

LOWESS 在锶同位素地层学中的应用

张 萌¹, 黄思静¹, 谢国刚², 王麒翔², 侯 杰²

(1. 成都理工大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

[摘要] 锶同位素地层学是海相地层定年和全球对比的有效工具。为了建立全球范围的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值-年龄数据库, 就必须对大量的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值-年龄数据进行拟合, 寻找最佳方法用于缩小最佳拟合曲线的区间范围是目前锶同位素地层学所面临的难题之一。在各种统计与拟合方法中, LOWESS(局部加权回归散点修匀法)为研究计算全球标准锶曲线最佳拟合模式提供了一种非参数拟合的精妙方法, 拟合得出的最佳曲线能较好地作为海相地层的定年和进行全球对比的基础数据, 并具有较高的置信区间。

[关键词] 锶同位素地层学; 海相地层定年; 全球对比; LOWESS 拟合

[中图分类号] P597 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)02-0001-05

[作者简介] 张萌(1974-), 女, 四川成都人, 讲师, 现从事矿物学、岩石学、矿床学的教学与研究工作。

1 锶同位素地层学基本原理

锶同位素地层学(Strontium Isotope Stratigraphy, 简称 SIS), 由瑞典地质学家 Wickman^[1] 1948 年提出, 其基本原理是: 由于锶在海水中的残留时间(10^6 a)大大长于海水的混合时间(10^3 a), 因而在百万年的时间尺度上, 海洋中 Sr 元素在同位素组成上是均一的, 海洋储库的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值与经度、盆地性质或水深无关^[2], 地质历史中海水的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值只是时间的函数^[3], 它们随时间的变化对地质作用具有精确的示踪能力, 对地质事件具有高分辨时间尺度的标定。基于此, 地质历史中未经成岩蚀变的、代表原始海水组成的海相内源沉积物(主要是碳酸盐矿物, 也包括硫酸盐和磷酸盐)的锶同位素组成不仅可作为全球等时对比的有效手段, 同时对海相地层的定年也具有潜在的潜在价值^[4,5]。

2 LOWESS 在锶同位素地层学中应用

随着锶同位素地层学的不断发展, 人类对显生

宙以来原始海水锶同位素组成的变化趋势已有了大致了解。利用锶同位素组成可以解决海相沉积物的定年和全球对比、估计沉积间断层持续的时间、对主要地球化学周期预测进行论证、估计生物带的时间范围及其发展阶段等问题, 同时也能区分海相与非海相环境。

当锶同位素地层学用于定年时, 其所确定的地质年龄的可靠性取决于如下几个因素:

(1) 样品中原始 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 的保存情况。

(2) $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的测量精度, 目前, 国际上权威实验室对碳酸盐锶同位素比值的测量精度已达到 10^{-6} 数量级。

(3) $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随时间变化曲线斜率的确定, 斜率过大过小都会影响定年的精度。

(4) 作为定年基础资料的锶同位素演化曲线及数据中相应地质年龄的可靠性和精确度。

(5) 所采用的拟合曲线方法是否适于研究锶同位素数据, 并可用于推导海相沉积物的地质年龄, 这是文中所要评述的内容。

目前, 统计学中的局部加权回归散点修匀法(Locally Weighted regression Scatterplot Smoother, 简称 LOWESS)为研究和计算全球标准锶同位素曲线(Global Standard Strontium Curve, 简称 GSSC)的最佳拟合模式提供了一种非参数拟合的方法, 由此

[收稿日期] 2003-06-29

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40272059); 国家基础研究重大项目(2001CCA01800)

获得的最佳曲线可较好地用于海相地层的定年和进行全球等时对比。

2.1 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随时间变化的最佳拟合

Howarth 等 1997 年^[6] 对全球 1 849 个锶同位素数据用一种最佳拟合方式进行了拟合, 获得了 0 ~ 206 Ma B. P. 的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值-时间曲线及相应的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值-时间数据库, 在此基础上, Mcarthur 等 1998 年提供了该曲线和数据库的版本 2^[7], 2001 年 Mcarthur 等^[8] 增加了三叠纪和古生代的记录, 使锶同位素数据增加到了 3 366 个, 同时也使全球锶同位素演化曲线时间范围扩展到了 0 ~ 509 Ma B. P., 这是目前为止所提供的最新、最完善的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随着地质时间变化而变化的可供全球对比的演化曲线, 这种曲线正是运用局部加权回归散点修匀法 (LOWESS) 得出的。

大多数研究者在计算 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随时间演化的最佳拟合趋势时, 通常采用的是一些简单而相似的方法, 例如散点图和回归 (线性回归或多项式回归) 方程的参数估计, 或人为进行手工拟合^[9~11]。除手工方法外, 这些方法所基于的两变量之间的关系包括直线、二次抛物线、指数、对数和幂函数等。其实, 两个变量之间的关系远不止这些, 有时变量之间的关系是非常复杂和微妙的, 仅凭简单的直线、曲线参数方程模型很难达到理想的拟合效果, 这使得一些研究者不得不采用手工方法进行拟合。这些回归之所以叫做参数型的, 是因它们是通过参数估计得出的, 也就是说, 无论是线性 ($Y = a + bx$), 还是高阶多项式 ($Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$), 都是有系数的。如图 1a, 如果要与 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随地质时间变化的回归值相配合, 至少需要 6 阶多项式。参数回归在几个百万年的时间尺度上可能是相对恰当的拟合方式, 但更长时间尺度的全球锶同位素曲线不会是一个简单的多项式函数关系。因此, 在研究全球锶同位素比值与地质时间的关系时, 有必要引进非参数回归 (平滑方法) 的思想及处理方法。

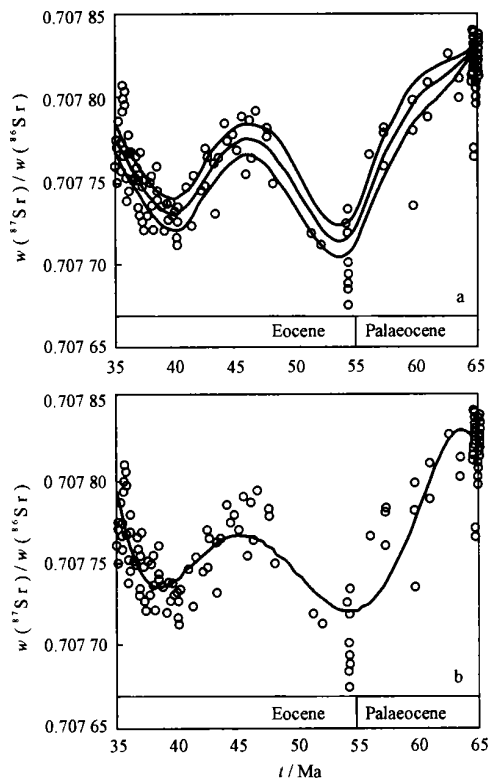
2.2 LOWESS 拟合方法的特点

非参数回归方法或称之为平滑方法, 与参数回归方法相反, 不采用现成的数学函数作为模型, 在统计领域中是较新的方法。采用非参数回归估计回归曲线其特点如下:

(1) 关于两个变量关系的探索是开放式的, 不

套用任何现成的数学函数。

(2) 所拟合的曲线可以很好地描述变量之间关系的细微变化。



a—6 阶多项式拟合; b—LOWESS 拟合 (包括预测均值及 95% 的置信区间); (据 Mcarthur 等, 2001)

图 1 35~65 Ma B. P. 全球海水锶同位素演化曲线

Fig. 1 Global marine strontium isotope curve for the period 35 to 65 Ma B. P.

(3) 非参数回归提供的是万能的拟合曲线, 不管多么复杂的曲线关系都能成功拟合。

(4) 虽然非参数回归没有参照固定的某个参数模型, 但仍能给出观察值的预测结果。

由此可见, 非参数回归与传统回归拟合相比则显得更加灵活机动, 可以对同一数据进行多次不同拟合, 以探索数据中可能隐藏的某种关系, 这是普通的回归拟合和散点图绝对做不到的。而且, 非参数拟合可以对数据中的任何模式或变量间的任何一种曲线关系进行拟合, 而传统回归却只能对个别的数据模式 (直线、二次曲线等) 进行拟合。实际上, 采用非参数回归拟合往往会带来意想不到的结果, 改变人们对数据进一步分析的思路 and 方向^[12]。

LOWESS 平滑方法, 即局部加权回归散点修匀法, 是 1979 年由 Cleveland 首创的^[13]。LOWESS 平滑方法就是使用迭代加权最小平方方法 (an iterative weight

least-squares method)来拟合一套数据点(至少需要 13 个数据点)。LOWESS 是一种非参数拟合的统计学方法, 可对一定百分比的数据进行拟合, 一般而言, 其默认值为 50%, 迭代步数默认值常为 3^[4]。同时, LOWESS 拟合还可以根据数据变化的实际规律, 进行局部直线拟合或者局部曲线拟合。

LOWESS 拟合的灵活性在预测分析及探索性分析中极具价值, 在利用锶同位素地层学确定地层年龄的过程中也得到成功地应用^[5]。这种 LOWESS 平滑方法尤其突出的价值是能抵抗在拟合中由非正常数据(也就是明显的异常值)所引起的偏差, 并且在建立数学模型时只需考虑 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值与地质时间的基本形式, 而不需要任何假设(图 1b)。

2.3 LOWESS 拟合曲线的应用

McArthur et al. (2001)^[8] 用最佳拟合方式 (LOWESS 拟合)对 509 Ma B. P. 以来海相地层的锶同位素数据进行了拟合, 获得了不同时代海水的锶同位素演化曲线, 这是到目前为止, 国际上最为完整、对海水代表性最好的锶同位素演化曲线, 也是海相地层定年和进行全球对比所必须的重要基础资料。我们对 McArthur 等(2001)^[8] LOWESS 拟合曲线均值部分进行了数据化, 获得了新生代全球标准锶同位素-年龄数据库及相应的演化趋势图(图 2), 供新生代海相地层定年和进行全球对比时使用。

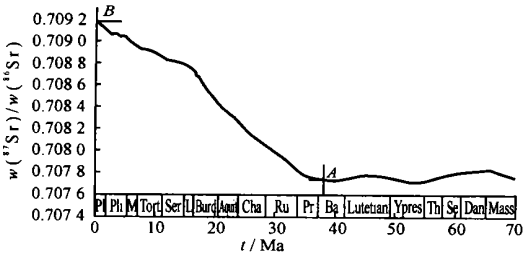


图 2 0~70 Ma B. P. 全球标准锶同位素演化曲线

Fig. 2 Global standard strontium isotope curve for the period 0 to 70 Ma B. P.

如表 1 所示可通过新生代未知年代地层中海相内源沉积物的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值, 利用已建立的代表原始海水的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值-时间曲线或锶同位素-时间数据库^[8], 从而解决地层中一些关键点的年龄问题。

就演化趋势和控制因素而言, 70 Ma B. P. 全球海水锶同位素演化曲线(图 2)具有以下主要特征:

①70~38 Ma B. P. 区间海水 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值处于相对稳定阶段; ②38 Ma B. P. 以后 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的持续单调上升, 即从 38 Ma B. P. 的 0.707 73(见图 2 中 A 点)上升到 0 Ma B. P. (现在)的 0.709 175(见图 2 中 B 点); ③20~15 Ma B. P. 是海水 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值上升最迅速的时期(即曲线斜率相对较大的区间); ④15 Ma B. P. 附近 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随时间的上升速度明显下降(即曲线斜率突然变小)。综合已有的研究成果, 70 Ma B. P. 全球海水锶同位素演化趋势主要受如下因素控制:

表 1 0~70 Ma B. P. 全球标准锶同位素演化曲线地层分界点坐标

Table 1 Coordinates of cutting points for the global standard strontium isotope curve from 0 to 70 Ma B. P.

分界点	地质时间/ Ma $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$	
	x	y
更新世/上新世	1.70	0.709 100
上新世/梅辛期	5.20	0.709 022
梅辛期/托尔通期	7.02	0.708 948
托尔通期/塞拉瓦尔期	11.23	0.708 845
塞拉瓦尔期/兰哥期	14.77	0.708 790
兰哥期/布尔迪加尔期	16.39	0.708 721
布尔迪加尔期/阿启坦期	20.43	0.708 438
阿启坦期/夏特期	23.84	0.708 264
夏特期/鲁培尔期	28.44	0.708 043
鲁培尔期/普利亚本期	33.71	0.707 820
普利亚本期/巴尔通期	37.09	0.707 751
巴尔通期/鲁帝特期	41.55	0.707 743
鲁帝特期/伊普里斯期	49.14	0.707 757
伊普里斯期/坦尼特期	54.92	0.707 725
坦尼特期/塞兰特期	57.95	0.707 776
塞兰特期/丹尼期	60.95	0.707 807
丹尼期/马斯特里赫特期	65.11	0.707 829

(1)38 Ma B. P. 以来海水 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的持续上升可能与喜马拉雅—青藏高原隆升^[13]所引起的风化速率增加有关, 风化速率的增加导致经大陆河流进入海水中的放射成因 Sr 通量的增加, 从而提高海水的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值。

(2)在约 20~15 Ma B. P. 处锶同位素演化曲线变陡, 达到新生代海洋 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值上升最迅速的时期。陈骏(2001)等^[16]认为: 在 20~15 Ma B. P. 有一个清楚的年代分布峰与西藏南部的研究所揭示出的一个迅速侵蚀时期的时代相符, 反映了这一时期的迅速去顶(unroofing)事件已经广泛地发生。由此可见, 喜马拉雅山迅速侵蚀去顶事件发生在约 20~15 Ma B. P., 由此所引起的大陆风化速率的迅

速增加是导致新生代锶同位素演化曲线斜率变大的直接原因。

(3) 在 15 Ma B.P. 处锶同位素演化曲线变缓, Lear 等 (2000)^[17] 注意到曲线的变缓对应着海相锶同位素的正偏, 说明全球气温的下降, 并与冰川体积的增加一致, 从而降低了化学风化的速率, 使经大陆河流进入海水中的放射成因 Sr 通量减少。

总的来说, 新生代海水 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的变化主要与西藏喜马拉雅隆升和局部时间段温度的降低所导致的冰川体积变化有关 (或两种因素共同作用的结果)。当然, 笔者只是对 LOWESS 拟合曲线的应用作了一些简单的尝试, 因此还可能有一些因素的影响引起新生代海洋 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的变化, 在此就不作探讨。由于地质历史中长期旋回上锶同位素的演化受全球地质事件的控制, 因此, 由 LOWESS 拟合的全球标准锶同位素演化曲线对全球远程对比具有重要的价值。

2.4 LOWESS 应用中应注意的问题

2.4.1 变量的选择

过去, 人们对地质时间和 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值两项中哪一项是因变量、哪一项是自变量曾产生过许多争议, 因为前者会由后者回归。根据海水锶同位素组成用于海相地层定年的基本原理, 可以知道在地质历史中海水的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值是时间的函数^[3], 即海水中锶同位素的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值是随着时间而变化的。因此, 在拟合过程中, 应把地质时间看作自变量, 而把 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值当成因变量。

2.4.2 样品数据的选择

在某段地质时间段建立关于 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的局部加权回归散点图修匀模型时, 数据点的采集是至关重要的。由于分析测试技术和支撑锶同位素地层学的生物地层学基础会随时间而不断发展, 因此要对任何时间所公布的该地质时间段上的全部可利用的数据进行专业分析和筛选, 尽量挑选最新公布数据。另外对样品数据的专业分析和筛选还包括对海相碳酸盐样品成岩蚀变性及其对海水信息保存性的评估, 评估标准主要有样品的 $w(\text{Sr})$ 含量、 $w(\text{Mn})/w(\text{Sr})$ 比值和阴极发光性等。

在研究全球锶同位素演化曲线及建立相应的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随地质时间而变化的数据库时, 首先要对所有样品的记录值 ($w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$)

比值及相应的年龄值) 进行专业分析和筛选, 排除那些因取样、测试分析、成岩蚀变等外在因素所造成的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的异常值, 再采用最佳的数学拟合方法, 减小数据本身所产生的内在干扰背景值。只有这样才能使所拟合的全球锶同位素演化曲线更符合地质事实, 更具有全球对比意义。

2.4.3 LOWESS 回归模型所造成的误差

因为随机误差存在于样本保护因素、样本的二次抽样及所测 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的分析误差中, 所以这些误差也相应地被带入到局部加权回归拟合参数的预测值以及全球修匀曲线中。全球标准锶同位素曲线的计算给出了随时间变化而变化的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 均值的最佳估计。反之, 如果已知经实验所测得出的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值, 也可通过此相关性得出相应的年龄预测值。虽然目前不能量化用以计算全球锶同位素曲线的时间误差, 但是 LOWESS 平滑方法仍是研究全球标准锶同位素演化曲线最为适合的非参数统计模型。

3 结论

在研究全球海水锶同位素演化曲线及建立相应的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值随地质时间而变化的数据库时, 特别要注意的是: 首先要对样品记录值进行专业的分析和筛选, 排除那些因取样、测试分析、成岩蚀变等外在因素所造成的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 的异常值, 再采用最佳的数学拟合方法, 减小数据本身所产生的内在干扰背景值。只有这样才能使所拟合的全球标准锶同位素演化曲线更符合地质事实, 具有更强地全球对比意义。目前, 统计学中的 LOWESS 为研究和计算全球标准锶同位素演化曲线最佳拟合模式提供了一种非参数拟合的精妙方法, 通过这种最佳曲线就能由已测出的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值来得出相应的地质年龄。

尽管锶同位素地层学在很多方面还存在着尚未解决的问题, 但是锶同位素地层学作为一种重要的手段在研究海相地层定年和全球对比等问题上已得到国外学者的广泛关注, 在不久的将来定会成为继生物地层学、磁性地层学以及直接测年法 (例如 Ar/Ar 法) 之后研究地层学的基本工具之一。在我国, 锶同位素地层学的应用研究才刚刚起步, 特别是在数据积累以及研究计算全球标准锶同位素曲线最佳拟合模型问题上。目前, 我国海相地层锶

同位素数据的积累还十分有限, 有关拟合模型的研究还是空白, 需要人们充分认识到锶同位素曲线在海相地层定年和进行全球对比中的潜在价值, 不断积累、更新和完善显生宙以来的锶同位素数据, 找出最佳拟合方式, 建立和完善演化曲线, 为锶同位素地层学的应用研究打下坚实的基础。

[参 考 文 献]

[1] Wickman F E. Isotope ratios: a clue to the age of certain Marine sediments[J]. *Geol*, 1948, 56: 61 ~ 66.

[2] Hodell D A, Mead G A and Mueller P A. Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8 Ma to present): implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to the oceans[J]. *Chem Geol (Isot Geosci Sect)*, 1990, 80: 291 ~ 307.

[3] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展[J]. *地球科学进展* 2001, 16(2): 194 ~ 200.

[4] McArthur J M, Kennedy W J, Chen M, et al. Strontium isotope stratigraphy for the Late Cretaceous: direct numerical age calibration of the Sr-isotope curve for the U. S. Western interior Seaway[J]. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 1994, 108: 95 ~ 119.

[5] McArthur J M, Kennedy W J, Chen M, et al. Using strontium isotopes to determine the age and origin of gypsum and anhydrite beds [J]. *Geol*, 1994, 106: 1 ~ 17.

[6] Howarth Richard J, McArthur John M. Statistics for strontium isotope stratigraphy: A robust LOWESS fit to the Marine sr-isotope curve for 0 to 206 Ma with look-up table for derivation of numeric age[J]. *Journal of Geology*, 1997, 105(4): 441 ~ 456.

[7] McArthur J M, Howarth R J. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS V2. A revised best-fit to the Marine Sr-isotope curve

for 0 to 206 Ma with a revised look-up table for derivation of numeric age[J]. *Am Assoc of Petro Geologists Annual Meeting[M]*. (Salt Lake City, Utah, 1988. 17 ~ 20), Tulsa Okla AAPG.

[8] McArthur J M, Howarth R J, Bailey T R. Strontium Isotope Stratigraphy: LOWESS Version 3: Best Fit to the Marine Sr-Isotope Curve for 0 ~ 509 Ma and Accompanying Look-up Table for Deriving Numerical Age[J]. *Journal of Geology*, 2001, 109: 155 ~ 170.

[9] Denison R E, Koelpnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Mississippian, Pennsylvanian and Permian seawater $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ curve[J]. *Chem Geol* 1994, 112: 145 ~ 167.

[10] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海平面变化[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 481 ~ 487.

[11] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 龙门山泥盆纪锶同位素演化曲线的全球对比及海相地层的定年[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(9): 945 ~ 951.

[12] 张颖. 统计学中回归分析及相关内容的教改思考——兼介绍 LOESS 回归[J]. *统计与信息论坛*, 2000, 15(2): 35 ~ 37.

[13] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplot[J]. *J Amer Statist Assoc*, 1979, 74: 829 ~ 836.

[14] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

[15] Harris N. Significance of weathering Himalayan meta-sedimentary rocks and leucogranites for the Sr isotope evolution of seawater during the early Miocene[J]. *Geology*, 1995, 23: 795 ~ 798.

[16] 陈骏, 杨杰东, 李春雷. 大陆风化与全球气候变化[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 399 ~ 405.

[17] Lear C H, Elderfield H, Wilson P. Cenozoic deep-sea temperature and global ice volumes from Mg/Ca in benthic foraminiferal calcite[J]. *Science*, 2000, 287: 269 ~ 272.

Application of LOWESS fit to strontium isotope stratigraphy

ZHANG Meng¹, HUANG Si-jing¹, XIE Guo-gang², WANG Qi-xiang², HOU Jie²

(1. State Key Laboratory of Oil/ Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract As an essential tool, the Strontium Isotope Stratigraphy(SIS) can be used to date and correlate marine sediments. Many geological events can be explained with the Global Standard Strontium Curve(GSSC), which representing the evolution of marine $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ through numerical times. The GSSC has highly important theoretical direction and real application in dating and correlating marine sediments. Therefore, the isotopic stratigraphers are trying to find out the optimum manner to shorten the section dimension of the best fitting curve. According to the position of $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ on GSSC, we will assign the unknown estimation to numerical age. Compared with the measured value of $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$, we can also gather all influence factors. LOWESS fit on statistics provides a shrewd manner to research and figure the optimum fitting mode of GSSC. When assigning numerical ages to sediments or estimating the duration of a biozone or a hiatus in sedimentation, the task is made both easier and less prone to error by using the LOWESS fit curve, which allows quick and easy conversion from $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ to numerical age. It is clear that a great deal of improvement needs to be made to most of the Phanerozoic $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ curve if SIS is to realize its true potential for dating and correlating rocks.

Key words strontium isotope stratigraphy; dating marine sediments; global correlation; LOWESS fit

[英文审定: 杨家喜]