

doi: 10.12029/gc20180605

马明, 漆家福, 张远泽, 苗全芸, 陈玮常, 张帅. 2019. 珠江口盆地新生代沉降特征及其影响因素分析[J]. 中国地质, 46(2): 269–289.

Ma Ming, Qi Jiafu, Zhang Yuanze, Miao Quanyun, Chen Weichang, Zhang Shuai. 2019. An analysis of subsidence characteristics and affecting factors in the Pearl River Mouth Basin in Cenozoic[J]. Geology in China, 46(2): 269–289(in Chinese with English abstract).

珠江口盆地新生代沉降特征及其影响因素分析

马明^{1,2}, 漆家福^{1,2}, 张远泽^{1,2}, 苗全芸^{1,2}, 陈玮常³, 张帅^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油冀东油田分公司, 河北唐山 063000)

摘要:为了研究珠江口盆地的沉降特征、沉降特征时空差异性以及影响因素,文章共选取了 32 口人工井进行沉降史计算,并进行综合分析,从中又特选出 12 口典型人工井进行对比分析,编绘和对比分析了 3 条典型沉降演化图。结果表明:盆地整体沉降可分为 3 幕,第一幕为始新世,平均总沉降速率为 85 m/Ma;第二幕为渐新世至中新世,平均总沉降速率为 146 m/Ma;第三幕为晚中新世至第四纪,平均总沉降速率为 104 m/Ma。同一时期不同构造单元之间及同一构造单元在不同时期,沉降与演化特征都存在差异性,各时期沉降速率平面分布表现出“分区”、“分带”的特征,沉降演化的差异性变化与盆地的演化阶段及其构造特征有关。盆地整体沉降特征受成盆动力学影响,而沉降特征差异性受盆地动力学和构造格局共同影响。珠江口盆地整体沉降表现为“幕式”特征,沉降及其演化特征表现出明显的时空差异性,盆地动力学特征和构造格局共同影响盆地的沉降特征。

关键词:珠江口盆地;沉降特征;差异性;演化特征;影响因素

中图分类号:P546 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)02-0269-21

An analysis of subsidence characteristics and affecting factors in the Pearl River Mouth Basin in Cenozoic

MA Ming^{1,2}, QI Jiafu^{1,2}, ZHANG Yuanze^{1,2}, MIAO Quanyun^{1,2}, CHEN Weichang³, ZHANG Shuai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: In order to study the characteristics of subsidence and the difference between each tectonic unit and time as well as its affecting factors in Pearl River Mouth Basin, the authors chose 32 simulation wells to calculate the subsidence and to make comprehensive analysis, and selected 12 typical wells from 32 simulation wells to make contrastive analysis. In the meantime, 3 typically evolution sections were also analyzed comprehensively. According to the results obtained, the overall subsidence can be divided into three episodes: the first episode was Eocene, whose average overall subsidence rate was 85m/myr; the second episode

收稿日期:2017-02-28; 改回日期:2017-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目“南海北部大陆边缘新生代盆地构造演化及其对油气聚集的影响”(41572202)资助。

作者简介:马明,男,1990生,硕士生,构造地质学专业;E-mail:maming1002@163.com。

通讯作者:漆家福,男,1958生,教授,博士生导师,主要从事构造地质学和盆地分析研究;E-mail:qijiafu@cup.edu.cn。

was from Oligocene to Middle Miocene, whose average overall subsidence rate was 146m/myr; the third episode was from Late Miocene to Quaternary, whose average overall subsidence rate was 104m/myr. The subsidence and evolution characteristics of various tectonic units were different during the same period, and the characteristics of subsidence and evolution in the same unit were also varied during different periods. The subsidence rate on the same plane can be arranged into different zones. The diversity in the changes during the subsidence evolution was affected by tectonic evolution stages of the basin as well as the structural characteristics. The characteristics of overall subsidence were controlled by basin dynamics, whereas the differences of subsidence were controlled by dynamics and structural framework. The overall subsidence can be divided into several episodes in Pearl River Mouth Basin. The characteristics of subsidence and evolution were varied between different time and space spans. Both of the basin dynamics and structural framework controlled the features of subsidence.

Key words: Pearl River Mouth Basin; subsidence; characteristics; difference; affecting factors

About the first author: MA Ming, male, born in 1990, master, engages in the study of structural geology; E-mail: maming1002@163.com.

About the corresponding author: QI Jiafu, male, born in 1958, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of structural geology and basin analysis, E-mail: qijiafu@cup.edu.cn.

1 引 言

沉降史理论最早由 Lemoine 于 1911 年提出 (Allen et al., 1990)。之后随着各种新地质理论的提出及地质资料的丰富,沉降史理论逐渐得到发展和完善 (Mckenzie, 1978; Royden et al., 1980; Sclater et al., 1980; Wernicke, 1981; Falvey et al., 1982; Kusznir, 1991; 杜旭东等, 1994, 1997; 刘翠荣等, 1996; 石广仁等, 1996, 2004, 2009; 刘学锋等, 1997; 郭秋麟等, 1998; 张庆春等, 2001; 陆春生等, 1996; 李向东等, 2010; 谢辉等, 2014)。现今,沉降史分析已经成为盆地模拟的重要基础工作和油气评价的重要步骤,为之后盆地的热史、生烃史、排烃史、运移聚集史模拟提供一个时空范围。同时,不同的大地构造背景下形成的盆地,其沉降史特征不同,盆地沉降史分析,尤其是构造沉降史分析对研究盆地形成演化、动力学机制有着重要的意义 (郭秋麟等, 1998; 陆克政等, 2001; 石广仁, 2004)。珠江口盆地是南海北部大陆边缘重要的含油气盆地,盆地内分布有较多的、结构特征差异性较大的构造单元。关于珠江口盆地新生代沉降特征分析,以往的研究侧重于分析个别构造单元或部分区域 (周蒂等, 1993; Zhou et al., 2009; Liao et al., 2011; 刘安等, 2011; 于兴河等, 2012; 付洁等, 2013; 丛晓荣等, 2013; Xie et al., 2014; 刘明辉等, 2015; 王聪等, 2016), 而没有将其与整个盆地沉降特征联系起来,这样用个别构造单元或部分区域的沉降特征来表征整个盆地的

沉降特征难免有些牵强。同时,用个别构造单元或部分区域的沉降特征来研究整个盆地的演化、动力学特征就更显得局限、片面,这是因为珠江口盆地不同构造单元之间在构造特征、动力学机制方面存在差异 (张健等, 2001; 施和生等, 2014)。也有研究者研究了整个珠江口盆地的沉降特征,但是由于资料有限,仅在盆地的坳陷中进行沉降史分析,这也不能很好地说明盆地整体沉降特征和不同构造单元之间沉降特征的差异性 (高红芳等, 2006; 吕学菊等, 2008)。为了反映整个盆地的整体沉降特征,笔者在珠江口盆地自西至东选取了 6 条地震剖面,并在地震剖面上选取了 32 口人工井进行沉降史综合分析,尽量使每个构造单元或相邻区域都有井控制。为了分析不同构造单元或区域沉降特征的时空差异性,在 32 口井当中,以各个构造单元或相邻区域有井控为原则选取了 12 口典型井进行沉降史对比分析。本文在盆地的东部、中部和西部各选 1 条贯穿盆地的剖面,做了 3 条剖面的局部沉降演化图,通过综合、对比分析研究了盆地的整体沉降演化特征和不同区域、构造单元在演化过程中表现出来的差异性特征。

2 区域地质概况

珠江口盆地是南海北部大陆边缘展布规模最大的盆地,面积约为 26.68 万 km² (崔莎莎等, 2009; 施和生等, 2014), 处于欧亚板块、印度—澳大利亚板块和太平洋—菲律宾板块相互作用且靠近菲律

宾板块的特殊构造位置(何家雄等,2012),从而使其具有复杂的动力学机制。盆地整体呈NE-SW向展布,从北至南可以划分为5个一级构造单元,依次为北部断阶带、北部拗陷带(珠三拗陷、珠一拗陷)、中央隆起带(神狐隆起、番禺低隆起、东沙隆起)、南部拗陷带(珠二拗陷、潮汕拗陷)和南部隆起带(图1)。由于在NE、NEE向和NW向两组基底断裂的相互交叉、联合和复合作用下,从而使珠江口盆地构造格局具有“东西分块、南北分带”的特征(陈长民,2003)。

珠江口盆地演化可分为3个阶段,分别为裂陷阶段、拗陷阶段和区域沉降阶段。珠江口盆地自新生代以来所经历的构造运动主要有神狐运动、珠琼运动(可进一步划分为珠琼运动一幕、珠琼运动二幕)、南海运动和东沙运动(图2)。各个构造运动对盆地的沉降特征、演化特征具有显著的影响,后文将详细论述沉降特征、演化特征对构造运动的响应。珠江口盆地发育的地层自下而上有神狐组、文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和琼海组(图2),除了神狐组研究程度较低外,

其他各个地层研究程度相对较高(谢利华等,2009;王昌勇等,2010;兰叶芳等,2015),但是根据盆地演化特征,探索应用层序地层学理论和方法认为神狐组主要在珠三拗陷断裂附近以狭长带状分布,而在其他区域较少分布(赵中贤等,2009)。盆地沉积相类型在古近纪裂陷阶段为陆相和海陆过渡相,而至新近纪、第四纪裂后阶段为海相。

3 沉降史分析与数据处理

3.1 基本原理

没有基底的沉降就不能形成沉积物充填的空间,也就不能形成盆地(郭秋麟等,1998;陆克政等,2001)。在构造作用下,盆地的基底会沉降,这个沉降被称为构造沉降。构造沉降会形成初始容纳空间,初始容纳空间随后会被空气、水、沉积物或者它们的组合所充填,这些物质在均衡作用下会使盆地的基底进一步沉降,这个沉降被称为充填物负荷沉降。在充填物充填致使盆地基底沉降的过程中,如果岩石圈没有破坏、连续性较好,岩石圈会产生向

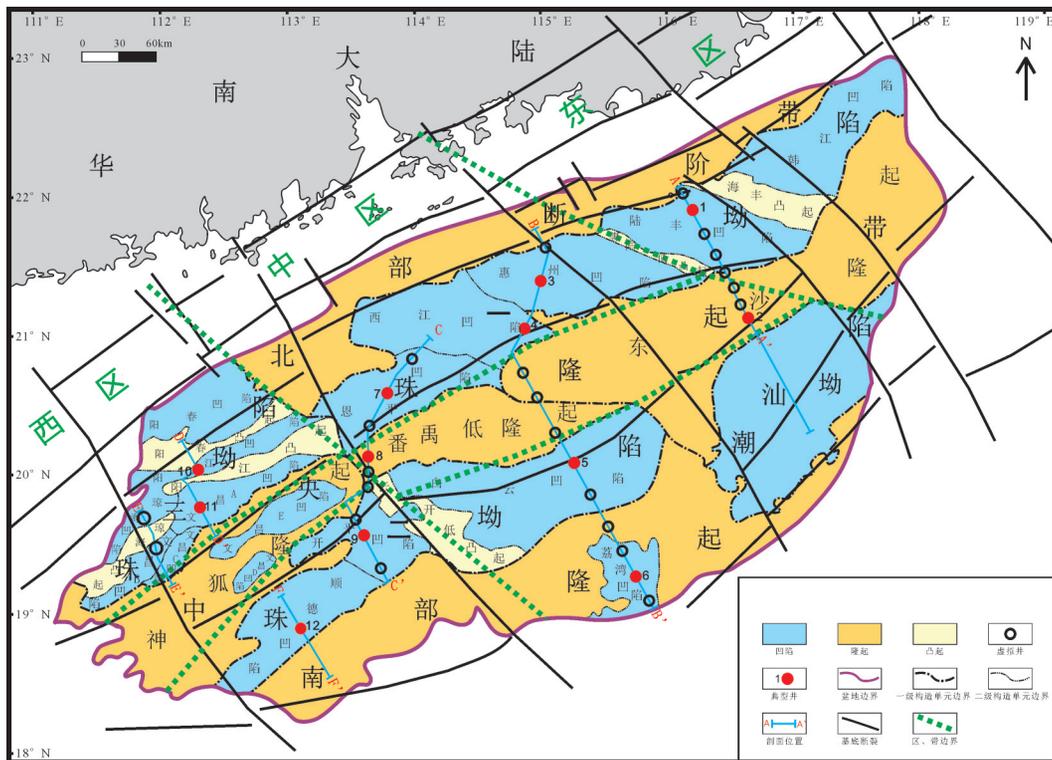


图1 珠江口盆地构造单元及基底断裂
(据陈长民,2003;朱伟林等,2010改编)

Fig.1 The tectonic units and basement faults in Pearl River mouth Basin
(modified after Chen Changmin, 2003; Zhu Weilin et al., 2010)

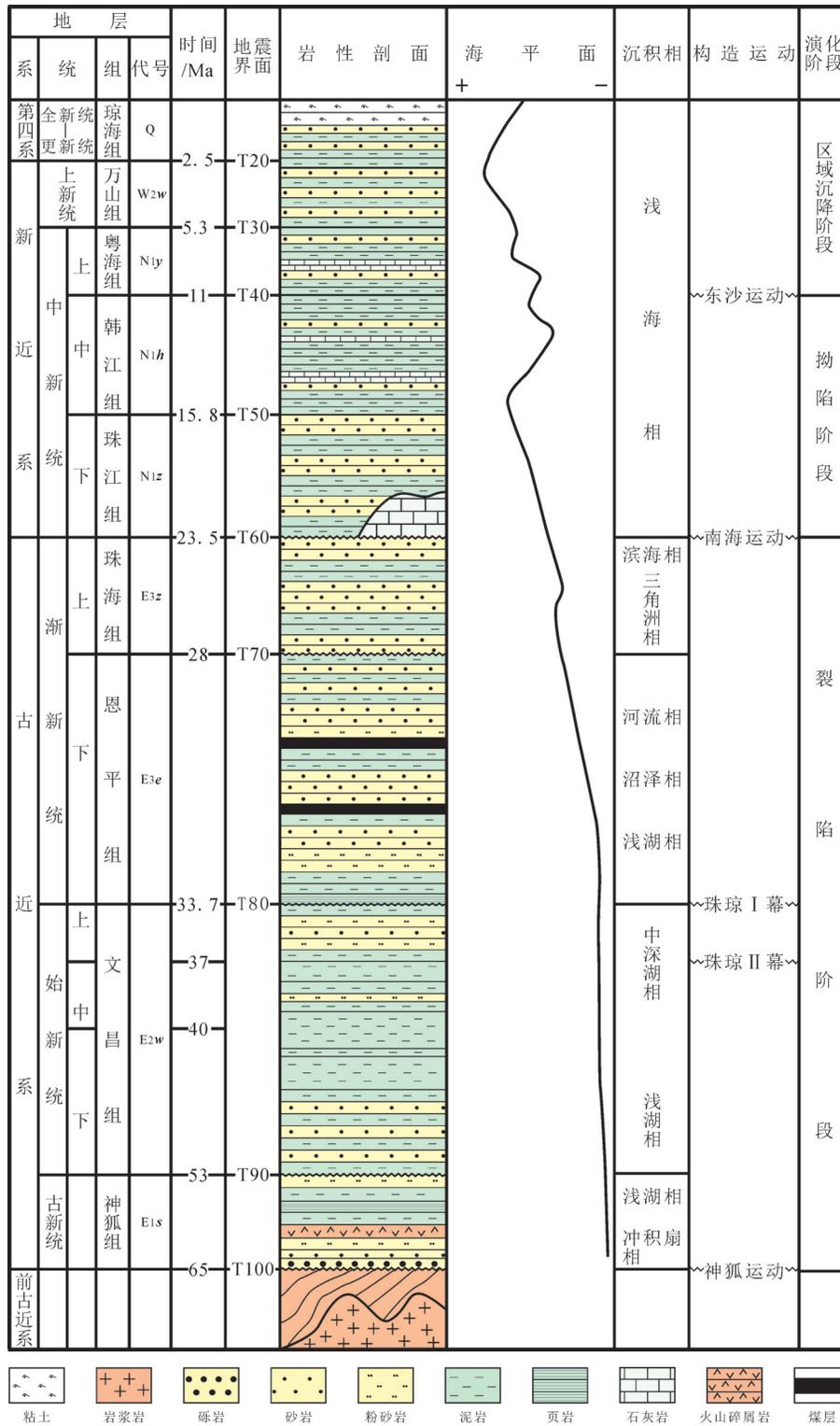


图2 珠江口盆地综合柱状图

(据全国地层委员会,2002;汪啸风等,2005;程裕淇等,2009;刘新宇等,2009;蔡周荣等,2010;朱伟林等,2010;赵迎东等,2015 编绘)

Fig.2 Stratigraphic column of Pearl River Basin

(modified after All China Commission of Stratigraphy, 2002; Wang Xiaofeng et al., 2005; Chen Yuqi et al., 2009; Liu Xinyu et al., 2009; Cai Zhourong et al., 2010; Zhu Weilin et al., 2010; Zhao Yingdong et al., 2015)

上的反向弹性挠曲支撑作用。在进行沉降史分析时通常选择现今海平面为基准面,而地质历史时期海平面一直发生变化,所以必须把地质历史时期的海平面校正到现今海平面上才能进行对比分析,地质历史时期海平面相对于现今海平面所产生的差值在均衡作用下也会产生负荷沉降。上述盆地形成演化过程中产生的各个沉降量之间的关系可表示为:盆地的总沉降(基底沉降)=构造沉降+充填物负荷沉降+海平面变化负荷沉降+岩石圈弹性挠曲,数学表达如式(1),但是一般在挤压盆地中,岩石圈相对连续,岩石圈的弹性挠曲作用较为显著,而在伸展盆地当中,岩石圈破坏程度较大,相对不连续,一般不考虑岩石圈的弹性挠曲作用(陆克政等, 2001),公式(1)可修正为公式(2)。文中所出现的参数及其意义见表1。

$$STT = ST + D + D(\Delta L) + DT \quad (1)$$

$$STT = ST + D + D(\Delta L) \quad (2)$$

根据式(1)或(2),可以梳理出进行沉降史分析的基本过程,如下:

(1)求取地质历史时期的总沉降(STT)

各个时期的总沉降STT可以用相应时期的地层厚度、古水深、海平面的变化之和来表示,如式(3)。

$$STT = Hs + Hw + \Delta L \quad (3)$$

每回剥掉一个地层而求下伏地层厚度(Hs)时,依据的地质原理是“地层骨架厚度不变”原理,即在地层的沉积过程中,由于压实作用地层的孔隙度会发生变化,但是地层的骨架厚度不会发生变化,而孔隙度的变化与深度之间存在定量关系,即Athy方程,如式(4)。而一个地区各个地层的表层孔隙度和压实系数可以通过已有的钻井数据或查询相关资料获得。因此,在每剥掉一个地层时,可通过Athy方程和迭代法求得下伏各个地层经过去压实后的地层埋深和厚度。古水深(Hw)和古海平面相对于现今海平面的变化值(ΔL)可通过古生物、沉积学、明显的地化标记等研究得知(Allen et al., 1990; 陆克政等, 2001)。

$$Z2 = (Hf + Z1) + \Phi_0 / c [e^{-cz1} - e^{-cz2}] \quad (4)$$

(2)求取充填物产生的负荷沉降(D)和海平面变化产生的负荷沉降(D(ΔL))

充填物产生的负荷沉降量可以根据Airy均衡原理来计算,由Airy均衡原理可求得沉积物产生的负荷沉降,如式(5)。式中,地层厚度是经过过去压实后的厚度。

$$D = Hs * (\rho_s - \rho_w) / (\rho_m - \rho_w) \quad (5)$$

同理,海平面变化所产生的负荷沉降也是根据Airy均衡原理求得,如式(6)。

$$D(\Delta L) = \Delta L * \rho_w / (\rho_m - \rho_w) \quad (6)$$

(3)求取构造沉降(ST)

直接求取构造沉降量需要用到的参数较多,而一地区大多数参数往往不易求取,但是在上述论述中发现式(2)中除了构造沉降量外,其他的各个沉降量均可求得。因此,由式(2)变换可求得构造沉降,如式(7)。

$$ST = STT - D - D(\Delta L) \quad (7)$$

3.2 数据采集与处理

在进行沉降史分析时,涉及到的参数较多,而各个参数的采集与处理必须要以实际地层、地层组合为基础,进行科学、合理地分析和处理,否则会出现较大的误差或错误。

(1)井位选择

文章在进行沉降史分析时,首先选取能与地震剖面较好对比的人工井进行分析,然后根据研究所需,在有良好井震对比的地震剖面上,在实际井周

表1 文中各个参数及代表的地质意义

Table 1 Geological meaning of parameters in the paper

参数符号	地质意义	参数符号	地质意义
STT	总沉降	ST	构造沉降
D	充填物负荷沉降	D(ΔL)	海平面变化产生的沉降
DT	岩石圈弹性挠曲	Hs	地层厚度
Hw	古水深	ΔL	海平面变化值
ρs	沉积物密度	ρw	0℃水的密度
ρm	地幔密度	ρL	地壳岩石圈密度
Z1	地层底面深度	Z2	地层顶面深度
Φ0	地表孔隙度	Hf	骨架厚度
c	压实系数	L	盆地基底至莫霍面之间的厚度
M	莫霍面至均衡补偿面之间的厚度	VTT	总沉降速率
Vt	构造沉降速率		

围选取了一些能够与其较好对比的人工井进行沉降史计算和分析,如图3所示。人工井平面位置分布上,尽量使每个构造单元都有井控,如果某个构造单元没有井控,则其相邻构造单元必须有井控,如图1所示。

(2)地层分层、地层顶底界年龄确定、相关物理参数处理

地层是进行地质研究的基础,也是联系地质各个领域的纽带,首先在井柱和地震剖面上获得地层分层数据(朱伟林等,2010)。通过年代地层对比确定了各年代地层的顶底界年龄,进而建立等时地层格架(全国地层委员会,2002;汪啸风等,2005),通过岩石地层对比和生物化石研究确定了各岩石地层顶底界年龄(程裕淇等,2009;刘新宇等,2009),结合构造、沉积研究,经过综合对比分析建立了珠江口盆地的地层系统(图2)。

确定地层分层以后,分析各个地层的岩性组合

及比例,根据地层的岩性组合及比例加权计算各岩性沉积物颗粒密度,进而求得各个地层的密度,这样可以使结果更为精确(陈亮等,2002;高红芳等,2006)。同时,根据各个地层的岩性组合及比例加权计算各个单一岩性的地表孔隙度和压实系数,从而得到各个地层的孔隙度和压实系数。正常情况单一岩性的密度、地表孔隙度和压实系数见表2。地幔密度和水的密度通常为 3330 kg/m^3 和 1000 kg/m^3 (Mckenzie, 1978)。

(3)古水深、海平面变化、剥蚀厚度

确定古水深的方法有古生物法、沉积相分析、明显的地化标记、地貌回剥法等(Allen et al., 1990; 陆克政等,2001;康波,2014),本文首先分析了珠江口盆地各个区域在地质历史时期的沉积相类型(陈长民,2003;赵中贤等,2009;朱伟林等,2010),然后根据不同沉积相类型对应的水深以及新生代海平面变化特征综合处理后得到不同时期的古水深。

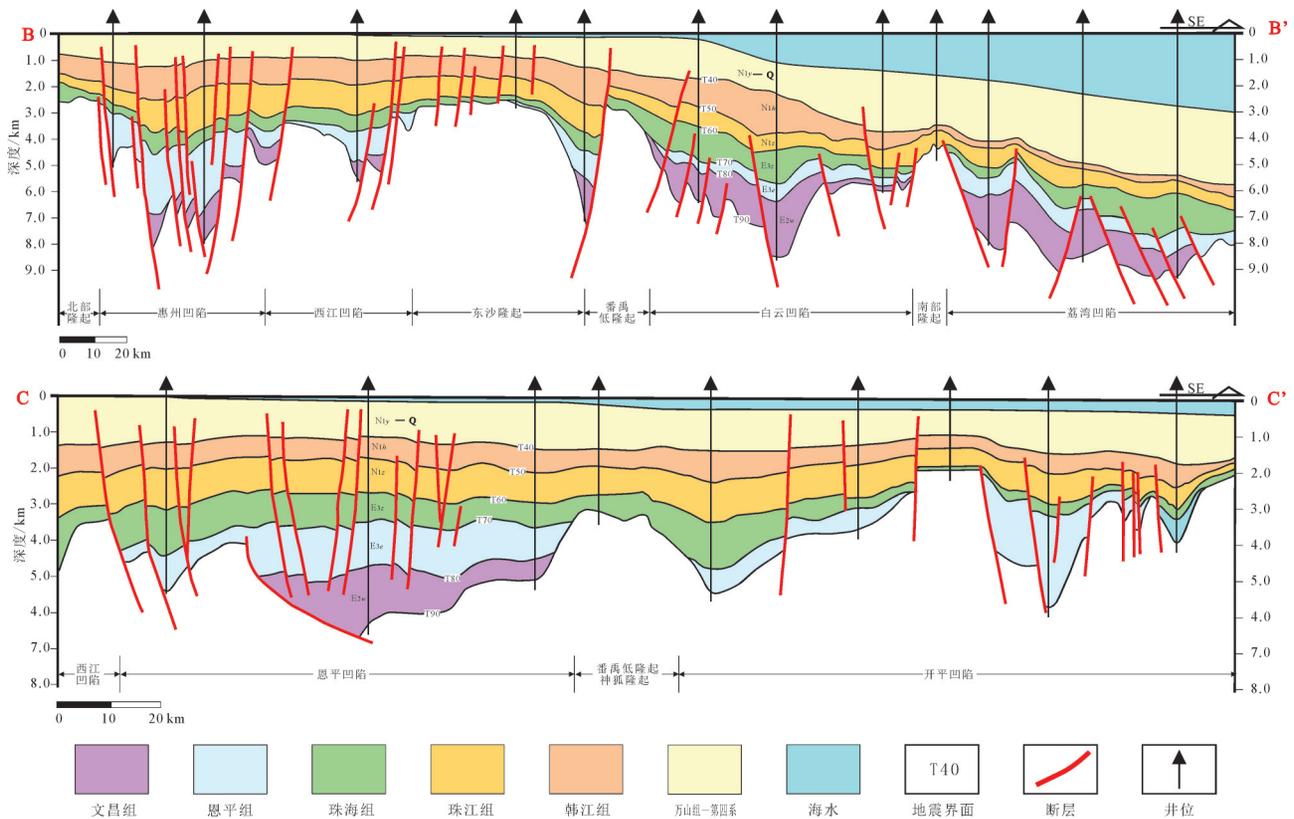


图3 典型地震剖面
(剖面位置见图1,剖面据朱伟林等,2010修改)

Fig.3 The typical seismic sections
(The location of sections are in Fig 1 and the original sections are modified after Zhu Weilin et al., 2010)

关于海平面的变化, Watts、Vail 和 Mitchum 等研究较多 (Vail et al., 1997; Watts, 2008), 本文应用了 Watts 根据钻井资料研究的自侏罗纪以来古海平面相对于现今海平面的变化的成果 (图 4)。通常用来计算地层剥蚀厚度的方法有泥岩声波时差法、镜质体反射率法、地层趋势外推法等。

4 沉降特征分析

4.1 整体沉降特征分析

为了更好地研究珠江口盆地新生代的整体沉降特征, 文章选取了穿过珠江口盆地的 6 条地震剖面, 并在地震剖面上选取了 32 口人工井进行沉降史计算, 这 6 条地震剖面基本覆盖了整个珠江口盆地。本文通过分析这 32 口人工井的沉降史及其组合特征, 发现珠江口盆地整体沉降表现为“幕式”特征, 总体可以分为 3 幕, 如图 5 所示 (其中, 图 5c 是通过计算 32 口井各个时期的总沉降速率和构造沉降速率的平均值而成)。

第一幕为始新世, 文昌组沉积时期。平均总沉降速率为 85 m/Ma, 平均构造沉降速率为 23 m/Ma, 构造沉降对总沉降的贡献较小, 平均构造沉降速率仅占平均总沉降速率的 27%, 总体来说, 第一幕沉降过程中, 盆地整体缓慢沉降。

第二幕为渐新世至中中新世, 恩平组至韩江组沉积时期。平均总沉降速率为 146 m/Ma (图 5c 中恩平组至韩江组平均总沉降速率的平均值), 平均构造沉降速率为 49 m/Ma (图 5c 中恩平组至韩江组平均构造沉降速率的平均值), 构造沉降对总沉降贡献开始增大, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 33.9%。总体来说, 第二幕沉降过程中, 盆地整体沉降率较大, 构造沉降对总沉降贡献较大。根据沉降速率变化特征, 第二幕又可以进一步划分为 4

个阶段 (图 5), 第 I 阶段为早渐新世恩平组沉积时期, 平均总沉降速率为 199 m/Ma, 平均构造沉降速率为 64 m/Ma, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 32%, 第 I 阶段平均总沉降速率和平均构造沉降速率在第二幕中分别达到最大; 第 II 阶段为晚渐新世珠海组沉积时期, 平均总沉降速率为 132 m/Ma, 平均构造沉降速率为 37 m/Ma, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 28%, 相比于第 I 阶段, 第 II 阶段平均总沉降速率和平均构造沉降速率有所下降; 第 III 阶段是早中新世珠江组沉积时期, 平均总沉降速率为 106 m/Ma, 平均构造沉降速率为 36 m/Ma, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 33%, 第 III 阶段平均总沉降速率在整个第二幕中达到最小值, 但是平均构造沉降速率几乎没有下降, 构造沉降对总沉降的贡献增大; 第 IV 阶段是中中新世韩江组沉积时期, 平均总沉降速率为 146 m/Ma, 平均构造沉降速率为 61 m/Ma, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 41%, 平均总沉降速率和平均构造沉降速率较上一阶段增大。

第三幕晚中新世至第四纪, 粤海组至第四系沉积时期。平均总沉降速率为 104 m/Ma, 平均构造沉降速率为 49 m/Ma, 相比于第二幕, 平均总沉降速率减小, 而平均构造沉降速率不变, 平均构造沉降速率占平均总沉降速率的 47%, 构造沉降在总沉降中占比达到最大。

4.2 差异沉降特征分析

为了分析不同构造单元沉降特征差异性, 在 32

表 2 正常情况下采用的压实参数和单一颗粒沉积物密度

Table 2 The compacting factor and density of single sediment granules under normal circumstance

岩性	地表压实系数(c)/(km ⁻¹)	地表孔隙度(Φ)%	沉积物颗粒密度(ρ)/(kg/m ³)
泥岩	0.51	0.63	2720
砂质泥岩	0.39	0.56	2680
砂岩	0.27	0.49	2650
砾岩	0.22	0.46	2640

注: 据陈亮等, 2002; 高红芳等, 2006 修改。

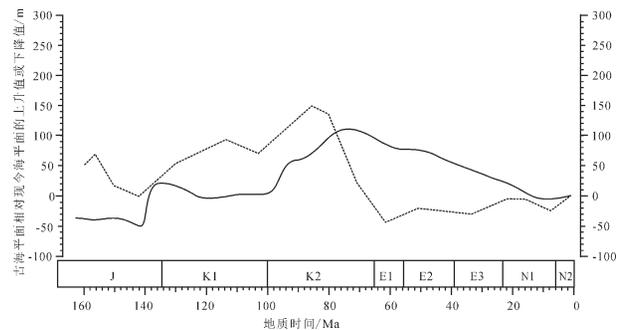


图 4 海平面变化图 (据 Watts 等, 1981, 转引自田在艺等, 1996) 虚线是 Wise (1974) 据北美数据估算出来的, 实线是 Watts (1979) 据北美东部钻井资料计算得到的

Fig.4 The change curve of sea level (after Watts et al., 1981)

The solid line was estimated by Wise based on data from North America; the dotted line was calculated by Watts based on well data from eastern part of North America

口人工井中,选取了12口较为典型的井进行对比分析(图1,图6,图7)。这12口人工井在位置分布上尽可能使每个构造单元都有井控,如果某个构造单元没有井控,则其相邻构造单元必须有井控,如韩江凹陷和阳春洼陷。其中,潮汕坳陷由于地震资料不清楚、地层层位不清晰,所以在潮汕坳陷中没有选取人工井。本文在分析沉降特征时空差异性时,首先,在横向上对比同一时期不同构造单元之间沉降特征差异性及其在平面上的分布规律,然后再从纵向上对比同一构造单元在不同时期沉降特征差异性、沉降速率变化特征。

始新世,文昌组沉积时期,平均总沉降速率和平均构造沉降速率分别为85 m/Ma和23 m/Ma。其中,白云凹陷、恩平凹陷、文昌凹陷的沉降速率远远高于这一时期的平均沉降速率(表3,图7中5、6、7、11井),为主要沉降中心,文昌凹陷表现尤为明显。而东沙隆起、惠州凹陷、西江凹陷、顺德凹陷的沉降速率与平均沉降速率接近(表3,图7中2、3、4、12井),为次级沉降中心。陆丰凹陷的沉降速率远远小于平均沉降速率(表3,图7中1井),为非沉降中心。由以上分析可以发现,始新世时,沉降速率在平面上的分布表现出明显的“分区”特征,即根据沉降速率平面分布特征把整个盆地自东至西分为东区、中区和西区(图1)。盆地的主要沉降中心分布在中区和西区的构造单元中,如白云凹陷、荔湾凹陷、文昌凹陷,但是总体来说中区的沉降速率高于西区,而东区沉降速率较小,沉降中心较少。同时,中区南部的白云凹陷、荔湾凹陷沉降速率总体高于北部,而西区北部的文昌凹陷沉降速率高于南部的顺德凹陷,在同一区内沉降速率在南北向上也表现出南北“分带”的特征。

早渐新世,恩平组沉积时期,平均总沉降速率为198 m/Ma,平均构造沉降速率为64 m/Ma。其中,惠州凹陷、西江凹陷、恩平凹陷、开平凹陷的沉降速率高于平均沉降速率(表3,图7中的3、4、7、9井),为主要沉降中心。而陆丰凹陷、东沙隆起、白云凹陷、阳江凹陷、文昌凹陷的沉降速率与平均沉降速率相差不多(表3,图7中的1、2、5、10、11井),为次级沉降中心。荔湾凹陷和顺德凹陷的沉降速率远远小于平均沉降速率(表3,图7中的6、12井),为非沉降中心。早渐新世,不同构造单元之间沉降速率存在较大的差异性,沉降速率平面分布仍表现

出“分区”、“分带”的特征。主要沉降中心大多分布在中区和西区,但中区构造单元沉降速率总体高于西区 and 东区,如惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷。同时,在中区,相比于始新世,早渐新世时期沉降中心北移、西移,主要沉降中心由早期的白云凹陷、荔湾凹陷迁移至北部和西部的惠州凹陷、西江凹陷、恩平凹陷以及开平凹陷,从而也出现南北“分带”的特征。在东区 and 西区,沉降速率总体变大,如东区的陆丰凹陷和西区的阳春凹陷。早渐新世,沉降速率最小的构造单元是盆地南部的顺德凹陷和荔湾凹陷,较始新世,顺德凹陷沉降速率略有下降,而荔湾凹陷沉降速率下降幅度较大。

晚渐新世,珠海组沉积时期,平均总沉降速率为132 m/Ma,平均构造沉降速率为37 m/Ma。白云凹陷、恩平凹陷、番禺凹陷、文昌凹陷、顺德凹陷的沉降速率高于平均沉降速率(表3,图7中的5、7、8、11、12井),为主要沉降中心。而东沙隆起、惠州凹陷、西江凹陷、荔湾凹陷、阳江凹陷的沉降速率在平均沉降速率附近波动(表3,图7中的2、3、4、6、10井),为次级沉降中心。晚渐新世,陆丰凹陷的沉降速率减小明显,远远小于平均沉降速率(表3,图7中的1井),是盆地内沉降速率最小的构造单元,为非沉降中心。总体来说,沉降速率在整个盆地内分布也表现出“分区”、“分带”特征,西区沉降速率在全盆地内较大,其中在北部,文昌凹陷为主要沉降中心,而在南部,顺德凹陷为主要沉降中心。在中区,较早渐新世,主要沉降中心向中西部迁移,如番禺低隆起、恩平凹陷和白云凹陷,而北部和南部成为次级沉降中心分布区,如惠州凹陷和荔湾凹陷。东区的陆丰凹陷在晚渐新世成为全盆地沉降速率最小的区域,在中区和西区,沉降速率在南北向上“分带”特征较为明显。

早中新世,珠江组沉积时期,平均总沉降速率和平均构造沉降速率分别为106 m/Ma、36 m/Ma。惠州凹陷、西江凹陷、荔湾凹陷、恩平凹陷、阳江凹陷和文昌凹陷的沉降速率高于平均沉降速率(表3,图7中的3、4、6、7、10、11井),为主要沉降中心。东沙隆起、白云凹陷、番禺低隆起和开平凹陷的沉降速率在平均沉降速率附近波动(表3,图7中的2、5、8、9井),为次级沉降中心。陆丰凹陷和顺德凹陷的沉降速率远远小于平均沉降速率(表3,图7中的1、12井),为非沉降中心。沉降速率分布在东西向上

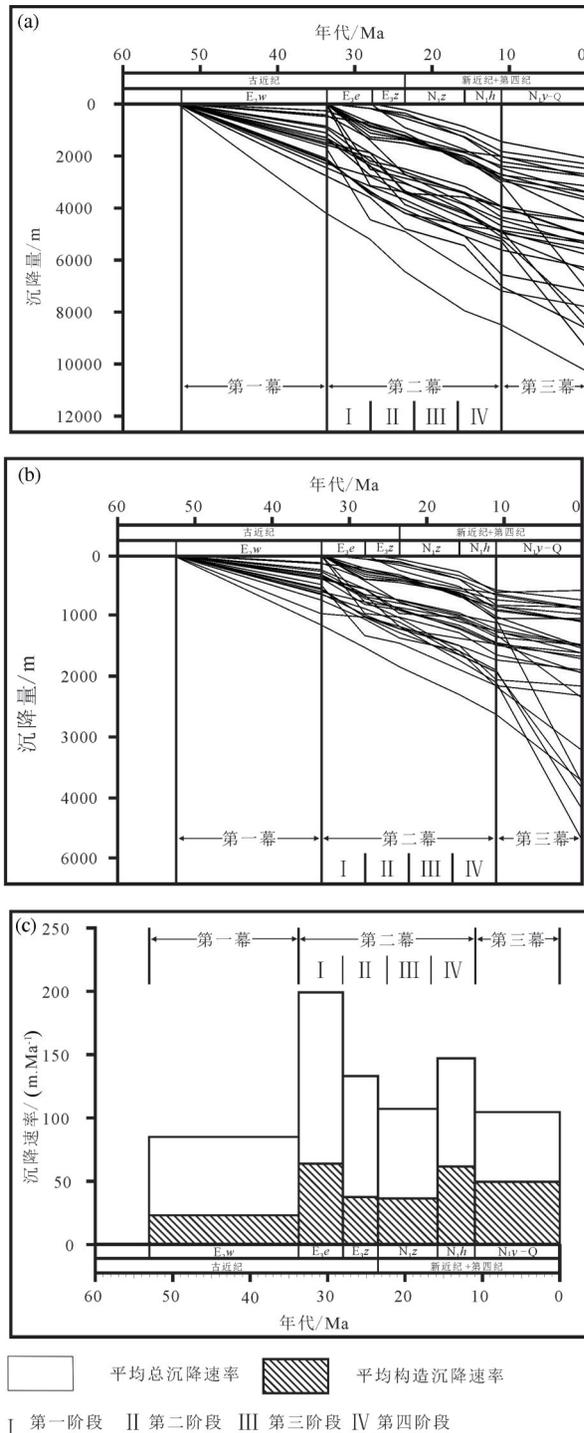


图5 盆地整体沉降曲线图和沉降速率图
 a—总沉降曲线图;b—总构造沉降曲线图;c—平均总沉降速率与平均构造沉降速率图;a和b中每根线为一口井的沉降曲线
 Fig.5 The overall subsidence curve and subsidence rate
 a—Total subsidence curve; b—Total tectonic subsidence curve;
 c—Average value of overall subsidence rate and average value of tectonic subsidence rate; the lines in a and b are subsidence curves of 32 simulations wells

仍表现出明显的“分区”特征。大多数主要沉降中心和次级沉降中心分布在中区和西区,而东区沉降速率最小,基本上不是沉降中心。在中区,相比于晚渐新世,白云凹陷沉降速率减小显著,主要沉降中心向北部和南部迁移,如惠州凹陷、西江凹陷和荔湾凹陷。而在西区,北部成为主要沉降中心,而南部的顺德凹陷沉降速率急剧减小至全盆最小,总沉降速率仅有 19 m/Ma,为非沉降中心。以陆丰凹陷为代表的东区,在早中新世,沉降速率有所增加,但仍是全区沉降速率最小的区域之一,基本上为非沉降中心。中区和西区沉降速率分布在南北向上表现出明显的“分带”特征。

中中新世,韩江组沉积时期,平均总沉降速率为 146 m/Ma,平均构造沉降速率为 61 m/Ma。惠州凹陷、西江凹陷和白云凹陷的沉降速率高于平均沉降速率(表3,图7中的3、4、5井),为主要沉降中心。陆丰凹陷、东沙隆起、荔湾凹陷、恩平凹陷、番禺低隆起、开平凹陷、阳江凹陷和文昌凹陷的沉降速率与平均沉降速率相差不大(表3,图7中的1、2、6、7、8、9、10、11井),为次级沉降中心。顺德凹陷的沉降速率全盆最小,为非沉降中心(表3,图7中的12井)。中中新世沉降速率平面分布特征与早中新世相比变化较小,具有继承性,仍表现出“分区”、“分带”的特征。主要沉降中心都分布在中区,在中区北部,西江凹陷和惠州凹陷仍为主要沉降中心,而在南部,白云凹陷沉降速率急剧增大,为全盆最大。在西区,文昌凹陷和阳江凹陷的沉降速率有所减小,但文昌凹陷仍然为整个西区沉降速率最大的构造单元,而南部的开平凹陷在中中新世沉降速率明显增加,成为整个西区沉降速率最大的构造单元,而顺德凹陷沉降速率较早中新世有所增加,但在整个盆地中仍然最小,为非沉降中心。东区的陆丰凹陷沉降速率在中中新世开始急剧增加,由早中新世的非沉降中心变为中中新世的沉降中心。

晚中新世至第四纪,粤海组至第四系沉积时期,平均总沉降速率和平均构造沉降速率分别为 104 m/Ma 和 49 m/Ma。白云凹陷、荔湾凹陷和文昌凹陷的沉降速率高于平均沉降速率(表3,图7中的5、6、11井),为主要沉降中心。番禺低隆起、开平凹陷、阳江凹陷和顺德凹陷的沉降速率接近平均沉降速率(表3,图7中的8、9、10、12井),为次级沉降中

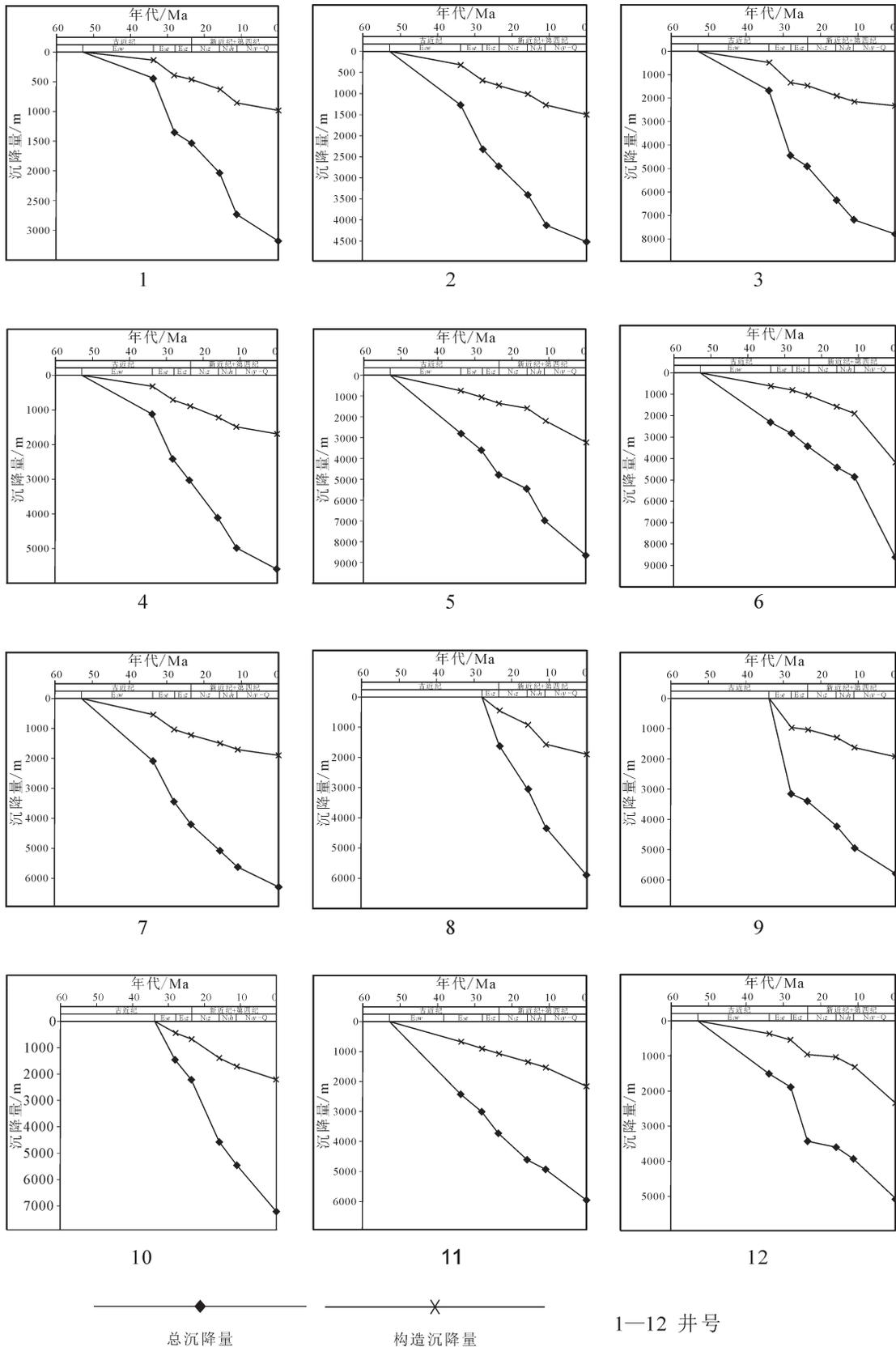


图6 典型井沉降曲线图

Fig.6 The subsidence curve of typical wells

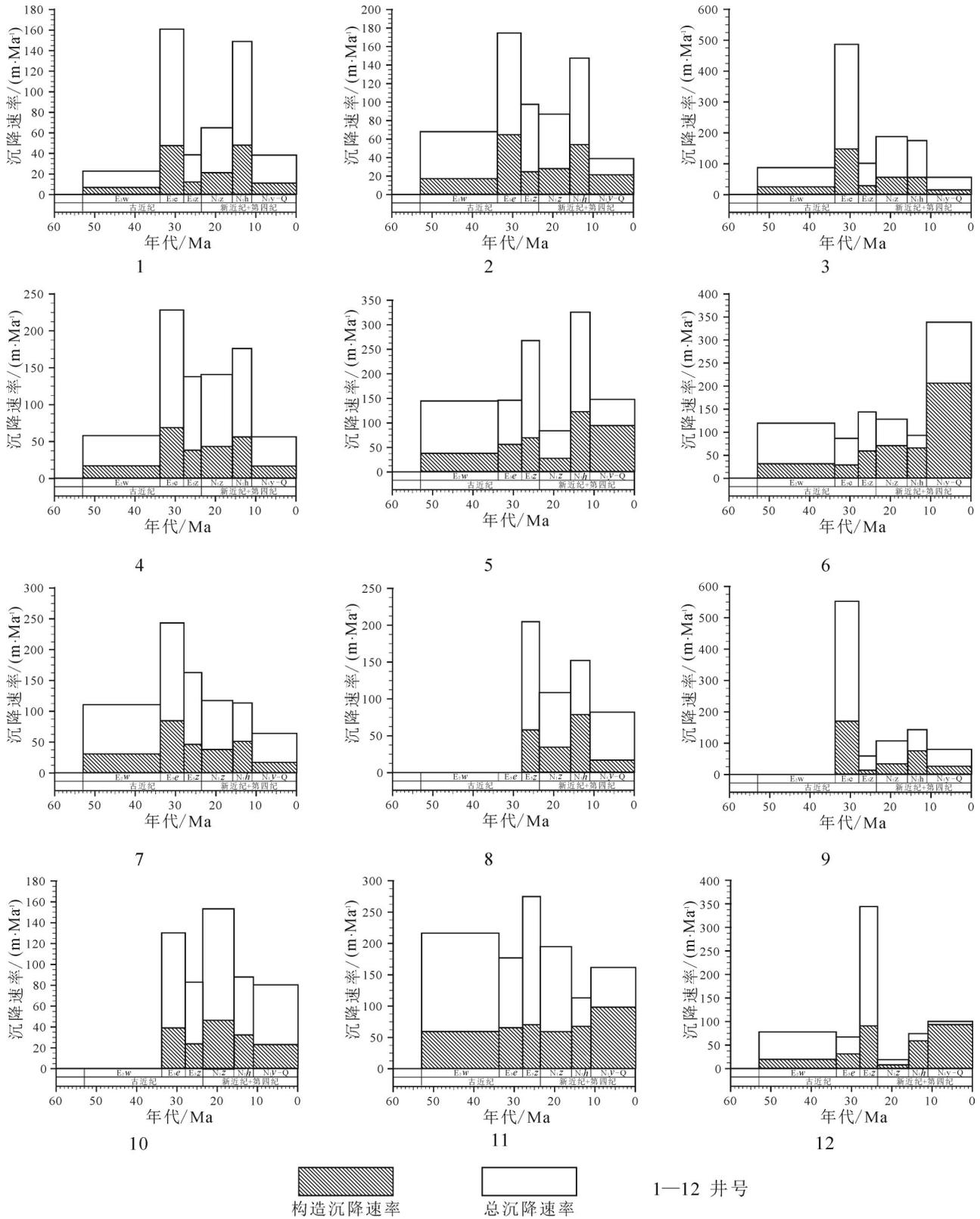


图7 典型井沉降速率图
Fig.7 The subsidence rate of typical wells

表3 各时期典型井沉降速率(m/Ma)
Table 3 The subsidence rate of typical wells during various periods

c	井号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
始新世	VTT	23	68	87	58	143	119	109			0	218	78
	VT	7	17	25	17	38	31	28			0	59	19
早渐新世	VTT	161	175	487	228	145	86	241		552	130	177	67
	VT	47.5	65	147	68	55	29	82		170	39	65	31
晚渐新世	VTT	39	97.5	101	138	267	143	161	206	59	83	275	344
	VT	12.5	25	28	38	69	59	43	57	13	24	70	90
早中新世	VTT	65	86.5	187	140	84	128	115	109	106	153	195	19
	VT	21	27.5	56	43	27	70	35	34	33	46	59	8.5
中中新世	VTT	149	147	175	176	326	93	111	151	142	88	113	74
	VT	48	54	55	56	122	65	49	78	75	32	68	59
晚中新世	VTT	38	38	56	56	147	338	61	82	79	80	162	100
-第四纪	VT	11	21	12.5	16	94	206	14	16	26	23	98	94

心。而惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷的沉降速率又有所减小(表3,图7中的3、4、7井),基本为非沉降中心。东沙隆起和陆丰凹陷的总沉降速率和构造沉降速率最小(表3,图7中的1、2井),为非沉降中心。中中新世末以来沉降速率分布规律相比于之前有较大的变化,在中区,沉降中心向南迁移明显,荔湾凹陷沉降速率增加幅度较大,成为全盆沉降速率最大的构造单元,白云凹陷沉降速率有所下降,但仍较高。而北部的惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷沉降速率明显降低,基本为非沉降中心,整个中区自中中新世末以来,从北至南沉降速率依次增大,从非沉降中心变为沉降中心。在西区,北部的文昌凹陷沉降速率仍然较大,为主要沉降中心,南部的顺德凹陷沉降速率增大,由之前的非沉降中心变为沉降中心。在东区,陆丰凹陷沉降速率较之前急剧减小,成为全盆沉降速率最小的构造单元,为非沉降中心。中中新世末以来,东区及靠近东区的惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷沉降速率小,而远离东区的西区西部及西区沉降速率较大。这主要是由于东沙运动在珠江口盆地产生的影响从东往西逐渐减弱所致(姚伯初,1998;陈长民,2003;蔡周荣等,2010;赵淑娟等,2012)。

由以上分析发现沉降特征时空差异性是整个盆地沉降特征所表现出来的基本规律。同一时期,不同构造单元之间沉降特征存在差异性,不同构造

单元的沉降速率差值甚至可达两个数量级,如早渐新世开平凹陷和顺德凹陷。同一构造单元在不同时期沉降特征也存在较大的差异性,如恩平凹陷早渐新世和晚渐新世、惠州凹陷始新世和早渐新世、顺德凹陷晚渐新世和早中新世等。不同构造单元沉降变化特征也表现出不同的特征,如文昌凹陷在新生代,沉降速率一直较高,波动性较小,而顺德凹陷和陆丰凹陷在新生代沉降速率变化频次较高、幅度较大。各个时期沉降速率平面分布均表现为“分区”、“分带”的特征。中区、西区内的各个构造单元沉降速率高于或接近于盆地平均沉降速率,是主要沉降中心和次级沉降中心的主要分布区域。东区总体来说沉降速率较小,在始新世、晚渐新世、晚中新世至第四纪时期是整个盆地内沉降速率最小的区域,为非沉降中心区域。

4.3 演化特征分析

为了更为直观地观察、分析、对比盆地不同区域和构造单元的沉降特征、演化以及影响因素,文章选取了3条贯穿整个盆地的典型剖面做了沉降演化,这3条剖面在位置分布上尽可能使其在东区、中区和西区都有分布。根据已有的研究,认为珠江口盆地均衡比值接近于1,主要为局部均衡沉降(高红芳,2006),所以用回剥法做了3条典型剖面的局部沉降演化图。其中AA'剖面,由于潮汕坳陷地震资料不清楚,层位不清晰,沉降演化只做了陆丰凹陷

至东沙隆起部分(图1,图8)。

东区,始新世沉降分布范围较为局限,仅在东沙隆起南部和陆丰凹陷北部有沉降(图8),沉降量在不同区域有差异,其中在东沙隆起较大,在陆丰凹陷较小,至始新世末,东沙隆起最大总沉降为1200 m。渐新世,沉降范围增大,整个东区都有沉降,沉降量增加显著,除了陆丰凹陷中部和东沙隆起北部沉降量较小外,其他区域沉降量较大。而且最大沉降量分布区域由始新世的东沙隆起南部移至陆丰凹陷南部,至晚渐新世末,陆丰凹陷最大总沉降量为3000 m。早中新世,沉降量增加显著,但是在沉降范围及沉降量分布特征上基本上继承了晚渐新世的格局,最大沉降量仍在陆丰凹陷,至早中新世末,最大总沉降量为3900 m。中中新世沉降范围及沉降量分布变化特征与早中新世相似,陆丰凹陷沉降量仍最大,至中中新世末,最大总沉降量为4700 m。自晚中新世开始,海水开始侵入东区,但沉降范围特征及沉降量分布特征与早、中中新世基本一致,现今陆丰凹陷总沉降量最大,约为5400 m。

中区,始新世沉降范围较小,其中在北部隆起、东沙隆起、南部隆起、惠州凹陷北部、西江凹陷北部、荔湾凹陷南部等区域没有沉降,而且沉降量在不同构造单元中具有较大差异(图9)。在白云凹陷和荔湾凹陷沉降范围和沉降量较大,至始新世末,最大总沉降量为2700 m,而西江凹陷最大总沉降量约为800 m。早渐新世,沉降范围有所增加,但仍较小,没有覆盖整个中区,在惠州凹陷、西江凹陷及荔湾凹陷沉降范围增加较为明显,而在北部隆起、东沙隆起及南部隆起增加较小。最大沉降量分布区域由始新世的白云凹陷、荔湾凹陷移至惠州凹陷,至早始新世末,最大总沉降量为4400 m,总体来说沉降特征较始新世有明显的差异。晚渐新世,沉降特征较前两个阶段变化较大,沉降范围增大,除了在南部隆起没有沉降外,其他区域都有沉降,但是沉降量分布特征与早渐新世基本一致,即惠州凹陷、白云凹陷和荔湾凹陷的沉降较大,至晚渐新世末,最大总沉降量约为4900 m。早中新世,海水开始侵入中区,沉降范围扩展至整个中区,这一阶段中区内各个构造单元的沉降量增加幅度都较大,其中惠州凹陷、白云凹陷和荔湾凹陷仍为全区最大沉降量分布区域,至早中新世末,最大沉降量为6200 m。中

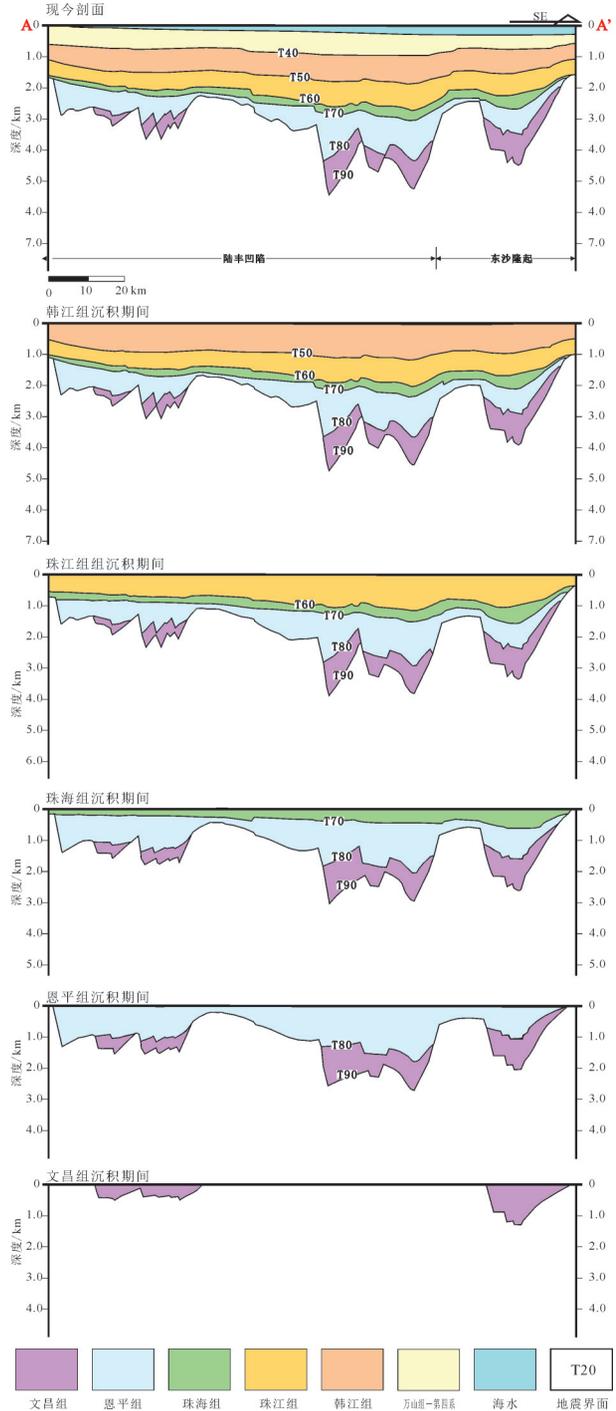


图8 AA'局部沉降演化图
(位置见图1,原始剖面据朱伟林等,2010修改)

Fig.8 The AA' regional evolution section
(The location of section is in Fig. 1 and the original section is modified after Zhu Weilin et al., 2010)

中新世,水深进一步增大,沉降特征与早中新世相比具有继承性,沉降范围和沉降量变化及分布特征与上

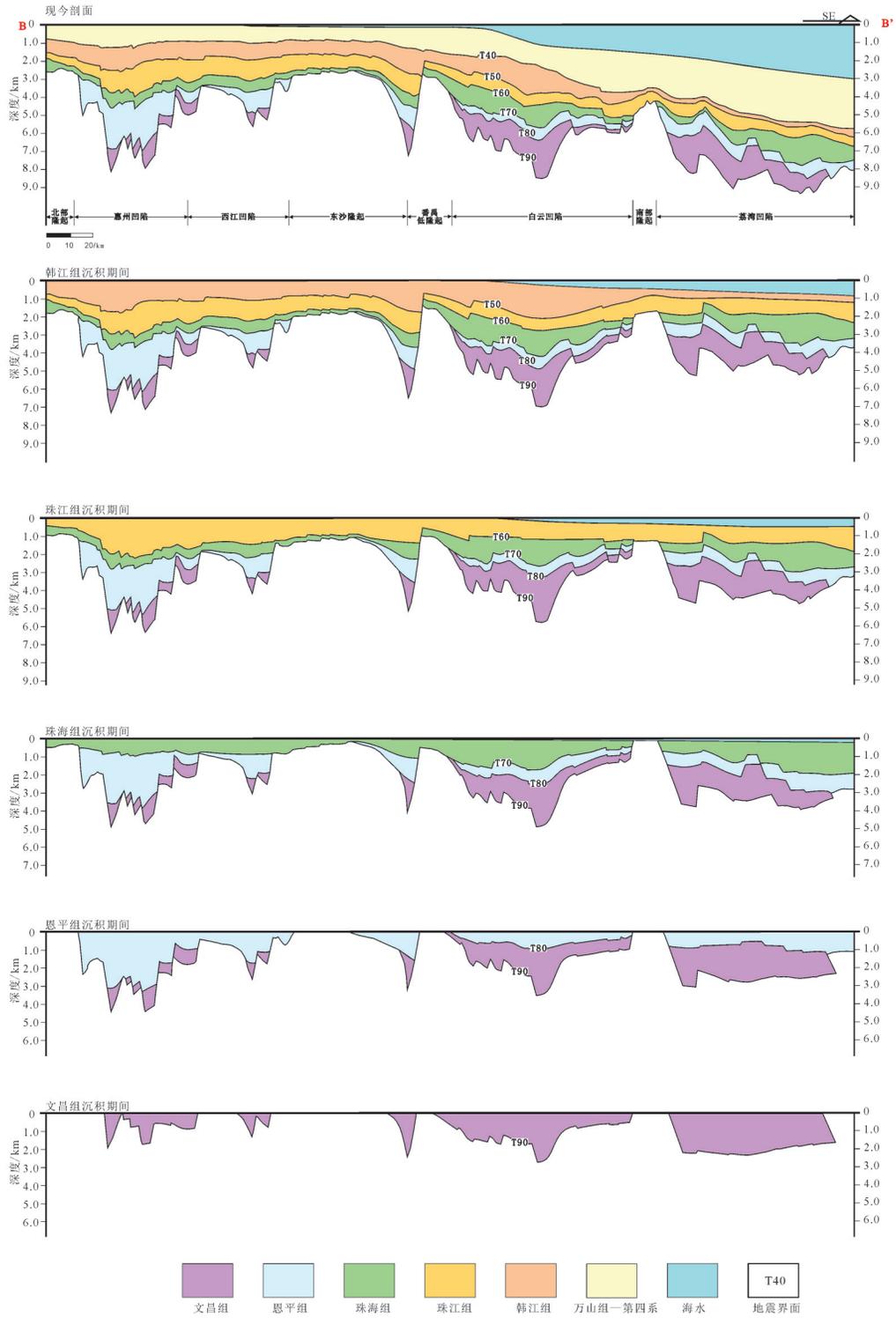


图9 BB'局部沉降演化图
 (位置见图1,原始剖面据朱伟林等,2010修改)
 Fig.9 The BB' regional evolution section

(The location of section is in Fig. 1 and the original section is modified after Zhu Weilin et al., 2010)

一阶段相似,惠州凹陷、白云凹陷、荔湾凹陷沉降量最大,至中中新世末,最大总沉降量为7200 m。自晚中新世开始,水深进一步增大,沉降特征较早,中中新世也有较大的变化,番禺低隆起以南的各构造单元发生强烈沉降,沉降量增加显著,现今荔湾凹陷最大总沉降约为9200 m,为全区最大。

西区及中区西部,始新世沉降范围局限,只在恩平凹陷有沉降,至始新世末,最大总沉降量为2300 m(图10)。早渐新世,沉降范围增大,其中在恩平凹陷和开平凹陷大部分区域都有沉降,西江凹陷、番禺低隆起和开平凹陷中部没有沉降,西江凹陷沉降量最大,至早渐新世末,最大总沉降量约为3650 m。从晚渐新世开始,沉降范围进一步增大,在整个西区及中区西部都有沉降,恩平凹陷沉降量仍最大,至晚渐新世末,最大总沉降量为4200 m。早中新世,沉降特征总体与晚渐新世相比具有继承性,全区都有沉降,而且恩平凹陷仍为最大沉降量分布区域,至早中新世末,最大总沉降量约为5200 m。中中新世的沉降范围和沉降量变化特征与早中新世相似,沉降范围覆盖全区,最大沉降量仍分布在恩平凹陷,至中中新世末,最大总沉降量为5700 m。从晚中新世开始,海水开始侵入西区及中区西部,沉降特征与早中中新世基本一致,恩平凹陷仍为最大沉降量分布区域,现今最大总沉降量为6700 m。

通过纵、横向综合对比分析3条演化剖面可以发现沉降演化特征存在明显的差异性,不同区域和构造单元的沉降范围、沉降量、分布等在不同时期具有不同的特征。如东区在始新世仅在东沙隆起和陆丰凹陷有分布,东沙隆起沉降量最大,而至早渐新世,沉降范围覆盖整个东区,陆丰凹陷南部沉降量增加显著,成为东区最大沉降分布区域。再如盆地东区和西区自晚中新世以来总体沉降特征与前期相比具有继承性,但中区自晚中新世以来沉降特征仍发生变化,如中区番禺低隆起以南区域自晚中新世以来发生强烈沉降,成为中区乃至整个盆地最大沉降量分布区域。同时,分析也发现在始新世和早渐新世时期,3条剖面中各个构造单元之间在沉降范围和沉降量等方面都存在较大差异,而且从始新世到早渐新世沉降特征差异性变化较为显著。但是从晚渐新世开始,3条剖面的沉降特征总体具有继承性,沉降格局基本不变,与前一阶段相

似。这种沉降特征及其变化的共性与整个盆地整体演化及其构造特征有关,在始新世和早渐新世,盆地演化处于裂陷阶段早中期,断层活动强烈,并形成一些具有差异性地地堑、半地堑等构造,而沉降范围主要是为这些构造所围限,这种构造格局从而使沉降范围和沉降量在不同区域和构造单元中有差异,而且在裂陷阶段不同时期,断层差异性活动较为强烈,构造特征也发生变化,从而使沉降特征差异性变化较为显著。而从晚渐新世开始,盆地演化进入裂陷阶段晚期及裂后阶段,断层活动减弱,至中中新世末,大部分新生代断裂活动停止(钟广见等,2008),盆地整体沉降,从而使沉降特征差异性变化较小,总体具有继承性。

5 影响因素分析

沉降特征从根本上受控于盆地的成盆动力学,不同时期沉降速率特征,尤其是构造沉降速率特征与盆地所经历的构造运动具有良好的对应关系(袁玉松等,2008;张云帆等,2008)。构造格局对沉降特征也有影响,尤其是对沉降平面分布特征的影响。

5.1 成盆动力学影响因素

对珠江口盆地整体沉降特征来说,在始新世第一幕沉降过程中,构造沉降在总沉降中的比例相对较小。这是因为自中生代末发生神狐运动以来至中始新世没有发生过构造运动,从中始新世开始至晚始新世末盆地经历了珠琼运动一幕和珠琼运动二幕(阎贫等,2005),而整个珠琼运动剧烈程度相对较小,所以构造沉降对总沉降贡献较小。而在第二幕沉降第I阶段,早渐新世恩平组沉积时,由于盆地刚刚经历了始新世的珠琼运动,并在始新世末珠琼运动二幕时,珠琼运动达到强烈阶段,形成了较大的沉降空间,所以早渐新世恩平组沉积时期沉降速率较大,构造沉降对总沉降的贡献较大。而至第二幕沉降第II阶段,晚渐新世珠海组沉积时,珠琼运动影响减弱,沉降速率减小,构造沉降对总沉降的贡献相对减小。在第二幕沉降第III阶段,早中新世珠江组沉积时期发生了南海运动(蔡周荣等,2010),但是在早中新世南海运动处于初始阶段,构造运动较弱,而且南海运动的主要作用区域在南海海盆,所以沉降速率较小。而至第二幕第IV阶段,中中新世韩江组沉积时期,南海运动影响增强,沉

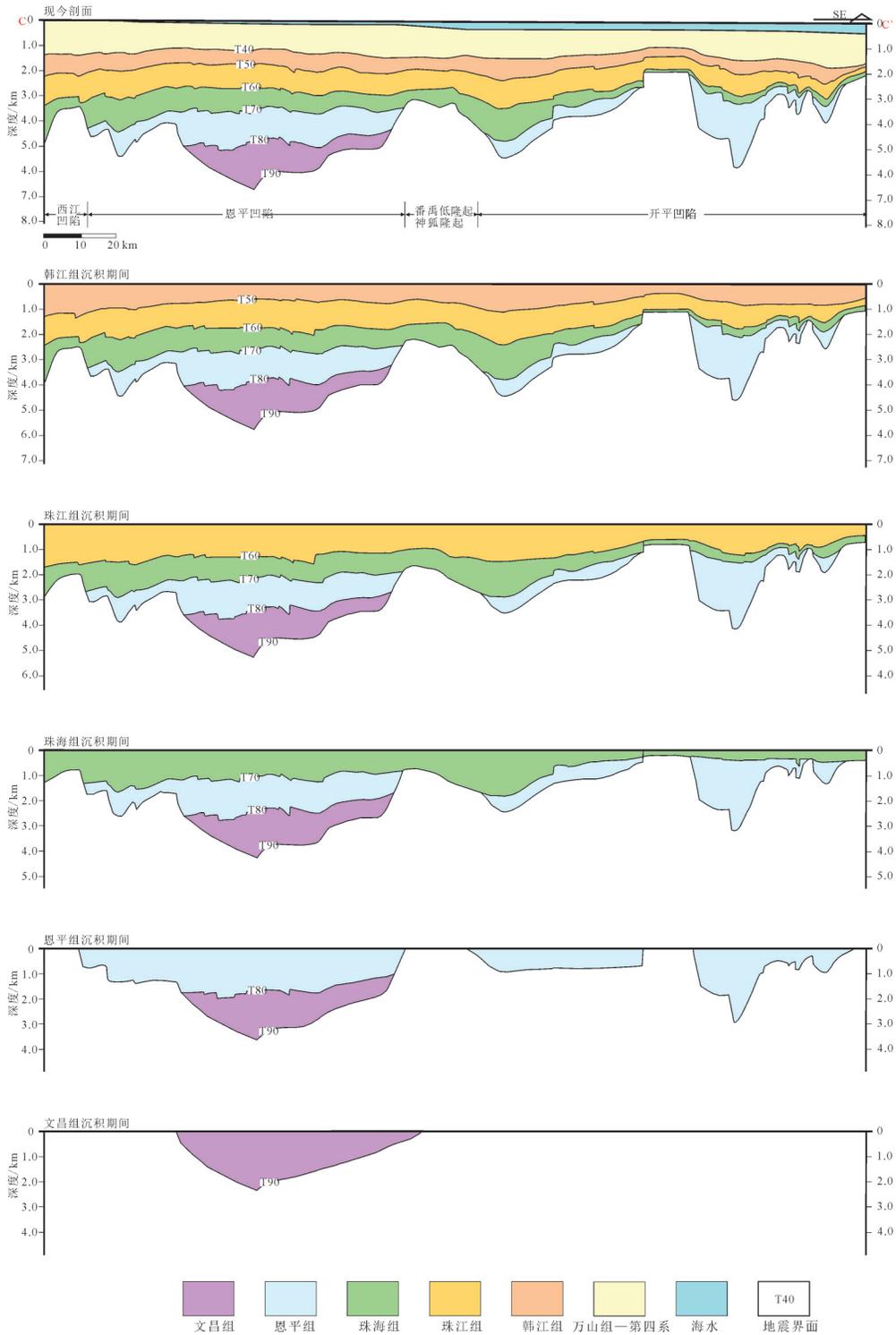


图10 CC'局部沉降演化图
(位置见图1,原始剖面据朱伟林等,2010修改)
Fig.10 The CC' regional evolution section

(The location of the section is in Fig. 1 and the original section is modified after Zhu Weilin et al., 2010)

降速率增大,构造沉降速率占总沉降速率的比例增大。总体来说,在整个第二幕沉降过程中,盆地经历了较多的构造运动,所以,总沉降速率和构造沉降速率较大,构造沉降对总沉降的贡献较大。中新世末,由于菲律宾板块的顺时针旋转,与华南大陆东部发生碰撞,从而导致了东沙运动,盆地沉降进入第三幕。但是东沙运动对珠江口盆地东部影响较大,而至西部影响较弱,所以使盆地的总沉降速率相比于第二幕减小,但是构造沉降速率基本没变,构造沉降对总沉降的贡献达到最大,这主要是因为珠江口盆地中中新世后发育了较多的断裂,火山活动进一步增强,构造活动仍然较强烈(阎贫等,2005;能源等,2013)。其中在白云凹陷、荔湾凹陷晚中新世以来存在强烈地沉降,关于其成因,部分研究者认为这是由于深部的地幔隆升引起的均衡补偿所致(张功成,2010)。也有研究者认为东沙运动使盆地发生断块升降,发育形成了一些NWW向断层,使沉降空间增大,从而使总沉降速率相对较大,同时剧烈的构造运动使构造沉降速率较大,构造沉降对总沉降的贡献达到最大。之后发生的台湾运动使珠江口盆地南部的深水构造格局发生变化,但是在重力均衡调整下而继续发生沉降,越往南沉降速率越大(于兴河等,2012)。

关于珠江口盆地不同构造单元沉降特征表现出来的差异性,从根本上来说也是受控于动力学特征的。如以争议最小、时代最新的东沙运动为例,由于菲律宾板块的顺时针旋转与华南大陆边缘东部发生碰撞,从而使珠江口盆地东部呈压扭应力状态,发育褶皱、断裂等,而往盆地西部和南部,东沙运动影响逐渐减弱。所以,盆地晚中新世以来的沉降特征表现为西部和南部各构造单元沉降速率较大,如文昌凹陷、白云凹陷、荔湾凹陷,而东部或靠近东部的各构造单元的沉降速率较小,如东沙隆起、陆丰凹陷、惠州凹陷、西江凹陷等。还有如珠江口盆地新生代沉降特征总体表现为中区和西区较大,是沉降中心的主要分布区,而东区沉降速率较小,这也因为不同区域位置不同,所受的应力状态有差异,从而影响沉降特征,中区和西区更靠近南海各海盆中心,南海各海盆在扩张过程中对盆地中区和西区影响较大,使中区和西区有较为充足的伸展空间,整体应力状态呈伸展状态,沉降速率较

大。而珠江口盆地东部,主要靠近南海东部,在其东部有台西南盆地、台湾岛等的阻挡,所以在盆地演化过程中,伸展区域局限,而且在晚中新世以来应力状态呈挤压应力状态,所以沉降速率较小。由以上分析可知,动力学特征对于沉降特征有着根本的影响,但是关于南海及其周缘的各盆地形成演化及动力学机制存在较大争议,不同研究者应用不同的研究方法提出不同的模式(Karig., 1971; Taylor et al., 1980; Tapponnier et al., 1986; 李思田等, 1998; 周蒂等, 2002; 夏斌等, 2005; 邹和平, 2005; 符启基等, 2007; 蔡学林等, 2010; 张功成等, 2015), 无论哪种动力学模式,在不同区域存在差异性这是一致的规律(张健等, 2001), 这种动力学区域差异性从而影响了沉降特征的区域差异性。

5.2 构造格局影响因素

构造格局对沉降速率分布特征也有较大的影响。珠江口盆地新生代时期由于在NE、NEE向和NW向两组基底断裂的相互作用下,使盆地呈现为“东西分块、南北分带”的构造格局。珠江口盆地各个时期沉降速率平面分布在东西向上表现为“分区”的特征,在同一区内南北向上又表现为“分带”的特征。其中,东西向上各个“区”的分布范围受NW向深大断裂所围限,在同一“区”内各个“带”的分布范围则受NE、NEE向深大断裂的控制,使得沉降速率“分区”的平面分布特征与“分块”的构造格局高度吻合,“分带”的平面分布特征与“分带”的构造格局高度吻合(图1)。这种现象说明盆地的构造格局对沉降速率分布特征有着重要的影响,结合前面的差异沉降特征分析可知,在盆地演化的裂陷阶段构造格局对沉降平面分布特征影响更为显著。

6 结 论

(1)珠江口盆地整体沉降可分为3幕。其中第一幕为始新世,构造沉降仅占平均总沉降的27%;第二幕为渐新世至中中新世,构造沉降对总沉降贡献开始增大,占平均总沉降的33.9%。根据沉降速率变化,第二幕可进一步划分为4个阶段;第三幕为晚中新世至第四纪,构造沉降对总沉降的贡献最大,占平均总沉降速率的47%。

(2)沉降特征时空差异性珠江口盆地的一个基本规律。同一时期的不同构造单元、同一构造单

元在不同时期沉降特征皆表现出差异性,不同区域沉降演化在沉降范围、沉降量、和沉降特征变化方面也存在差异性,各个时期沉降速率平面分布呈“分区”、“分带”的特征,与“东西分区、南北分带”的构造格局特征高度吻合。

(3)影响整体沉降特征和沉降特征时空差异性的根本因素是盆地的成盆动力学,盆地的构造格局对于沉降特征差异性也有影响。

致谢:审稿专家、编辑针对文章提供了宝贵的意见和建议,使本文增色不少,在此一并表示感谢!

References

- All China Commission of Stratigraphy. 2002. The Instruction of China Regional Stratigraphy(Geological Time Scale) Chart[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Allen P A, Allen J R. 1990. Basin Analysis: Principles and Applications[M]. London: Blackwell Pub.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cheng Xianqiong, Cao Jiamin. 2010. The structure of the composite mushroom-shaped mantle plume in the SouthChina Sea and its mantle dynamics[J]. *Geology in China*, 37(2): 268-279(in Chinese with English abstract).
- Cai Zhourong, Liu Weiliang, Wan Zhifeng, Guo Feng. 2010. Determination of Cenozoic tectonic movement in the northern South China Sea and the relationship between oil-gas reservoir and tectonic movement[J]. *Marine Science Bulletin*, 29(2): 161-165 (in Chinese with English abstract).
- Chen Changmin, Shi Hengsheng, Xu Shice, et al. The Forming Conditions of Palaeogene in the Eastern of Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Science Press, 2003:1-25(in Chinese).
- Chen Liang, Gan HuaJun, Zhu Chunrong, Tian Jijun. 2002. Study on subsidence history of Weixinan Depression in Beibuwan Basin[J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 14(4): 12-17(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuqi, Wang Zejiu, Huang Zhigao. 2009. The Pandect of Stratigraphical of China[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Cong Xiaorong, Yu Xinghe, Su Ming, Sha Zhibin, Wu Nengyou. 2013. Tectonic subsidence characteristics on the northern continental margin of the South China Sea since Late Miocene[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 32(6): 42-49.
- Cui Shasha, He Jiexiong, Chen Shenghong, Zou Heping, Cui Jie. 2009. Development characteristics of Pearl River Mouth Basin and its geological conditions for oil and gas Accumulation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(3): 384-391(in Chinese with English abstract).
- Du Xudong, Qi Jiafu, Lu Chunsheng. 1997. Application and present situation of subsidence backwards[J]. *Global Geology*, 16(2): 23-27(in Chinese with English abstract).
- Du Xudong, Zhu Jianwei. 1993. Principle and application of subsidence curve[J]. *Global Geology*, 13(3): 104-113(in Chinese).
- Falvey D A, Deighton I C. 1982. Recent advances in burial and thermal geohistory Analysis[J]. *APEA*, 65-80.
- Fu jie, Li Mingbi, Tang Yong, Qiu Wenxuan, Wang Hui. 2013. Post-rift subsidence anomaly and its mechanism in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 31(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiji, Cai Zhourong, Ma Chi. 2007. Preliminary discussion on the comprehensive models of forming and evolution in South China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 23(9): 1-7.
- Gao Hongfang, Du Deli, Zhong Guangjian. 2006. Quantitative simulation of subsidence history and analysis of Pearl River Mouth Basin in South China Sea[J]. *Research of Geology in South China Sea*, 13: 11-20(in Chinese with English abstract).
- Guo Qiulin, Mi Shiyun, Shi Guangren, Zhang Qingchun, Yang Qiulin, Li Amei. 1998. Principle and Method of Basin Simulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- He Jian, Liang Qianrong, Ma Yun, Shi Yaohong, Xiao Zhen. 2018. Geohazards types and their distribution characteristics in the natural gas hydrate area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Geology in China*, 45(1): 15-28(in Chinese with English abstract).
- He Jiexiong, Chen Shenghong, Ma Wenhong, Gong Xiaofeng. 2012. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou basin, northeastern South China Sea[J]. *Geology in China*, 39(1): 106-118(in Chinese with English abstract).
- Kang Bo. 2014. Cenozoic Subsidence and thermal history modelling of Qiongdongnan Basin[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 19-28(in Chinese with English abstract).
- Karig D E. 1971. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 76(11): 2542-2561.
- Kusznir N J, Marsden G, Egan S S. 1991. A flexural-cantilever simple-shear/pure-shear model of continental lithosphere extension: Applications to the Jeanne d'Arc Basin, Grand Banks and Viking Graben, North Sea[J]. *Geological Society London Special Publications*, 56(1): 41-60.
- Lan Yefang, Huang Sijing, Zhou Xiaokang, Zeng Yi, Ma Yongkun. 2015. The recovery of diagenetic environments of limestone in Early Miocene Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geology in China*, 42(6): 1837-1850(in Chinese with English abstract).
- Liao Jie, Zhou Di, Zhao Zhongxian, Zhang Yunfan, Xu Ziyang. 2001. Numerical modeling of the anomalous post-rift subsidence in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(8):1156-1167.
- Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, Yang Shigong, Wu Peikang. 1998. Dynamic process of episodes rifting in northern margin of South China Sea and tectonic incidents from 10 Ma[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 43(8): 797-810(in Chinese).
- Li Xiangdong, Chen Gang, Li Jiuyong, He Youbin, Zhang Mingji. 2010. The method and status of subsidence history analysis[J]. *Journal of Oil and Gas*, 32(5): 199-203(in Chinese with English abstract).
- Li Xuejie, Wang Zhe, Yao Yongjian, Gao Hongfang, Li Bo. 2017. The tectonic features and evolution of the west Pacific margin[J]. *Geology in China*, 44(6): 1102-1114(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Liu An, Wu Shi Min, Cheng Wei Hua. 2011. Tectonic subsidence history and dynamic mechanism of the Dongsha rise in the Zhujiang River Mouth Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(6): 117–124(in Chinese with English abstract).
- Liu Cuirong, Chen Fajing. 1996. A modification to basic Models of subsidence history[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 23(4): 15–19(in Chinese with English abstract).
- Liu Shusheng, Yang Yongfei, Guo Linnan, Nie Fei, Peng Zhiming, Pan Guitang. 2018. Tectonic characteristics and metallogeny in Southeast Asia [J]. *Geology in China*, 45(5): 863–889(in Chinese with English abstract).
- Liu Minghui, Mei Lianfu, Yang Yajuan, Tian Wei, Liu Hailun, Yuan Xun. 2015. Temporal–spatial difference of subsidence between syn and post–rift stages in northern Huizhou Sag of Pearl River Mouth Basin and their main control factors[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 37(2):31–43(in Chinese with English abstract).
- Liu Xinyu, Xie Jinyou, Zhang Huolan, He Weijun. 2009. Chronostratigraphy of planktonic foraminifera in the Yinggehai–Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 26(2): 181–192(in Chinese with English abstract).
- Liu Xuefeng. 1997. A revision to Watts formula used to calculate tectonic subsidence[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 24(3): 82–85(in Chinese with English abstract).
- Lu Chunsheng, Qi Jiafu, Lu Kezheng. 1996. Improvement of model and development of software for basins subsidence history analysis[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 4(4): 378–384(in Chinese with English abstract).
- Lu Kezheng, Zhu Xiaomin, Qi Jiafu, Liu Guangdi, Yang Qiao, Huang Zhilong. 2001. Analysis of Petroliferous Basin[M]. Dongying: China University of Petroleum Press(in Chinese).
- Lv Xueju, Xiao Li, Lin Zhengliang, Yue Yong. 2008. Analysis of subsidence history of Zhusan Depression in western Pearl River Mouth Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(2): 195–197(in Chinese with English abstract).
- Mckenzie D. 1978. Some remarks on the development of sedimentary Basins[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 40(1): 25–32.
- Neng Yuan, Wu Jingfu, Qi Jiafu, Zhang Gongcheng, He Yu, Chen Weichang. 2013. Three structural layers and its Evolution of Cenozoic basins in deep water area of northern margin, South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 403–414(in Chinese with English abstract).
- Royden L, Keen C E. 1980. Rifting process and thermal evolution of the continental margin of Eastern Canada Determined from subsidence curves[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 51(2): 343–361.
- Slater J G, Christie P A F. 1980. Continental stretching: An explanation of the Post–Mid–Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 85(B7): 3711–3739.
- Shi Guangren, Mi Shiyun. 1996. Basin integrated modeling system “BASIMS” [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 17(1): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Shi Guangren. 2004. The Method of Numerical Simulation(the Third Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Shi Guangren. 2009. Review and outlook for the 30th anniversary of basin modeling techniques[J]. *Computer Application of Petroleum*, (1): 3–6(in Chinese with English abstract).
- Shi Hengsheng, He Min, Zhang Lili, Yu Qiuhua, Pang Xiong, Zhong Zhihong, Liu Lihua. 2014. Hydrocarbon geology, accumulation pattern and the next exploration strategy in the eastern Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 26(3):11–22(in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanisms of the collision between India and Asia[C]//Collision Tectonics. Geological Society London Special Publications, 19(1): 113–157.
- Taylor B, Hayes D E. 1980. The Tectonic evolution of the South China Basin[J]. Washington Dc American Geophysical Union Geophysical Monograph, 23: 89–104.
- Tian Zaiyi, Zhang Qingchun. 1996. Petroliferous Basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Vail P R, Mitchum R M, Thompson Iii S. 1997. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 3. relative changes of sea level from coastal onlap[J]. *Antimicrobial Agents & Chemotherapy*, 41(9): 1859–1866.
- Wang Changyong, Zheng Rongcai, Gao Boyu, Zhu Guojin, Hu Xiaoping, Li Yun. 2010. Deepwater fan sedimentary characteristics of Zhujiang Formation in Liwan area of Zhujiang River mouth basin[J]. *Geology in China*, 37(6): 1628–1637(in Chinese with English abstract).
- Wang Cong, Mei Lianfu, Chen Hanlin, Shi Hesheng, Shu Yu, Liu Hailun, Wang Hui. 2016. Post–rift subsidence history and mechanism of Huizhou depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 47(3): 807–818(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong. 2005. Stratigraphy Division and Correlation of Each Geological Period in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Watts A B. 2008. The U.S. Atlantic continental margin: Subsidence history, crustal structure and thermal evolution[J]. *Art & Design*, 2(8): 533–537.
- Wernicke B. 1981. Low–angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogeny[J]. *Nature*, 291(5817): 645–648.
- Xia Bin, Cui Xuejun, Zhang Yanhua, Liu Baoming, Wang Ran, Yan Yi. 2005. Dynamic factors for the opening of South China Sea and a numerical modeling discussion[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 328–333(in Chinese with English abstract).
- Xie Hui, Zhou Di, Chen Guanghao, Lipengchun, Pang Xiong, Li Yuanping. 2014. Uncertainty and parameterization in backstripping of basin subsidence analysis[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 33(5): 50–59(in Chinese with English abstract).
- Xie Hui, Zhou Di, Li Yuanping, Pang Xiong, Li Pengchun, Chen Guanghao, Li Fucheng, Cao Jinghe. 2014. Cenozoic tectonic subsidence in deep water sags in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 615–616(4): 182–198.

- Xie Lihua, Lin Changsong, Dong Wei, Qin Chenggang, Zhang Zhongtao, Xiong Liang. 2009. High-resolution sequence stratigraphy of Zhujiang Formation and Zhuhai Formation in Panyu low uplift of the Zhujiang River mouth basin[J]. *Geology in China*, 36(2): 366–377(in Chinese with English abstract).
- Yan Pin, Liu Hailing. 2005. Temporal and spatial distribution of Mesocenoic igneous rocks over South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 33–41(in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu. 1998. The Tectonic evolution and sedimentary basins of South China Sea in Cenozoic[J]. *Geological Research of South China Sea*, (10): 1–17(in Chinese with English abstract).
- Yu Xinghe, Liang Jinqiang, Fang Jingnan, Cong Xiaorong, Jiang Longyan, Wang Jianzhong. 2012. Tectonic subsidence characteristics and its relationship to BSR distribution in deep water area of Pearl River Mouth Basin since the Late Miocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(6): 787–800(in Chinese with English abstract).
- Yuan Yusong, Yang Shuchun, Hu Shengbiao, He Lijuan. 2008. Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(2): 376–383(in Chinese with English abstract).
- Zhang Gongcheng, Wang Pujun, Wu Jingfu, Liu Shixiang, Xie Xiaojun. 2015. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: A new evolution model of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 27–37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Gongcheng. 2010. Tectonic evolution of deep water area of northern continental margin in South China Sea[J]. *Acta Petroli Sinica*, 31(4): 528–533(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Xiong Liangping, Wang Jiyang. 2001. Characteristics and mechanism of geodynamics evolution of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(5): 602–610(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qingchun, Shi Guangren, Tian Zaiyi. 2001. Present developing situation and future prospects of basin simulation technology[J]. *Petroleum Geology Experiment*, 23(3): 312–317(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunfan, Sun Zhen, Guo Xingwei, Zhou Di, Jiang Jianqun, Fan Hao. 2008. Tectonic subsidence characteristics of Qiongdongnan Basin in Cenozoic[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 27(5): 30–36(in Chinese with English abstract).
- Zhao Shujuan, Wu Shiguo, Shi Hesheng, Dong Dongdong, Chen Duanxin, Wang Ying. 2012. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin of South China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 27(3): 1008–1019(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yingdong, Gan Huaqun, Chen Shanbin, Wang Guanrong, Wang Xiang, Zhang Chengcheng. 2015. Determination of Zhu-Qiong movement: the enlightenment from tectonic and sedimentary characteristics of Fushan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Geology in China*, 42(4): 948–959(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhongxian, Zhou Di, Liao Jie. 2009. Tertiary paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth Basin of the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 28(6): 52–60(in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangjian, Wu Nengyou, Lin Zhen, Yao Yongjian, Yi Hai. 2008. Characteristics of faults on the northeastern continental slope of the South China Sea and their controls on basin evolution[J]. *Geology in China*, 35(3): 456–462(in Chinese with English abstract).
- Zhou Di, Chen Hanzong, Wu Shimin, Yu Hexing. 2002. Opening of the South China Sea by dextral splitting of the east Asian Continental Margin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 180–190(in Chinese with English abstract).
- Zhou Di, Sun Zhen, Liao Jie, Zhao Zhongxian, He min, Wu Xiangjie, Pang Xiong. 2009. Filling history and post-breakup acceleration of sedimentation in Baiyun Sag, deepwater northern South China Sea[J]. *Journal of Earth Science*, 20(1): 160–171.
- Zhou Di, Wang Ping, Fang Qing. 1993. A quantitative biostratigraphic correlation and analysis of subsidence history in Pearl River Mouth Basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 28(3): 211–220(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weilin, Mi Lijun. Atlas of Oil and Gas Basins, China Sea[M], Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Zou Heping. 2005. The Meso-Cenozoic crust-mantle interactions and the tectonic evolution in the north Part of South China Sea and its coastal areas—to the memory of Professor Chen Guoda, the advocacy of the concept of Continental Marginal Extensional Belts[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 78–86(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡学林, 朱介寿, 程先琼, 曹家敏. 2010. 南海复蘑菇状地幔低速柱结构及其地幔动力学[J]. *中国地质*, 37(2): 268–279.
- 蔡周荣, 刘维亮, 万志峰, 郭峰. 2010. 南海北部新生代构造运动厘定及与油气成藏关系探讨[J]. *海洋通报*, 29(2): 161–165.
- 陈亮, 甘华军, 祝春荣, 田继军. 2002. 北部湾盆地涠西南凹陷沉降史研究[J]. *新疆石油学院学报*, 14(4): 12–17.
- 陈长民. 2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社.
- 程裕淇, 王泽九, 黄枝高. 2009. 中国地层典总论[M]. 北京: 地质出版社.
- 丛晓荣, 于兴河, 苏明, 沙志斌, 吴能友. 2013. 南海北部陆坡区晚中新世以来沉降特征[J]. *热带海洋学报*, 32(6): 42–49.
- 崔莎莎, 何家雄, 陈胜红, 邹和平, 崔洁. 2009. 珠江口盆地发育演化特征及其油气成藏地质条件[J]. *天然气地球科学*, 20(3): 384–391.
- 杜旭东, 漆家福, 陆春生. 1997. 沉降史反演的现状与应用[J]. *世界地质*, 16(2): 23–27.
- 杜旭东, 朱建伟. 1994. 沉降曲线原理及应用[J]. *世界地质*, 13(3): 104–113.
- 符启基, 蔡周荣, 马驰. 2007. 南海形成演化综合模式的初步探讨[J]. *海洋地质前沿*, 23(9): 1–7.
- 付洁, 黎明碧, 唐勇, 邱文弦, 王辉. 2013. 珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降研究及成因分析[J]. *海洋学研究*, 31(1): 1–15.
- 高红芳, 杜德莉, 钟广见. 2006. 珠江口盆地沉降史定量模拟和分析[J]. *南海地质研究*, (1): 11–20.
- 郭秋麟, 米石云, 石广仁, 张庆春, 杨秋琳, 李阿梅. 1998. 盆地模拟原

- 理方法[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 龚晓峰. 2012. 南海东北部珠江口盆地成生演化与油气运聚成藏规律[J]. 中国地质, 39(1): 106-118.
- 何健, 梁前勇, 马云, 石要红, 夏真. 2018. 南海北部陆坡天然气水合物区地质灾害类型及其分布特征[J]. 中国地质, 45(1): 15-28.
- 康波. 2014. 琼东南盆地新生代沉降—热演化模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 19-28.
- 兰叶芳, 黄思静, 周小康, 曾熠, 马永坤. 2015. 珠江口盆地东沙隆起珠江组灰岩成岩环境的恢复[J]. 中国地质, 42(6): 1837-1850.
- 李思田, 林畅松, 张启明, 杨士恭, 吴培康. 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂隙的动力过程及10 Ma以来的构造事件[J]. 科学通报, 43(8): 797-810.
- 李向东, 陈刚, 李玖勇, 何幼斌, 张铭记. 2010. 沉降史分析方法及研究现状[J]. 石油天然气学报, 32(5): 199-203.
- 李学杰, 王哲, 姚永坚, 高红芳, 李波. 2017. 西太平洋边缘构造特征及其演化[J]. 中国地质, 44(6): 1102-1114.
- 刘安, 吴世敏, 程卫华. 2011. 珠江口盆地东沙隆起的沉降史及其动力机制[J]. 海洋学报, 33(6): 117-124.
- 刘翠荣, 陈发景. 1996. 对沉降史基本模型的改进[J]. 石油勘探与开发, 23(4): 15-19.
- 刘明辉, 梅廉夫, 杨亚娟, 田巍, 刘海伦, 袁勋. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷北部裂陷期与拗陷期沉降作用时空差异及主控因素[J]. 地球科学与环境学报, 37(2): 31-43.
- 刘书生, 杨永飞, 郭林楠, 聂飞, 彭智敏, 潘桂棠. 2018. 东南亚大地构造特征与成矿作用[J]. 中国地质, 45(5): 863-889.
- 刘新宇, 谢金有, 张伙兰, 何卫军. 2009. 南海北部莺琼盆地浮游有孔虫年代地层研究[J]. 微体古生物学报, 26(2): 181-192.
- 刘学锋. 1997. 对Watts等构造沉降量计算公式的修正[J]. 石油勘探与开发, 24(3): 82-85.
- 陆春生, 漆家福, 陆克政. 1996. 沉降模拟的模型改进及系统研制[J]. 应用基础与工程科学学报, 4(4): 378-384.
- 陆克政, 朱筱敏, 漆家福, 刘广弟, 杨桥, 黄志龙. 2001. 含油气盆地分析[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 285-315.
- 吕学菊, 肖力, 林正良, 岳勇. 2008. 珠江口盆地西部珠三坳陷沉降史分析[J]. 新疆石油地质, 29(2): 195-197.
- 能源, 吴景富, 漆家福, 张功成, 何玉, 陈玮常. 2013. 南海北部深水新生代盆地三层结构及其构造演化[J]. 地质学报, 87(3): 403-414.
- 全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 施和生, 何敏, 张丽丽, 余秋华, 庞雄, 钟志洪, 刘丽华. 2014. 珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略[J]. 中国海上油气, 26(3): 11-22.
- 石广仁, 米石云. 1996. 盆地综合模拟系统BASIMS[J]. 石油学报, 17(1): 1-9.
- 石广仁. 2004. 油气盆地数值模拟方法(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 石广仁. 2009. 盆地模拟技术30年回顾与展望[J]. 石油工业计算机应用, (1): 3-6.
- 田在艺, 张庆春. 1996. 中国含油气沉积盆地论[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 汪啸风, 陈孝红. 2005. 中国各地质时代地层划分与对比[M]. 北京: 地质出版社.
- 王昌勇, 郑荣才, 高博禹, 朱国金, 胡晓庆, 李云. 2010. 珠江口盆地荔湾井区珠江组深水扇沉积特征[J]. 中国地质, 37(6): 1628-1637.
- 王聪, 梅廉夫, 陈汉林, 施和生, 舒誉, 刘海伦, 王辉. 2016. 珠江口盆地惠州凹陷裂后期沉降特征及成因分析[J]. 中南大学学报自然科学版, 47(3): 807-818.
- 夏斌, 崔学军, 张宴华, 刘宝明, 王冉, 闫义. 2005. 南海扩张的动力学因素及其数值模拟讨论[J]. 大地构造与成矿学, 29(3): 328-333.
- 谢辉, 周蒂, 陈广浩, 李鹏春, 庞雄, 李元平. 2014. 盆地沉降史回剥分析的不确定性及其参数影响[J]. 热带海洋学报, 33(5): 50-59.
- 谢利华, 林畅松, 董伟, 秦成岗, 张忠涛, 熊亮. 2009. 珠江口盆地番禺低隆珠江组—韩江组高精度层序地层[J]. 中国地质, 36(2): 366-377.
- 阎贫, 刘海龄. 2005. 南海及其周缘中生代火山活动时空特征与南海的形成模式[J]. 热带海洋学报, 24(2): 33-41.
- 姚伯初. 1998. 南海新生代的构造演化与沉积盆地[J]. 南海地质研究, (10): 1-17.
- 于兴河, 梁金强, 方竞男, 丛晓荣, 姜龙燕, 王建忠. 2012. 珠江口盆地深水晚中新世以来构造沉降与似海底反射(BSR)分布的关系[J]. 古地理学报, 14(6): 787-800.
- 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 何丽娟. 2008. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. 地球物理学报, 51(2): 376-383.
- 张功成, 王璞珺, 吴景富, 刘世翔, 谢晓军. 2015. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式[J]. 地学前缘, 22(3): 27-37.
- 张功成. 2010. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征[J]. 石油学报, 31(4): 528-533.
- 张健, 熊亮萍, 汪集旸. 2001. 南海深部地球动力学特征及其演化机制[J]. 地球物理学报, 44(5): 602-610.
- 张庆春, 石广仁, 田在艺. 2001. 盆地模拟技术的发展现状与未来展望[J]. 石油实验地质, 23(3): 312-317.
- 张云帆, 孙珍, 郭兴伟, 周蒂, 姜建群, 樊浩. 2008. 琼东南盆地新生代沉降特征[J]. 热带海洋学报, 27(5): 30-36.
- 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 董冬冬, 陈端新, 王莹. 2012. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. 地球物理学进展, 27(3): 1008-1019.
- 赵迎冬, 甘华军, 陈善斌, 王观宏, 王祥, 章诚诚. 2015. 珠江运动的厘定——来自北部湾盆地福山凹陷构造沉积特征的启示[J]. 中国地质, 42(4): 948-959.
- 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 2009. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化[J]. 热带海洋学报, 28(6): 52-60.
- 钟广见, 吴能友, 林珍, 姚永坚, 易海. 2008. 南海东北陆坡断裂特征及其对盆地演化的控制作用[J]. 中国地质, 35(3): 456-462.
- 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 俞何兴. 2002. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. 地质学报, 76(2): 180-190.
- 周蒂, 王平, 放青. 1993. 珠江口盆地东部定量生物地层划分对比及沉降历史分析[J]. 地质科学, 28(3): 211-220.
- 朱伟林, 米立军. 2010. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 邹和平. 2005. 南海北部及其沿岸中、新生代壳幔相互作用与构造演化——纪念“陆缘扩张带”概念的倡导者陈国达教授[J]. 大地构造与成矿学, 29(1): 78-86.