

文章编号:1673-5005(2009)05-0017-06

珠江口盆地深水区新生代构造沉积演化

董冬冬^{1,2}, 王大伟¹, 张功成³, 吴时国^{1,4}, 袁圣强^{1,5}

- (1. 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 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510301;
3. 中国海洋石油有限公司 研究中心, 北京 100027; 4. 中国石油大学 资源与信息学院, 山东 青岛 266555;
5. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:运用平衡剖面技术对珠江口盆地深水区珠二坳陷的典型测线进行构造演化史恢复, 计算不同构造时期的拉伸速率及沉积速率等参数, 总结其构造沉积演化特征。结果表明: 珠二坳陷的构造演化过程可以分为裂陷期和拗陷期两个发育阶段; 23 Ma 之前为裂陷期, 伸展作用十分强烈, 主要断裂构造发育; 23 Ma 后为裂后的拗陷期, 伸展作用减弱; 拗陷新生代拉伸系数为 1.15 ~ 1.35, 不同凹陷在拉伸作用、沉积速率和断裂发育方面具有明显的差异; 白云凹陷裂陷期发育陆相断陷湖相和水下三角洲沉积, 拗陷期发育深水扇和深海沉积序列。

关键词: 珠江口盆地; 深水区; 平衡剖面; 构造演化

中图分类号: P 542 **文献标识码:** A

Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of deepwater area, Pearl River Mouth Basin

DONG Dong-dong^{1,2}, WANG Da-wei¹, ZHANG Gong-cheng³, WU Shi-guo^{1,4}, YUAN Sheng-qiang^{1,5}

- (1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*
2. *CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;*
3. *CNOOC Research Center, Beijing 100027, China;*
4. *College of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;*
5. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Balanced cross-section technique was applied to restore tectonic evolution history of the representative seismic lines in the deepwater area of Zhuer depression, Pearl River Mouth Basin. The extensional rate and deposition rate were calculated to discuss the tectonic and sedimentary evolution. The results show that the structural evolution of Zhuer depression could be generally divided into two stages of syn-rift and post-rift. The syn-rift stage is before 23 Ma, when extension and fracture were strong, and the major faults developed well. The post-rift stage is after 23 Ma, when the extension was weakening. The total stretching factor of the depression is between 1.15 and 1.35. There are obvious difference in the extension, deposition rate and fault development among the different sags. The Baiyun sag developed the syn-rift sequence of lacustrine deposits and submerged delta, followed by the post-rift sequence of deepwater fans and pelagic deposits.

Key words: Pearl River Mouth Basin; deepwater area; balanced cross-section; structural and sedimentary evolution

南海北部陆缘现今的深水区分布有规模巨大的 盆地(水深大于 300 m), 由于其巨大的油气远景而

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-203); 中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金项目(MSGL08-22); 国家“973”重点基础研究项目(2007CB411703)

作者简介: 董冬冬(1982-), 男(汉族), 山东济南人, 助理研究员, 博士, 主要从事深水油气的相关研究。

受到了国内科研单位和石油公司的重视^[14]。近年来,大型深水扇的发现使人们更加重视深水构造沉积体系的研究^[5-9]。目前对珠江口盆地深水区,即珠二拗陷的构造演化过程及地层沉积规律认识不清,尤其缺乏定量研究,影响了该区的油气勘探进程。平衡剖面方法是研究断陷盆地演化过程的有效方法,自20世纪70年代以来这一方法逐渐得到推广应用并成为盆地构造恢复的基础和核心技术^[10,11-18]。笔者运用2DMove软件对珠二拗陷的典型测线进行平衡剖面恢复,计算拗陷各发育时期的拉张速率及沉积速率等参数,研究其新生代的构造及沉积演化特征。

1 区域地质概况

珠江口盆地深水区主要位于珠二拗陷内,包括白云凹陷、荔湾凹陷、开平凹陷和顺德凹陷,其中顺德凹陷又被中间的低凸起分为顺德北凹和顺德南凹。拗陷北部以番禺低隆起和神狐隆起¹与珠一和珠三拗陷相隔,南部以南部隆起为界,东部与东沙隆起相邻,西部以神狐隆起为界。拗陷整体呈NE-SW向展布,水深为0.2~2.0 km,面积约为4×10⁴ km²(图1),跨越大陆边缘的陆坡-深海平原区,即洋陆过渡带,发育巨厚的新生代沉积物,具有良好的油

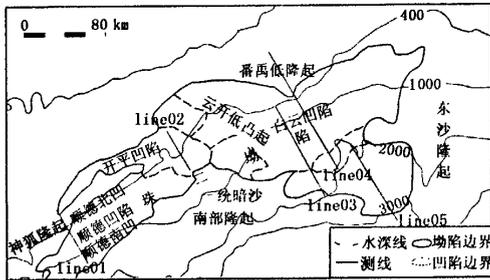


图1 珠二拗陷及其周边区域构造划分
Fig.1 Structural units in and around Zhu'er depression

气资源前景^[19-20]。盆地新生代经历过5次大的构造运动,分别为珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动和东沙运动,存在多个海进海退旋回^[6,20]。研究区自下而上发育8个三级层序,分别对应于文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系地层,其中文昌组和恩平组地层被认为是该区的主要烃源岩层^[19-20](图2)。基底主要发育近NE-EW向的控洼边界大断层^[21]。

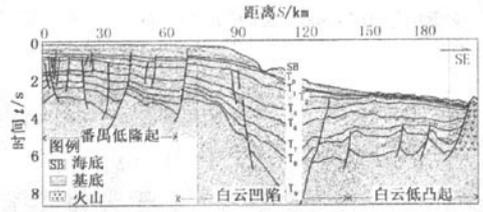


图2 珠江口盆地深水区层序划分
Fig.2 Sedimentary sequence of deepwater area of Pearl River Mouth Basin

2 平衡剖面恢复

平衡剖面技术是假定剖面上地层的变形符合平面应变条件,按照面积不变或长度不变的几何学平衡原则进行剖面的构造复原^[13]。笔者对白云凹陷内钻井的VSP拟合曲线进行地震剖面的时深转换,根据单井分析得到的珠江口盆地综合地层岩性进行地层脱压实校正,地层回剥时采用Airy模型进行均衡校正,参考前人的研究成果^[5-8],在恢复古地貌的基础上对古水深进行了校正。盆地总体伸展特征可用拉张系数(β)予以表征,计算公式为

$$\beta = L_1/L_0$$

式中,L₀和L₁分别为剖面原始长度和拉张后长度^[22]。

每一期地层沉积时期的拉张程度可以用拉张速率来衡量,计算公式为

$$r_i = (L_n - L_0) / \Delta T_i$$

式中,r_i为第i层沉积时的拉张速率;L_n为第i层顶界面沉积时的长度,km;L₀为第i层底界面沉积时的长度,km;ΔT_i为第i层的沉积时间,Ma。

选取珠二拗陷的5条地震测线进行研究,自西向东依次命名为Line01至Line05(图1)。测线过拗陷内的所有主要构造单元,可以用来研究拗陷的总体演化特征。通过对构造发育剖面的定量分析,计算剖面各发育时期的剖面长度和沉积厚度(表1),在此基础上求取拉张系数和拉张速率。图3为Line03测线的构造演化剖面。需要指出的是,Walsh等^[23]曾指出由于地震剖面分辨小断层的能力有限,大约40%的拉张是无法通过地震剖面求得的,因此本次将平衡剖面计算得到的拉张系数增加了40%,进而修正拉张速率。

表1 平衡剖面长度及各期地层厚度

Table 1 Length of balanced cross-section and formation thickness km

测线	参数	$T_8/50$ Ma	$T_8/40$ Ma	$T_7/32$ Ma	$T_6/23$ Ma	$T_4/16.5$ Ma	$T_2/10.5$ Ma	$T_0/2.6$ Ma	SB/0 Ma
Line01	L_1	44.77	50.50	54.07	55.17	55.46	55.46	55.46	55.55
	T_{ms}	0	0.48	0.79	0.24	0.53	0.15	0.35	0.21
	T_{ms}	0	1.47	1.99	1.06	0.99	0.28	0.17	0.37
Line02	L_1	49.17	54.60	55.32	55.74	56.00	56.00	56.00	56.06
	T_{ln}	0	5.44	1.00	0.72	0.82	0.51	0.23	0.34
Line03	L_1	117.00	122.35	125.43	127.40	128.70	129.25	130.00	130.00
	T_{ln}	0	5.94	1.60	2.00	1.49	1.00	0.70	0.25
	T_{ln}	0	2.28	1.44	1.13	1.23	0.34	0.22	0.21
Line04	L_1	175.67	188.27	195.81	197.96	199.36	200.78	201.48	201.48
	T_{ln}	0	9.20	3.47	3.94	1.99	1.31	0.79	0.50
	T_{ln}	0	4.25	1.84	1.10	1.50	0.30	0.18	0.13
Line05	L_1	91.03	99.57	104.25	104.52	104.70	104.70	104.70	104.70
	T_{ln}	0	4.68	4.87	3.38	1.14	0.74	0.28	0.33
	T_{ln}	0	0	0	0.65	0.56	0.30	0.18	0.14

注: L_1 为剖面长度; T_{ms} 、 T_{ms} 、 T_{ln} 、 T_{ln} 和 T_{ln} 分别为顺德北凹、顺德南凹、白云凹陷、荔湾凹陷和白云低凸起各期的沉积层厚度。

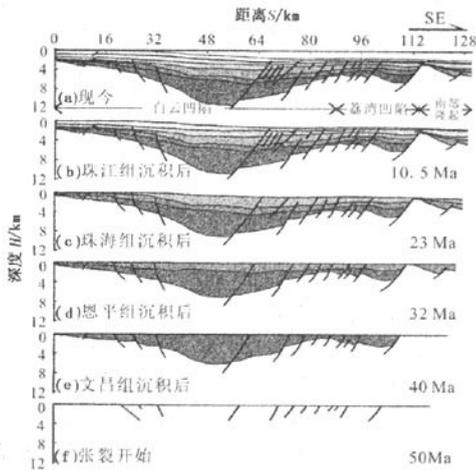


图3 Line03 测线的构造演化剖面

Fig.3 Structural evolution profiles of Line03

2.1 现今构造特征

顺德北凹由两个并联的北断南超型半地堑组成,而顺德南凹则为南断北超型的半地堑。顺德凹陷文昌组地层不太发育,最厚处不超过 0.9 km,而恩平组地层很发育,最大厚度可达 1.5 km。开平凹陷在 Line02 测线上呈现南断北超型半地堑样式,文昌组地层发育,凹陷中心厚度超过 4.0 km。白云凹陷整体表现为复式地堑,在 Line03 测线上表现为蝶形拗陷的特征,凹陷南北坡断裂发育程度具有很大差异,北坡的断裂发育很少,而南坡发育密集。在 Line04 测线上白云凹陷表现为半地堑构造样式,为南断北超型,南部边界断裂一直活动至 10.5 Ma,沉积中心明显受该断裂的控制。荔湾凹陷在 Line03

测线上呈现南断北超的半地堑形态,而在 Line05 测线上呈现复杂的复式地堑特征,凹陷中部的低凸起将凹陷分为两个部分,北部为地堑式,而南部为北断南超型的半地堑式。

2.2 拗陷拉张过程

由图 3 和表 1 可以看出,5 条测线在新生代基本上呈现近南北向拉张的状态。5 条测线各构造时期的拉张系数及拉张速率对比图显示,在新生代演化过程中拗陷的拉张系数不是很大,为 1.15 ~ 1.35 (图 4)。

研究区东部的拉张程度呈现南东比北西高的特点,拉张系数 Line05 > Line04 > Line03,原因可能为受北部番禺低隆起和西南部的南部隆起夹持,珠二拗陷的东部区域呈向南东张开的喇叭状(图 1),加之该区受地幔顺时针流动产生的左行旋转变力影响,其发育受南南东向拉张应力场和北西向左行剪应力场控制,所以东南部较西北部更容易拉张^[24]。

在新生代的演化过程中,前 3 个构造时期(50 ~ 23 Ma)分别对应于文昌组、恩平组和珠海组沉积时期,拉张速率较大,之后的地层拉张不明显(图 4)。其中,文昌组沉积时期(50 ~ 40 Ma)拉张速率最大,在 Line04 测线可以达到 1.8 mm/a,说明文昌组沉积时期深部的构造活动较为剧烈,岩石圈减薄强烈。恩平组和珠海组沉积时期拉张速率有所下降,但平均仍接近 0.6 mm/a。研究区至 23 Ma 后拉张速率开始出现大幅下降,每期均小于 0.2 mm/a,伸展作用开始减弱。区域性的大断裂大多只发育到 T_6 层(23 Ma),后期的断裂发育很少,且多为断距较小的层间断裂或早期断层的重新活动。Line05 测线

主要跨荔湾凹陷,位于研究区的最南部,32 Ma之后便几乎没有拉伸。

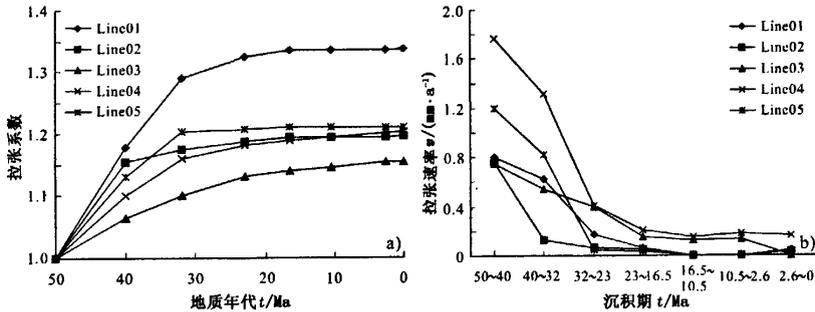


图4 拉伸系数及拉伸速率曲线

Fig. 4 Curves of stretching factors and stretching rates

3 构造沉积演化特征

南海北部陆缘发育完好的陆架陆坡体系,且陆架坡折带也曾经发生过跃迁^[5]。白云凹陷北坡位于上陆坡,发育多期深水扇且还受进积的水下三角洲的影响,记录了丰富的构造沉积信息^[3,9-11]。平衡剖面恢复所得到的沉积地层厚度都经过了脱压实和均衡校正。笔者计算并分析白云凹陷北坡位置的地层沉积速率和基底沉降量(图5),结合前人成果对该区的构造和沉积演化进行综合研究。

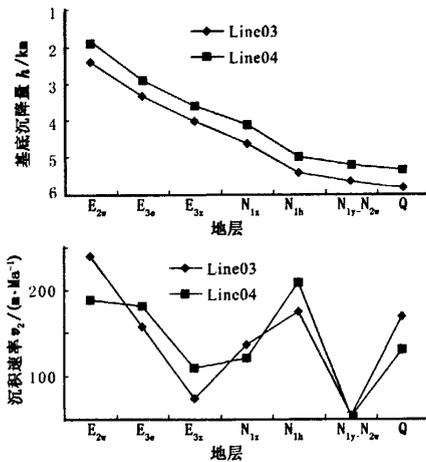


图5 白云凹陷北坡基底沉降量与沉积速率对比

Fig. 5 Curves of sedimentation and deposition rates in northern slope of Baiyun sag

白云凹陷文昌组(E_{2w})沉积时期地层沉积速率最高,在凹陷北坡可达250 m/Ma,沉积了巨厚的文昌组湖相灰黑色泥岩夹砂岩^[25]。恩平组(E_{3e})地层沉积速率下降,小于200 m/Ma,主要因为该时期基底沉降速率相对较低,早期又有文昌组的巨厚沉积物,导致可容空间变小,沉积了湖泊-沼泽相灰黑色

泥岩与砂岩互层夹煤层^[25],但是地层受海侵影响严重,具有一定的海相特征^[26]。从32 Ma开始发生大规模海进,陆架坡折位于白云低凸起附近,整个白云凹陷均位于陆架的位置,广泛发育了珠海组(E_{3z})浅海三角洲沉积^[27],但沉积速率不大,约为100 m/Ma,荔湾凹陷此时已处于陆坡深水环境。23~10.5 Ma(N_{1z} ~ N_{1h})陆架坡折跃迁至白云凹陷的北坡,白云凹陷及其以南地区都处于深水区,在低位期发育深水扇沉积^[6,9,27];白云凹陷北坡的沉积速率明显增大,最大可超过200 m/Ma。10.5~2.6 Ma(N_{1y} ~ N_{2x})白云凹陷北坡乃至整个凹陷沉积速率快速降低,主要是因为10.5 Ma以来的海侵作用增强,三级海平面下降时不能退到陆架坡折带,白云凹陷北坡不再发育深水扇,主要为半深海相的细粒沉积,且受东沙运动的影响区域发生断块升降作用,地层遭受剥蚀导致沉积速率进一步降低。2.6 Ma至今凹陷进入稳定的沉降阶段,沉积速率有所增大。

综合以上的分析,珠江口盆地深水区新生代以来的构造及沉积演化以23 Ma为界大体可以将其分为裂陷期和拗陷期两个阶段,各发育阶段在构造和沉积方面均表现出不同的特征。

早始新世南海北部陆缘发生珠琼运动一幕,现今的珠江口盆地深水区(珠二拗陷)初步形成,开始了新生代的构造演化。早中始新世是裂陷阶段的早期,研究区内的各构造单元雏形基本形成,但是分块断陷作用强烈,不同的构造单元发育差异巨大。白云、荔湾和开平凹陷内沉积了巨厚的文昌组湖相泥岩夹砂岩,形成拗陷的主力烃源岩,而番禺低隆起和白云低凸起等构造高部位沉积地层较薄,南部隆起尚未接受沉积。顺德凹陷尚处于相对的高部位,仅沉积了很薄的文昌组地层。荔湾凹陷的中部形成一个地垒,将凹陷分为南北两部分。

晚始新世发生珠琼运动二幕,研究区进一步伸展、沉降。晚始新世至早渐新世沉积了恩平组的湖泊-沼泽相砂泥岩互层,形成拗陷的次级烃源岩。开平凹陷恩平组地层厚度相对于文昌组急剧减薄,反映了该区已不再是沉积中心,而是处于向白云凹陷倾斜的大斜坡位置^[28]。随着伸展沉降的不断进行,晚始新世末期或早渐新世时研究区发生了海侵,局部海侵范围较大。此时南部隆起也开始接受沉积,恩平组在全区的沉积厚度相对文昌组地层均匀,反映该期断陷作用开始减弱。

早渐新世发生南海运动,南海中央海盆开始扩张,珠江口盆地深水区进一步沉降,发生了大规模海侵,陆架坡折位于白云凹陷的南坡,中晚渐新世在白云凹陷沉积了珠海组大套的浅海三角洲沉积,而南部的荔湾凹陷已处于半深海沉积环境。该构造期全区进一步拉张,部分基底断裂重新活动,同时发育部分层间断裂,但断距不大。珠海组在凸起和凹陷的沉积厚度还是具有不均匀性,仍然反映出一定的裂陷期的特征。

渐新世晚期到中新世早期在珠江口盆地发生白云运动,陆架坡折跃迁至白云凹陷的北坡,白云凹陷及其以南地区都处于深水陆坡区。之后研究区在裂后热沉降的作用下整体进入拗陷阶段,断裂作用明显减弱,地层沉积厚度均匀,早期凹凸相间的构造格局消失。全区在拗陷期的拉张不明显,断裂相对不发育,且主要为层间小断裂。23 Ma之后大部分地区已变为深水或半深水环境。23~10.5 Ma在白云凹陷主要沉积了深水扇砂泥岩,为全区主要的储层,沉积速率相对较高。10.5 Ma至今沉积了深海半深海相泥岩和泥质粉砂岩,成为区域盖层^[2]。

4 结 论

(1) 顺德凹陷由若干个半地堑组成,开平凹陷在局部呈现南断北超的半地堑样式,白云和荔湾凹陷整体表现为复式地堑。区域断裂主要发育在23 Ma之前,部分断裂延伸到上中新世,具有一定的继承性。

(2) 珠江口盆地深水区的新生代构造演化大体可分为裂陷期和拗陷期两大发育阶段:新生代23 Ma前为裂陷期,伸展作用强烈;23 Ma后为拗陷期,伸展作用减弱。珠二拗陷新生代拉张系数为1.15~1.35。

(3) 白云凹陷裂陷期发育陆相断陷湖相沉积和水下三角洲,拗陷期发育深水扇和深海沉积序列。

参考文献:

- [1] 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. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petroli Sinica, 2007,28(2):15-21.
- [2] WU Shi-guo, WONG How-kin, LUEDMANN Thomas. Gravity driven sedimentation on the northwest continental slope in the South China Sea: result from high-resolution seismic data and piston cores[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1999,17(2):155-169.
- [3] WU Shi-guo, LIU Zhan, WANG Wan-yin, et al. Late Cenozoic tectonic deformation in Dongsha Islands and adjacent sea area[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2003,21(4):377-388.
- [4] 蒲晓强,钟少军,李艳,等.南海北部陆坡NH-1孔沉积物中碳酸盐碳同位素特征及其地球化学意义[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):40-48.
PU Xiao-qiang, ZHONG Shao-jun, LI Yan, et al. Carbon isotope characteristics of carbonate minerals in sediments of core NH-1 on the northern continental slope of the South China Sea and their geochemical implications [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):40-48.
- [5] 庞雄,陈长民,邵磊,等.白云运动:南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J].地质论评,2007,53(2):145-152.
PANG Xiong, CHEN Chang-min, SHAO Lei, et al. Baiyun movement: a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. Geological Review, 2007,53(2):145-152.
- [6] 彭大均,庞雄,陈长民,等.南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素[J].沉积学报,2006,24(1):10-19.
PENG Da-jun, PANG Xiong, CHEN Chang-min, et al. The characteristics and controlling factors for the formation of deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006,24(1):10-19.
- [7] 彭大均,庞雄,黄先律,等.南海珠江深水扇系统的形成模式[J].石油学报,2007,28(5):7-11.
PENG Da-jun, PANG Xiong, HUANG Xian-lu, et al. Depositional model of Pearl River deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Petroli Sinica, 2007,28(5):7-11.

- [8] 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.
- [9] 郑晓东,朱明,何敏,等. 珠江口盆地白云凹陷荔湾深水扇砂体分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5):529-533.
ZHENG Xiao-dong, ZHU Ming, HE Min, et al. Prediction of Liwan deep submarine fan sand body distribution, Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5):529-533.
- [10] DAHLSTROM C. Balanced cross sections [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4):743-757.
- [11] 苏惠,曲丽萍,李桂霞,等. 东濮凹陷平衡剖面与构造演化研究[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4):469-478.
SU Hui, QU Li-ping, LI Gui-xia, et al. Balanced section and tectonic evolution in the Dongpu depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(4):469-478.
- [12] WU S, WANG X, JI Y, et al. Application of forecasting structural cracks technique of 3D move in Chengdao buried hill [J]. Science in China (Ser D)—Earth Sciences, 2005, 48(9):1403-1410.
- [13] 薛冈,卢华复,朱成宏,等. 伸展区域平衡剖面法及其在构造分析中的应用[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4):427-434.
XUE Gang, LU Hua-fu, ZHU Cheng-hong, et al. Structure restoration of balancing cross section in extension area: an example from the Huaifu depression, North Jiangsu Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(4):427-434.
- [14] 周建勋. 同沉积挤压盆地构造演化恢复的平衡剖面方法及其应用[J]. 地球学报, 2005, 26(2):151-156.
ZHOU Jian-xun. The balanced cross-section method for restoration of structural evolution in compressional basins with synkinematic sedimentation and its application [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(2):151-156.
- [15] GIBBS A. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics [J]. Journal of Structural Geology, 1983, 5(2):153-160.
- [16] 李月,周瑶琪,颜世永,等. 龙门山造山带构造演化模式的建立[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(2):12-15.
LI Yue, ZHOU Yao-qi, YAN Shi-yong, et al. Establishment of tectonic evolution pattern of Longmenshan Orogen [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(2):12-15.
- [17] 余一欣,汤良杰,殷进垠,等. 应用平衡剖面技术分析库车坳陷盐构造运动学特征[J]. 石油学报, 2008, 29(3):378-382.
YU Yi-xin, TANG Liang-jie, YIN Jin-yin, et al. Analysis on kinematic characteristics of salt structures in Kuqa depression by using balanced section technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3):378-382.
- [18] 毕素萍,张庆龙,王良书,等. 松辽盆地宾县凹陷平衡剖面恢复及构造演化分析[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):203-206.
BI Su-ping, ZHANG Qing-long, WANG Liang-shu, et al. Balanced cross-section restoration and tectonic evolution analysis in the Binxian sag, the Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(2):203-206.
- [19] 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.
- [20] 黄春菊,周蒂,陈长民,等. 深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构[J]. 科学通报, 2005, 50(10):1024-1031.
HUANG Chun-ju, ZHOU Di, CHEN Chang-min, et al. Deep crustal structure of Baiyun sag, northern South China Sea revealed from deep seismic reflection profile [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(10):1024-1031.
- [21] 连世勇,何敏,庞雄,等. 珠江口盆地深水白云凹陷始新世注陷结构研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3):13-16.
LIAN Shi-yong, HE Min, PANG Xiong, et al. Research on Eocene structure of Baiyun sag in deep-water area of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3):13-16.
- [22] WU Shi-guo, YU Zhao-hua, ZHANG Rong-qiang, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Zhuanghai area, Bohai-Bay Basin, East China: the application of balanced cross-sections [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2:158-168.

(下转第29页)

- [22] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 286-287.
- [23] 朱创业. 陕甘宁盆地下奥陶统马家沟组层序沉积有机相特征及其烃源岩分布[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 57-62.
ZHU Chuang-ye. Characteristics of sequence sedimentary organic facies and distribution of source rocks of Majiagou formation, lower Ordovician, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 57-62.
- [24] 朱光有, 金强, 戴金星, 等. 东营凹陷沙四中亚段盐湖相烃源岩研究[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 257-266.
ZHU Guang-you, JIN Qiang, DAI Jin-xing, et al. Investigation on the salt lake source rocks for middle Shasi column of Dongying depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(2): 257-266
- [25] 梅玲, 张枝焱, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 40-46.
MEI Ling, ZHANG Zhi-huan, WANG Xu-dong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 40-46.
- [26] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 19-23.
JIN Qiang, ZHU Guang-you, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 19-23.
- [27] 曾发富. 南堡凹陷下第三系烃源岩地球化学特征及有机相研究[D]. 东营: 石油大学勘探系, 1996.
- [28] 周海民, 董月霞, 刘蕴华, 等. 断陷盆地油气勘探理论与实践[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 22-24.
(编辑 徐会永)

(上接第22页)

- [23] WALSH J, WATTERSON J, YIELDING G. The importance of small-scale faulting in regional extension [J]. Nature, 1991, 351: 391-393.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 傅宁, 米立军, 张功成, 等. 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, et al. 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.
- [27] 柳保军, 申俊, 庞雄, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积特征[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 49-56.
LIU Bao-jun, SHEN Jun, PANG Xiong, et al. Characteristics of continental delta deposits in Zhuhai formation of Baiyun depression in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 49-56.
- [28] 庞雄, 陈隽, 代一丁, 等. 珠江口盆地白云西-开平凹陷油气聚集及勘探目标研究[J]. 中国海上油气: 地质, 1995, 9(4): 237-245.
PANG Xiong, CHEN Jun, DAI Yi-ding, et al. Study on hydrocarbon accumulation and exploration targets in west Baiyun-Kaiping sag of Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(4): 237-245.
(编辑 徐会永)