

# 幕式差异沉降运动对断陷湖盆中湖平面和水深变化的影响

操应长<sup>1,2</sup>, 姜在兴<sup>1</sup>, 夏 斌<sup>2</sup>

(1. 石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 湖平面(相对和绝对)和水深是控制湖盆沉积作用的两个基本参数。在断陷湖盆中,由于盆地边界断层的幕式活动,导致盆地缓坡带基底发生差异沉降,相对湖平面、绝对湖平面和水深等参数可出现不统一的变化,主要表现在以下两个方面:a)相对湖平面、绝对湖平面和水深3个参数间出现不统一性变化;b)相对湖平面或水深在湖盆的不同构造位置出现不统一性变化。即在同一沉积时间单元内,湖盆中水深既有增加带也存在减小带,或者相对湖平面既存在上升带也存在下降带;但是绝对湖平面对于同一湖盆来说具有统一性变化。幕式差异沉降运动控制了盆地可容空间的变化,这种非统一性变化是某段时间内新生可容空间量( $\Delta V_a$ )与外界水净流入量( $\Delta V_w$ )和沉积物充填量( $\Delta V_s$ )3个参数的综合响应。特别当 $\Delta V_a > \Delta V_w + \Delta V_s$ 时,基底差异沉降运动引起湖盆出现强制性湖退作用,形成层序界面。

**关键词:** 可容空间; 湖平面; 层序地层; 差异沉降; 断陷湖盆

**中图分类号:** TE121.3

**文献标识码:** A

层序地层学的理论基础是沉积变化的旋回性和统一性,在湖盆中主要体现在湖平面变化上。但在一个层序演化过程中,湖盆内的绝对湖平面和相对湖平面变化是否一定遵循统一性变化?它具体包含两层含义:第一,绝对湖平面上升相对湖平面也上升,绝对湖平面下降相对湖平面也随之下降,即相对湖平面和绝对湖平面的变化是否具有统一性?第二,在湖盆的不同构造位置如单断式断陷湖盆,缓坡带相对湖平面上升也就意味着陡坡带相对湖平面上升,缓坡带相对湖平面下降陡坡带相对湖平面也随之下降,即湖盆内不同构造位置的相对湖平面变化是否具有统一性?在此以断陷湖盆为例,探讨幕式差异沉降运动或构造掀斜作用对湖平面变化的影响。

## 1 控制湖盆沉积作用的基本因素

沉积盆地的沉积作用及其演化常与水深和海(湖)平面等因素有关。在湖盆中,绝对湖平面可定义为湖面相对于一个固定基准面如地心的高度,与盆地内的局部因素无关,其升降变化多受湖盆基底位置、水体体积、盆地内沉积物量等因素控制。相对

湖平面为沉积盆地的基底距湖面的高度,反映了湖盆基底的局部沉降或上升,其升降变化受控于绝对湖平面位置和湖盆基底的位置。

可容空间是指(基准面之下)“可供沉积物堆积的潜在空间”,包括老空间和新增可容空间<sup>[1]</sup>。在湖盆中,池英柳(1998)<sup>[2]</sup>根据湖平面的位置,将可容空间划分出两类:沉积基准面与湖平面之间为iv类空间;湖平面与湖盆底面之间为㊟类空间(图1)。对于盆地中的某一点来说,㊟类空间的大小与水深呈正比关系;iv类空间以湖盆最低溢出点的平面为界可进一步分出两部分,位于该界面与沉积基准面之

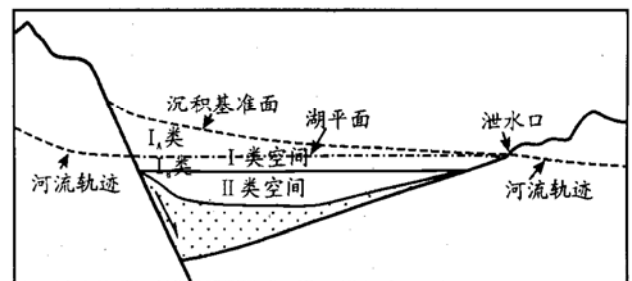


图1 断陷湖盆沉积基准面和可容空间分布示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Schematic map showing the distribution of sedimentary base level and capacity in a rift lake basin

收稿日期: 2003-02-04; 修订日期: 2003-06-20.

基金项目: 中国石化“十五”科技攻关项目(P01013); 国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A09).

作者简介: 操应长(1969—),男(汉族),安徽潜山人,博士生、副教授,主要从事沉积学及层序地层学的教学和研究工作.

间的为  $iv_A$  类, 位于该界面与湖平面之间的为  $iv_B$  类。当湖平面位于湖盆最低溢出点高程时,  $iv_B$  类空间为零; 但当湖平面发生升降变化时,  $iv_B$  类与  $\text{㊸}$  类空间之间可发生转化。

湖盆沉积作用基本方程是描述湖进、湖退作用的定量方程, 即  $\Delta D = \Delta Sub + \Delta E - \Delta Sed$ , 且  $\Delta RE = \Delta Sub + \Delta E$ 。其中  $\Delta Sub$  为盆地基底在  $\Delta T$  时间内的沉降幅度,  $\Delta Sub > 0$ , 表明基底下降,  $\Delta Sub < 0$ , 表明基底上升;  $\Delta E$ 、 $\Delta RE$  分别为沉积盆地在  $\Delta T$  时间内的绝对湖平面和相对湖平面变化, 上升为正值, 下降为负值;  $\Delta Sed$  为沉积盆地内某点在  $\Delta T$  时间内沉积的厚度;  $\Delta D$  为该点的水体深度变化,  $\Delta D > 0$ , 水深增大, 发生湖进作用,  $\Delta D < 0$ , 水深变小, 发生湖退作用。

## 2 单断湖盆的幕式断陷活动对湖平面和水深的影响

单断式断陷盆地的裂陷扩张活动主要表现为边界断层的断陷活动, 也叫做构造掀斜运动。由于边界断层的活动, 导致断层上盘即湖盆斜坡带发生沉降, 但斜坡上不同点的沉降幅度不同, 靠近盆地沉降中心的下降幅度最大, 而向盆地边缘的下降幅度逐渐减小<sup>[3]</sup>。在边界断层幕式活动前后, 盆地基底出现不同的变化响应。缓坡基底产生差异沉降, 且坡度增大; 陡坡带基底可分为两段, 即原生基底段和新生基底段(图 2)。原生基底是指断层活动前已存在的基底, 如图 2 中 A 点以上的基底, 新生基底是指在断层活动过程中新产生的基底, 如图 2 中 A 点以下即 A A' 段基底。

边界断裂的断陷活动具有幕式旋回性<sup>[4]</sup>, 一个幕式旋回可分为构造活动期和宁静期<sup>[5]</sup>。在构造活动期, 边界断层的活动导致盆地的形态发生变化, 盆地内水体也将发生重新分配。虽然断层呈幕式活动, 但由活动到静止需要持续一段时间, 在此期间,

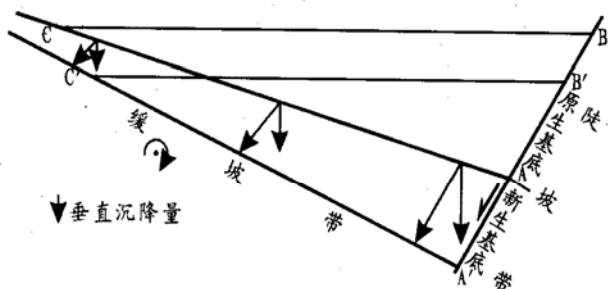


图 2 盆地边界断层的幕式活动对湖盆基底变化的影响

Fig. 2 Effects of the episodic movement of boundary faults in a basin on the changes of lake basin basement

外界水继续流向湖盆, 同时, 由于蒸发作用湖盆内水也要发生蒸发; 沉积物也随河水的流入在湖盆内发生沉积。因此, 控制湖盆内水深和湖平面变化除了受到幕式断层活动影响外, 还受到沉积物供给、外界水流入、气候(蒸发作用)等因素的影响。

断层活动、沉积物充填、外界水流入、气候变化等因素不但影响湖平面的变化, 而且对湖盆中可容空间的形成和充填产生不同响应。断层活动导致湖盆基底沉降, 将产生新的可容空间(包括  $iv$  类和  $\text{㊸}$  类); 而沉积物充填湖盆将减少可容空间。外界水流入、蒸发作用对湖盆可容空间总量无影响, 但可改变湖平面位置和水深, 可使可容空间类型发生转换。如当外界水流入量小于蒸发量, 即在干旱气候条件下, 此时将导致相对和绝对湖平面的下降, 湖盆水深减小, 将发生  $\text{㊸}$  类可容空间减小、 $iv$  类增大, 但总量不变, 即  $\text{㊸}$  类可容空间向  $iv$  类转化。当外界水流入量大于蒸发量, 此时闭流湖盆和敞流湖盆将产生不同响应: 若为闭流湖盆, 湖平面和水深均将增大,  $\text{㊸}$  类可容空间增大、 $iv$  类减小, 但总量不变, 即  $iv$  类可容空间向  $\text{㊸}$  类转化; 若为敞流湖盆, 当湖平面达到最低溢出点位置时, 湖盆的湖平面、水深和可容空间均将不发生变化。

假设某单断湖盆处在潮湿气候条件(外界水流入量大于蒸发量)下, 在发生构造掀斜运动之前, 湖平面已处在最高位置, 即湖平面与湖盆水体最低溢出点处于同一高程。由于导致掀斜运动的断层活动强度不同, 断层活动导致基底沉降产生的新生可容空间量(此处主要指  $\text{㊸}$  类和  $iv_B$  类空间, 文中下同)也不同, 其与该时期的沉积物充填量和外界水净流入量(外界水流入量减去蒸发量)的总量相比存在 3 种情况: 大于、等于和小于。对于此 3 种情况, 湖平面(相对和绝对)、水深、可容空间变化将出现不同响应, 且同一参数在湖盆不同构造位置也可产生不同响应。图 3 是针对此 3 种情况的图解模型, 其中 ABC 代表了变化前的湖盆, 图中用虚线表示, A' B' C' 代表了变化后的湖盆, 图中用实线表示; O 点代表了缓坡带盆地基底上的任一点, OE 和 OE' 分别代表了变化前后湖盆缓坡带上 O 点的相对湖平面; O' 点代表了缓坡带沉积基底上的任一点, O'E 和 O'E' 分别代表了变化前后缓坡带上 O' 点的水深; P 点代表了湖盆陡坡带原生基底上的任一点, PF 和 PF' 分别代表了变化前后湖盆缓坡带上 P 点的相对湖平面、水深。

a) 新生可容空间量 ( $\Delta V_a$ ) = 外界水净流入量 ( $\Delta V_w$ ) + 沉积物充填量 ( $\Delta V_s$ )

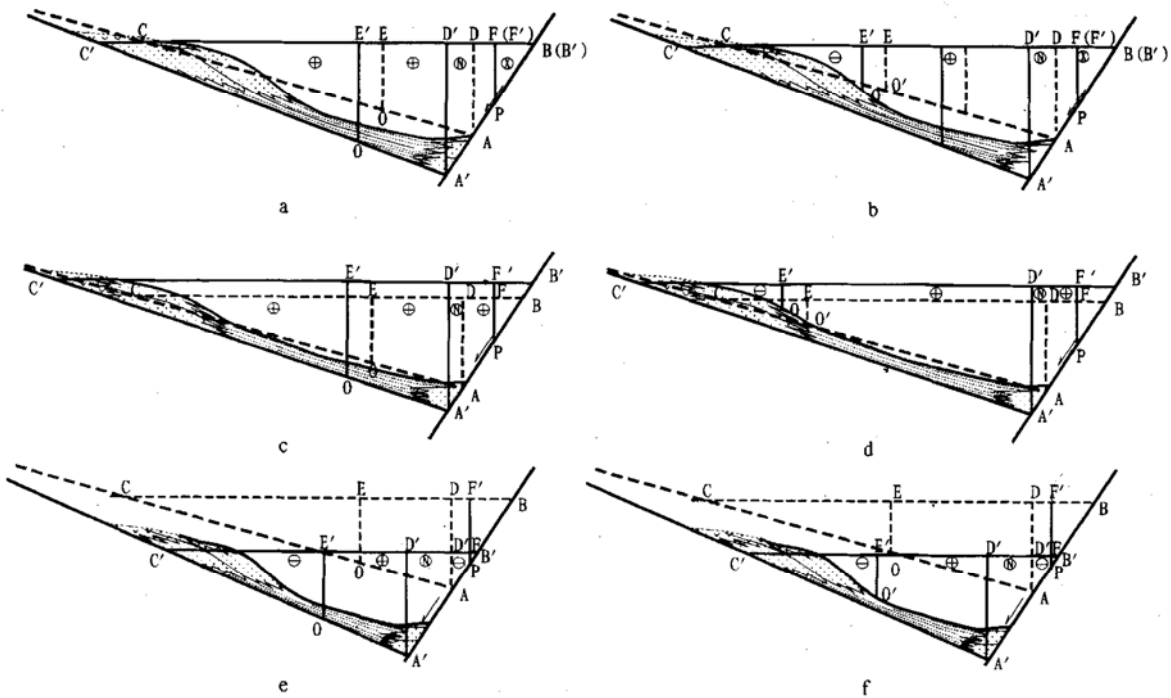


图 3 构造掀斜运动对单断湖盆的相对湖平面(左)和 ⊕类可容空间或水深(右)变化的影响  
 ⊕表示上升或增大; ⊖表示下降或减小; ⊙表示新产生; ⊚表示不变

Fig. 3 Effects of tectonic tilting on the changes of relative lake level(left) and ⊕typed capacity or water depth(right) of a single faulted lake basin

此时湖盆的绝对湖平面将保持不变(图 3a), 即  $\Delta E = 0$ 。相对湖平面在湖盆的缓坡带和陡坡带出现不同的变化特征。缓坡带上任一 O 点均存在  $OE' > OE$ , 即相对湖平面上升; 陡坡带原生基底 AB 段上任一 P 点均存在  $PF' = PF$ , 即相对湖平面保持不变, 新生基底段 AA' 段, 湖水从无到有(图 3a)。

湖盆内水体深度和 ⊕类可容空间变化还受沉积物充填量多少控制, 特别是缓坡带。由沉积作用基本方程可知,  $\Delta D = \Delta Sub + \Delta E - \Delta Sed$ , 由于此时  $\Delta E = 0$ , 因此  $\Delta D = \Delta Sub - \Delta Sed$ 。当沉积物供给不充足时, 沉积厚度  $\Delta Sed$  较小, 若小于基底沉降幅度  $\Delta Sub$  时,  $\Delta D > 0$ , 意味着缓坡带沉积基底上任一点的水深增大, ⊕类可容空间也增大; 若沉积物供给过充足, 沉积厚度  $\Delta Sed$  很大, 若大于基底沉降幅度时,  $\Delta D < 0$ , 意味着缓坡带沉积基底上任一点水深减小; 当沉积物供给量中等时, 在缓坡带可能存在这样一点 O', 其沉积厚度等于基底沉降幅度, 即  $\Delta D = 0$  或  $O'E' = O'E$ , 意味着该点在变化前后的水深不变, 在 O' 点外侧将出现水深减小, ⊕类空间减小, 在 O' 点内侧将出现水深增大, ⊕类空间增大(图 3b)。对于陡坡带 AA' 段为新生基底段, 可容空间为新增; 原生基底 AB 段在无沉积的背景下, 水深和 ⊕类可容空间基本保持不变(图 3b)。

b) 新生可容空间量 ( $\Delta V_a$ ) < 外界水净流入量 ( $\Delta V_w$ ) + 沉积物充填量 ( $\Delta V_s$ )

在构造掀斜运动前后, 若湖盆的最低溢出口高程不变, 绝对湖平面? 相对湖平面和水深的变化与第一种情况相同; 若湖盆的最低溢出口高程也变大, 绝对湖平面将上升, 相对湖平面也上升(图 3c)。湖盆内水深和 ⊕类可容空间变化在湖盆缓坡带与第一种情况具有相似的变化特征, 但此时  $\Delta E > 0$ , 只有当沉积物沉积厚度足够大时, 才可能出现沉积物厚度  $\Delta Sed$  超过或接近基底沉降幅度  $\Delta Sub$  和绝对湖平面上升幅度  $\Delta E$  的总量, 导致  $\Delta D \leq 0$ , 此时在缓坡带上将存在  $O'E' = O'E$  的 O' 点, 且 O' 点外侧水深减小, ⊕类空间减小, O' 点内侧水深增大, ⊕类空间增大(图 3d); 否则缓坡带上所有的点  $\Delta D > 0$ , 水深增大, ⊕类可容空间增大。陡坡带 AA' 段为新生基底段, 可容空间为新增; 原生基底 AB 段的水深和 ⊕类可容空间基本增大(图 3d)。

c) 新生可容空间量 ( $\Delta V_a$ ) > 外界水净流入量 ( $\Delta V_w$ ) + 沉积物充填量 ( $\Delta V_s$ )

此时将导致湖盆绝对湖平面下降, 相对湖平面? 水体深度、可容空间在湖盆不同构造位置出现不同的变化特征(图 3e)。

由于断层的幕式活动, 断层上盘由 A 点下滑到 A' 时, 湖盆基底上任一点的水深、湖平面、可容空间变化如下:

1) 陡坡带: 新生基底 AA' 段上任一点为湖盆基底上的新生点, 为新增可容空间; 原生基底 AB 段上

任一点, 相对湖平面下降(图 3e), 水体深度减小(图 3f), ㊟类可容空间减小, iv 类可容空间可能增大。

2) 缓坡带: 由于基底的差异沉降, 斜坡上任一点的相对湖平面、水深、可容空间变化幅度不同。

根据相对湖平面的定义和沉积作用基本方程, 湖盆基底上任一点在  $\Delta T$  时间内相对湖平面变化  $\Delta RE = \Delta Sub + \Delta E$ 。当基底沉降幅度( $\Delta Sub$ )与绝对湖平面下降幅度( $\Delta E$ )相等时,  $\Delta RE = 0$ , 即在缓坡带上 O 点存在  $OE' = OE$ 。缓坡带上 O 点外侧基底上各点, 其  $\Delta Sub$  绝对值小于  $\Delta E$  绝对值, 因此  $\Delta RE < 0$ , 即  $OC'$  段上的任一点相对湖平面下降; 缓坡带上 O 点内侧基底上各点, 其  $\Delta Sub$  绝对值大于  $\Delta E$  绝对值, 因此  $\Delta RE > 0$ , 即  $OA'$  段上的任一点相对湖平面上升(图 3e)。

缓坡带上任一点  $O'$  的水深  $\Delta D = \Delta Sub + \Delta E - \Delta Sed$ 。当某点基底沉降幅度、绝对湖平面下降幅度和沉积物厚度达到平衡时,  $\Delta D = 0$ , 也意味着  $O'E' = O'E$ 。此时在  $O'$  点的外侧, 基底沉降幅度  $\Delta Sub$  减小, 沉积物厚度也一般增大, 而  $\Delta E$  不变, 水深变化  $\Delta D$  将小于零, 即水深变浅, ㊟类可容空间减小; 在  $O'$  点内侧, 基底沉降幅度  $\Delta Sub$  增大, 而  $\Delta E$  不变, 若在沉积物厚度变化不大的情况下, 水深变化  $\Delta D$  将大于零, 即水深变深, ㊟类可容空间增大(图 3f)。

由以上分析可知, 在单断式湖盆中, 由于盆地边界断层的幕式活动导致缓坡带基底的差异沉降, 湖盆内湖平面(相对和绝对)、水深、可容空间等参数间可存在不统一性变化, 且相对湖平面、水深、可容空间等同一参数在湖盆不同构造位置也可存在不统一性变化; 但是, 在任何情况下, 湖盆的绝对湖平面均为统一性变化。

### 3 边界断层的幕式活动(掀斜运动)对单断湖盆中层序地层分布的影响

层序地层的分布和堆积方式是湖盆中可容空间变化的直接反映。当沉积速率大于可容空间增加速率时, 形成进积式准层序组; 当沉积速率与可容空间增加速率相等时, 形成加积式准层序组; 当沉积速率小于可容空间增加速率时, 形成退积式准层序组<sup>[6, 7]</sup>。因此, 对于盆地边界断层的幕式沉降活动所控制的单断式湖盆, 水深、可容空间在盆地不同构造位置可能出现的不统一性变化, 将直接表现在沉积地层的叠加模式和分布上。

湖盆的缓坡带若存在  $O'E' = O'E$  的  $O'$  点, 在

$O'$  点外侧由于水深或 ㊟类可容空间减小, 将形成进积式准层序组; 而在  $O'$  点内侧由于水深或 ㊟类可容空间增大, 将形成退积式准层序组, 但水体深度大, 可能多表现为加积式深水沉积。对于陡坡带, 沉积物多沉积于新生可容空间中, 分布于新生陡坡带基底上, 即  $AA'$  段; 只有沉积物供给相当充足时, 才可能沉积于原生基底即  $AB$  段上。但由于断层的效应, 往往所形成的沉积物多表现为退积式特点。

上述讨论的 3 种情况, 在湖盆缓坡带  $O'$  点外侧均可发育进积式准层序组, 但形成机制上存在差异。第一种  $\Delta V_a = \Delta V_w + \Delta V_s$  和第二种  $\Delta V_a < \Delta V_w + \Delta V_s$  的情况, 若沉积物厚度为零即  $\Delta Sed = 0$ ,  $\Delta D = \Delta Sub + \Delta E$ , 其中  $\Delta Sub > 0$ 、 $\Delta E \geq 0$ , 因此  $\Delta D > 0$ , 此时就不会形成进积式准层序组, 而形成退积式准层序组, 此时退积式准层序组的形成主要受沉积物供给量的控制。但对于第三种  $\Delta V_a > \Delta V_w + \Delta V_s$  的情况,  $\Delta E < 0$ , 当绝对湖平面下降幅度( $\Delta E$ )超过基底沉降幅度( $\Delta Sub$ )时, 即使沉积物厚度为零即  $\Delta Sed = 0$ , 也会出现  $\Delta D < 0$  的情况, 即水深和 ㊟类可容空间减小, 湖盆发生湖退作用, 在有沉积物供给的背景下将形成典型的进积式准层序组。根据 Posamentier 等对正常性海退和强制性海退的定义<sup>[8]</sup>, 前者属于正常湖退作用, 由沉积物过量充填引起; 后者属于强制湖退作用, 并形成不整合面或层序界面。

## 4 结束语

我国东部裂谷盆地一般经历了裂谷前期、裂谷断陷和裂谷拗陷的演化阶段。裂谷断陷期主要表现为张性断裂所控制的断陷活动, 且断裂活动具有幕式性。对于单断式的断陷湖盆, 幕式断层所控制的断块差异掀斜运动是层序界面的重要动力, Badley (1988)、Surlyk (1990, 1991)<sup>[9]</sup> 等通过对张性盆地的构造运动与海平面升降变化的关系研究, 均认为区域性断陷、断块差异运动是形成不整合面的重要因素。同时, 在控盆断裂的幕式活动作用下, 湖盆内水深、湖平面可发生非统一性变化, 此时, 如何进行等时性对比, 将是层序地层学研究中所面临的新问题。

### 参考文献:

- [1] Wheeler H E. Base level, lithosphere surface, and time-stratigraphy[J]. GSA Bulletin, 1964, 75(5): 599-610.
- [2] 池英柳. 可容纳空间概念在陆相断陷盆地层序分析中的应用[J]. 沉积学报, 1998, 16(4): 8-13.
- [3] 胡受权. 泌阳断陷双河—赵凹地区下第三系核三上段陆相层

- 序发育的可容空间机制[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 102-108.
- [4] 肖焕钦, 陈广军, 李长宝. 济阳坳陷盆地拉张量及其石油地质意义[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 13-18.
- [5] 解习农, 程守田, 陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成[J]. 地球科学, 1996, 21(1): 27-33.
- [6] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[J]. AAPG Methods in Exploration Series 7, 1990. 55.
- [7] 董清水, 崔宝琛, 李想, 等. 陆相层序地层划分及岩心、测井高分辨率层序地层界面判识[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 121-126.
- [8] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and exploration significance[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 1687-1709.
- [9] 纪友亮, 张世奇, 等. 层序地层学原理及层序成因机制模式[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

## EFFECTS OF EPISODIC DIFFERENTIAL SUBSIDENCE ON THE CHANGES OF LAKE LEVEL AND WATER DEPTH IN RIFT LAKE BASINS

CAO Yingchang<sup>1,2</sup>, JIANG Zaixing<sup>1</sup>, XIA Bin<sup>2</sup>

(1. College of Earth Resource and Information, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;  
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** Relative and absolute lake level and water depth are two essential parameters controlling lake-basin sedimentation. In a rift lake basin, the differential subsidence of basement in the gentle slope zone of the basin resulted from the episodic movement of boundary faults in the basin can lead to the discordant changes of relative and absolute lake level, water depth and other parameters, that is, the discordant changes of relative lake level, absolute lake level and water depth and those of relative lake level or water depth at different structural location of the lake basin. In the same sedimentary time unit, the water depth of a lake basin had both increasing and decreasing zones, or not only rising but also falling zones existed in relative lake level; but the absolute lake level to the same lake basin had concordant changes. Episodic differential subsidence controlled the changes of accommodating space in a basin. This kind of discordant changes were the comprehensive response of the neogenic volume of accommodating space ( $\Delta V_a$ ), the net incurrent volume of external water ( $\Delta V_w$ ) and the infilling volume of sediments ( $\Delta V_s$ ) three parameters during a certain period of time. Especially when  $\Delta V_a > \Delta V_w > \Delta V_s$ , the differential subsidence of basement resulted in forced regression in a lake basin and formed sequence interfaces.

**Key words:** accommodating space; sequence stratigraphy; lake level; differential subsidence; rift lake basin