

沉积速率的定量计算

杜小弟 王璞君

(能源系)

摘要 分别推导并给出了砂砾岩和泥质岩沉积速率的定量计算公式,以松辽盆地白垩系钻孔数据为实例详述了公式的使用方法、公式的通用性和计算精度,以及对一些具体问题的处理方法。

关键词 沉积速率 岩石骨架体积率 压实作用 原始沉积厚度

中图法分类号 P312.2

原始沉积速率的恢复是盆地分析的重要内容之一,对于研究沉积盆地的古构造特征具有特殊意义。以往人们多根据沉积物组成、结构及生物遗迹等特征定性估计沉积速率的大小(孟祥化,1989;吴贤涛,1988)。沉积速率的定量计算也有一些报导,采用积分方法借助计算机进行计算(M. F. Middleton 和 D. A. Falvey)。沉积速率的定性估计常不能满足研究的需要,而采用积分方法借助计算机进行计算则步骤多而复杂。本文引用“岩石骨架体积率”的概念(J. Dykstra, 1987),结合沉积物在压实过程中孔隙度随深度的变化关系(Athy, L. F., 1930),推导出砂砾岩和泥质岩沉积速率的定量计算公式,该公式具有计算简单、易于采用且满足计算精度要求的特点,并由此计算出松辽盆地SN8717

登娄组原始沉积速率为186.82m/Ma、召深2#姚家组沉积速率为105.98m/Ma。

1 砂砾岩沉积速率的定量计算

原始沉积厚度的计算 岩石骨架体积率指固体颗粒体积占沉积物总体积的百分数,它与孔隙度之和为100%(J. Dykstra, 1987)。如果在沉积物压实过程中不发生固体颗粒的溶解和迁移(在一般情况下这点可

以保证),则沉积物骨架体积率与沉积层厚度之积为一常数,即:

$$R_1 D_1 = R_2 D_2 \quad (1)$$

式中 R_1 ——原始沉积物骨架体积率;

D_1 ——原始沉积厚度;

R_2 ——现今沉积岩骨架体积率;

D_2 ——现今沉积岩层厚度。

由孔隙度(φ)与沉积物(岩)埋深(d)的关系式(Athy, L. F., 1930)知:

$$\varphi = A \cdot e^{-Bd} \quad (A \text{ 与 } B \text{ 为常数}) \quad (2)$$

又知孔隙度 φ 与沉积物(岩)层骨架体积率 R 之和为1(J. Dykstra, 1987),即:

$$\varphi + R = 1, \quad \text{或} \quad R = 1 - \varphi \quad (3-1)$$

$$\text{或} \quad R = 1 - A \cdot e^{-Bd} \quad (3-2)$$

对于沉积岩层,因其现今孔隙度可测,所以采用(3-1)式求其岩石骨架体积率。即:

$$R_2 = 1 - \varphi \quad (4)$$

对于原始沉积物层,其原始孔隙度无法知道,但因其顶面埋深可以忽略不计,所以其原始沉积物层埋深 d 可以近似地用原始沉积厚度(D_1)的中值表示。即:

$$d = D_1/2 \quad (5)$$

第一作者简介 杜小弟 男 27岁 助教 沉积学专业

收稿日期 1991-03-09

将(5)式代入(3-2)式得

$$R_1 = 1 - A \cdot e^{-\frac{B \cdot D_1}{2}} \quad (6)$$

将(6)、(4)式分别代入(1)式得

$$D_1(1 - A \cdot e^{-\frac{B D_1}{2}}) = D_2(1 - \varphi) \quad (7)$$

因现今岩层厚度 D_2 及其孔隙度 φ 已知时, $D_2(1 - \varphi)$ 为一可求常数。故设:

$$C = D_2(1 - \varphi) \quad (8)$$

在实际问题中 $|BD_1/2| \ll 1$, 所以有

$$e^{-\frac{B D_1}{2}} \approx 1 - \frac{B D_1}{2} \quad (9)$$

将(9)、(8)分别代入(7)式左、右两边并整理后得原始沉积物厚度为:

$$D_1 = [(A-1) + \sqrt{(A-1)^2 + 2ABC}] / A \cdot B \quad (10)$$

当已知一组岩石孔隙度及对应深度数据时, A 、 B 均为可由线性回归方法求出的已知常数; 而常数 C 可用平均孔隙度 $\bar{\varphi}$ 值由(8)式求得(详见应用实例)。所以对任一已知厚度和孔隙度的沉积岩层, 可用(10)式求得其原始沉积物厚度。

沉积速率的计算 设 V 为沉积速率; t 为该沉积层(D_1)沉积所持续的时间, 则:

$$V = D_1/t = \{(A-1) + [(A-1)^2 + 2A \cdot B \cdot C]^{1/2}\} / t \cdot A \cdot B \quad (11)$$

应用实例 松辽盆地 SN8717 # 登娄库组几乎由砂砾岩组成, 厚度为 991.8m, 平均孔隙度为 9.2%, 历时 6Ma。表 1 列出了该井砂砾岩孔隙度及相应深度值。

对(2)式 $\varphi = A \cdot e^{-Bd}$ 两边取对数得:

$$\ln \varphi = \ln A - B \cdot d \quad (12)$$

将表 1 中数据代入上式, 用线性回归法可求得常数 A 与 B , 其中:

$$B = - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})(\ln \varphi_i - \overline{\ln \varphi})}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2};$$
$$\ln A = \overline{\ln \varphi} + B \cdot \bar{d}$$

其中 $\overline{\ln \varphi}$ 为 $\ln \varphi$ 的平均值; \bar{d} 为 d 的平均

值, 求出 $\ln A$ 后取反对数得 A 值。本例中 $A = 0.39$; $B = 1/1130$ 。

表 1 SN8717 岩石孔隙度及相应深度值

Tab. 1 The well log data of SN 8717

porosity-depth		
井深(m)	孔隙度(%)	埋深 d(m)
1690.72~1690.80	11.865	1690.76
1759.09~1759.17	8.8255	1759.13
1760.25~1760.3	6.9642	1760.28
1761.775~1761.90	8.1726	1761.83
⋮	⋮	⋮
2201.26~2201.31	1.1533	2201.29
2457.32~2457.42	1.9372	2457.37
2515.17~2515.84	2.3366	2515.49
2515.84~2515.91	1.6791	2515.88
样品总数 n=200	平均孔隙度 $\bar{\varphi}=9.2\%$	

将 A 、 B 值代入(10)式得原始沉积物厚度为:

$$D_1 = \{(0.39 - 1) + [(0.39 - 1)^2 + 2 \times 0.39(1 - 0.092) \times 991.8/1130]^{1/2}\} / 0.39/1130 = 1120.9\text{m}$$

故登娄库组在该区的原始沉积速率为:

$$V = \frac{D_1}{t} = \frac{1120.9}{6} = 186.82(\text{m/Ma})$$

2 泥质岩沉积速率的定量计算

原始沉积物厚度计算 对于正常沉积的泥质沉积岩(物)(1)式 $R_1 D_1 = R_2 D_2$ 仍然成立。对于泥质沉积岩层, 仍可用(4)式 $R_2 = 1 - \varphi$ 求其岩层骨架体积率。而对于原始沉积物层, 因其骨架体积率 R_1 与沉积物埋深 d 之间的关系式(*J. Dykstra*, 1987)为:

$$R_1 = (a \cdot d)^b \quad (13)$$

式中 a 、 b 均为可求常数。

若仍用原始沉积层厚度中值 $D_1/2$ 近似代替沉积物埋深 d , 则有:

$$R_1 = (a \cdot \frac{D_1}{2})^b \quad (14)$$

将(14)式和(4)式代入(1)式得:

$$(a \cdot \frac{D_1}{2})^b \cdot D_1 = (1 - \varphi) \cdot D_2 \quad (15)$$

当已知现今岩层厚度 D_2 和平均孔度 $\bar{\varphi}$ 时, (15)式右边为一常数, 仍设 $C=(1-\varphi)D_2$; 代入(15)式并整理得原始沉积物厚度为:

$$D_1 = [(\frac{2}{a})^b \cdot C]^{\frac{1}{b+1}} \quad (16)$$

沉积速率的计算 设 V 为沉积速率; t 为原始沉积厚度 D_1 所持续的时间, 则:

$$V = \frac{D_2}{t} = [(\frac{2}{a})^b \cdot C]^{\frac{1}{b+1}} / t \quad (17)$$

应用实例 松辽盆地召深2井姚家组主要组成岩石为泥岩夹粉砂质泥岩, 厚度149m, 平均孔隙度 φ 为2.5%, 沉积该层所经历的时间为2.5Ma(召深2井完井报告, 1978)。其孔隙度与对应深度及埋深值的原始数据表格形式同表1。计算步骤如下:

① 将(13)式代入(3-1)式得:

$$(a \cdot d)^b = 1 - \varphi \quad (18)$$

② 对(18)式两边取对数并整理得:

$$\ln(1 - \varphi) = b \cdot \ln a + b \cdot \ln d \quad (19)$$

③ 将原始数据表中孔隙度值(φ)与对应埋深(d)逐一代入(19)式, 并用线性回归法求得常数: $a=1.66 \times 10^{-4}$; $b=0.157$ 。

④ 将 a, b 值代入(16)式求得原始沉积厚度:

$$\begin{aligned} D_1 &= [(\frac{2}{1.66 \times 10^{-4}})^{0.157} \\ &\quad \times (1 - 0.0255) \times 149]^{\frac{1}{0.157+1}} \\ &= 264.58\text{m} \end{aligned}$$

⑤ 求原始沉积速率:

$$V = \frac{D_1}{t} = \frac{264.58}{2.5} = 105.83\text{m/Ma}$$

3 讨论

(1)式 $R_1 D_1 = R_2 D_2$ 是上述两个沉积速率计算公式推导过程的基础。可以证明“固体颗粒不发生溶解”的压实过程中该式普遍

成立。因若设 S 为计算层面积, 则计算层原始沉积物体积为 $S \cdot D_1$, 现今沉积岩体积为 $S \cdot D_2$; 因上述压实过程中沉积碎屑物的绝对体积不变, 即 $R_1 \cdot (S \cdot D_1) = R_2 \cdot (S D_2)$, 故 $R_1 D_1 = R_2 D_2$ (因为 R_1 和 R_2 是用固体沉积碎屑占整个沉积体体积的百分数表示的)。

在砂砾岩沉积速率公式推导中, 引用了(2)式 $\varphi = A \cdot e^{-Bd}$; 在泥质岩公式推导中引用了(12)式 $R = (a \cdot d)^b$ 。上述两式分别由艾西(Athy L. F., 1930)和鲍尔德温-巴勒(Baldwin, Butler, 1985)孔通过研究砂岩及泥质岩在压实过程中砂岩隙度及泥质岩骨架体积率随深度变化规律时总结出的经验公式, 对于正常沉积过程(非事件沉积)普通适用。

在砂砾岩计算公式推导中引用了近似计算步骤(9)式: $e^{-\frac{B \cdot D_1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2} B \cdot D_1$ 。在实际计算中, 一般 $B/2 < 1/2000$, 即只要计算层厚度小于2000m就有 $B/2 < 1$ 成立。因 $e^{-BD_1/2}$ 展开式为收敛调和级数, 当 $BD_1/2 < 1$ 时(B, D 均为正数)有:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{BD_1}{2} &< e^{-\frac{BD_1}{2}} < 1 - \frac{BD_1}{2} + \frac{1}{2!} (\frac{BD_1}{2})^2 \\ &< 1 - \frac{BD_1}{2} + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\text{即: } 1 - \frac{BD_1}{2} < e^{-\frac{BD_1}{2}} < 1.5 - \frac{BD_1}{2}$$

故 $e^{-\frac{BD_1}{2}}$ 的下限值是 $1 - \frac{BD_1}{2}$, 上限值为 $1.5 - \frac{BD_1}{2}$ 。在实际计算中, 当 $\frac{B \cdot D_1}{2} \ll 1$ 时(例如小于0.3), 可直接用(10)式求其原始沉积厚度; 当 $\frac{BD_1}{2} \approx 1$ 时可用下面的修正公式求原始沉积厚度 D_1 :

$$\begin{aligned} D_1 &= [(1.5A - 1) \\ &\quad + \sqrt{(1.5A - 1)^2 + 2 \cdot A \cdot B \cdot C}] / A \cdot B \end{aligned} \quad (20)$$

当 $\frac{BD_1}{2}$ 居于中间值时(如0.3~0.7), 可取(10)式与(20)式计算结果的平均值。例如本

文例1中,岩层厚度 $D_2=991.8m$,用(10)式求得原始沉积厚度 $D_1=1120.9m$, $\frac{B \cdot D_1}{2} \approx 0.5$;若用修正公式(20)式计算,得 $D_1=1379.1m$,两次计算相对误差为20.6%;此时可取平均厚度值1250m。

在沉积速率计算中,需要用线性回归法求常数A与B或常数a与b。这些常数是用现今沉积岩的孔隙度(φ)与对应深度(d)代入线性回归方程求得的,而公式所表示的是原始沉积物的特征常数值。因为正常沉积的碎屑物质的无溶解、无迁移的压实作用,实际上可看作是一种原始沉积物与沉积岩之间的连续的渐变过程,所以就我们研究的某个地区而言,这种做法应具有其合理性。

在计算沉积速率之前,对所要计算的沉积层段首先按岩性划分成不同岩性单元,岩

性单元划分愈细,计算精度愈高,但与之俱来的是计算量加大。对不同岩性单元采用不同的计算公式,其中粗粉砂岩的计算公式同砂砾岩;细粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩的特点更接近泥质岩,所以采用泥质岩的公式计算。最后采用不同计算公式求得各岩性单元原始沉积厚度之和除以所要计算层段的持续时间,使得计算结果。对于单一岩性组成时,可直接代入相应的计算公式计算即可。

沉积速率通常按组、段进行计算,此时沉积作用持续时间t可由地层表查得,也可据生物群组合来确定,但有时很难甚至无法确定,这种情况下只能用(10)式或(15)式来恢复其原始沉积厚度。

参 考 文 献

- 1 J. Dykstra. 埋藏史曲线的压实校正(刘方槐译). 天然气勘探与开发, 1989, (1)
- 2 孟祥化. 沉积建造原理和分析方法(二). 岩相古地理, 1989, 42(4): 54~60
- 3 吴贤涛. 痕迹化石和沉积作用. 天然气勘探与开发, 1988, (2)
- 4 Middleton M. F. and Falvey D. A. 澳大利亚特维盆地的成熟模式. (张金源译). 海洋地质译丛, 1984, (3)
- 5 Athy L. F. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks, Bull. Amer. Assoc. Petro. Geol., 1930, 14: 1~24

CALCULATION OF THE ORIGINAL SEDIMENTARY RATE

Du Xiaodi Wang Pujun

(Geoenergy Department)

Abstract This paper describes the methods of calculation of the original sedimentary rate for sandstone, conglomerate, and mudstone. The deduction of the formulae in this paper is based on the concept of "fragment volume in rock" and the function between porosity and depth during the compaction. The sedimentary rate calculation formulae are as followings.

The two formulae above are used to SN8717# Denglouku Formation and Zhaochen 2 well of Yaoja Formation, in which the authors describe how to get parameters A, B(or a, b) by regression and discuss how to use these formulae practically. At last, the authors prove that these formulae are applicable to any kind of normal sedimentary rocks.

Key words sedimentary rate, rock fragment volume ratio, original sedimentary thickness