

湖泊原生碳酸盐化学沉积模型及其应用

梅洪明 汪品先

(同济大学海洋地质与地球物理系, 上海, 200092)

摘要 对湖泊原生碳酸盐(以碳酸钙为代表)化学沉积体系的模型化作了初步的尝试, 并把它与对胜利油区早第三纪的古东营湖的研究相结合, 量化地探讨了古东营湖中的由气候的旋回性变化所控制的富碳酸盐/富碎屑物的韵律沉积现象。

关键词 湖泊; 模型化; 古东营湖; 韵律沉积

中图法分类号 P 73

湖泊沉积体系对于经济、气候研究和环境保护均具有重要意义, 因此已受到日益的重视。在湖泊沉积中(主要是较深水及深水相环境)有一个十分常见的沉积类型, 即为季节性气候变化成因的由富碳酸盐/富碎屑物的纹层层系所组成的韵律沉积(本文所涉及到的古东营湖沉积就是此种类型)。对这类韵律沉积, 国内外学者都已作了广泛的研究, 取得了许多成果, 但到目前为止, 尚未见有从模式及定量研究的角度来探讨湖泊韵律沉积的现象。本文就是在这方面的一个尝试, 即以水-碳酸钙(CaCO_3)化学体系为核心, 建立了湖泊原生碳酸盐(以碳酸钙为代表)化学沉积模型。当然, 本文还只是一次初步的尝试, 只考虑了一个较为简单的湖泊水化学系统, 且未将对湖泊碳酸盐的形成起重要作用的生物的诱发因素纳入模型之中(这是由于生物作用机制过于复杂, 现阶段尚未能对其进行量化的描述, 而且本文的着重点是对以水-碳酸钙系统为核心的湖泊原生碳酸盐化学沉积体系进行模型化尝试)。在对湖泊水体化学作用机制进行数量化时, 借鉴了水文地球化学领域内的一些成果^[1~3]。

湖泊的类型多种多样(指其气候特点、水文条件等等)。本文以我国陆相含油盆地的代表之一——胜利油区早第三纪的古东营湖为背景建立湖泊化学沉积模型, 并且把模型运用到对古东营湖的韵律沉积现象的研究之中。文中所展示的建立湖泊模型的过程, 对其他类型的湖泊也会具借鉴意义。

1 湖泊原生碳酸盐化学沉积模型的建立

根据地质资料, 胜利油区早第三纪的古东营湖在当时是处在亚热带的气候条件之下, 湖区的注入水量(包括注入河流、降水等)不小于蒸发量, 与现代中国的中南部地区相似^[1]。古东营湖所沉积出的沙河街组沙三段下部地层, 为一套深湖相油页岩, 具有由富碎屑物(有机质或粘土)的泥岩纹层和富碳酸盐(主要为钙质)的泥岩纹层这两种基本单元所组成的韵律层系

本文收到日期: 1996 年 5 月 16 日 第一作者: 男, 1968 年生, 博士生, 现在上海市地震局工作

1) 姚益民, 朱宗浩, 刘桂兰等. 牛庄油藏牛 38 井沙河街组沙三段中下亚段地层划分、古环境和古地磁年代. 牛庄油藏描述技术研究, 1989, 27~34

的特征,且这种韵律层系的形成被认为是由气候的旋回性(季节性)变化所控制^[4].

根据上面所讲的古东营湖的一些特点,本文拟建立一个如图1所示的湖泊模型.模型考虑的参量有:湖区面积及水深(两者的乘积给出湖水体积)、集水区面积、气温、湖区蒸发量及降水量,注入河流(即入流)、降水及湖水的水温和水质(为简化起见,古东营湖韵律沉积中的碳酸盐可用碳酸钙来代表,因而在这里水质指 Ca^{2+} , Na^+ , H^+ , OH^- , Cl^- , CO_3^{2-}

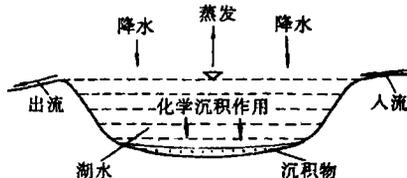


图1 湖泊模型示意图

和 HCO_3^- 等的浓度以及 CO_2 分压).图1中的出、入流均指地表(不考虑地下水的出、入流).

模型在水文方面的前提条件,就是假设湖区始终处于满水位,且湖区的注入水量(入流和湖面降水量)始终不小于湖面蒸发量,注入水量与湖面蒸发量之差(即湖区的净注水量)给出溢出河流(即出流)水量.

关于入流水量的确定,本模型采用如下方法:相对于湖区来说,集水区中的除了湖区以外的那一部分区域相当于外流区(亦即这一部分区域中的降水、河流等均流入该湖).外流区的水量平衡方程为^[6]

$$P_{\text{外}} - E_{\text{外}} - R_{\text{地表}} - R_{\text{地下}} = \Delta S_{\text{外}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{外}}$, $E_{\text{外}}$, $R_{\text{地表}}$, $R_{\text{地下}}$, $\Delta S_{\text{外}}$ 分别为外流区的降水量、蒸发量、地表径流量、地下径流量和蓄水变量.

本文对该式进行简化,即不考虑外流区蓄水变量、地下径流及蒸发等因素,并展开 $P_{\text{外}}$, 使该式给出最大的人流量,变为

$$R_{\text{地表}} = H_p (A_{\text{集水区}} - A_{\text{湖区}}) \quad (2)$$

式中: H_p 为以水柱高形式表示的降水量; A 为面积.

整个模型的工作原理是:注入河流(入流)、降水和湖水发生混合(包括水量、水温及各溶质浓度的混合),再经历蒸发.如果此时的水体达到碳酸钙过饱和,则产生碳酸钙沉积.整个水体中相对于原湖水体积增加的那一部分(在体积上即相当于湖区的净注水量)则构成溢出河流(出流),以保持湖水体积不变.

模型的关键在于如何判断水体的饱和状况.这就要求对水体的化学机制进行模拟.本文所考虑的湖泊水体是一个水-碳酸钙开放化学系统,包含 CaCO_3 , H_2O , H_2CO_3 和 CO_2 等电中性物质以及 Ca^{2+} , H^+ , OH^- , CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 等离子(下文还要引入以 Na^+ , Cl^- 为代表的盐离子).系统中发生的化学反应有



这些反应相应的平衡常数为

$$K_c = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (8)$$

$$K_w = a_{\text{H}^+} \cdot a_{\text{OH}^-} \quad (9)$$

$$K_h = a_{\text{H}_2\text{CO}_3^*} / p_{\text{CO}_2} \quad (10)$$

$$K_1 = a_{\text{H}^+} \cdot a_{\text{HCO}_3^-} / a_{\text{H}_2\text{CO}_3} \quad (11)$$

$$K_2 = a_{\text{H}^+} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} / a_{\text{HCO}_3^-} \quad (12)$$

式中: a 表示活度; p 表示分压. 文献 6、7 给出了上述平衡常数的数值表达式, 它们均为温度的函数.

由式(8)~(12), 系统中所有离子的活度都可以被表达成 H^+ 活度的函数

$$a_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{K_c}{K_h K_1 K_2 p_{\text{CO}_2}} a_{\text{H}^+}^2 \quad (13)$$

$$a_{\text{OH}^-} = K_w / a_{\text{H}^+} \quad (14)$$

$$a_{\text{CO}_3^{2-}} = K_h K_1 K_2 p_{\text{CO}_2} / a_{\text{H}^+}^2 \quad (15)$$

$$a_{\text{HCO}_3^-} = K_h K_1 p_{\text{CO}_2} / a_{\text{H}^+} \quad (16)$$

整个系统的电中性方程为

$$2m_{\text{Ca}^{2+}} + m_{\text{H}^+} = m_{\text{OH}^-} + 2m_{\text{CO}_3^{2-}} + m_{\text{HCO}_3^-} \quad (17)$$

式中: m 为浓度(质量摩尔浓度或量浓度).

现在往系统中引入盐离子. 本文考虑 Na^+ 和 Cl^- . Na^+ 和 Cl^- 不参加系统内发生的化学反应, 而只改变系统的电中性方程, 使式(17)变为

$$2m_{\text{Ca}^{2+}} + m_{\text{Na}^+} + m_{\text{H}^+} = m_{\text{OH}^-} + 2m_{\text{CO}_3^{2-}} + m_{\text{HCO}_3^-} + m_{\text{Cl}^-} \quad (18)$$

把式(13)~(16)代入式(18)可得

$$m_{\text{Na}^+} + a_{\text{H}^+}^2 + \left(\frac{1}{Y_{\text{H}^+}}\right) a_{\text{H}^+}^3 + \left(\frac{2}{Y_{\text{Ca}^{2+}}}\right) \left(\frac{K_c}{K_h K_1 K_2 p_{\text{CO}_2}}\right) a_{\text{H}^+}^4 = \left(\frac{1}{Y_{\text{OH}^-}}\right) K_w a_{\text{H}^+} + m_{\text{Cl}^-} a_{\text{H}^+}^2 + \left(\frac{1}{Y_{\text{HCO}_3^-}}\right) K_h K_1 p_{\text{CO}_2} a_{\text{H}^+} + \left(\frac{2}{Y_{\text{CO}_3^{2-}}}\right) K_h K_1 K_2 p_{\text{CO}_2} \quad (19)$$

式中: Y 为活度系数, 能够用化学中相应的方法来计算^[6](本文采用扩展 Debye-Hückel 法).

对方程(19)进行求解可得 H^+ 平衡活度(本文采用 Newton-Raphson 叠代法^[8]求解该方程), 再由式(13)~(16)可得其余离子的平衡活度, 从而可以知道系统的平衡溶度积. 再结合实际水体的化学状况(指浓度值), 即可计算出该水体的饱和度, 并进而求得水体中的化学沉积量及各溶质的浓度随化学沉积而发生的变化, 这里就不作叙述了.

2 古东营湖计算参数的确定

本文采用位于现今中国中南部亚热带区的湖南长沙的现代气候资料来近似模拟古东营湖区当时的气温、降水量及蒸发量(见附表). 注入河流、降水及湖水假设具有相同的水温, 其变化形式与气温一致, 只是变化幅度减小(式(20)), 以模拟自然水体的温度对外界气温变化的阻尼反应.

$$T_{\text{水体}} = 6\sin[2\pi(t-1/4)] + 10 \quad (20)$$

古东营湖的水深被认为是具有一定深度(大于 20m)^[1], 本文采用 50m. 湖区面积定为

1) 姚益民, 朱宗浩, 刘桂兰等, 牛庄油藏牛 38 井沙河街组三段中下亚段地层划分、古环境和古地磁年代, 牛庄油藏描述技术研究, 1989, 33

1 000km²,为基于湖区古地理重建图^[9]的估计值.至于集水区面积,由于这方面资料的缺乏,本文假定为2 000km²(为湖区面积的两倍),这样由式(4)给出的注入河流的水量将不少于湖区净蒸发量的两倍,且至多为整个湖水体积的0.5%.

附表 湖南长沙的现代月平均气温、降水量和蒸发量

月份	气温 ¹⁾ /°C	降水量 ²⁾ /mm	蒸发量 ³⁾ /mm	月份	气温/°C	降水量/mm	蒸发量/mm
1	4.3	64.3	52.0	7	29.3	117.8	364.5
2	6.2	120.9	69.5	8	29.0	120.5	242.5
3	10.9	122.4	70.5	9	24.6	79.7	164.0
4	16.8	202.8	110.5	10	18.3	83.2	134.0
5	22.0	211.5	152.5	11	12.1	85.0	68.0
6	25.6	253.7	228.5	12	7.7	67.5	55.5

1) 可被简化为: $T_{\text{max}} = 13\sin[2\pi(t-1/4)] + 17$; 2) 可被简化为: $H_{\text{max}} = 95.2\sin[2\pi(t-1/4)] + 158.5$; 3) 可被简化为: $H_{\text{max}} = 156.25\sin[2\pi(t-1/4)] + 208.25$, H 表示水汽高,因此在实际计算中将乘以湖区面积,以得出湖区降水和蒸发的水量体积.

同样,由于缺乏古水质方面的资料,本文以现代世界河流及降雨中各溶质含量的平均值^[9]作为古东营湖区当时的注入河流及降水中相应溶质的浓度值.对于没有平均值数据的 H^+ , OH^- 及 CO_3^{2-} 的浓度,则取它们在标准状态下(1标准大气压 = $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, 25°C)的水-碳酸钙开放系统中相应的平衡浓度值^[10]. CO_2 分压采用 $1.01325 \times 10^{-5} \text{Pa}$, 为 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 中二氧化碳的分压值^[11].最后,初始湖水假设具有与注入河水相同的浓度值.

3 计算结果

图2反映了湖水中碳酸钙沉积量在90年中的逐月变化(为清晰起见,图中所示为以10年为间隔).从图中可以明显看出,在前约50年的时间当中,湖水化学状态变化较快,并且没有化学沉积形成;在经过约50年后,湖体的演化则基本达到稳定阶段,并且在每年的夏季(7月份)沉积出碳酸钙.如前所述,本文的模拟没有考虑生物对湖水中碳酸盐沉积的诱发作用.从时间上看,生物的这种诱发作用与模拟所得是同步的,即生物活动(植物的光合作用)也是在夏季促成碳酸盐的沉淀^[4],这就更加促进了碳酸盐在夏季湖水中的生成.再考虑到湖水中还能发生碎屑物的沉积(这一因素也未纳入本文模型),这样就会形成交替富碳酸钙和碎屑物的韵律层系.因此,古东营湖在亚热带的气候条件下完全可以产生由气候的季节性变化所控制的富碎屑物/富碳酸盐的韵律沉积,且其中富碳酸盐的单元层是在每年的夏季形成.这一模拟结果与目前有关季节性环境变化成因的深湖相韵律沉积的一般性论述^[4](即夏季沉淀 CaCO_3 , 冬季沉积粘土)是一致的,说明文中所建立的湖泊模型是可行的.

本文建立的只是一个较为简单的湖泊原生碳酸盐化学沉积模型,因而还只是一次初步

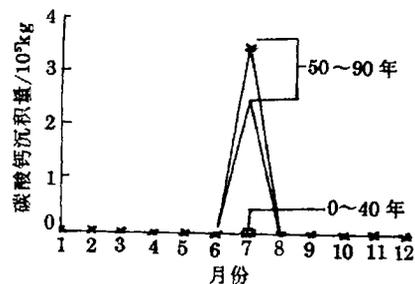


图2 碳酸钙沉积量随时间的变化

1) 胜利油田地质科学研究所勘探室.济阳拗陷下第三系沙河街组岩性等值线图,1987,18~19

的尝试. 湖泊体系中的诸多因素, 如碎屑物的沉积情况、更为复杂而真实的湖水化学系统(如含 Mg^{2+} , SO_4^{2-} 等离子)直至生物作用机制等等在本文的模型中均未考虑, 尚有待于今后更进一步的研究和完善.

参考文献

- 1 Holland H D, Malinin S D. The solubility and occurrence of non-ore minerals. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1979
- 2 Kravnov S R. Thermodynamic computer programs used in the USA in groundwater geochemical research. *Geochemistry International*, 1993, 30(12): 72~82
- 3 李宽良. 水文地球化学热力学. 北京: 原子能出版社, 1993. 116~175
- 4 汪品先, 刘传联主编. 含油盆地古湖泊学研究方法. 北京: 海洋出版社, 1993. 1~95
- 5 黄锡荃主编. 水文学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 47~51
- 6 Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry, an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. New York: Wiley-Interscience, 1981. 127~135
- 7 Lerman A. *Lakes chemistry geology physics*. New York: Springer-Verlag, 1978. 298~305
- 8 Ferguson J. *Mathematics in geology*. London: Allen & Unwin, 1988. 185~187
- 9 Garrels R M, Mackenzie F T. *Evolution of sedimentary rocks*. New York: W W Norton & Company, 1971. 101~107
- 10 Garrels R M, Christ C L. *Solutions, minerals and equilibria*. San Francisco: Freeman, Cooper & Company, 1965. 44~83
- 11 Pagenkopf G K. *Environmental science and technology series: Vol 3. introduction to natural water chemistry*. New York: Marcel Dekker, 1978. 90~98

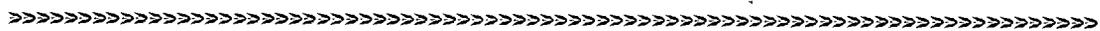
Model for Chemical Sedimentation of Primary Lake Carbonates and Its Application

Mei Hongming Wang Pinxian

(Department of Marine Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract This paper shows a preliminary attempt to model the chemical sedimentation system of primary lacustrine carbonates (represented by $CaCO_3$), and to apply the model to the study on the early-Tertiary Dongying Paleo-lake in Shengli Oilfield, quantitatively analyzing the phenomenon of the carbonate/clastic rhythmic deposition in the Dongying Paleo-lake which was controlled by seasonal climatic changes.

Keywords Lake; Model; Dongying Paleo-lake; Rhythmic deposition



下期文献
摘要预报

沙拐枣属花粉形态研究

张玉兰 王开发 羊向东 潘安定

对沙拐枣属 12 种花粉形态用光学显微镜和扫描电子显微镜作了观察和数据测定, 并作了扫描电镜摄片, 以期于干旱地区第四纪孢粉研究提供有价值的资料.