

盆地沉降史回剥分析的不确定性及其参数影响*

谢辉^{1,2}, 周蒂¹, 陈广浩¹, 李鹏春¹, 庞雄³, 李元平³, 赵美松⁴

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国海洋石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 广州 510240

4. 中国石化胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东 东营 257000

摘要: 回剥分析(backstripping)是盆地沉降史分析的核心方法, 应用极为广泛; 但对其分析结果的不确定性及其参数对分析结果的影响的关注甚少。以珠江口盆地白云凹陷地区为例, 探讨了原始数据和选用参数(包括无钻井揭示的基底埋深和界面年龄、地层划分、孔隙度随深度变化曲线、沉积岩性、古水深和全球海平面变化等)对回剥分析结果的影响。理论分析和灵敏度试验表明, 无钻井揭示的基底埋深的误差影响回剥分析的所有结果; 界面年龄的误差仅影响对沉积速率和构造沉降速率的估计; 岩性的影响反映在选取密度和孔隙度随深度变化的曲线参数之中, 孔隙度在不同地区可能有较大差异; 而古水深是回剥分析参数中不确定性最大的因素, 古水深的误差会影响去压实厚度和沉积速率, 但却 100% 成为构造沉降量的误差。由于陆坡区古水深和岩性随位置的变化较大, 这两种参数对陆坡区回剥分析结果的影响尤为显著, 需要采用随位置而变的参数, 特别需要综合利用各种地质地球物理资料估计各地层沉积时的古水深变化。数据的不确定性及其参数选取的不当有可能导致谬误的结果, 因此发表回剥分析结果时应该说明主要参数的选取依据, 而对于文献中发表的回剥分析结果则必须在考察其数据和参数的不确定性后才能考虑采用与否。

关键词: 回剥分析; 沉降史分析; 不确定性; 参数影响; 白云凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)05-0050-10

Uncertainty and parameterization in backstripping of basin subsidence analysis

XIE Hui^{1,2}, ZHOU Di¹, CHEN Guang-hao¹, LI Peng-chun¹, PANG Xiong³, LI Yuan-ping³, ZHAO Mei-song⁴

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

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

3. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) China Ltd-Shenzhen, Guangzhou 510240, China;

4. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Co. Ltd., China Petroleum & Chemical Corporation (SINOPEC), Dongying 257000, China.

Abstract: Backstripping is an important and widely used method for basin subsidence analysis. Little attention has been paid on the uncertainty of its results. In this paper, we address this issue based on a study of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin. We demonstrated through theoretical analysis and sensitivity tests that the uncertainty in the non-recovery of the basement depth will pass on to all the results of backstripping, but the uncertainty in age only affects the estimations of sedimentary and subsidence rates. Formation lithology influences the selection of porosity and density parameters. The porosity-depth curves of sandstone and shale vary from area to area. Largest uncertainty comes from paleo-water depth, whose error is 100% inherited by the calculated tectonic subsidence. In the slope area, paleo-water depth and lithology vary significantly with locations. Thus, it is essential to use the paleo-water depth and lithology parameters that are variable with locations. The uncertainty in the source data and inappropriate parameters may lead to erroneous results. Caution should be

收稿日期: 2014-01-22; 修订日期: 2014-04-14。孙淑杰编辑

基金项目: 国家高新技术发展计划项目(2008AA093001); 国家科技重大专项(2011ZX05025-003-005); 国家自然科学基金项目(40976033)

作者简介: 谢辉(1987~), 男, 江西省抚州市人, 在读博士研究生, 从事盆地分析研究。E-mail: xiehuihaoba@163.com

*感谢孙珍研究员、赵中贤助研技术上的帮助; 感谢中海油深圳分公司提供的资料。

taken when reading published backstripping results. The quality of parameterization needs to be examined before adopting the results.

Key words: backstripping; subsidence analysis; uncertainty; parameters; Baiyun Sag; Pearl River Mouth Basin

自从 1954 年 Von Bubnoff 首次提出沉降曲线的概念以来, 盆地沉降史的研究不断发展并得到广泛应用(Von Bubnoff, 1954; Watts, et al, 1976; Steckler, et al, 1978; Sclater, et al, 1980; Stam, et al, 1987; 杜旭东 等, 1997; Allen et al, 2005; 李向东 等, 2010)。沉降史分析是构造地质学与沉积学在沉积盆地研究中的结合点和生长点, 是含油气盆地模拟的重要组成部分, 是热史、生烃史和盆地充填模拟的基础。另外, 沉降曲线的绘制对确定岩石圈伸展系数和裂后异常沉降起到决定性的作用。因此, 开展精确的盆地沉降史分析具有重要的理论和实际意义。

回剥分析(backstripping)是盆地沉降史分析的核心方法, 首次由 Watts 等(1976)提出。回剥分析是通过地层压实、沉积物负载均衡、古水深变化以及海平面变化等校正求取盆地构造沉降的过程。其利用现今观测到的地层厚度, 通过逐层剔除的办法, 获得各地层的原始沉积厚度及速率和各时期的构造沉降量及速率, 为盆地沉积沉降历史提供定量分析结果。地层去压实的目的是恢复地层在沉积时的初始厚度, 其基本假设是沉积物在压实过程中骨架体积保持不变, 地层厚度的减小仅由在上覆沉积载荷的作用下孔隙体积的变小而引起, 因而由深度及上覆沉积物密度所决定。另一个假设是地层压实过程不可逆, 即地层后期抬升到浅部时孔隙度仍将保持其最大埋深时的值。去压实的基本操作是: 在剥去上覆地层之后, 根据孔隙度-深度关系曲线恢复下伏地层在沉积初期位于地表时的孔隙度, 然后恢复其在地表时的厚度。孔隙度-深度关系曲线有直线和幂函数曲线两种, 都由两个参数决定, 即沉积物的初始孔隙度(ϕ_0)和沉积岩的压实系数(c)。以幂函数曲线为例, 去压实计算公式如下(Steckler, et al, 1978; Stam, et al, 1987):

$$y'_2 - y'_1 = y_2 - y_1 - \frac{\phi_0}{c} \{ \exp(-cy_1) - \exp(-cy_2) \} + \frac{\phi_0}{c} \{ \exp(-cy'_1) - \exp(-cy'_2) \} \quad (1)$$

式中, y'_1 和 y'_2 是去压实后地层的顶底界深度, y_1 和 y_2 是地层现今的顶底界深度; 实际计算需要用迭代算法。

构造沉降量计算是在实测的基底沉降量中去掉由于沉积物负载和压实、古水深变化、海平面变化

及重力均衡所带来的沉降, 从而得到由地球热动力因素产生的构造沉降。在时间 t 时的基底构造沉降量计算公式如下(Steckler, et al, 1978):

$$Y = \left[\frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} \right] S + W_d - \left[\frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \right] \Delta SL \quad (2)$$

其中, Y 是基底在时间 t 的构造沉降量, ρ_m 、 ρ_w 和 ρ_s 分别为地幔、水和沉积物的平均密度, S 是在时间 t 内沉积的沉积物厚度(经过去压实), W_d 是在时间 t 的古水深, ΔSL 是在时间 t 的海平面相对于现今的海平面变化。

作为一种定量的研究方法, 回剥分析已成为盆地分析的基本方法, 在构造研究中也得到了普遍的运用。但是, 对于回剥分析的不确定性以及参数影响的研究甚少, 虽然有些作者(Perrier, et al, 1974; 袁炳存 等, 1986; 杜旭东 等, 1997; Cunha, 2008; 李向东 等, 2010)对回剥分析的不确定性以及参数影响之中的个别因素进行了探讨, 但尚未见到对各种因素的全面分析。本文以南海北部珠江口盆地白云深水区为例, 通过理论分析和灵敏度试验, 探讨了回剥分析计算结果受原始数据和参数的影响到底有多大以及哪些数据和参数影响较大的问题。

1 原始数据的不确定性及其影响

原始数据的不确定性主要在于无钻井揭示的基底埋深和界面年龄。另外, 地层划分方案也是基础数据, 影响显著。原始数据对回剥分析的结果具有直接的影响。

1.1 无钻井揭示的基底埋深

浅部层序的界面深度往往有钻井控制, 精度较高; 但是基底埋深往往有很多钻井没有钻遇, 只能通过时深转换获得, 其深度很可能存在较大的不确定性。在白云凹陷地区, 基底最大深度可能超过 14km (黄春菊 等, 2005), 目前在白云凹陷中心还没有钻井揭示其基底深度。我们分别用二次多项式、幂函数和三次多项式对白云凹陷的基底走时进行时深转换, 获取的基底最大深度分别为 15632m、14774m 和 12656m, 即幂函数得到的基底最大深度比三次多项式深约 2100m, 比二次多项式浅约 850m。这是因为对于深度大于约 4.5km 的地层, 用三次多项式进行时深转换会低估界面深度, 用二次多项式进行时深转换又会高估界面深度, 只有采用幂函数进行时

深转换会得到较合理的结果(周蒂等, 2008)。基底深度的不确定性直接影响到各个地层(包括裂后期地层)去压实厚度和构造沉降量的计算。分别利用幂函数、三次多项式和二次多项式获取的白云凹陷基底最大深度进行回剥分析时, 幂函数和三次多项式的去压实厚度最大差距达 46%, 构造沉降速率最大差距

达 98%; 幂函数和二次多项式的去压实厚度最大差距达 32%, 构造沉降速率最大差距达 42%(表 1)。可见, 基底埋深的确定性对回剥分析结果影响显著, 在没有钻井控制基底埋深的情况下, 对于深度较大的地层, 用幂函数进行时深转换所得的界面深度更合理, 通过该界面深度获取的回剥分析结果也更可靠。

表 1 不同时深转换公式获得基底埋深回剥分析结果对比

Tab. 1 Comparison of backstripping results that depend on basement depths from different time-depth conversion formula

地层年龄/Ma	$S_p/(m \cdot Ma^{-1})$	$S_t/(m \cdot Ma^{-1})$	$S_s/(m \cdot Ma^{-1})$	$(S_p-S_t)/S_p$	$(S_p-S_s)/S_p$	$T_p/(m \cdot Ma^{-1})$	$T_t/(m \cdot Ma^{-1})$	$T_s/(m \cdot Ma^{-1})$	$(T_p-T_t)/T_p$	$(T_p-T_s)/T_p$
5.33~0	61	61	61	0%	0%	10	20	11	-98%	-5%
10.5~5.5	73	59	73	19%	0%	13	21	14	-61%	-4%
12.5~10.5	87	59	87	33%	0%	149	156	149	-5%	0%
13.8~12.5	370	273	371	26%	0%	150	180	150	-20%	0%
15.5~13.8	159	101	159	37%	0%	112	121	111	-8%	1%
16.5~15.5	133	76	133	43%	0%	-49	-44	-52	11%	-5%
17.5~16.5	133	75	133	43%	0%	162	166	159	-3%	2%
18.5~17.5	190	111	190	42%	0%	-45	-42	-53	7%	-17%
21.0~18.5	132	86	138	34%	-4%	89	93	85	-5%	5%
23.3~21.0	50	27	50	46%	0%	365	363	361	1%	1%
24.4~23.3	67	48	89	29%	-32%	-71	-65	-70	9%	3%
26.0~24.4	192	135	217	30%	-13%	-1	12	-1	1508%	24%
27.0~26.0	333	216	351	35%	-5%	49	49	29	1%	42%
27.8~27.0	282	194	330	31%	-17%	44	57	39	-31%	10%
29.0~27.8	172	113	196	34%	-14%	62	69	59	-11%	6%
32.0~29.0	159	104	160	34%	-1%	120	99	90	18%	26%
39.0~32.0	92	82	113	10%	-24%	23	27	21	-16%	7%
65.0~39.0	36	32	41	12%	-12%	28	25	31	12%	-11%

注: S_p 、 S_t 和 S_s 分别指幂函数、三次多项式和二次多项式获得基底埋深回剥分析所得沉积速率; T_p 、 T_t 和 T_s 分别指幂函数、三次多项式和二次多项式获得基底埋深回剥分析所得构造沉降速率。

1.2 界面年龄

在采用层序界面而不是地层界面以后, 界面的穿时性大大降低; 但界面年龄的不确定性仍然存在, 尤其是在为了进行较高分辨率的回剥分析而使用较低级别的层序界面的时候。在白云凹陷地区, 裂后期地层含有丰富的生物化石, 其层序界面年龄可以根据钙质超微化石带和有孔虫化石带组合确定, 不过由于样品误差和生物带分辨率所反映的精度有限, 界面年龄的误差可能达到 0.5Ma (庞雄等, 2005)。南海北部裂陷期地层多为陆相, 其年龄由于缺少古生物化石而存在较大的不确定性。界面年龄的误差虽然不会影响去压实沉积物厚度和总的构造沉降量, 但直接影响到沉积速率和构造沉降速率的计算。分别采用中国海洋石油有限公司深圳分公司研究院提供的老地层年龄和通过 2013 年地质年代表校正的新地层年龄(Xie, et al, 2014)对 LW3-1-1 井进行回剥分析, 其结果如表 2 所示, 可见界面年龄在该井对

沉积速率和构造沉降速率的影响最大可达 52%。界面年龄的确定除了可以通过作精细的古生物定年来约束之外, 对边缘海盆地层序界面年龄的确定还可以通过对比区域海平面变化和全球海平面变化来进行约束。例如, 庞雄等(2005)通过对比珠江口盆地区域海平面变化和全球海平面变化发现这两者渐新世之后的旋回变化基本一致, 从而将珠江口盆地 21Ma 以来的层序界面年龄与全球海平面变化旋回的一致性对比进行准确标定, 大大提高了层序界面年龄的精度。

1.3 地层划分

地层分层数据是进行回剥分析的基础, 因此其划分详细程度也决定了我们对事件认识的精细程度。以白云凹陷 LW3-1-1 井为例, 我们在三级层序划分的基础上进行回剥分析; 如果采用以二级层序为单位划分地层进行回剥分析的话, 可以得到完全不同结果(图 1 和 2)。

表 2 LW3-1-1 井新老地层界面年代回剥分析结果对比
Tab. 2 Comparison of backstripping results based on old age and new age in LW3-1-1

老地层年龄/Ma	S_{old}	T_{old}	新地层年龄/Ma	S_{new}	T_{new}	$(S_{new}-S_{old})/S_{new}$	$(T_{new}-T_{old})/T_{new}$
5.33~0	61	10	6.0~0	56	9	-9%	-9%
10.5~5.5	73	13	11.9~6.0	62	11	-18%	-18%
12.5~10.5	87	149	13.2~11.9	135	229	35%	35%
13.8~12.5	370	150	14.3~13.2	438	177	15%	15%
15.5~13.8	159	112	15.5~14.3	225	159	29%	29%
16.5~15.5	133	-49	16.3~15.5	166	-62	20%	20%
17.5~16.5	133	162	17.2~16.3	148	180	10%	10%
18.5~17.5	190	-45	17.9~17.2	271	-65	30%	30%
21.0~18.5	132	89	19.8~17.9	173	118	24%	24%
23.3~21.0	50	365	23.3~19.8	33	240	-52%	-52%
24.4~23.3	67	-71	23.9~23.3	124	-131	45%	45%
26.0~24.4	192	-1	25.4~23.9	204	-1	6%	6%
27.0~26.0	333	49	26.2~25.4	416	62	20%	20%
27.8~27.0	282	44	27.0~26.2	282	44	0%	0%
29.0~27.8	172	62	28.0~27.0	206	75	17%	17%
32.0~29.0	159	120	30.0~28.0	238	181	33%	33%
39.0~32.0	92	23	38.0~30.0	80	20	-14%	-14%
65.0~39.0	36	28	66.0~38.0	34	26	-8%	-8%

注: S_{old} 和 T_{old} 分别为根据老地层年龄所得沉积速率和构造沉降速率; S_{new} 和 T_{new} 分别为根据新地层年龄所得沉积速率和构造沉降速率。

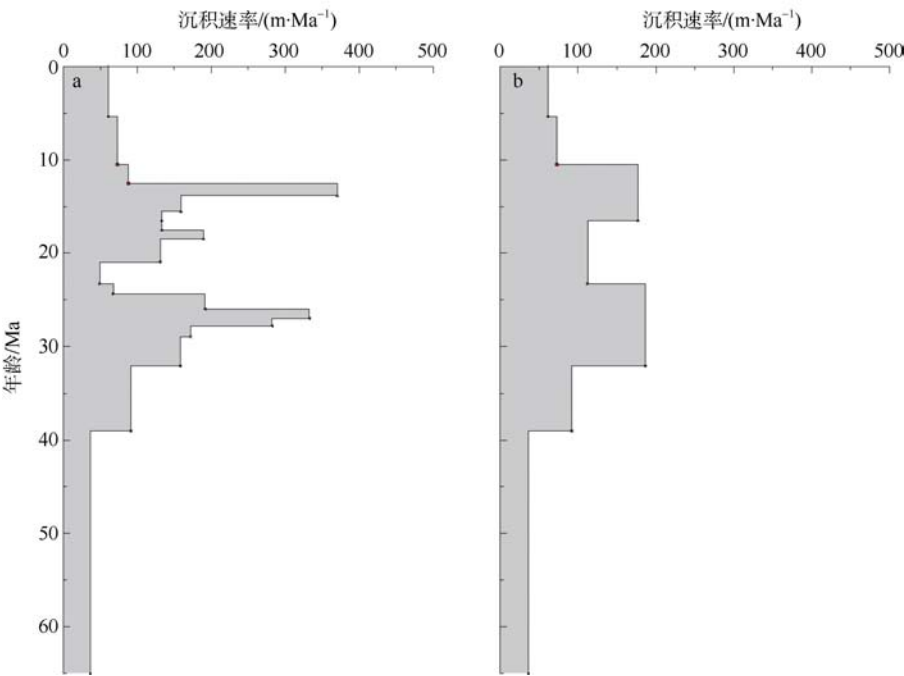


图 1 沉积速率直方图对比
a. 18 个地层单元沉积速率直方图; b. 7 个地层单元沉积速率直方图
Fig. 1 Histogram of sedimentation rate. (a) Sedimentation rate of 18 layers; (b) sedimentation rate of 7 layers

图 1a 和 1b 分别是将白云凹陷地区按三级层序划分为 18 个地层单元和按二级层序划分为 7 个地层单元进行回剥分析得到的沉积速率直方图。从图 1a 可以看出 LW3-1-1 井有两个显著的沉积高峰期 (27.8~26Ma 和 13.8~12.5Ma), 一个次沉积高峰期 (18.5~17.5Ma), 中间有一个沉积低谷期 (23.3~21Ma)。而图 1b 却将这些信息均一化了, 只能看出在 32~23.3Ma 和 16.5~10.5Ma 区间发育中等的沉积速率。

图 2a 和 2b 分别是将白云凹陷地区按三级层序划分为 18 个地层单元和按二级层序划分为 7 个地层单元进行回剥分析得到的构造沉降速率直方图。从图 2a 可以看出 LW3-1-1 有一个显著的构造沉降高峰期(23.3~21Ma), 另外还可以观察到 3 个构造抬升期(24.4~23.3Ma, 18.5~17.5Ma 和 16.5~15.5Ma); 而图 2b 却没有显示这些重要的信息, 只能看出在 23.3~16.5Ma 区间发育中等的构造沉降速率。

回剥分析所得的沉积速率和构造沉降速率反映的都是相应地层时间的平均速率, 在时间跨度比较大的时候, 往往会将一些重要的沉积演化和沉降演化信息均一化, 导致我们丢失了区域地质的一些重要细节, 从而阻碍了我们对研究区域的认识。因此, 在确保层序界面年龄精度足够高的情况下, 越精细的地层划分越有利于对本地区沉积演化史和沉降演化史的认识。

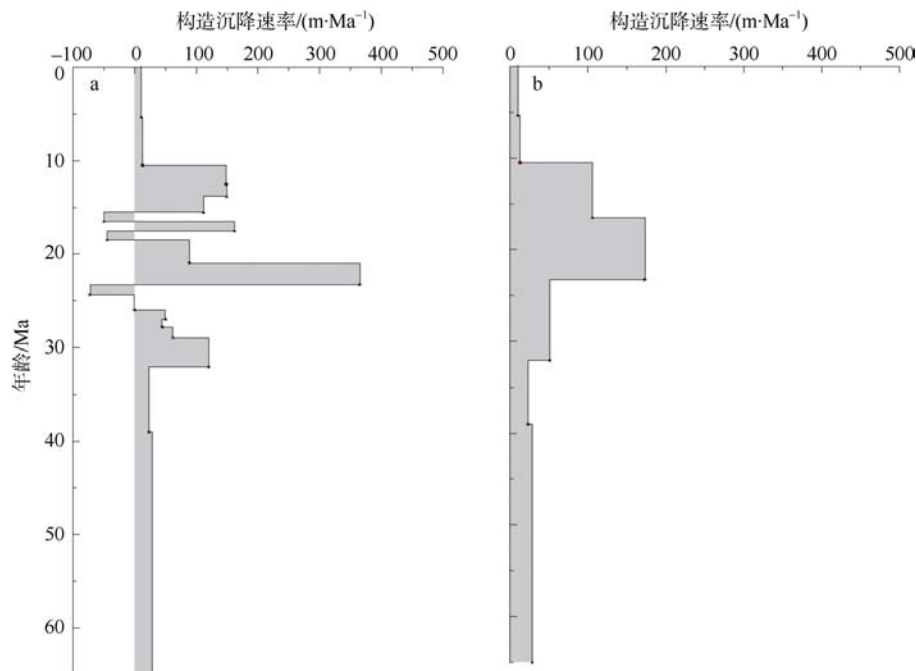


图 2 构造沉降速率直方图对比

a. 18 个地层单元沉降速率直方图; b. 7 个地层单元沉降速率直方图

Fig. 2 Comparison histogram of tectonic subsidence rate. (a) Subsidence rate of 18 layers; (b) subsidence rate of 7 layers

2 回剥参数的不确定性及其影响

回剥分析使用的参数主要有孔隙度、岩性、古水深和全球海平面变化。孔隙度和岩性可以通过钻井资料和测井声波时差曲线及密度曲线等资料获取; 对于古水深的恢复至今也没有直接有效的方法, 通常基于地震相和沉积相进行分析; 全球海平面变化一般采用前人的研究成果。

2.1 孔隙度随深度变化关系

沉积物在沉积初期含有大量的孔隙水, 之后随着埋深的不断增大, 在上覆水层、沉积物荷载及构造变形的作用下, 沉积物颗粒将会发生重新排列、变形, 排出水分, 甚至发生重结晶和某些化学变化, 导致孔隙度降低和渗透率变小, 即受到压实作用。白云深水区新生代沉积巨厚, 岩性以泥岩和砂岩为主, 本文在钻井岩性分析和测井声波时差曲线解释

的基础上分别拟合了砂岩、泥岩各自孔隙度随深度变化的函数关系。对于正常压力体系的沉积物, 孔隙度随深度的变化遵循指数关系(Allen, et al, 2005)。白云凹陷总体上属于正常压力体系, 多口钻井数据显示其孔隙度-深度关系遵循指数变化。但是拟合分析发现, 陆架区泥岩跟陆坡区泥岩孔隙度-深度关系曲线差别比较大, 陆坡区泥岩初始孔隙度和压实系数都要明显比陆架区泥岩大, 而砂岩在陆架和陆坡区却表现为相似的特征(图 3)。

一些学者在进行回剥分析时简单地采用 Sclater 等(1980)的北海盆地的孔隙度-深度关系曲线, 但是不同区域砂岩和泥岩的孔隙度-深度关系曲线还是可能有较大差别的(Perrier, et al, 1974, 袁炳存等, 1986)。将白云凹陷地区砂岩和泥岩的孔隙度-深度关系曲线(Xie, et al, 2013)与北海盆地的孔隙度-深度关系曲线对比, 发现差别较大(图 3)。分别

用白云凹陷地区和北海盆地的孔隙度-深度关系曲线对陆坡区的 LW3-1-1 井进行回剥分析, 其去压实厚度的差别在-3%~18%, 构造沉降速率的差别在-35%~7%(表 3)。这说明不同区域砂岩和泥岩的孔

隙度-深度关系曲线的差别对回剥分析的结果, 尤其是对计算的构造沉降速率的影响较大, 为了保证回剥分析结果的质量应该尽量采用本地区的孔隙度参数。

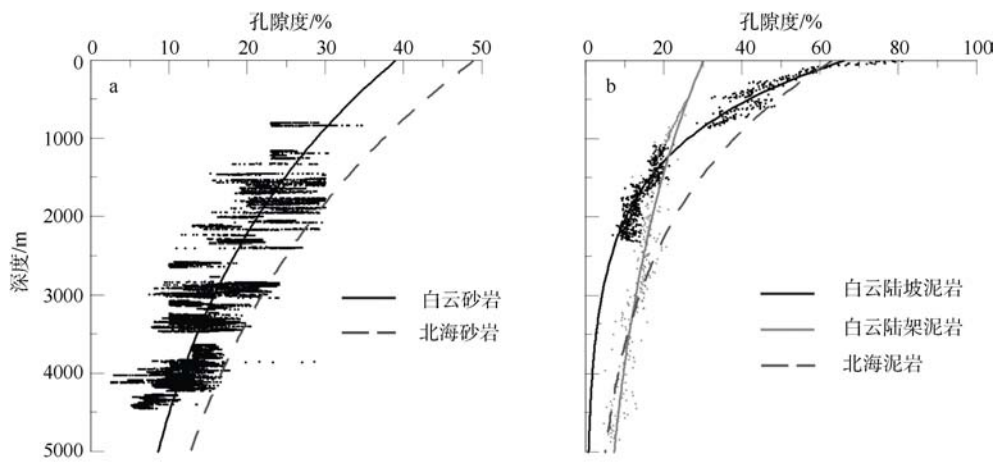


图 3 砂岩和泥岩孔隙度-深度变化曲线

a. 白云深水区砂岩孔隙度随深度的分布; b. 白云深水区陆坡区(黑点)及陆架区(灰点)泥岩孔隙度随深度的分布

Fig. 3 Porosity-depth curves of sand and shale. (a) Black dots show the sand porosity in the Baiyun Sag; (b) black dots show the shale porosity in the slope of the Baiyun Sag, gray dots show the shale porosity in the shelf of the Baiyun Sag

表 3 采用白云凹陷和北海盆地孔隙度-深度关系曲线的模拟结果对比

Tab. 3 Comparison of the porosity parameters between the Baiyun Sag and North Sea Basin

地层年龄/Ma	白云参数 去压实厚度/m	北海参数 去压实厚度/m	百分比差 /%	白云参数构造沉降速率 /(m·Ma ⁻¹)	北海参数构造沉降速率 /(m·Ma ⁻¹)	百分比差 /%
5.33~0	336	336	0	10	13	-29
10.5~5.5	363	334	8	13	16	-20
12.5~10.5	175	149	15	149	151	-2
13.8~12.5	481	437	9	150	163	-9
15.5~13.8	270	233	14	112	117	-4
16.5~15.5	133	109	18	-49	-46	7
17.5~16.5	133	109	18	162	165	-2
18.5~17.5	190	160	16	-45	-42	7
21.0~18.5	329	295	10	89	93	-4
23.3~21.0	114	94	18	365	365	0
24.4~23.3	74	69	8	-71	-67	6
26.0~24.4	307	285	7	-1	9	1164
27.0~26.0	333	303	9	49	58	-18
27.8~27.0	226	210	7	44	59	-35
29.0~27.8	206	190	8	62	72	-17
32.0~29.0	476	447	6	120	118	2
39.0~32.0	641	663	-3	23	30	-30
65.0~39.0	945	974	-3	28	31	-9

2.2 沉积岩性

在回剥计算中, 不同岩性采用的孔隙度参数和密度参数都不同, 因此回剥结果也会不同。为了分析岩性对回剥分析计算结果的影响, 假定 LW3-1-1 井中各地层都由砂岩组成和都由泥岩组成的两种极

端情况, 分别进行回剥分析, 其结果如表 4 所示。两种情况下去压实厚度的差别最大可达 87%, 构造沉降速率的差别达-26%~47%。可见岩性对回剥分析计算结果的影响显著, 尤其是对去压实厚度具有明显的影响。白云凹陷位于外陆架和陆坡区,

表 4 砂岩和泥岩回剥分析计算结果对比

Tab. 4 Comparison of the backstripping results between sand and shale

地层年龄/Ma	砂岩去压实厚度/m	泥岩去压实厚度/m	百分比差/%	砂岩构造沉降速率/(m·Ma ⁻¹)	泥岩构造沉降速率/(m·Ma ⁻¹)	百分比差/%
5.33~0	336	336	0	20	11	47
10.5~5.5	294	363	-24	21	14	36
12.5~10.5	117	175	-49	156	149	4
13.8~12.5	355	482	-36	180	150	17
15.5~13.8	171	270	-58	121	111	8
16.5~15.5	76	133	-75	-44	-52	-17
17.5~16.5	75	133	-76	166	159	4
18.5~17.5	111	190	-71	-42	-53	-26
21.0~18.5	216	344	-59	93	85	9
23.3~21.0	62	114	-84	363	361	1
24.4~23.3	52	98	-87	-65	-70	-7
26.0~24.4	216	348	-61	12	-1	105
27.0~26.0	216	351	-62	49	29	42
27.8~27.0	155	264	-70	57	39	31
29.0~27.8	136	236	-74	69	59	15
32.0~29.0	313	481	-54	99	90	9
39.0~32.0	577	793	-38	27	21	19
6.05~39.0	827	1057	-28	25	31	-26

岩性随位置的变化较大, 因此我们在白云凹陷的回剥计算中, 根据各点各层的实际砂泥比进行岩性编码, 根据岩性编码内插求得其孔隙度参数和密度参数, 从而提高了回剥分析计算结果的可靠性(Xie et al, 2013)。

2.3 古水深及全球海平面变化

回剥计算中, 古水深和全球海平面变化这两个参数未出现在公式(1)中而只出现在公式(2)中, 表明这两个参数对去压实没有影响, 但却直接影响了构造沉降计算结果。这是因为压实作用仅取决于地层的岩性、埋深和孔隙度随深度的变化, 与水深无关, 而构造沉降却与全球海平面变化和重力均衡等因素一起影响了古水深。

值得注意的是, 回剥分析采用的海平面变化是全球海平面变化, 而不应该是区域海平面变化。因为全球海平面变化相对的是对地心的变化, 而区域海平面变化相对的是对该区某个基准面的变化。第三纪以来珠江口盆地的区域海平面变化(上升)与全球海平面变化(下降)的趋势相反, 正是因为在该时期珠江口盆地基底持续沉降的结果, 如果采用区域海平面变化校正来进行回剥分析, 那么部分构造沉降也将被校正掉。

为了更直观地说明古水深和全球海平面变化参数对构造沉降估算的影响, 我们对 ρ_m 、 ρ_w 和 ρ_s 分别赋值为 $3.33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.03\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $2.33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 则公式

(2)成为:

$$Y=0.43 \times S+W_d-1.45 \times \Delta SL \quad (3)$$

公式(3)中, 沉积物厚度项 S 的系数最小(0.43), 且可以通过钻井等资料准确获取层位深度数据, 从而取得沉积物厚度值, 因此该项的误差不会太大, 对构造沉降量(Y)的计算结果影响应该较小。全球海平面变化项(ΔSL)和古水深项(W_d)的系数分别是 1.45 和 1.0, 说明全球海平面变化的误差的 1.45 倍和古水深误差的 1 倍将传递到构造沉降量(Y)的误差之中。但全球海平面变化在全区是相同的, 且变化幅度相对较小(新生代以来变化约 190m), 在陆坡区其变化幅度一般小于古水深的变化幅度, 因此该项对构造沉降的计算结果的影响也不会太大。对构造沉降计算结果影响最大的应该是古水深, 因为目前还没有直接、准确的方法来确定古水深, 古水深估计的误差可能会较大, 而且会 100%地传递到构造沉降的计算结果中去。作者在另外一篇文章中分析了白云深水区新生代构造沉降演化(Xie, et al, 2014), 其中在 23.3~19.8Ma 间的构造沉降速率及古水深变化如图 4 所示。对比发现, 两者之间的变化基本完全吻合, 构造沉降速率形态的变化完全受古水深变化的控制。在其中选取 5 口模拟井(图 4)对比分析, 发现古水深变化量普遍占构造沉降量比例很大, 最高可达 99.8%(表 5), 证明了古水深的确定对构造沉降的计算结果有极大的影响。

表 5 23.3~19.8Ma 古水深变化与构造沉降变化结果对比
Tab. 5 Comparison of the changes between paleo-water depth and tectonic subsidence at 23.3~19.8 Ma

模拟井	构造沉降/m	古水深变化/m	百分比/%
P1	543	519	95.6
P2	760	642	84.5
P3	107	65	60.4
P4	72	31	43.9
P5	494	493	99.8

古水深的定量估计是一项困难的工作。常规的岩相古生物分析多半只给出古水深的范围,在陆架区的范围较窄(如内陆架为 0~50m),在外陆架和陆坡区的范围却很宽(如前三角洲至半深海指 0~500m,下陆坡代表 500~2000m);而后一种古水深的范围往

往超过所要回剥的地层厚度,显然其精度不能满足沉降史分析的需要。因此在外陆架和陆坡区进行回剥分析时,除了充分利用钻井的古生物、岩相等资料来确定古水深之外,还需要尽量利用其他资料来提供进一步的约束,以提高古水深估计的精度。例如,近期已通过地震相和钻井资料的综合分析编制了白云凹陷各时段的沉积体系图,显示了古海岸线、水道、斜坡扇、盆底扇的空间分布。这些沉积体系图成为我们用来定量估计区域古水深变化情况的最重要依据,具体方法在 Xie 等(2014)的文章中有较详细的介绍。古水深定量估计的不确定性大小在很大程度上取决于相关资料的丰富程度,因此对于缺乏古水深相关资料的地区,古水深定量估计的不确定性很大,相应地,构造沉降的估计结果的不确定性也会很大。

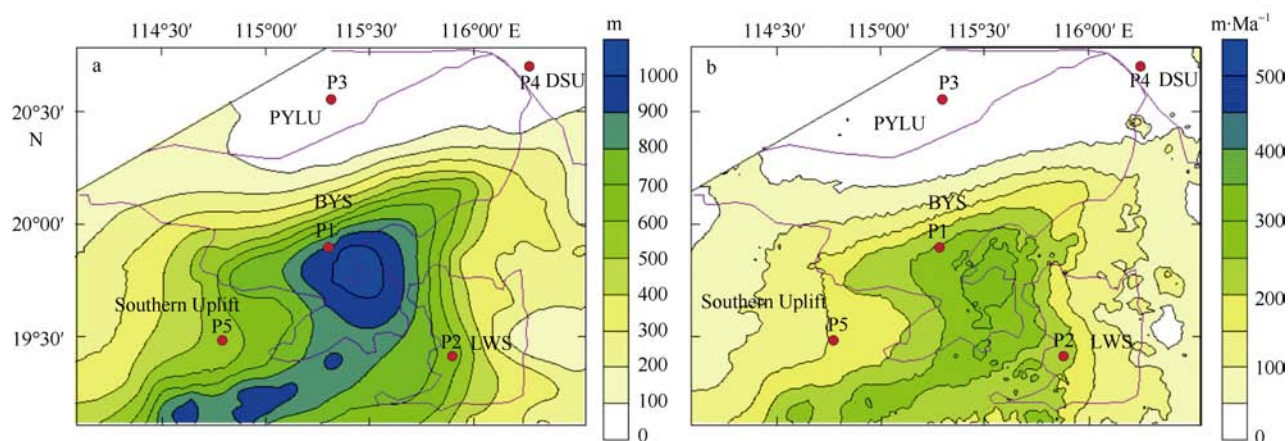


图 4 古水深变化和构造沉降速率对比图

a. 23.3~19.8Ma 古水深变化等值线图; b. 23.3~19.8Ma 构造沉降速率等值线图。PYLU: 番禺低隆起; DSU: 东沙隆起; BYS: 白云凹陷; LWS: 荔湾凹陷; Southern Uplift: 南部隆起。图中红点为各单元沉降中心点

Fig. 4 Comparison between paleowater change and tectonic subsidence rate. (a) Contour map of the paleowater change at 23.3~19.8 Ma. (b) Contour map of the tectonic subsidence rate at 23.3~19.8 Ma. PYLU: Panyu Low Uplift; DSU: Dongsha Uplift; BYS: Baiyun Sag; LWS: Liwan Sag. The five red dots are the subsidence centers

3 讨论

回剥分析法是一种定量的沉降史分析方法,在回剥分析的过程中,原始数据(包括无钻井揭示的基底埋深、界面年龄和地层划分)和各项回剥参数(包括孔隙度随深度变化关系、沉积岩性、古水深以及全球海平面变化)都会对回剥分析结果造成不同程度的影响。

原始数据是进行回剥分析的基础,对回剥分析的结果具有直接的影响。在钻井没有钻遇基底的地区,基底埋深往往存在较大的不确定性,对去压实厚度和构造沉降速率计算的影响都很大,其中对构造沉降速率计算的影响更大些,这不仅表现在裂陷期地层,也同样表现在裂后期地层。对于缺乏钻井

控制的深部地层,常用的三次多项式时深转换公式将低估界面深度,这个问题可以通过采用幂函数时深转换公式来避免(周蒂等, 2008)。在采用层序界面而不是地层界面以后,界面的穿时性大大降低,但界面年龄的不确定性仍然存在,尤其是在为了进行较高分辨率的回剥分析而使用较低级别的层序界面的时候。界面年龄的误差直接影响沉积速率和构造沉降速率的计算,但不影响总的去压实厚度和构造沉降量。回剥分析的结果对地层分层方案依赖性相当大,不同的地层划分可能导致完全不同的回剥分析结果。理论上讲,地层分层越精细,回剥分析结果越能反映细节。但地层划分的精细程度还应考虑到地层界面深度和定年的误差,因为地层划分太精细,地层界面深度和年龄的较小误差就会引起较大

的沉积速率和构造沉降速率计算的误差。因此,在回剥分析过程中,应该结合实际的地质资料,合理地确定地层划分的精细程度。

孔隙度随深度变化关系在正常压力体系中一般遵循指数关系,但本文并没有讨论存在异常压力的情况,无可否认异常压力的存在会导致孔隙度随深度变化的关系更加复杂(袁炳存等,1986)。另外,本文只讨论了砂岩和泥岩两种情况,对于存在碳酸盐岩、火山岩等多种岩性时其对回剥分析结果的影响如何,由于缺少相关数据而没有进行进一步讨论。沉积岩性对回剥分析计算结果的影响很大,在白云凹陷的回剥分析中对去压实厚度计算的影响最大可达87%,对构造沉降速率计算的影响最大可达47%;不过这是砂岩和泥岩两种极端情况下的差异,实际情况应该介于这两种极端情况之间。对于陆坡区的回剥分析,古水深是不确定性最大的因素。尽管现在有各种各样的方法(自生矿物、地球化学、沉积岩相和古生物学、层序地层学等)来估计古水深,但就是相对最为成熟和有效的古生物学方法也往往不尽如人意,通过古生物组合确定的古水深范围通常达几百米甚至上千米,这会不可避免地对构造沉降的计算造成不可忽视的影响。因此,在进行回剥分析过程中,古水深分析必须慎之又慎,以免造成构造沉降变化的假象。

本文主要讨论了原始数据(包括无钻井揭示的基底埋深、界面年龄和地层划分)和各项回剥参数(包括孔隙度随深度变化关系、沉积岩性、古水深以及全球海平面变化)对回剥分析结果的影响。其实,对回剥分析结果的影响还存在其他因素,比如盆地的拉张或挤压会改造前期地层的厚度和埋深,从而导致沉积速率和构造沉降速率的估计误差。另外,剥蚀也是影响回剥分析结果的一个重要因素,忽略剥蚀作用也会导致地层厚度的低估,最终导致沉积速率和构造沉降速率的低估。由于数据的局限性,本文对这些因素没有进行讨论。

以上分析都是基于一维回剥模型,即假定研究区域符合艾力均衡且岩石圈强度为零。前人的研究表明,白云凹陷岩石圈非常软弱,有效弹性厚度很小,基本符合一维回剥模型的假设(Clift, et al, 2002; Shi, et al, 2005);但在其他一些岩石圈弹性厚度较大的地区,就应该采用挠曲均衡,即二维回剥模型。二维回剥模型当中,孔隙度随深度变化、沉积岩性、古水深和地层分层等参数对其回剥分析计算结果的影响同样存在,只是具体的影响程度不同。前人研究表明,在同一个地区,一维回剥模型计算的构造沉降结果在隆起处要比二维回剥模型计算的结果要大,在坳陷处却偏小(Roberts, et al, 1998)。由于现有的二维回剥模型(Watts, et al, 1976; Kuszniir, et al, 1991; Kuszniir, et al, 1995; Nadin, et al, 1995; Roberts, et al, 1998)对于同一层的各点只能采用相同的岩性和古水深参数,因此还不能适用于陆坡区。

4 结论

综上所述,回剥分析作为一种定量的沉降史分析方法,其结果受无钻井揭示的基底埋深、界面年龄、地层划分、孔隙度随深度变化关系、沉积岩性、古水深以及全球海平面变化影响显著;而对于白云凹陷这样的陆坡区,古水深和岩性对回剥分析结果的影响更为突出。

不同地区岩石的孔隙度随深度变化关系具有较大差异,尤其是泥岩。珠江口盆地白云凹陷地区陆架区泥岩和陆坡区泥岩孔隙度随深度变化关系差异显著,陆坡区泥岩的初始孔隙度和压实系数都明显要比陆架区泥岩的要大,砂岩表现为相似的特征。具体原因有待进一步讨论。

此外,以上分析还表明,数据的不确定性及参数选取的不当有可能导致谬误的回剥分析结果。因此,对于文献中已发表的回剥分析结果不能盲目采用,必须考察其数据和参数的选用情况,以判断其结果的可信程度。

参考文献

- 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.
- 黄春菊, 周蒂, 陈长民, 等. 2005. 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, 50(10): 1024-1031.
- 李向东, 陈刚, 李玖勇, 等. 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.
- 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 2005. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. 地学前缘, 12(3): 167-177.
- 袁炳存, 钱奕中. 1986. 计算沉积层古厚度的逐层恢复法[J]. 石油实验地质, 8(3): 253-262.
- 周蒂, 胡登科, 何敏, 等. 2008. 深部地层时深转换中的拟合式选择问题[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 33(4): 531-537.
- ALLEN P A, ALLEN J R. 2005. Basin analysis: principles and

- applications[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell: 349–395.
- CLIFT P, LIN J, BARCKHAUSEN U. 2002. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 951–970.
- CUNHA T. 2008. Gravity anomalies, flexure and the thermo-mechanical evolution of the west Iberia margin and its conjugate of Newfoundland[D]. Oxford: the University of Oxford: 117–162.
- 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.
- KUSZNIR N J, ROBERTS A M, MORLEY C K. 1995. Forward and reverse modelling of rift basin formation[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 80(1): 33–56.
- NADIN P A, KUSZNIR N J. 1995. Palaeocene uplift and Eocene subsidence in the northern North Sea Basin from 2D forward and reverse stratigraphic modelling[J]. *Journal of the Geological Society*, 152: 833–848.
- PERRIER R, QUIBLIER J. 1974. Thickness changes in sedimentary layers during compaction history.methods for quantitative evaluation[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58(3): 507–520.
- ROBERTS A M, KUSZNIR N J, YIELDING G, et al. 1998. 2D flexural backstripping of extensional basins: The need for a sideways glance[J]. *Petroleum Geoscience*, 4(4): 327–338.
- SCLATER 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*, 85(B7): 3711–3739.
- SHI XIAOBIN, BUROV E, LEROY S, et al. 2005. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 407(1–2): 117–134.
- STAM B, GRADSTEIN F M, LLOYD P, et al. 1987. Algorithms for porosity and subsidence history[J]. *Computers & Geosciences*, 13(4): 317–349.
- STECKLER M S, WATTS B. 1978. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 41: 1–13.
- VON BUBNOFF S. 1954. *Fundamentals of geology* [M]. 3rd ed. Edinburgh: Oliver and Lloyd: 1–287.
- WATTS A, RYAN W. 1976. Flexure of the lithosphere and continental margin basins[J]. *Tectonophysics*, 36(1): 25–44.
- XIE HUI, ZHOU DI, PANG XIONG, et al. 2013. Cenozoic sedimentary evolution of deepwater sags in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 34: 159–173.
- XIE HUI, ZHOU DI, LI YUANPIN, et al. 2014. Cenozoic tectonic subsidence in deepwater sags in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 615/616: 182–198.