

琼东南华光凹陷深水重力搬运 沉积体系及其油气勘探

姚根顺^{1,2,3}, 袁圣强^{1,2}, 马玉波^{1,2}, 秦蕴珊¹, 吴时国^{1,4}

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

4. 中国石油大学(华东)资源与信息学院, 山东青岛 266555

摘要: 重力搬运沉积作用形成的岩性地层圈闭对深水油气勘探具有非常重要的作用。为弄清琼东南盆地华光凹陷重力搬运沉积特征, 基于近年新采集的地震资料和经典层序地层模式, 开展了该区的深水沉积特征研究。南海西北部深水区重力搬运沉积特征发育, 主要包括中新统三亚组发育的复合水道、上新统变形滑坡体及第四系深水浊积水道。三亚组复合水道具有典型的强弱振幅相互叠置特征, 上新统变形滑坡体具有典型的下部变形、上部滑坡的双层结构, 第四系深水浊积水道具有典型的侧向迁移、分支水道等特征。这些沉积特征的形成与越南隆起的物源供给有关。复合水道充填可作为潜在的深水储层, 滑塌体的形成可能与天然气水合物的形成或解体有关。

关键字: 南海; 陆坡; 复合水道; 海底滑坡; 重力搬运沉积。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2009)03-0471-06

收稿日期: 2008-11-10

Deepwater Mass Transport Deposition System of Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin and Its Significance for Hydrocarbon Exploration

YAO Gen-shun^{1,2,3}, YUAN Sheng-qiang^{1,2}, MA Yu-bo^{1,2}, QIN Yun-shan¹, WU Shi-guo^{1,4}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

4. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266555, China

Abstract: The stratigraphic trap formation by mass transport deposition (MTD) in the deepwater area is very important for the deepwater exploration and production. Based on the new seismic data acquired recently and classic sequence stratigraphy theory, we study the deepwater deposition characteristics of Huaguang depression, Qiongdongnan basin. The sedimentary features relates with MTD develop since Miocene, including channel complex developed in Miocene Sanya Formation, Pliocene deformation slide layer and Quaternary deepwater turbidite channels. The Miocene channel complex has typical shingle structure of high amplitude and low amplitude reflection; the Pliocene deformation slide layer has typical deformation feature of lower part and slide of upper part; the Quaternary deepwater turbidite channels have typical lateral migration and bifurcation. These sediment phenomena are related with the sediment supply from the Vietnam uplift. The channel complex in Sanya Formation could be the potential reservoir of the slope deepwater area, and the formation of deformation slide layer may be related with the gas hydrate.

Key words: South China sea; continental slope; channel complex; submarine slide; mass transport deposition (MTD).

基金项目: 中国科学院三期院创新重要方向项目 (Nos. KZCX2-YW-229, KZCX2-YW-203); 国家重点基础研究发展计划项目课题 (No. 2007CB411703).

作者简介: 姚根顺(1962—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事碳酸盐岩和深水油气地质相关研究. E-mail: yaogs_hz@petrochina.com.cn

近年来,随着深水油气勘探的快速发展,与深水
区油气勘探有关的深水沉积过程日益成为当今海洋
科学研究的热点. 无论是中生代湖相沉积还是新生
代海相沉积地层,重力搬运沉积所形成的水道砂体
或浊积扇体都是重要的油气储集体类型,在当今深
水勘探中扮演重要角色,受到各大油气公司和科研
机构的重视(Deptuck *et al.*, 2003). 随着全球海域
油气勘探的不断深入和突破,关于深水沉积作用的
研究将越来越多地引起科学和工业界的关注(Wu
et al., 1999; Shanmugam, 2000, 2002; Wu *et al.*,
2005; 庞雄等, 2007; Yuan *et al.*, 2009). 重力
搬运沉积是深水环境下常见的沉积现象,许多被动
陆缘陆坡的沉积过程都与重力搬运有关(McHugh
et al., 2002). 陆坡具有相对较大的坡度,来自陆架
源源不断的沉积物供给在陆坡位置常由于重力作用
而失稳,形成一系列沿陆坡向下的搬运过程,主要包
括蠕动、滑动、滑坡、碎屑流和浊流等,由于它们主要
受重力作用控制,因此通称为重力搬运沉积.

研究区位于琼东南盆地南部深水区,现属于被动
大陆边缘陆坡区,主体水深 1 200 m(图 1). 该区地层
层序以 T60(早中新世,23.3 Ma)反射界面为界,分为
断陷和坳陷两个巨层序,T60 为该区的断坳转换面,
与琼东南盆地北部层序相同(龚再升等,2001; 王华
等,2004; 姚根顺等,2008; Yuan *et al.*, 2009). 研究
区中新世以来主体处于半深海环境中,是重力搬运沉
积作用集中发育的时期. 本文根据新近获得的高分辨
率地震资料,结合周边地质勘探成果,开展琼东南盆

地华光凹陷的深水重力搬运沉积研究.

1 琼东南盆地深水重力搬运沉积体系

琼东南盆地典型的陆架—陆坡体系开始形成于
中中新世时期(Xie *et al.*, 2006; Yuan *et al.*,
2009),越南隆起边缘陆架—陆坡体系也开始形成于
中中新世时期或者更早(Fyhn *et al.*, 2007). 研究
区特殊的地理位置使其从中新世就开始进入深水沉
积环境,并且具有越南隆起和海南岛双物源供给特
征(姚根顺等,2008). 基于近些年新采集的 2D 和
3D 地震数据,发现华光凹陷中新世以来广泛发育重
力搬运沉积.

1.1 中新统深水复合水道

单个深水水道的形成要经历以下几个时期:侵
蚀期、充填期、溢出期和泥岩充填期(Navarre *et al.*,
2002). 水道初始侵蚀的位置一般是陆坡不稳定
或沉积物固结较差的位置,当然还受到诸如海底
地形、构造特征等方面的影响. 就单个水道来说,侵
蚀期的结束意味着充填期的开始. 现在的研究认为
充填期一般分为粗粒物充填期、沉积物溢出期以及
水体相对较深的细粒泥岩充填期(图 2). 复合水道
是经过反复的侵蚀—充填过程而形成的.

华光凹陷三亚组地层(23.3~15.5 Ma)中发
现了特征典型的复合水道(图 3). 它具有典型复合
水道的黑色波峰强反射与白色波谷弱反射相互叠置和

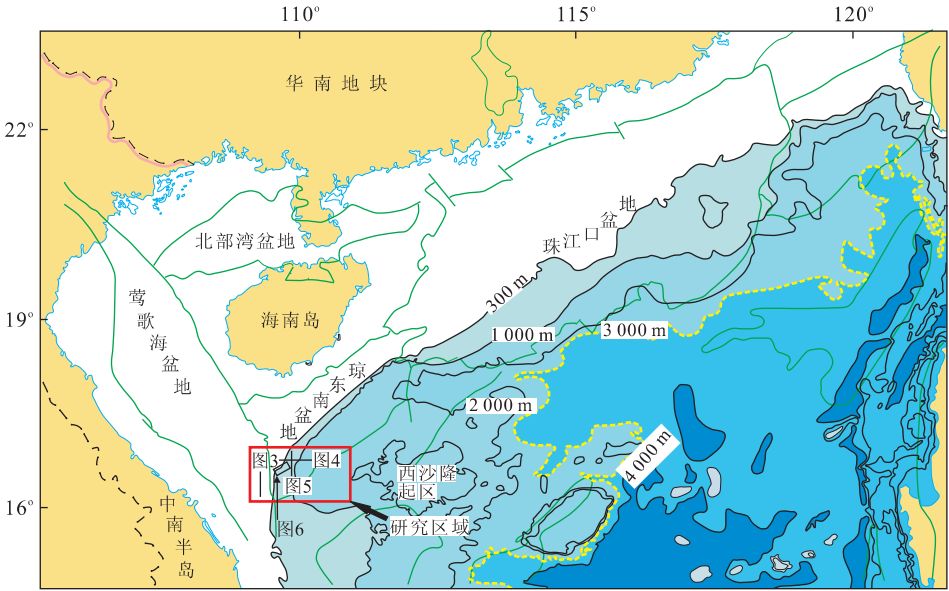


图 1 研究区构造位置及水深分布

Fig. 1 Structural location and bathgram map of study area

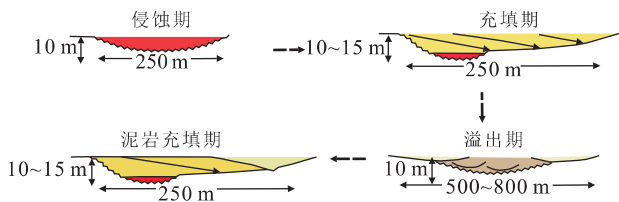
图 2 水道形成期次图示(据 Navarre *et al.*, 2002 修改)

Fig. 2 Paradigm of channel

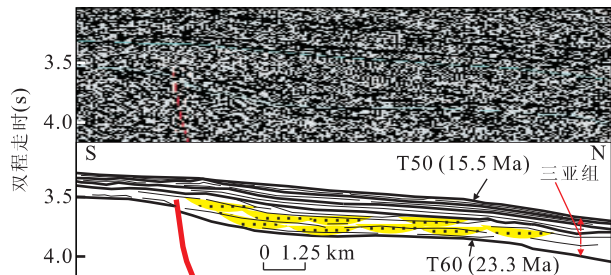


图 3 过复合水道的 N-S 走向剖面及其解释图(位置见图 1)

Fig. 3 N-S trend seismic profile and interpretation map across the channel complex of Sanya Formation

不连续特征(Schwab *et al.*, 2007). 据现有地震资料判断该水道的主轴方向是 S-N 或 SSW-NNE 走向,水道下切现象明显,水道底部清楚;水道两侧地层反射特征基本相同,水道内沉积反射层清晰或模糊;差异压实作用较明显;水道顶部形状为丘状或平缓弱反射;复合水道最大厚度约 400 m,宽约 6 km,长轴方向长约 12 km,整体规模巨大.

1.2 上新世以来大型变形滑坡体

在研究区 T30(5.5 Ma)反射界面之上发现了一套变形体,该变形体主体位置位于研究区的中部,其上部到海底为一套小断裂发育的沉积层序,该层序被断裂错断,而在海底形成了类似沟壑状的陡坎和峡谷(图 4). 笔者认为 T30 界面到海底之间的这两套地层关系密切,两者组成一个滑坡体,滑坡体下部变形使得上部地层滑坡变形,沉积断裂发育(图 4a). 图 4a 是一条 E-W 走向的剖面,可以明显地看出其滑坡体的边界断层. 图 4b 是一条 S-N 走向的剖面,可以看出其滑坡体南部边界断裂明显,而北部却被来自北部的地层上超在这套变形体上(图 4b).

1.3 第四系深水水道

在研究区内,基于 3D 地震数据在第四系地层中发现了典型的深水水道(图 5). 该期水道包括 C1、C2 和侵蚀洼地. C1 具有典型的水道侧向迁移、分支水道和水道前端擦痕特征(图 5). C2 相对 C1 来说规模相对比较小,发育有堤坝特征. 从地震剖面

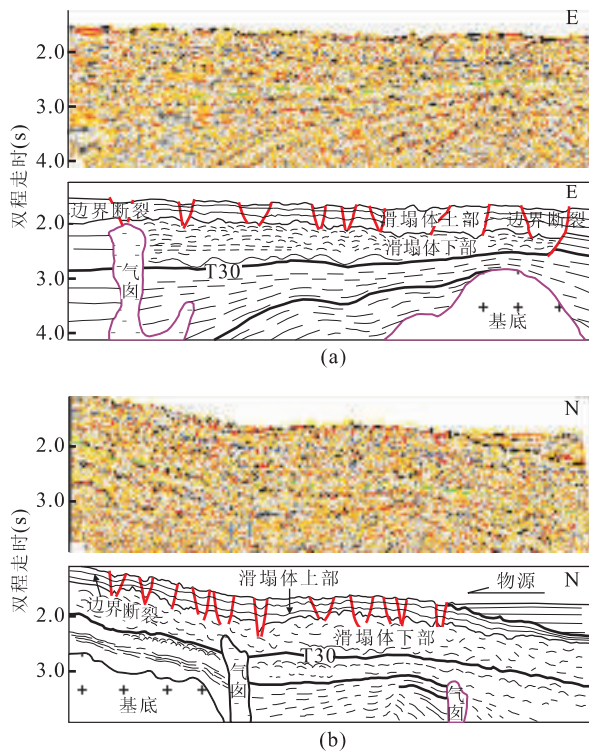


图 4 过滑坡体的 E-W 走向(a)和 S-N 走向(b)剖面及其解释图(位置见图 1)

Fig. 4 E-W trend (a) and S-N (b) seismic profile and interpretation map across the slide

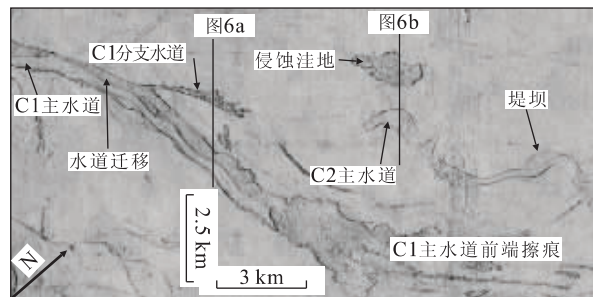


图 5 相干时间切片显示深水水道的平面特征(位置见图 1)

Fig. 5 Coherence time-slice shows the plane characteristics of deepwater channels

上来看,该期深水水道的下切侵蚀特点明显,其内部充填地震反射特征与周围地层不同,以中弱振幅反射为主(图 6). 这与世界上典型地区的复合水道的强振幅特征不同,以世界范围内发现的深水水道钻探来看,强振幅代表富砂,那么该地区发现的深水水道充填物应该富泥(Popescu *et al.*, 2001; Deptuck *et al.*, 2003, 2007; Kolla *et al.*, 2007).

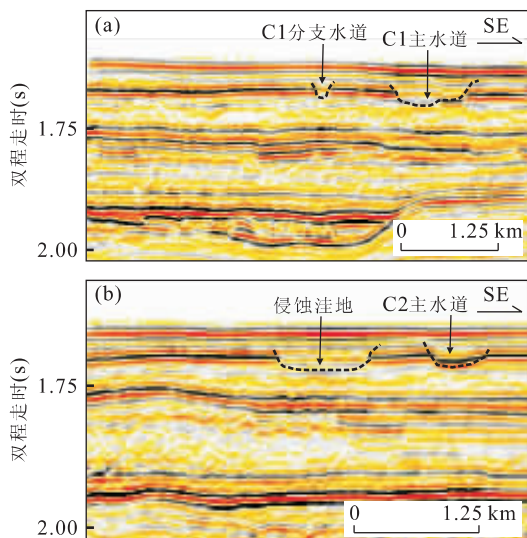


图 6 过第四系水道的两条地震剖面(位置见图 5)

Fig. 6 Seismic profiles across the Quaternary deepwater channels

2 讨论

2.1 水道成因及物源分析

大陆边缘的深水沉积体系主要受控于沉积物供给、区域构造运动和全球海平面变化(Wu *et al.*, 1999; Deptuck *et al.*, 2003). 华光凹陷作为琼东南盆地最南端的凹陷,其东南方向被西沙隆起包围,其地理位置和琼东南其他凹陷有比较明显的差异,其沉积体系及物源供给都有异于琼东南盆地北部的凹陷. 华光凹陷的物源受海南岛影响非常有限,由于距离较远,推测主要以细粒沉积物供给为主,从陆坡盆地的沉积层序来看主要是远端重力流沉积物.

笔者也曾对于华光凹陷的物源模式进行过探讨,认为其主要为双物源供给模式,即西南方向的越南隆起物源和北部的华南大陆物源(姚根顺等, 2008). 本次讨论的三亚组和第四系水道都应该属于西南物源供给的结果. 三亚组复合水道指示当时的物源供给量较大,但是当时越南隆起边缘的陆架—陆坡体系还没有成形,应该属于重力搬运的典型例子,可能包括多个重力搬运沉积过程. 而第四系地层中发现的水道则属于典型的陆坡深水浊积水道,其形成与浊流关系密切,侵蚀、侧向迁移和堤坝特征都特别典型,应该对应于第四纪晚期的浊流事件.

2.2 大型变形滑坡体成因

陆坡海底滑坡是大陆边缘沉积物向深海盆地搬运的重要过程(Haflidason *et al.*, 2004),其形成与

重力因素关系密切,加上陆坡具有相对较大的坡度,增加了滑坡体的发生几率,往往在其他地质作用的诱发下形成,比如构造活动、地震和水合物分解等因素(Sultan *et al.*, 2007). 大陆坡海底滑坡因其巨大的地质灾害和与天然气水合物的密切关系而受到关注(Brown *et al.*, 2006). 华光凹陷现今的水深在 500~1 500 m,变形滑坡体所在的位置水深在 1 200 m 左右,位于整个凹陷靠北部且水体较深的位置,根据琼东南盆地相对海平面变化曲线得出滑坡体形成时期水深也应该超过 1 000 m(魏魁生等, 2001). 对于该套变形体,王海荣(2007)认为是底流沉积作用造成的. 本文据其垂直陆坡的分布形态和区域古南海学特征认为该套沉积变形体是重力搬运作用下形成,其形成可能与晚期的构造活动有关.

2.3 深水重力搬运沉积体系对深水油气勘探的意义

深水水道常成为陆架—陆坡体系中陆源碎屑物从大陆边缘输送到深海或大洋中的通道,其也可以作为粗粒沉积物的沉积场所,因此对深水油气勘探具有重要的经济意义(Deptuck *et al.*, 2003; Kolla *et al.*, 2007). 许多专家认为深水重力搬运沉积体系概念模式在深水油气勘探的预测是非常成功的(Popescu *et al.*, 2001; Deptuck *et al.*, 2003, 2007; Kolla *et al.*, 2007). 重力搬运沉积形成的复合水道充填、浊积岩可以作为良好的储层,分布于烃源岩附近的水道砂体具有较好孔隙度和渗透率,往往具有高产特征,这点在世界上许多深水勘探热点地区都得到了证实,特别是在巴西的 Campos 盆地,其深水发现的储层接近 90% 都是浊积岩(Pettingill and Weimer, 2002). 近些年 Shanmugam (2000, 2002)等进行的水槽试验认为重力搬运形成的碎屑流可以形成更加良好的干净的砂岩储层,认为碎屑流可以在较缓的陆坡上(小于 1°)长距离的搬运并且需要较低的泥质含量,他们认为现在所说的浊积岩储层存在问题,但是无论是浊积岩或者是碎屑流都是属于重力搬运沉积过程,因此对于重力搬运沉积对于深水储层的贡献都持肯定态度. 而大型陆坡滑坡体与天然气水合物能源关系密切(吴时国等, 2008).

本区发育良好的中新统复合水道充填可以作为良好的深水油气储层,这一点在世界许多勘探热点区已经得到证实. 图 3 上可以看出华光凹陷的水道沉积下面是巨厚的断陷期烃源岩,上面是梅山组区域泥岩盖层,并且有断层穿过水道与烃源岩连通. 虽然水道内部的砂体连通性可能存在问题,但是水道

规模巨大,长轴方向约12 km,最大厚度达400 m,可作为华光凹陷深水区一个潜在的岩性储层。另外,碎屑流等形成的砂体也可以作为潜在的深水储层。因此,南海北部地区发育的深水重力搬运沉积体系中形成的各类砂体将成为南海海域重要的勘探目标,具有良好的勘探前景。

3 结论

对华光凹陷的重力搬运沉积体系进行研究发现,其许多潜在的深水地层圈闭都与重力搬运过程关系密切。中新统三亚组大型复合水道、上新统大型变形滑坡体和第四系深水浊积水道的形成都与重力搬运有关。中新世以来研究区主要受到越南隆起的物源供给,滑塌体的形成还可能与局部构造活动有关。重力搬运沉积体系形成的峡谷水道可以作为良好的储层,具有较好的孔隙度和渗透率,往往具有高产特征,其发现为本区油气勘探提供了重要的勘探目标。只要有适当的生储盖时空组合关系,结合构造圈闭就可以形成规模巨大的深水油气藏,具有广阔的勘探前景。而大型变形滑坡体的研究除了可以研究其地质灾害以外,其与天然气水合物的关系也是潜在的研究热点。

致谢:该文在撰写过程中受到杭州地质研究院海洋所吕福亮所长的帮助,图件编辑和成文过程中受到付彦辉同志的帮助,在此一并表示感谢。

References

- Brown, H. E., Holbrook, W. S., Hornbach, M. J., et al., 2006. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga slide, offshore Norway. *Marine Geology*, 229(3—4): 179—186.
- Deptuck, M. E., Steffens, G. S., Barton, M., et al., 2003. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6—8): 649—676.
- Deptuck, M. E., Sylvester, Z., Pirmez, C., et al., 2007. Migration-aggradation history and 3D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope. *Marine and Petroleum Geology*, 24: 406—433.
- Fyhn, M. B. W., Nielsen, L. H., Boldreel, L. O., et al., 2007. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the northwest Phu Khanh basin, offshore Central Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, DOI:10.1016/j.marpetgeo.2007.07.014.
- Gong, Z. S., Yang, J. M., Hao, F., et al., 2001. Difference in natural gas accumulation conditions between Yinggehai and Qiongdongnan basins and its implications for natural gas exploration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(3): 286—290 (in Chinese with English abstract).
- Hafliadason, H., Sejrup, H. P., Nygard, A., et al., 2004. The storegga slide: Architecture, geometry and slide development. *Marine Geology*, 213: 201—234.
- Kolla, V., Posamentier, H. W., Wood, L. J., 2007. Deep-water and fluvial sinuous channels—Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation. *Marine and Petroleum Geology*, 24: 388—405.
- McHugh, C. M. G., Damuth, J. E., Mountain, G. S., 2002. Cenozoic mass-transport facies and their correlation with relative sea-level change, New Jersey continental margin. *Marine Geology*, 184(3—4): 295—334.
- Navarre, J. C., Claude, D., Liberelle, E., et al., 2002. Deep-water turbidite system analysis, West Africa: Sedimentary model and implications for reservoir model construction. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 21(11): 1132—1139.
- Pang, X., Chen, C. M., Zhu, M., et al., 2007. Frontier of the deep-water deposition study. *Geological Review*, 53(1): 36—43 (in Chinese with English abstract).
- Pettingill, H. S., Weimer, P., 2002. World-wide deep water exploration and production: Past, present, and future. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 21(4): 371—376.
- Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., et al., 2001. Late Quaternary channel avulsions on the Danube deep-sea fan. *Marine Geology*, 179(1—2): 25—37.
- Schwab, A. M., Cronin, B. T., Ferreira, H., 2007. Seismic expression of channel outcrops: Offset stacked versus amalgamated channel systems. *Marine and Petroleum Geology*, 24: 504—514.
- Shanmugam, G., 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s) deep-water processes and facies models: A critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285—342.
- Shanmugam, G., 2002. Ten turbidite myths. *Earth-Science Reviews*, 58(3—4): 311—341.
- Sultan, N., Voisset, M., Marsset, B., et al., 2007. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta. *Marine Geology*, 237(3—4): 169—190.
- Wang, H., Lu, Y. C., Liao, Y. T., et al., 2004. Sequence architecture and favorable reservoir prediction of Sanya Formation.

- tion in the central and eastern Qiongdongnan basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5):609—614 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. R., 2007. Sedimentation processes and its response in deep-water environment of the northern continental margin, the South China sea [Dissertation]. Petroleum University of China, Beijing, 82—97 (in Chinese).
- Wei, K. S., Cui, H. Y., Ye, S. F., et al., 2001. High-precision sequence stratigraphy in Qiongdongnan basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(1):59—66 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S., Wong, H. K., Ludmann, T., 1999. Gravity-driven sedimentation on the northwest continental slope in South China sea; Results from high-resolution seismic data and piston cores. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 17(2):155—169.
- Wu, S. G., Takahashi, N., Tokuyama, H., et al., 2005. Geomorphology, sedimentary processes and development of the Zenisu deep-sea channel, Northern Philippine Sea. *Geo-Marine Letters*, 25(2):230—240.
- Wu, S. G., Yao, G. S., Dong, D. D., et al., 2008. Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field, northern South China sea. *Acta Petrolei Sinica*, 29(3):324—328 (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.
- Yao, G. S., Yuan, S. Q., Wu, S. G., et al., 2008. The double provenance supply depositional model and its exploration prospect in the deepwater of Qiongdongnan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(6):685—691 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, S. Q., Yao, G. H., Lu, F. L., et al., 2009. Features of Late Cenozoic deepwater sedimentation in southern Qiongdongnan basin, northwestern South China sea. *Journal of Earth Science*, 20(1):172—179.

附中文参考文献

- 龚再升, 杨甲明, 郝芳, 等, 2001. 莺歌海盆地与琼东南盆地成藏条件的比较及天然气勘探方向. 地球科学——中国地质大学学报, 26(3):286—290.
- 庞雄, 陈长民, 朱明, 等, 2007. 深水沉积研究前缘问题. 地质论评, 53(1):36—43.
- 王华, 陆永潮, 廖远涛, 等, 2004. 琼东南盆地中东部三亚组层序构成及有利区带预测. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5):609—614.
- 王海荣, 2007. 南海北部大陆边缘深水沉积过程—响应及其主控因素(博士论文). 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——中国地质大学学报, 26(1):59—66.
- 吴时国, 姚根顺, 董冬冬, 等, 2008. 南海北部陆坡大型气田区天然气水合物的成藏地质构造特征. 石油学报, 29(3):324—328.
- 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等, 2008. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景. 石油勘探与开发, 35(6):685—691.