于认识陆缘海底 斜坡稳定性、海底地形地貌演化和海底沉积物搬运 机制(Moscardelli et al., 2006; Bull et al., 2009; 王大伟等,2011),同时也有助于对海域潜在地质 灾害形成机制的理解,并为海底工程实施提供科 学依据(Mosher et al., 2010; Alves, 2015; Terry et al., 2017; Li et al., 2019; 孙启良等, 2020). 甚 至,对较老的重力滑动系统的研究还有助于油气 圈闭的识别,从而指导油气勘探实践(de Vera et al., 2010; Scarselli et al., 2016; 廖晶等, 2020).

南海北部琼东南盆地华光凹陷上中新统及其 以上地层中发育了一个大型的自南向北滑动的海 底重力滑动系统.不同的学者对该套变形地质体 进行了描述和成因分析,提出了底流沉积作用(王 海荣,2007)、重力驱动(姚根顺等,2009)和红河断 裂走滑反转触发(王大伟等,2016)等不同的成因 观点.诚然,海底重力滑动系统是沉积物在自身重 力作用下顺坡迁移的结果和产物,但其触发机制, 可以是区域性的,如构造作用或海平面变化,也可 以是局域性的,如水合物分解或流体释放等.底流 作用可能形成或改造深水沉积体,但很难形成如 此规模的沉积物滑动和变形.红河断裂走滑反转 大致发生在5.5 Ma,但华光凹陷大型海底重力滑 动系统发育和演化的持续时间很长,可能还存在 其他因素使得海底滑动持续进行.本次研究将利 用区域二维地震资料,通过地震相分析和构造解 释,查明该套海底重力滑动系统的空间分布、发育 特征和演化过程,并通过地形地貌、沉积充填和构 造活动分析,为该套系统发育机制提出新的解释.

1 区域地质背景

南海西北陆缘是南海"挤出一逃逸构造域"和 "古南海俯冲一拖曳构造域"的结合部位(任建业和 雷超,2011;解习农等,2015),发育了NW向展布的 莺歌海盆地和NE向展布的琼东南盆地(图1).华光 凹陷总体位于两个盆地南部交汇位置,其形成演化 受NW向走滑和NW向伸展双重作用,地层序列以 渐新世末 T60 面为界,分为"下断上拗"的双层结 构,断陷期层序包括始新统岭头组、渐新统的崖城 组和陵水组;拗陷期层序包括中新统的三亚组、梅 山组和黄流组,以及上新统莺歌海组和第四系乐东 组地层(图1;魏魁生等,2001;李绪宣等,2006;杨涛 涛等,2012).新近纪以来,盆地构造演化经历了裂后 缓慢热沉降和加速沉降两个阶段(Xie et al., 2006; 周杰等,2019),相应地其沉积环境也发生了重大转 变,总体在中中新世末由滨浅海相环境转变为半深 海-深海相环境,伴随着莺-琼盆地区陆架-陆坡 体系自东向西逐渐形成以及东部西沙隆起和西侧 广乐隆起沉没于水下,开始广泛发育深水沉积体系 (Xie et al., 2008;姚根顺等, 2009;解习农等, 2012).

2 数据与方法

本文利用的基础数据主要为中国石油天然气 集团公司采集的面积约25000 km²、长近5000 km 的区域二维反射地震叠后资料,地震主频20~ 30 Hz,以及中国海洋石油总公司钻探的YC35-1-2



图1 研究区地理位置、构造单元及地层序列图及海底重力滑动系统展布

Fig.1 Geographical location, structural unit division and stratigraphic sequence of the study area and plane distribution of the SGDS

井地质分层资料.

研究中采用了钻井分层约束的地震地层学和 地震沉积学的分析方法,在Landmark2000地球物理 解释系统中根据地震反射结构和地震相特征,识别 和分析海底重力滑动系统的结构单元、发育特征、 空间分布,乃至运动过程.最后,通过地形地貌、 深一浅构造响应关系、沉积结构单元配置,以及地 质演化背景等,探寻海底重力滑动系统发育的成因 机制.

3 重力滑动系统构成、特征及演化

3.1 重力滑动系统构成

图2为平行于斜坡倾向的剖面,剖面位置、地震 反射界面代号以及地层单元名称见图1.如图所示, 该斜坡向北倾斜,从坡顶至坡底的水平距离超过 100 km.斜坡的顶部位于广乐隆起之上,向北逐渐 倾斜,进入华光凹陷,是中新世以来在差异沉降背 景下形成的地貌.斜坡带内,T60界面至T31界面之 间地层变形较弱,T31界面之上地层变形明显,内部 因块体滑动而形成的断层十分发育.这套地层尽管 变形较强烈,但其内部原始地层界面特征仍较明 显,因此可与滑动系统外正常序列进行较好对比.

根据海底重力滑动系统内地层的变形特征及 其边界和内部构造样式,可将其划分为伸展域、过 渡域、收缩域、滑动面和软弱层等5个要素(图2).伸 展域总体位于斜坡中上部,以沉积物在重力驱动下 沿斜坡迁移和滑动过程中产生的断层陡坎、海底坍 塌和块体迁移等海底地貌现象,及沉积体变形、旋 转及其内部的滑动断层等构造现象为特征..过渡域 总体位于斜坡中部,以块体滑动一挤压、张性一压 性变形的过渡为特征,总体不发育落差较大的断层 陡坎和地形塌陷.收缩域总体位于斜坡中下部,以



图 2 海底重力滑动系统构成要素及具演化序列(剖面平行滑动方回,位置见图 1) Fig.2 Main elements and evolutionary sequence of the submarine gravity-driven system (SGDS) pre-GDL.前重力滑动层;syn-GDL.同重力滑动层;post-GDL.后重力滑动层

挤压弯曲、水平收缩、垂向增厚、逆冲叠覆等沉积体 和构造变形现象为特征.滑动面可以是原始的地质 界面,也可以是破裂面,其重要标志是界面上、下构 造形态、变形强烈程度显著不协调,伸展域、过渡域 和收缩域的所有块体迁移和构造变形均终止于该界 面处.软弱层,也可称为润滑层,是降低滑动摩擦阻 力,使得滑动块体长距离搬运和迁移的必要条件之 一.深水环境下,未固结的富泥层段往往是较好的软 弱层.同时,块体滑动过程中,海水沿破裂或断层下 渗至滑动面,往往会提高滑动面上下的润滑效果.需 要说明的是,海底重力滑动系统的规模和形态受地 形坡度、坡底空间范围及沉积物成分等多种因素 控制.

3.2 重力滑动系统特征

3.2.1 地震反射特征 地震剖面显示,海底重力滑动系统具有明显的地震相特征.该系统内部的大部分地层由于破碎、断裂、旋转甚至揉皱等破坏性作用,已经失去了原始形貌特征,表现为严重破碎的、杂乱的地震反射同向轴特征(图2).因重力和地形的作用,海底重力滑动系统总体表现为自南

向北由地势高部位向地势低部位迁移的特征(图 2).此外,由于该系统东、西两侧下伏西沙隆起和 凹陷内局部隆起强硬基底的存在,导致上覆地层 因差异压实沿着隆起边缘形成斜坡,结果造成沉 积物在重力作用下首先向从东、西两侧斜坡向中 央汇聚,再沿中央凹槽斜坡自南向北滑动,形成一 个大型的海底重力滑动系统.因而,在伸展域,乃 至过渡域内垂直于主滑动方向的地震剖面上,杂 乱反射地层和原状地层之间的边界明显,以断层 陡坎为特征,断层可能兼具张性和走滑性质(图 3a、3b);在收缩域内垂直于主滑动方向的地震剖 面上,地震相由杂乱反射到连续反射呈渐变过 渡,反映了重力驱动减弱的特点(图 3c、3d).

该系统底部的滑动面呈现强振幅、负极性的强 反射界面,反映了重力流发育过程中与下伏地层的 强烈剪切(图4).该界面之下地震反射连续性好,顶 部因剪切、侵蚀,可能存在削截反射终止现象,局部 区域甚至形成"坡坪式"台阶.沿着物质迁移方向, 底部滑动面的形态和产状往往也发生一定程度变 化,南部伸展域内往往呈下倾的下凹特征,中部过









渡域内呈略向上凸的宽缓背形形态,北部收缩域内 呈上倾的下凹形态,反映了逆冲的趋势(图2).软弱 层往往为连续性较好、振幅相对较弱的地震相,反 映了相对稳定的悬浮泥质沉积特征.

该系统内地层变形程度自下而上呈减弱趋势, 底部强变形层(即pre-GDL)为重力滑动系统发育 前的沉积物,在重力滑动中遭受的破坏最明显;中 部弱变形层(即syn-GDL)为重力滑动系统发育过 程中在强变形层顶部地貌背景下一边堆积、一边 协同变形的沉积物;顶部未变形层(即post-GDL) 为重力滑动系统萎缩后,在相对稳定的地貌背景 下发育的深水沉积物,可能是底流沉积,也可能 是正常悬浮物质的缓慢沉积(图2、3).

3.2.2 空间分布特征 根据地震反射特征和区域 地层界面解释,琼东南盆地华光凹陷大型海底重 力滑动系统的底滑动界面总体位于T31附近,向 上重力变形由强变弱,至T20之上地层基本不发 育重力变形(图2、3).由于区域二维地震资料分 辨率所限,除通过区域对比解释的关键层序界面 外,很难再进一步识别反映重力滑动幕次的次级 界面,因而将其作为一次海底重力滑动过程进行 分析.根据地震反射层速度大致推断,该系统最大 厚度达1000 m左右,沿重力滑动方向,伸展域厚 度相对较薄,但在重力滑动阻力较大的过渡域和 滑动终止的收缩域可出现厚度增大和地层叠覆的 现象(图2、3).平面上,该系统呈南北向延伸的长 舌状,东西宽约80 km,南北长在120 km左右,面 积约10000 km²,体积近8000 km³(图1).

3.3 重力滑动系统演化

海底重力滑动系统是原始沉积物经过一定的 触发机制在自身重力驱动下沿斜坡向下运动而形 成的地质体及其相关构造变形的总和.海底重力滑 动系统的发育演化应始于原始沉积物准备,以原始 沉积物在重力驱动下的滑动、迁移和变形,以及新



图 5 海底重力滑动系统发育演化模式 Fig.5 Model of development and evolution of the SGDS

物质的同沉积和协同变形为动力过程,终止于滑动 物质的最终定位和同期新沉积物协同变形的消失. 因而,根据沉积物滑动特点和变形特征,可将重 力滑动系统的发育演化划分为前重力滑动、同重 力滑动和后重力滑动等3个阶段,与之对应可划 分为前重力滑动、同重力滑动和后重力滑动等3 个局域尺度的构造层(图2、3).

根据地层界面解释及其时代标定,可初步 建立琼东南盆地华光凹陷大型海底重力滑动 系统演化的时间框架(图5):

(1)晚中新世(8.2~5.5 Ma, T31-T30)处于 前重力滑动阶段,即强烈变形层物质原始沉积 期.该时期相对偏砂的碎屑物质沉积于半深海 泥质斜坡之上,为重力滑动提供了物质基础.该 套地层在后续重力滑动过程中遭受强烈破坏, 变形最为明显,顺坡滑动距离最大.

(2)上新世(5.5~2.6 Ma,T30—T20)处于同重 力滑动阶段,即晚中新世堆积于斜坡上的原始沉积 物在重力驱动下发生滑动、迁移和构造变形的时期. 该阶段是重力滑动系统发育的主体阶段,早期原始 沉积物滑动、迁移和在下斜坡部位堆积,产生了伸 展域和收缩域的各种变形构造,如上斜坡的滑动断 层和下斜坡的逆冲构造等.与此同时,新的碎屑物 质又沉积于强烈变形产生的地貌之上,并随重力滑 动过程协同滑动、变形,只是变形程度相对较弱,侧向滑动距离相对较小,地层侧向连续性较好.

(3) 第四纪(2.6~0 Ma, T20—T0)处于后重力滑动阶段,即重力滑动系统萎缩阶段.该阶段重力滑动停止,滑动块体基本定位,新的碎屑物质在底流或静水条件下沉积于同重力滑动阶段沉积的弱变形层之上,将重力滑动产生的凸凹地形逐渐填平,并继续沉积.

4 重力滑动系统成因机制

海底重力滑动系统的形成是不同层次、不同尺 度的各种因素综合作用的结果.南海陆缘海底斜坡 区广泛发育重力滑动系统,如曾母盆地(Xu et al., 2019)、南海海槽(任金锋等,2020)和珠江口盆地 (孙启良等,2020)等.Xu et al.(2019)认为,曾母盆地 康西凹陷重力滑动系统的发育与泥底辟作用相伴, 但底辟并非重力滑动系统发育的诱因,而是富泥层 段在重力扩展作用下顺坡滑动的结果.任金锋等 (2020)认为,南沙海槽不断隆升的背斜脊对高供给 率沉积物的阻挡是海底滑坡形成的内在条件,而高 通量流体渗漏和天然气水合物分解导致背斜脊抗 剪强度下降是先决条件,最终在区域地震或海底火 山活动等因素诱导下发生大型海底滑坡.尽管不同 盆地或地区其地质特征和演化存在一定差别,但重 力滑动系统的发育归根结底是重力作用的结果,只 是不同盆地或地区导致沉积物重力失稳的诱因不 尽相同.与上述两个盆地不同的是,首先,基底差异 隆升/沉降、地层不均衡压实和沉积物堆积形成的 斜坡地形可能是琼东南盆地华光凹陷重力滑动系 统发育的必要条件;其次,高沉积物供给一方面为 重力滑动系统发育提供物质基础,同时也加速了 斜坡地形变陡,为沉积物重力失稳创造条件;再 次,盆地基底断层的隐伏活化和底辟作用可能是 研究区海底重力滑动系统发育的触发机制.

4.1 斜坡地形

沉降史模拟表明,新近纪以来,华光凹陷、 广乐隆起和西沙隆起的沉降速率存在显著差 异,特别是在晚中新世(10.5~5.5 Ma)这种差 异进一步扩大(图6),结果导致沿广乐隆起北 缘和西沙隆起西缘形成了明显的斜坡,为重力 滑动系统发育创造了基础条件.

4.2 高沉积物供给

晚中新世的基底差异沉降加剧以及盆缘中



图6 南海西北陆缘不同单元沉降/沉积速率差异

Fig.6 Difference of subsidence / depositional rate among few structural units in northwestern margin of the South China Sea

南半岛的隆升剥蚀加强(Carter et al., 2000; Fyhn et al., 2009),必然导致盆地内沉积物供给 速率的显著增加.Wang et al.(2013)通过模拟计 算得出,琼东南盆地南部未受海底滑坡干扰地 层在晚中新世的平均沉积速率高达355.5 mm/ ka(图6),大于中中新世和上新世的平均沉积速 率.高沉积物供给加速了斜坡变陡,同时也为重 力滑动系统的发育提供了物质准备.

4.3 断层活化和底辟

前已述及,华光凹陷位于南海西北部NW向走 滑构造域和NW向伸展构造域的结合部位,受其双 重影响.研究表明,NW走向红河断裂在晚中新世末 (5.5 Ma)发生了由左旋运动向右旋运动的反转 (Clift and Sun, 2006; Zhu et al., 2009),结果引起 研究区的深部断层活化,隐伏活动,甚至部分控坳 断层向上延伸至滑动系统内部(图2),触发了斜坡 沉积物失稳,并在重力驱动下发生滑动、迁移,形成 海底重力滑动系统.此外,研究区发育了一定数量 的底辟体,导致地震反射界面断开,内部反射杂乱, 多数刺穿了上中新统,说明其发育时间在晚中新世 后(图3).底辟作用及其伴随的流体活动事件使得 沉积物剪切强度降低,同时易形成穹隆构造,引起 斜坡沉积物重力失稳,进而触发海底重力滑动系统的发育.

综上所述,斜坡地形和高沉积物供给是海底重 力滑动系统必要条件,深部断层活化和底辟作用是 触发海底重力滑动系统发育的动力源.

5 结论

(1)琼东南盆地华光凹陷上中新统及其以上 地层中发育的大型海底重力滑动系统总体呈自 南向北延伸的长舌状,由伸展域、过渡域、收缩 域、滑动面和软弱层等5个要素构成.

(2)该海底重力滑动系统发育演化可划分为 晚中新世前重力滑动、上新世同重力滑动和第四 纪后重力滑动等3个阶段.其中,前重力滑动为 物质准备阶段;同重力滑动为系统发育的主体阶段;后重力滑动为系统萎缩阶段.

(3)斜坡地形和高沉积物供给是海底重力 滑动系统发育的基础,基底断层活化和底辟作 用可能是触发其发育的动力源.

References

- Alsop, G. I., Weinberger, R., Marco, S., et al., 2021. Detachment Fold Duplexes within Gravity-Driven Fold and Thrust Systems. *Journal of Structural Geology*, 142: 104207.https: //doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104207
- Alves, T.M., 2015. Submarine Slide Blocks and Associated Soft-Sediment Deformation in Deep-Water Basins: A Review. Marine and Petroleum Geology, 67: 262-285. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.05.010
- Bull, S., Cartwright, J., Huuse, M., 2009. A Review of Kinematic Indicators from Mass-Transport Complexes Using 3D Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7): 1132-1151. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011
- Butler, R. W. H., Turner, J. P., 2010. Gravitational Collapse at Continental Margins: Products and Processes; An Introduction. *Journal of the Geological Society*, 167(3): 569– 570. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-003
- Carter, A., Roques, D., Bristow, C.S., 2000. Denudation History of Onshore Central Vietnam: Constraints on the Cenozoic Evolution of the Western Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 322(3-4): 265-277. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00091-3
- Chen, H., Xie, X. N., Mao, K. N., et al., 2020. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Deep-

Water Canyon Systems along the Northern South China Sea Margin. *Journal of Earth Science*, 31(4): 808-819. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1284-z

- Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The Sedimentary and Tectonic Evolution of the Yinggehai-Song Hong Basin and the Southern Hainan Margin, South China Sea: Implications for Tibetan Uplift and Monsoon Intensification. *Journal* of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B6): B06405B6. https://doi.org/10.1029/2005jb004048
- de Vera, J., Granado, P., McClay, K., 2010. Structural Evolution of the Orange Basin Gravity-Driven System, Offshore Namibia. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): 223-237.
- Fyhn, M.B.W., Boldreel, L.O., Nielsen, L.H., 2009. Geological Development of the Central and South Vietnamese Margin: Implications for the Establishment of the South China Sea, Indochinese Escape Tectonics and Cenozoic Volcanism. *Tectonophysics*, 478(3/4): 184–214. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.002
- Huhn, K., Arroyo, M., Cattaneo, A., et al., 2020. Modern Submarine Landslide Complexes: A Short Review. In: Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., eds., Submarine Landslides Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles. The American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc., Washington, D.C., Hoboken, 183-200.
- Li, L. L., Shi, F. Y., Ma, G. F., et al., 2019. Tsunamigenic Potential of the Baiyun Slide Complex in the South China Sea. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(8): 7680-7698. https://doi.org/ 10.1029/2019jb018062
- Li, X.X., Zhong, Z.H., Dong, W.L., et al., 2006. Paleogene Rift Structure and Its Dynamics of Qiongdongnan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(6): 713-721 (in Chinese with English abstract).
- Liao, J., Gong, J.M., Chen, J.W., et al., 2020.New Discovery of Gravity Gliding Structure in the Offshore Indus Basin.*Marine Geology Frontiers*, 36(6): 76-79 (in Chinese with English abstract).
- Moscardelli, L., Wood, L., Mann, P., 2006. Mass Transport Complexes and Associated Processes in the Offshore Area of Trinidad and Venezuela. AAPG Bulletin, 90(7): 1059-1088.
- Mosher, D.C., Moscardelli, L., Shipp, R.C., et al., 2010. Submarine Mass Movements and Their Consequences. 4th International Symposium. Springer, Netherlands, 1-8. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9_1
- Ren, J.Y., Lei, C., 2011. Tectonic Stratigraphic Framework

of Yinggehai-Qiongdongnan Basins and Its Implication for Tectonic Province Division in South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3303-3314 (in Chinese with English abstract).

- Ren, J. F., Sun, M., Han, B., 2020. A Giant Submarine Landslide and Its Triggering Mechanisms on the Nansha Trough Margin, South China Sea. *Earth Science*, https:// kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200714.1059.008. html (in Chinese with English abstract).
- Scarselli, N., McClay, K., Elders, C., 2016. Seismic Geomorphology of Cretaceous Megaslides Offshore Namibia (Orange Basin): Insights into Segmentation and Degradation of Gravity-Driven Linked Systems. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 151–180. https://doi.org/ 10.1016/j.marpetgeo.2016.03.012
- Shanmugam, G., Wang, Y., 2015. The Landslide Problem. Journal of Palaeogeography, 4(2): 109-166. https:// doi.org/10.3724/SP.J.1261.2015.00071
- Sun, Q.L., Xie, X.N., Wu, S.G., 2020. Submarine Landslides in the Northern South China Sea: Characteristics, Geohazard Evaluation and Perspective. *Earth Sciences Frontiers*, https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.9.3 (in Chinese with English abstract)
- Suo, S. T., 1983. On Gravitational Gliding Structures. Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology, 22(3): 11-22 (in Chinese with English abstract)
- Terry, J. P., Winspear, N., Goff, J., et al., 2017. Past and Potential Tsunami Sources in the South China Sea: A Brief Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 167: 47-61. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.007
- Wang, D.W., Wu, S.G., Li, C.F., et al., 2016.Submarine Slide Evidence for Late Miocene Strike-Slip Reversal of the Red River Fault. *Scientia Sinica (Terrae)*, 46(10): 1349-1357 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.W., Wu, S.G., Lü, F.L., et al., 2011.Mass Transport Deposits and Its Significance for Oil & Gas Exploration in Deep-Water Regions of South China Sea. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 35(5): 14-19 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.W., Wu, S.G., Qin, Z.L., et al., 2013. Seismic Characteristics of the Huaguang Mass Transport Deposits in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: Implications for Regional Tectonic Activity. *Marine Geolo*gy, 346: 165-182
- Wang, H. R., 2007. Deep-Water Sedimentary Process-Response and Its Main Controlling Factors in the Northern Continental Margin of the South China Sea (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing, 82–97

(in Chinese with English abstract).

- Wei, K.S., Cui, H.Y., Ye, S.F., et al., 2001. High-Precision Sequence Stratigraphy in Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 26(1): 59-66 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Müller, R. D., Li, S. T., et al., 2006.Origin of Anomalous Subsidence along the Northern South China Sea Margin and Its Relationship to Dynamic Topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745-765. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.03.004
- Xie, X. N., Müller, R. D., Ren, J. Y., et al., 2008.Stratigraphic Architecture and Evolution of the Continental Slope System in Offshore Hainan, Northern South China Sea. *Marine Geology*, 247(3/4): 129-144.
- Xie, X.N., Chen, Z.H., Sun, Z.P., et al., 2012.Depositional Architecture Characteristics of Deepwater Depositional Systems on the Continental Margins of Northwestern South China Sea. *Earth Science*, 37(4): 627-634 (in Chinese with English Abstract).
- Xie, X.N., Ren, J.Y., Wang, Z.F., et al., 2015.Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77-87 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. J., Ren, J.Y., Luo, P., 2019. The Evolution of a Gravity-Driven System Accompanied by Diapirism under the Control of the Prograding West Luconia Deltas in the Kangxi Depression, Southern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 199-221. https://doi.org/10.1007/s11001-019-09384-8
- Yang, T.T., Wu, J.W., Wang, B., et al., 2012. Structural Pattern and Sediment Filling in Huaguang Sag of Southern Qiongdongnan Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- Yao, G.S., Yuan, S.Q., Ma, Y.B., et al., 2009.Deepwater Mass Transport Deposition System of Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin and Its Significance for Hydrocarbon Exploration. *Earth Science*, 34(3): 471– 476 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Yang, X.B., Yang, J.H., et al., 2019. Structure– Sedimentary Evolution and Gas Accumulation of Paleogene in Songnan Low Uplift of the Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 44(8): 2704-2716(in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. Z., Graham, S., McHargue, T., 2009. The Red River Fault Zone in the Yinggehai Basin, South China Sea. *Tectonophysics*, 476(3/4): 397-417. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2009.06.015

附中文参考文献

- 李绪宣,钟志洪,董伟良,等,2006.琼东南盆地古近纪裂陷 构造特征及其动力学机制.石油勘探与开发,33(6): 713-721.
- 廖晶,龚建明,陈建文,等,2020.印度扇近海盆地重力滑动 构造新发现.海洋地质前沿,36(6):76-79.
- 任建业, 雷超, 2011. 莺歌海-琼东南盆地构造-地层格 架及南海动力变形分区. 地球物理学报, 54(12): 3303-3314.
- 任金锋,孙鸣,韩冰,2020. 南海南沙海槽大型海底滑坡的发 育特征及成因机制. 地球科学.https://kns.cnki.net/ kcms/detail/42.1874.P.20200714.1059.008.html
- 孙启良,解习农,吴时国,2020.南海北部海底滑坡的特征、 灾害评估和研究展望.地学前缘.https://doi.org/ 10.13745/j.esf.sf.2020.9.3
- 索书田,1983.重力滑动构造.地球科学——武汉地质学院学报,22(3):11-22.
- 王大伟,吴时国,李春峰,等,2016.晚中新世红河断裂走滑 反转事件的海底滑坡证据.中国科学(地球科学),46 (10):1349-1357.
- 王大伟,吴时国,吕福亮,等,2011.南海深水块体搬运沉积

体系及其油气勘探意义.中国石油大学学报(自然科学版), 35(5):14-19.

- 王海荣,2007.南海北部大陆边缘深水沉积过程一响应及其 主控因素(博士学位论文).北京:中国石油大学, 82-97.
- 魏魁生,崔旱云,叶淑芬,等,2001.琼东南盆地高精度层序 地层学研究.地球科学,26(1):59-66.
- 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等, 2012. 南海西北陆缘深水沉积 体系内部构成特征. 地球科学, 37(4): 627-634.
- 解习农,任建业,王振峰,等,2015.南海大陆边缘盆地构造 演化差异性及其与南海扩张耦合关系.地学前缘,22 (1):77-87.
- 杨涛涛,吴敬武,王彬,等,2012. 琼东南盆地华光凹陷构造 特征及沉积充填.海洋地质与第四纪地质,32(5): 13-18.
- 姚根顺,袁圣强,马玉波,等,2009.琼东南华光凹陷深水重 力搬运沉积体系及其油气勘探.地球科学,34(3): 471-476.
- 周杰,杨希冰,杨金海,等,2019.琼东南盆地松南低凸起古近 系构造一沉积演化特征与天然气成藏.地球科学,44(8): 2704-2716.