

文章编号:1000-0550(2000)03-0395-05

一种计算沉积速率的新方法

——宇宙尘埃特征元素法

吴智平 周瑶琪

(石油大学(华东) 石油资源系 山东东营 257062)

摘要 地球每时每刻都在接受宇宙尘埃的沉降,且其年沉降量相对稳定,加之宇宙尘埃中的 Ir、Co 等特征元素的平均含量较恒定,因此沉积物中宇宙尘埃特征元素 Ir、Co 的丰度值能够体现出沉积物的沉积速率。当沉积速率较慢时,沉积物中宇宙尘埃特征元素的丰度值较大,反之,则较小。本文在前人工作的基础上,对利用宇宙尘埃特征元素计算沉积速率的方法和原理进行了探讨,并运用该方法对山东临朐 N/E 界线地层的沉积速率进行了实例研究。与传统方法相比,依据宇宙尘埃特征元素在地层中的分布特征计算沉积速率具有更好的实用性和准确性。

关键词 沉积速率 宇宙尘埃 元素 Ir、Co

第一作者简介 吴智平 男 1967年出生 副教授 博士 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 引言

沉积速率的计算是沉积学研究中的一项重要内容,对于了解层序的形成过程、划分沉积相带、分析沉积环境变化、确定古水深等具有重要意义^[1,2,3]。

传统方法通过古生物、古地磁、同位素元素等手段计算出的沉积速率往往较之真正的沉积速率值偏小^[4];尤其是对一些厚度较薄的特殊层段(如密集段)或是沉积时间较短的层段进行沉积速率研究时,很难用常规的测年手段确定其沉积所需的时间。

依据宇宙尘埃特征元素在地层中的分布特征计算沉积速率是近年来发展起来的一种运用地球化学手段测定沉积速率的新方法,其与上述传统方法相比,具有更好的实用性和准确性。

本文在前人研究的基础上,对运用宇宙尘埃特征元素计算沉积速率的方法和原理进行了探讨,并运用该方法对山东临朐地区 N/E 界线地层的沉积速率进行了研究。

2 沉积地层中的宇宙尘埃特征元素

宇宙尘埃是来自宇宙中的尘埃物质,为有形的实体颗粒,直径范围为零点几微米至 1 mm。其来源主要有:(1)太阳系形成时,一部分没有形成行星及卫星的残余物;(2)彗星、彗星尘及大的流星雨等;(3)来自太阳系外的物质,如新星和超新星的爆发;(4)月球及其它行星的喷发作用;(5)陨石和大气层相互作用的产

物;(6)处于小行星带的小天体物质相互间的碰撞作用。因此,宇宙尘埃是目前人类所能获得的三种地外物质(月球样品、陨石和宇宙尘埃)之一^[5]。

与地球岩石相比,宇宙尘埃中的 Ir、Co 等微量元素的丰度特征存在明显差异。在宇宙尘埃中,Ir 的含量为零点几至十几 $\times 10^{-6}$,Co 的含量最高可达 $6\ 000 \times 10^{-6}$ 以上,而地壳中 Ir、Co 的含量则低得多,分别小于 $10^{-4} \times 10^{-6}$ 和 25×10^{-6} ^[5]。因而,人们将 Ir、Co 等元素称作宇宙尘埃特征元素,常将其用于地外事件的研究^[6]。

就沉积岩而言, Ir、Co 等元素的丰度值主要受如下因素的影响:

(1)火山活动

与地壳相比,地球深部为基性、超基性物质, Ir、Co 的含量高(在地幔橄榄岩和平均地壳玄武岩中 Co 的丰度值分别为 130×10^{-6} 、 38×10^{-6}),火山作用常常把一些地球深部物质带到地表,因而在富含火山碎屑物的沉积地层中 Co 的丰度值偏高。

(2)生物富集作用

生物对元素的吸收往往具有选择性,有些生物,如海藻类,其体内 Co 的含量一般比正常海水中 Co 的含量高出几千倍^[7],因此,当沉积地层中这类生物发育时,将造成地层中 Co 异常。

(3)宇宙尘埃沉降

宇宙尘埃可以分为铁质、硅质和玻璃质三种类型,在铁质宇宙尘埃中,Co 的丰度值为 $2\ 000 \times 10^{-6} \sim$

$6\ 000 \times 10^{-6}$, Ir 可达十几 $\times 10^{-6}$, 在硅质、玻璃质宇宙尘埃中, Co 的丰度值一般小于 900×10^{-6} , Ir 为零点几个 $\times 10^{-6}$; 尽管在不同类型宇宙尘埃中的特征元素 Ir、Co 的含量有差异, 但人们认为, 在正常情况下沉降于地球上的宇宙尘埃中 Ir、Co 的平均丰度值较恒定, 如 Co, 约为 $4\ 000 \times 10^{-6}$ [8]。

(4) 物源

Ir、Co 为亲铁性元素, 与 Fe、S 等有着良好的伴生关系, 如果沉积物的物源为高 Fe、S 的物质, 那么 Ir、Co 的含量相对较高, 如 Co 在玄武岩物源中的丰度值可达 35×10^{-6} , 而在花岗岩中仅为 1×10^{-6} [9]。因此, 物源直接影响沉积岩中 Co 的含量。

值得一提的是, 物源物质在由物源区搬运到沉积区的过程中, Co 会发生再分配, 其在沉积岩中的再分配系数 $w(\text{Co})$ 受沉积岩的粒径 (D) 影响, 在同一物源条件下, 沉积物的粒度越小, $w(\text{Co})$ 值越大, Co 的含量则越高 [8], 如图 1 所示。

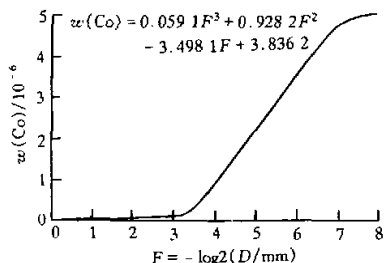


图1 物源 Co 与粒径大小之间的经验关系曲线
Fig. 1 Relationship between the Co fractionation and the variation of grain size in clastic sediments

上述四种影响因素中, 火山活动和生物富集作用对地层中 Ir、Co 丰度值的影响仅仅是局部性的或暂时性的, 在不存在火山活动和生物富集作用的情况下, 沉积地层中的 Ir、Co 主要来源于宇宙尘埃和物源。

与元素 Co 相比, 尽管 Ir 在地层中的丰度值低得多, 仅为零点几至几个 $\times 10^{-9}$, 一般的化学和物理方法很难精确测定, 但在各类岩石中, 元素 Ir 与 Co 之间存在良好的相关性 [8], 因此 Co 也能反映元素 Ir 在地层中的分布规律。

3 运用宇宙尘埃特征元素计算沉积速率的原理与方法

地球每时每刻都在接受宇宙尘埃的沉降, 且其年沉降量相对稳定, 约为 $1.6 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2 \text{a}$, 加之宇宙尘埃中的 Ir、Co 等特征元素的平均含量较恒定 [8], 因此, 正常沉积物的沉积速率与沉积物中宇宙尘埃特征

元素 Ir、Co 的丰度值存在明显的相关性, 当沉积速率较慢时, 沉积物中宇宙尘埃特征元素的丰度值较大, 反之, 则较小。

由于 Ir 在地壳中的平均丰度值仅为 0.003×10^{-9} , 因此 Petterson 和 Rotschi (1952) 及 Goldschmidt (1954) 认为沉积岩中含量可达几个 $\times 10^{-6}$ 的 Ir 主要来自宇宙尘埃等地球外物质, 据于此, Alvarez 等人建立了一个利用地层中宇宙尘埃特征元素 Ir 的丰度特征计算海相地层沉积速率的公式 [6], 即:

$$V_s = V_s' [A'(Ir)/A(Ir)] \quad (1)$$

式中 V_s' 、 $A'(Ir)$ 分别为正常情况下海洋沉积物的沉积速率和 Ir 的丰度值 (标准值), V_s 、 $A(Ir)$ 为所要测的样品的沉积速率和 Ir 的丰度值。

用公式 (1) 计算沉积速率, 必须满足如下前提条件: (1) 地球上宇宙尘埃的沉降速率恒定, (2) 沉积物中的 Ir 均来自宇宙尘埃。

依据地层中的 Ir 与 Co 存在良好的相关性, 并考虑到物源对沉积地层中 Co 的丰度值影响, 周瑶琪等参照公式 (1) 提出了一种利用 Co 的丰度值来计算沉积速率的新方法 [10]:

$$V_s = V_s' A'(Co) / [A(Co) - kA''(Co)] \quad (2)$$

式中 V_s' 、 $A'(Co)$ 为标准样品的沉积速率和 Co 的丰度值, $A''(Co)$ 为所研究样品的物源中 Co 的背景丰度值, k 为物源 Co 对样品的贡献值, 因为物源中 Co 与 LREE 元素具有较好的相关性, 且 LREE 元素在地表岩石中的分布较稳定, 所以 k 值可以通过公式 (3) 求得。

$$k = A(\text{La})/A''(\text{La}) = A(\text{Sm})/A''(\text{Sm}) = A(\text{LREE})/A''(\text{LREE}) \quad (3)$$

如果标准样品中的 Co 含有陆源成分, 则公式 (2) 应改为:

$$V_s = V_s' [A'(Co) - k'A''(Co)] / [A(Co) - kA''(Co)] \quad (4)$$

式中 k' 为标准样品中陆源 Co 的贡献值。

以上计算方法是建立在已知标准样品的沉积速率和 Co 的丰度值的基础上。但很多时候, 我们所要研究的区域不存在可以参照的标准样品, 在这种情况下, 该如何动用地层中的宇宙尘埃特征元素 Co 计算沉积速率呢?

由于宇宙尘埃沉降速率恒定, 因此面积为 S , 厚度为 H 的地层中来自宇宙尘埃的 Co 的总量 $Q_{\text{universe}}(\text{Co})$ 可表示为:

$$Q_{\text{universe}}(\text{Co}) = V(\text{Co}) \times S \times (H/V_s) \quad (5)$$

式中 $V(\text{Co})$ 为地层中来自宇宙尘埃的 Co 的沉降速率, 值为 $6.48 \times 10^{-7} \text{g/cm}^2 \text{a}$ [10], V_s 为岩石的沉积速率。

又由于在无生物富集作用和火山活动的情况下，沉积地层中的 Co 主要来源于宇宙尘埃和物源，因此：

$$Q_{\text{universe}}(\text{Co}) = S \times H \times \rho \times [A(\text{Co}) - w(\text{Co})A''(\text{Co})] \quad (6)$$

式中 ρ 为沉积岩(或沉积物)的密度, $A(\text{Co})$ 为所测样品 Co 的丰度值, $A''(\text{Co})$ 为原始物源中 Co 的丰度值, $w(\text{Co})$ 为物源 Co 在沉积岩中的再分配系数, 即在 $A''(\text{Co})$ 为一个 10^{-6} 时, 沉积物中来自物源 Co 的丰度值, 其主要受沉积岩的粒径影响, 依据图 1 所示的经验公式, 我们可以由所测样品的粒度推算出 $w(\text{Co})$ 的值。

综合式 (5) 和式 (6), 得到:

$$V(\text{Co}) \times S \times (H/V_s) = S \times H \times \rho \times [A(\text{Co}) - w(\text{Co}) \times A''(\text{Co})]$$

即: $V(\text{Co})/V_s = \rho \times [A(\text{Co}) - w(\text{Co}) \times A''(\text{Co})]$

所以:

$$V_s = V(\text{Co}) / \{\rho \times [A(\text{Co}) - w(\text{Co}) \times A''(\text{Co})]\} \quad (7)$$

式(7)中,除了 V_s 之外,其他各项的值均为已知或可以通过实验测试得到,因此,在没有可进行直接对比的标准样品的情况下,可运用上述关系式计算出样品的沉积速率。如果式中所用的 ρ 值为沉积物经过压实后的密度值,那么得到的沉积速率为沉积物经过压实后所表现出来的视沉积速率,如果 ρ 值为沉积物的原始密度值,那么得到的沉积速率为沉积物的原始沉积速率。

4 实例研究

采用上述方法,本文对渤海湾盆地外围的山东临朐地区的新老第三纪界线地层剖面进行了实例研究(样品的中子活化分析结果详见吴智平博士论文,石油大学,1999)。

该剖面发育于临朐县城以南的牛山西侧,其下第三系顶部的五图组与上第三系底部的牛山组呈微角度不整合接触。五图组为一套在热带气候条件下的湖泊、泻湖相细碎屑沉积,其底部为一段砂砾岩,下部由煤层、油页岩、粘土岩、含油泥岩及粉砂岩组成,中部以油页岩、粘土岩、泥岩、砂岩为主,上部则由粘土岩、泥岩及少量泥灰岩、薄煤层组成,由下而上,沉积环境经历了一个由滨湖相→深湖相→浅湖相的变化过程。牛山组主要为中厚层玄武岩,并出现有沉积夹层,其底部为一套厚约 2~10 m 的下粗上细的河流相棕灰、灰白色砂砾岩沉积。

元素地球化学分析表明,不同沉积环境中的元素分布特征存在差异(图 2)。元素 Ca 的分布与水体的化学性质(如盐度、pH、Eh 值)密切相关,尤其受 pH 值大小的影响,pH 值高,有利于 Ca 的富集,因此在河流

相的沉积环境中, Ca 的丰度值低,而滨浅湖、深湖相中,其丰度值较高;元素 Mn 在沉积岩中分布与 Ca 具有较强的相关性,常在富 Ca 的泥岩中富集,因此其在各沉积环境中的分布规律与 Ca 极其相似;K 是活泼性极强的元素,极易迁移,因此从河流相→滨浅湖相→深湖相,其丰度值逐渐变大;与 K 相反,由于元素 Ba 的迁移能力较弱,因此其在河流相中的丰度值较湖泊相要大;Ca/Mg 比值由河流相→滨浅湖相→深湖相逐渐变小,表现出明显的变化特征,因此人们也常常将其作为区分河、湖相沉积的标志^[11]。

在进行了沉积相划分的基础上,首先对该剖面的沉积物的粒度进行了分析,而后运用公式(6)计算样品中扣除物源 Co 后的来源于宇宙尘埃的 Co 的含量,得到地层中宇宙尘埃 Co 的分布特征,再依据公式(7)计算出地层的视沉积速率(图 3)。

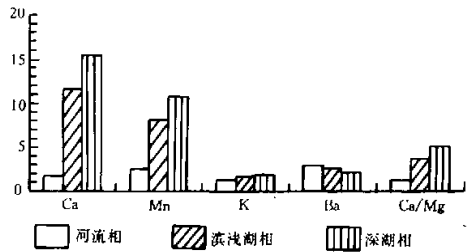


图 2 山东临朐新老第三纪界线地层各沉积环境中的元素分布特征

图中所用的数据为各沉积相中该元素的平均丰度值:Ca、K 的单位为 $10^4 \times 10^{-6}$, Mn 的单位为 $10^3 \times 10^{-6}$, Ba 为 $10^2 \times 10^{-6}$

Fig.2 Variation of some element contents in different environment in the section of N/E in Linqu County of Shandong Province

地层中 Co 的总量与地层中来源于宇宙尘埃的 Co 的含量的差值变化体现出了原始物源 Co 在不同粒度沉积物中的再分配规律:在同一物源的情况下,粒度大的碎屑沉积物(如砂岩、砾岩)中物源 Co 所占比例小,粒度细的碎屑沉积物(如泥岩)物源 Co 所占比例大。此外,地层中来源于宇宙尘埃的 Co 的含量变化曲线与地层的沉积速率变化曲线呈镜象对称:样品中来源于宇宙尘埃的 Co 的含量越低,其沉积速率越大,反之,则沉积速率越小,如河流相砂砾岩,宇宙尘埃 Co 为 $6 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$,其沉积速率为 80~120m/Ma,而湖相泥岩中宇宙尘埃 Co 为 $11 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$,其沉积速率为 60~80m/Ma。由于本文计算过程中所采用的密度值(ρ)为沉积物经过压实后的岩石密度值,所以得到的结果为视沉积速率。

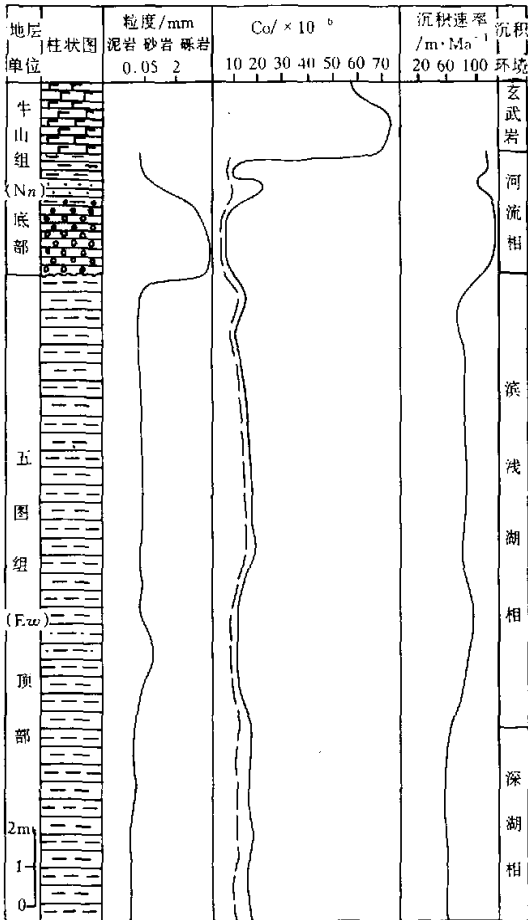


图3 山东临朐 N/E 界限地层中元素 Co 分布特征及沉积速率分析

实线为地层各样品中 Co 的总量变化曲线，
虚线为扣除物源后源于宇宙尘埃的 Co 的含量变化曲线

Fig. 3 Distribution of the abundance of the element Co and variation of deposition rate in the section of N/E in Linqu County of Shandong Province

5 结论

(1) 运用宇宙尘埃特征元素计算沉积速率的方法是建立在“地球上宇宙尘埃的年沉降量不变，且宇宙尘埃中的 Ir、Co 等特征元素的平均丰度值较恒定”这一原理的基础上，因此，只要对样品中的宇宙尘埃特征元素的丰度值进行分析，便可确定其沉积速率。该方

法不仅可以对地层的沉积速率进行分段计算，从而更好地研究沉积速率的变化，而且还可以避免传统研究沉积速率的方法(用地层厚度除以其时间跨度)由于测年不准、或时间跨度中包含无沉积间断时间等因素造成的误差。

(2) 与 Alvarez 的方法相比，利用岩石中 Co 的含量计算沉积速率具有如下几点优点：(a) Co 在陨石和宇宙尘中的丰度高(平均 $4\ 000 \times 10^{-6}$ ，INAA 的测试精度高)；(b) 考虑了物源对岩石样品中 Co 丰度值的影响；(c) Co 的溶解度低(0.0007%)，在水中的滞留时间较短。

(3) 由于沉积地层中的宇宙尘埃特征元素 Ir、Co 的含量还受到物源、生物富集、火山活动等因素的影响，因此，在用宇宙尘埃特征元素法计算沉积速率时，必须考虑扣除这些因素的影响值，以提高计算结果的准确性。

(4) 与陆相地层相比，海相地层的物源较稳定，且沉积速率较小，地层中来自宇宙尘埃的 Ir、Co 等特征元素的丰度值较高，易于测得，因此宇宙尘埃特征元素法在海相地层沉积速率的研究中，具有更高的准确性和实用性。

参 考 文 献

- 1 杨俊杰. 层序地层学基础理论[M]. 北京: 地质出版社, 1990. 80~97
- 2 熊继辉. 层序地层学及其在塔里木盆地石炭系研究中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 4~40
- 3 赖志云. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 37~44
- 4 吴智平, 李守军, 周瑞琪. 地层间断面的时间结构研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(6): 119~124
- 5 柴之芳, 祝汉民. 微量元素化学概论[M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 1~182
- 6 Alvarez L W, Alvarez W F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous/Tertiary extinction[J]. Science, 208(4448): 1 095~1 108
- 7 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987, 57~80
- 8 周瑞琪, 吴智平. 中子活化技术在层序地层学中的应用[J]. 地学前缘, 5(1~2): 143~146
- 9 Brown H J H. Environmental Chemistry of the Elements[M]. London: Academic Press, 1997, 21~93
- 10 周瑞琪, 陆永潮, 李思田等. 间断面缺失时间的计算问题[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 7~16
- 11 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境化分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993, 1~32

Using the Characteristic Elements from Meteoritic Must in Strata to Calculate Sedimentation Rate

WU Zhi-ping ZHOU Yao-qi

(Department of Resources Science, University of Petroleum, Dongying Shandong 257062)

Abstract

In the study of sedimentology, one of the most fundamental quantities that geoscientists seek to measure is the sedimentation rate, and it is crucial to a complete understanding of depositional process.

The meteoritic dust is a kind of extraterrestrial material with high abundance of iridium and cobalt. Most people think that the deposition quantity of meteoritic dust per year is almost constant on earth surface, and the average abundance of some characteristic elements such as Ir and Co in meteoritic dust are fixed, so there is a correlation between sedimentation rate and Ir (or Co) concentration. The abundance of Ir (or Co) in the sedimentary sample with low sedimentation rate is higher than in the sample with high sedimentation rate. According to this, the abundance of the element Ir or Co in sediment can be used to measure the deposition rate as a dating tool. Based on the previous work, the theory and method of using characteristic element from meteoritic dust to calculate sediment rate have been suggested, and the formulae can be particularly expressed as follows:

$$V_s = V(\text{Co}) / \rho \times [A(\text{Co}) - w(\text{Co}) \times A''(\text{Co})]$$

where V_s is the sedimentation rate of the sample which we want to calculate, $V(\text{Co})$ is the deposition rate of Co from meteoritic dust ($6.48 \times 10^{-7} \text{g/cm}^2 \text{a}$), ρ is the density of the sample, $A(\text{Co})$ is the total abundance of Co in the sample, $A''(\text{Co})$ is the abundance of Co in the source rock and $w(\text{Co})$ is contribution coefficient of Co from the terrigenous sources.

Using this method, the sedimentation rates of the Eocene - Neogene section in Linqu County of Shandong Province has been measured as a case in this paper.

Comparing with common methods, the method of using characteristic element from meteoritic dust to calculate sedimentation rate is more practical and accurate.

Key words sedimentation rate meteoritic dust Ir and Co