

# 基于 EMD 和数学形态学的多环芳烃光谱去噪

苑媛媛, 王书涛, 王玉田, 王志芳, 杨 哲

燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066000

**摘要** 基于多环芳烃中苯并[k]荧蒽(BkF)的强荧光特性, 构建了荧光检测实验系统, 并制备了 10 个不同浓度的 BkF 甲醇溶液样品, 分析了样品荧光特性。为了更好地进行定性和定量分析, 采用经验模态分解(EMD)改进阈值法结合数学形态学对荧光光谱信号进行去噪处理, 并与 EMD 阈值去噪法进行对比。结果表明, 提出的方法使去噪后的荧光光谱更加平滑, 荧光强度与样品浓度的线性相关系数更高, 达到 0.99746; 信噪比有所提高; 原始信号与去噪后信号的均方误差由 0.0053 降低至 0.0012。提出的方法去噪效果显著, 有效地提高了光谱的分析精度, 为荧光光谱预处理提供了一种新方法。

**关键词** 光谱学; 多环芳烃; 经验模态分解; 数学形态学; 去噪

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0630001

## Denoising of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Spectra Based on EMD and Mathematical Morphology

Yuan Yuanyuan, Wang Shutao, Wang Yutian, Wang Zhifang, Yang Zhe

*Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province,*

*Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066000, China*

**Abstract** Based on the strong fluorescence property of polycyclic aromatic hydrocarbons benzo[k] fluoranthene (BkF), a fluorescence detection system is constructed and ten BkF methanol solution samples with different concentrations are prepared to analyze their fluorescence characteristics. In order to proceed qualitative and quantitative analyses well, the improved empirical mode decomposition (EMD) threshold method combined with mathematical morphology is applied to denoising the fluorescence spectrum, which is compared with the EMD threshold denoising method. The results show that the proposed method can smooth the denoised fluorescence spectra preferably, make the linear correlation coefficient between the fluorescence intensity and the sample concentration high and reach 0.99746, make the signal-to-noise ratio increase, and make the mean square error between the original signal and the denoised signal decrease from 0.0053 to 0.0012. The proposed method possesses a remarkable denoising effect, which effectively improves the analytical precision of spectra and provides a new method for preprocessing fluorescence spectra.

**Key words** spectroscopy; polycyclic aromatic hydrocarbons; empirical mode decomposition; mathematical morphology; denoising

**OCIS codes** 300.2530; 070.4790; 300.6170; 300.6390

## 1 引 言

多环芳烃(PAHs)是一类包含两个或两个以上芳香环的有机化合物, 是常见的环境有机污染物之一。它们的基因具有毒性、致癌性和致突变性, 对人体健康和生态环境造成了巨大的威胁<sup>[1]</sup>。多环芳烃广泛存在

**收稿日期:** 2016-12-09; **收到修改稿日期:** 2017-02-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471312, 61201110)、河北省自然科学基金(F2015203240)

**作者简介:** 苑媛媛(1991—), 女, 博士研究生, 主要从事光电检测、环境监测方面的研究。

E-mail: ysuYuanyuan@163.com

**导师简介:** 王书涛(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测、环境多参量检测、环境监测等方面的研究。

E-mail: wangshutao@ysu.edu.cn

于大气、水体、土壤等自然环境中。大气中的 PAHs 主要来源于煤、石油等化石燃料的不完全燃烧；水中的 PAHs 主要来源于倾倒入河流中的生活垃圾以及排放的工业废水等；土壤中的 PAHs 主要来源于堆放的垃圾、有机化合物的不完全燃烧、油类污染等，油田周边地区的土壤污染尤为严重。PAHs 具有半挥发性，且脂溶性高，因此更易富集在生物体脂肪组织中。PAHs 可随着食物链的延续而累积，最终会严重威胁人类健康<sup>[2]</sup>。

目前，针对多环芳烃的检测方法主要有高效液相色谱法(HPLC)、气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)、毛细管电泳分析法、表面增强拉曼散射光谱检测以及荧光法等<sup>[3-7]</sup>。本文采用三维荧光分析技术对多环芳烃中的苯并[k]荧蒽(BkF)进行荧光特性分析，但受仪器以及外界环境的限制，荧光信号往往包含一定的噪声，为了更精确地进行定性和定量分析，滤除荧光光谱中所包含的噪声是关键技术之一<sup>[8]</sup>。光谱去噪的方法主要有小波包变换、归一化最小自适应滤波(NLMS)、经验模态分解(EMD)等<sup>[9-11]</sup>。EMD 可以把数据分解成具有物理意义的一组内蕴模态函数(IMF)分量<sup>[12]</sup>，在一定程度上克服了小波变换的不足，是一种新的完全数据驱动的自适应信号分解算法。对于非线性和非平稳信号，EMD 分解结果比小波分解结果更清晰、准确，获得的去噪效果也更好，分解出的 IMF 能够充分保留信号本身所固有的非线性和非平稳特征<sup>[13]</sup>，在地球物理、机械故障诊断、图像处理、光谱去噪等<sup>[13-17]</sup>诸多领域具有广泛的应用。数学形态学利用形态学算法和工具，使滤波简单易实现，计算效率较高。本文采用数学形态学来评估 EMD 的每一层 IMF 的阈值，从而实现光谱的有效去噪，这为光谱去噪提供了一种新方法。

## 2 实 验

### 2.1 荧光检测实验系统

荧光光谱检测系统主要由激发光源、发射器件、样品池、光学探测器件以及显示装置等组成<sup>[18]</sup>，具体结构如图 1 所示。450 W 高压氙灯发射激发光，经光栅激发单色器滤光，波长大于 200 nm 的紫外光通过滤波器后照射到样品池；样品池中的荧光物质产生的荧光经发射单色器滤除杂光，获得的单色荧光照射到光电倍增管(PMT)；光电倍增管将荧光信号转变为电信号，放大器对该电信号进行放大，最后经模拟/数字(A/D)转换将电信号转变为数字信号，信号传输到达计算机进行处理。

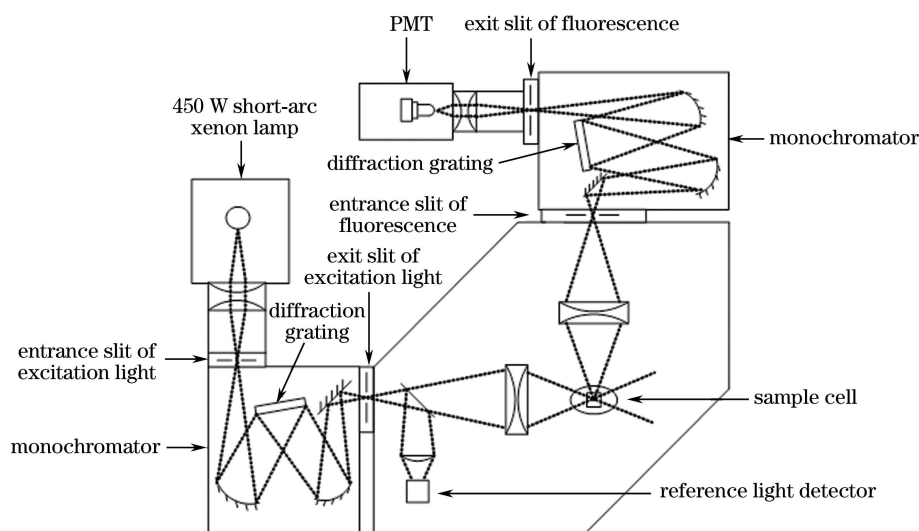


图 1 荧光检测实验系统

Fig. 1 Experimental set-up of fluorescence detection

### 2.2 样品制备

苯并[k]荧蒽标准品由中国计量科学研究院提供，质量浓度为 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，以甲醇为溶剂，分别配制 10 组不同浓度的 BkF 溶液，其质量浓度分别为 0.001, 0.004, 0.005, 0.008, 0.010, 0.020, 0.040, 0.050, 0.080, 0.100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，作为待测样品。

### 2.3 实验过程

实验中,激发波长设置为 200~600 nm,发射波长设置为 230~630 nm,通过扫描甲醇的荧光光谱,可得出甲醇的最佳激发波长为 300 nm,最佳发射波长在 320~370 nm 之间,而在发射波长 500~630 nm 范围内有比较明显的瑞利散射。为了消除溶剂荧光峰及瑞利散射的影响,根据 BkF 的荧光特性,将 BkF 激发和发射波长范围分别设置为 290~350 nm 和 380~480 nm,步长为 2 nm。以质量浓度为 0.008  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的 BkF 为例进行光谱去噪分析,其三维荧光光谱和等高线光谱如图 2 所示。

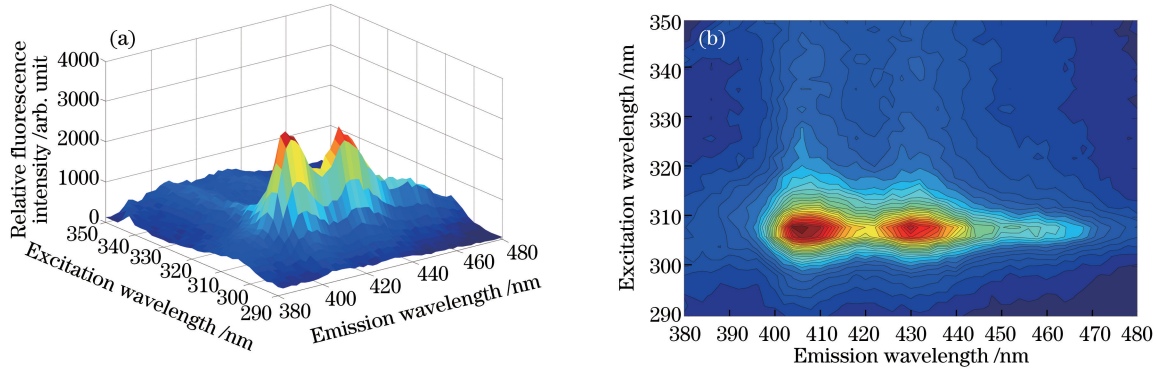


图 2 BkF 的荧光光谱图。(a)三维荧光光谱;(b)等高线光谱图

Fig. 2 Fluorescence spectra of BkF. (a) Three-dimensional fluorescence spectra; (b) contours of fluorescence spectra

由图 2 可知,BkF 存在两个荧光特征峰,分别位于  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 306 \text{ nm}/406 \text{ nm}$  和  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 306 \text{ nm}/430 \text{ nm}$  处( $\lambda_{\text{ex}}$ 为激发波长, $\lambda_{\text{em}}$ 为发射波长)。甲醇的最佳发射波长为 320~370 nm,对 BkF 的荧光峰没有干扰,但由于内外环境和设备本身的干扰,实验数据往往包含一定量的噪声。为了对物质进行精确的定性和定量分析,需要对数据进行去噪处理。采用 EMD 的改进阈值与数学形态学相结合的方法对 BkF 的荧光光谱进行一定的去噪处理,以便更好地对其进行定性和定量分析。

## 3 数据分析

### 3.1 EMD 的阈值去噪

#### 3.1.1 EMD 基本原理

EMD 按照信号成分的频率和幅值将信号分解成一系列具有物理意义的本征模态函数即 IMF<sup>[19]</sup>。分解得到的每层 IMF 须满足:1)在整个信号上,极值点和过零点的个数相等或至多相差 1;2)在任意点处,由极大值和极小值构成的上下包络线的均值为 0。EMD 算法的流程图如图 3 所示,具体步骤如下。

1) 找出原始信号  $x(t)$  的所有极大值和极小值,通过三次样条函数分别拟合出极大值包络线  $e_+(t)$  和极小值包络线  $e_-(t)$ ,从而得到原信号的均值包络线  $m(t)$ ,即

$$m(t) = \frac{e_+(t) + e_-(t)}{2}, \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

2) 将原信号序列减去  $m(t)$ ,得到一个去掉低频成分的新的数据序列  $h(t)$ ,即

$$h(t) = x(t) - m(t). \quad (2)$$

3) 若  $h(t)$  满足 IMF 的两个条件,则  $c_i(t) = h(t)$  为一个 IMF 分量,转至步骤 4);否则,  $x(t) = h(t)$ ,回到步骤 1),重复上述过程,直至满足条件。

4) 用原信号  $x(t)$  减去  $c_i(t)$  可得到去掉高频成分的新信号  $m_i(t)$ ,即

$$m_i(t) = x(t) - c_i(t). \quad (3)$$

5) 对  $m_i(t)$  重复上述过程,直到得到的  $m_i(t)$  为单调函数或常量,则冗余量  $r(t) = m_i(t)$ ,EMD 结束。

最终,原信号  $x(t)$  经 EMD 后得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t), \quad (4)$$

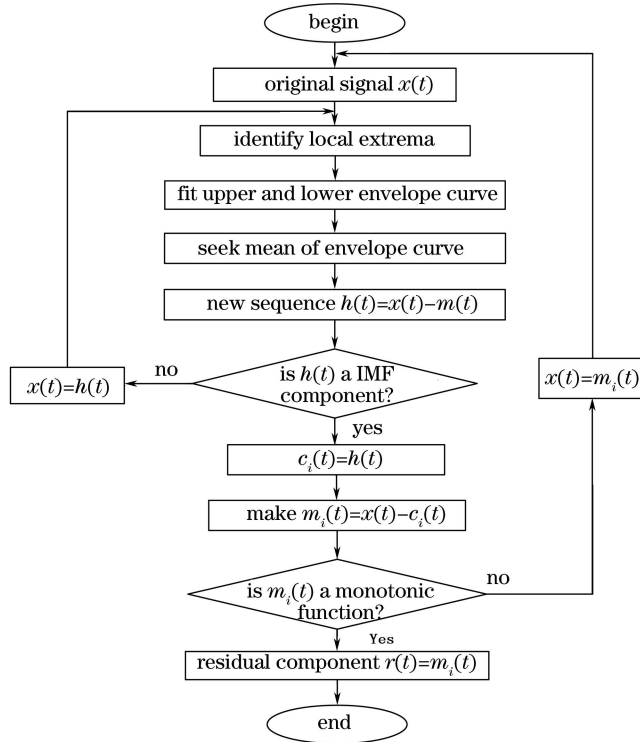


图 3 经验模态分解流程图

Fig. 3 Flow chart of empirical mode decomposition

式中  $r(t)$  为趋势项, 表示信号均值或平均趋势。经 EMD 后得到的  $n$  个本征模态函数和冗余量相加, 可实现信号重构。

### 3.1.2 基于 EMD 的改进阈值去噪

含噪光谱经 EMD 后得到的各个 IMF 分量不仅包含真实光谱信息, 也包含一定的噪声, 出现噪声和信号混叠现象。通过设置阈值可达到去噪的目的, 其中硬阈值和软阈值是两种常用的方法。信号  $x(t)$  经过 EMD 后得到  $n$  个 IMF 分量  $c_i(t)$ , 可以选用一个合适的阈值对每一层的 IMF 分量  $c_i(t)$  进行截取变成  $\hat{c}_i(t)$ , 然后再用得到的  $\hat{c}_i(t)$  重构信号。

1) 硬阈值去噪。对每一层 IMF 选取合适的阈值  $\lambda$ , 若信号比设定的阈值小, 则判定为噪声信号, 并赋值为 0; 若信号比设定的阈值大, 则判定为有用信号, 值不变。数学公式为

$$\hat{c}(t) = \begin{cases} c(t), & |c(t)| \geq \lambda \\ 0, & |c(t)| < \lambda \end{cases} \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

硬阈值去噪的误差较小, 但在阈值临界点处容易出现间断和寄生振荡。

2) 软阈值去噪。对每一层 IMF 选取合适的阈值  $\lambda$ , 若信号比设定的阈值小, 判定为噪声信号, 并赋值为 0; 若信号比设定的阈值大, 则判定为有用信号, 先取绝对值, 然后减去阈值本身。数学公式为

$$\hat{c}(t) = \begin{cases} [ |c(t)| - \lambda ] \operatorname{sgn}[c(t)], & |c(t)| \geq \lambda \\ 0, & |c(t)| < \lambda \end{cases} \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

软阈值去噪有很好的连续性, 但误差较大。

3) 本文结合硬阈值和软阈值去噪的优点, 得到改进阈值去噪方法, 利用圆弧在阈值临界点处进行平滑过渡, 数学公式为

$$\hat{c}(t) = \begin{cases} 0, & |c(t)| < \frac{\lambda}{2} \\ \left\{ \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - \left\{c(t) - \frac{\lambda}{2} \operatorname{sgn}[c(t)]\right\}^2} \right\} \operatorname{sgn}[c(t)], & \frac{\lambda}{2} \leq |c(t)| < \lambda \\ \left\{ \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}+1}{2}\lambda\right)^2 - \left\{c(t) - \frac{\sqrt{2}+3}{2}\lambda \operatorname{sgn}[c(t)]\right\}^2} \right\} \operatorname{sgn}[c(t)], & \lambda \leq |c(t)| < \frac{4+\sqrt{2}}{4}\lambda \\ c(t), & |c(t)| \geq \frac{4+\sqrt{2}}{4}\lambda \end{cases} \quad (7)$$

改进阈值去噪方法不仅减少了一些寄生振荡,也提高了重构信号的信噪比。硬阈值、软阈值、改进阈值去噪方法结果如图 4 所示。

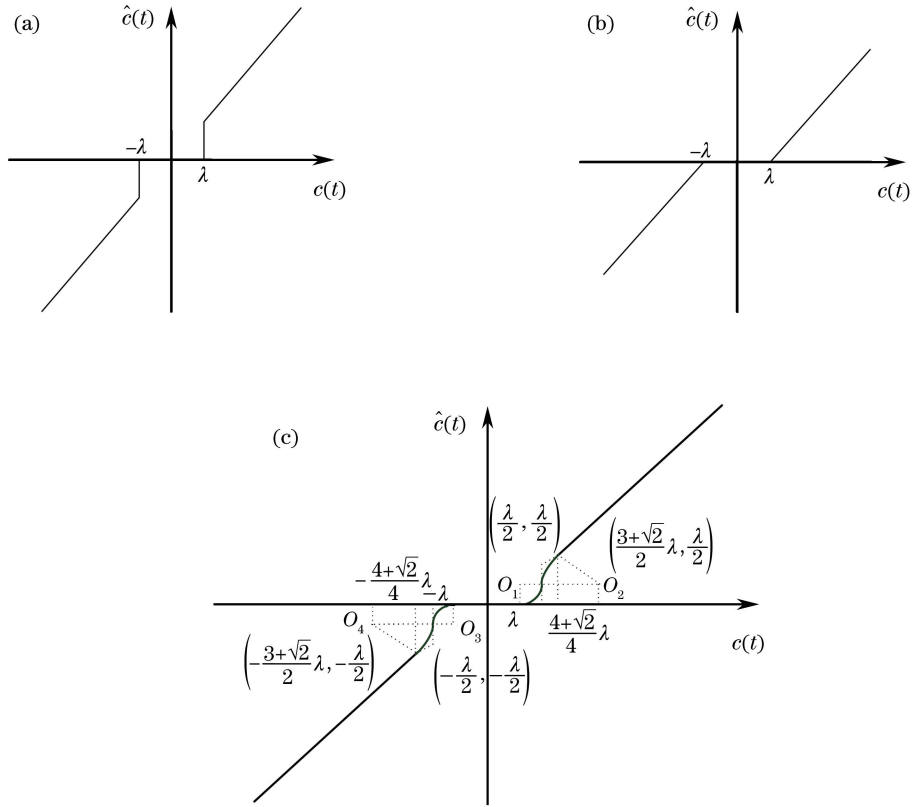


图 4 (a)硬阈值去噪;(b)软阈值去噪;(c)改进阈值去噪

Fig. 4 (a) Hard threshold denoising; (b) soft threshold denoising; (c) improved threshold denoising

### 3.2 数学形态学结合 EMD 的改进阈值去噪

在基于 EMD 的阈值去噪过程中,阈值的选择是关键。因为每一层 IMF 都有不同的噪声强度,所以对每一层 IMF 都选取合适的阈值。若阈值选择过小,去噪后的光谱图将会包含较多的噪声信号;若阈值过大,则有用信息会被过滤掉。因此,要评估每一层 IMF 的噪声强度以选取合适的阈值。本文采用数学形态学来提取每一层 IMF 的峰谷信息并进行噪声评估,以选取合适的阈值。

#### 3.2.1 数学形态学的基本原理

数学形态学是一种重要的非线性滤波方法,将起到滤波窗作用的结构元素作为探针,与待分析信号的形态特征进行匹配,当信号局部形态特征和结构元素相匹配时,信息才会保留下来,从而实现滤波和特征提取<sup>[20]</sup>。数学形态学方法具有原理简单、计算效率高、参数设置少等优点。

若  $f(n)$  为一维离散信号,其定义域为  $F = \{1, 2, \dots, N\}$ ; 结构元素  $g(m)$  为一维离散信号,其定义域为

$G = \{1, 2, \dots, M\}$ , 且  $M \ll N$ 。则  $f(n)$  关于  $g(m)$  的腐蚀和膨胀运算分别定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+m) - g(m)\}, m \in G, \quad (8)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\}, m \in G, \quad (9)$$

式中  $\ominus$  和  $\oplus$  分别表示腐蚀和膨胀。

腐蚀和膨胀的计算描述如下:逐点平移结构元素,当结构元素原点与待分析信号的某一点重合时,将落在  $G$  内的待分析信号幅值和结构元素幅值相减(相加),对计算结果取最小(最大),即为该点的腐蚀(膨胀)结果<sup>[21]</sup>。

$f(n)$  关于  $g(m)$  的开运算和闭运算分别定义为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n), \quad (10)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n), \quad (11)$$

式中  $\circ$  和  $\bullet$  分别表示开运算和闭运算。

形态开运算是对同一结构元素进行先腐蚀后膨胀,可消除目标信号中的细节和毛刺,使目标信号的轮廓光滑,滤除尖峰,抑制正脉冲噪声;形态闭运算是对同一结构元素进行先膨胀后腐蚀,目的是填平目标信号中的小洞及裂缝,滤除低谷噪声,从而补偿谷底,抑制负脉冲噪声<sup>[22]</sup>。

### 3.2.2 利用数学形态学方法估计噪声阈值

采用形态开-闭和闭-开运算结合来实现数学形态学滤波,滤波后的信号为

$$M_{fg}(f) = \frac{(f \circ g) \bullet g + (f \bullet g) \circ g}{2}. \quad (12)$$

峰谷信息可通过原始信号减去滤波后的信号获得:

$$P_{\text{enkg}}(f) = f - M_{fg}(f) = f - \frac{(f \circ g) \bullet g + (f \bullet g) \circ g}{2}. \quad (13)$$

选取线性结构元素  $g = \{0, 0, \dots, 0\}$  来获取每一层 IMF 的峰谷信息,进而计算得到估计噪声的方差  $\sigma^2$ 。统计资料表明,99.74%的高斯白噪声集中在  $[-3\sigma, 3\sigma]$  之间。相关研究表明,每一层 IMF 的噪声分布与原始信号的高斯白噪声分布一致。因此,采用  $\lambda = 3\sigma$  作为每一层 IMF 的阈值,具体阈值确定流程如图 5 所示。

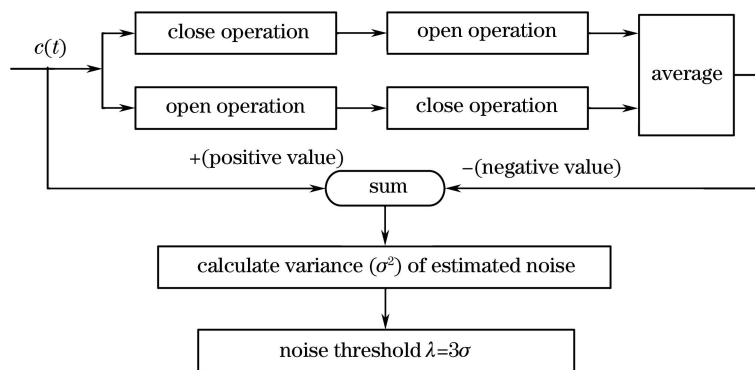


图 5 每一层 IMF 噪声阈值估计流程图

Fig. 5 Flow chart of noise threshold estimation for each IMF

### 3.3 EMD 改进阈值结合数学形态学对 BkF 荧光光谱进行去噪处理

EMD 结合数学形态学对多环芳烃荧光光谱去噪的流程如图 6 所示。首先,用 EMD 方法分解含噪声的苯并[k]荧蒽荧光光谱;然后,用数学形态学提取分解后每一层 IMF 的峰谷信息,峰谷信息可评估每一层 IMF 的噪声,采用噪声方差  $\sigma^2$  来评估噪声强度,并选取  $\lambda = 3\sigma$  作为每一层 IMF 的阈值,得到阈值后,每一层 IMF 可实现改进阈值去噪;最后,对已处理的每一层 IMF 进行信号重构,实现对光谱的去噪。

采用三维荧光对物质进行定量分析时,一般选取最佳激发波长对应的发射光谱。以  $0.008 \mu\text{g/mL}$  的 BkF 为例,其最佳激发波长  $\lambda_{\text{ex}} = 306 \text{ nm}$  时的二维发射荧光光谱如图 7 所示。由光谱图可以看出其包含大量的噪声,对其进行 EMD 后的结果如图 8 所示,仅采用 EMD 改进阈值去噪的结果如图 9 所示,采用本文提出的数学形态学结合 EMD 改进阈值去噪后的光谱如图 10 所示。通过对比可知,本文方法极大程度上去除

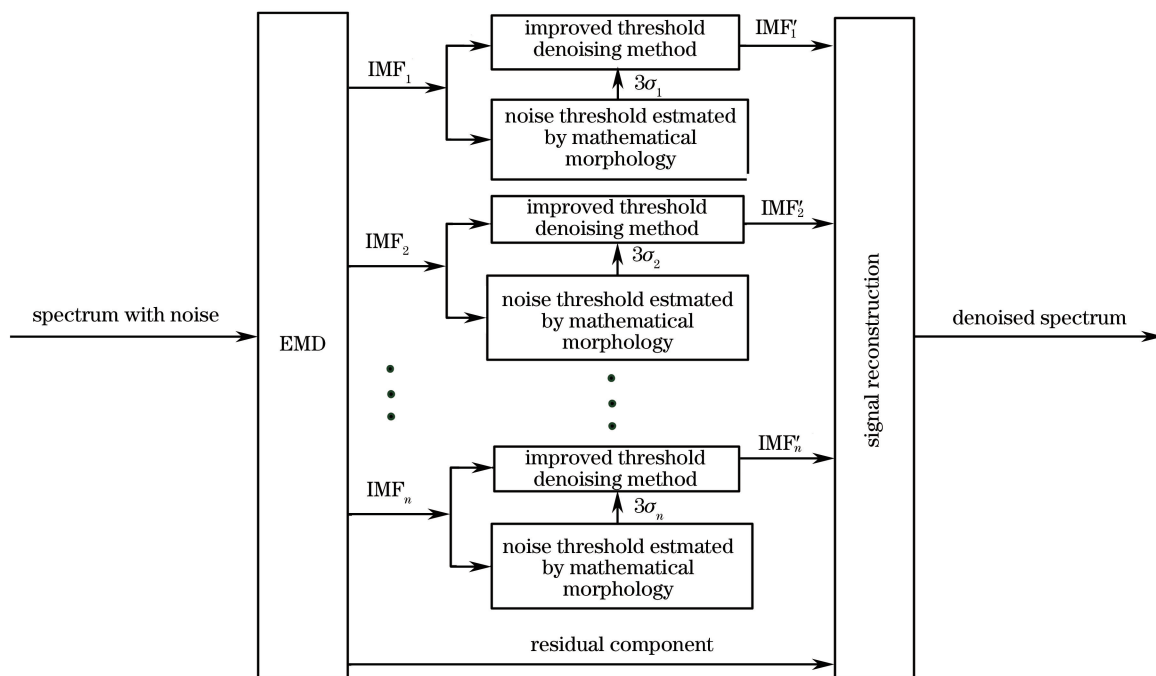


图 6 EMD 结合数学形态学对苯并[k]荧蒽光谱去噪的流程图

Fig. 6 Flow chart of BkF fluorescence spectrum denoising with EMD and mathematical morphology

了原始信号中所包含的噪声成分,使光谱更加圆滑,峰值也较为明显,而 EMD 改进阈值去噪并没有完全去除噪声,无法更好地提取光谱信息。

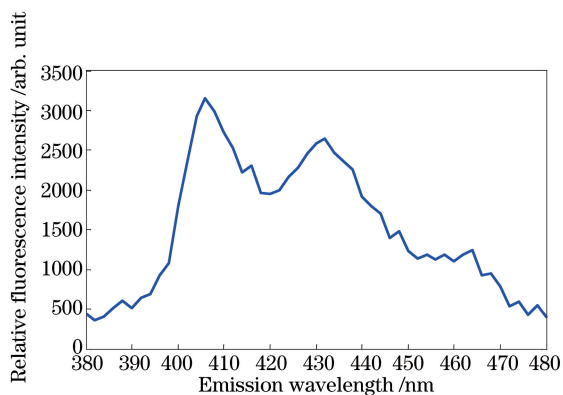


图 7 BkF 的原始荧光光谱

Fig. 7 Original fluorescence spectrum of BkF

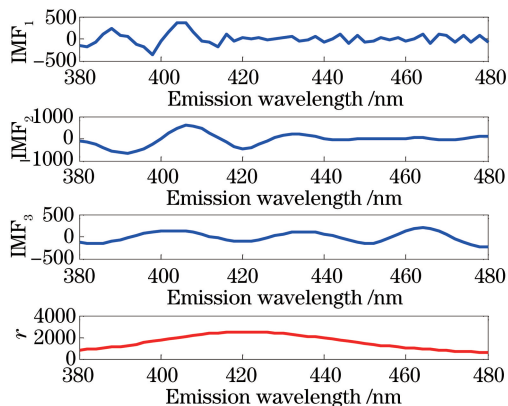


图 8 经验模态分解过程

Fig. 8 Empirical mode decomposition process

对不同浓度的 BkF 溶液,分别采用 EMD 阈值去噪和数学形态学结合 EMD 改进阈值去噪的方法来提取最佳激发和发射波长下的最大荧光峰值。根据去噪后的荧光光谱数据,拟合出样品浓度与提取出的荧光强度之间的关系。对于某一荧光物质的稀溶液,在一定频率和一定强度的光线照射下,溶液所产生的荧光强度与溶液中该荧光物质的浓度成正比,因此可根据拟合曲线的相关度来评判去噪效果的优劣。图 11 为不同浓度 BkF 溶液未经去噪的原始荧光光谱强度与样品浓度的拟合曲线,线性相关系数为 0.93559,相关度不高。图 12 为经 EMD 阈值去噪后荧光强度与样品浓度的拟合曲线,线性相关系数为 0.98497,线性相关度有所提高。图 13 为 EMD 改进阈值去噪结合数学形态学对荧光光谱去噪后的荧光强度与样品浓度的拟合曲线,线性相关系数为 0.99746,线性相关度较好。可见,本文方法在一定程度上改进了 EMD 阈值去噪效果,可应用于光谱去噪预处理。

为了更好地评价提出的光谱去噪方法,引入信噪比( $R_{SN}$ )和均方误差( $R_{MSE}$ )评估去噪效果:

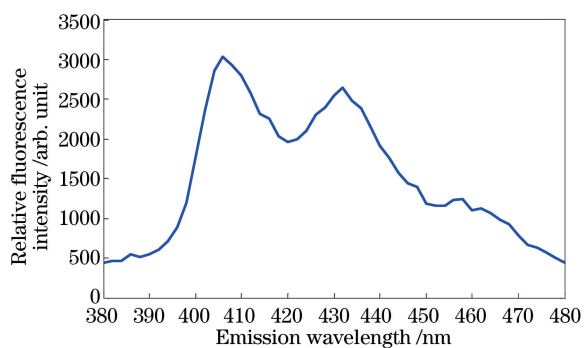


图 9 EMD 阈值去噪后的荧光光谱图

Fig. 9 Fluorescence spectrum after EMD threshold denoising

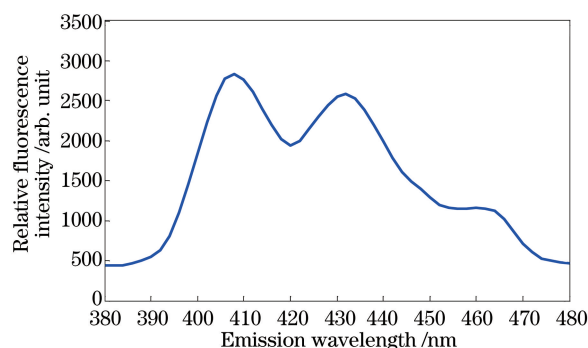


图 10 EMD 改进阈值结合数学形态学去噪后的荧光光谱图

Fig. 10 Fluorescence spectrum after improved EMD threshold denoising combined with mathematical morphology

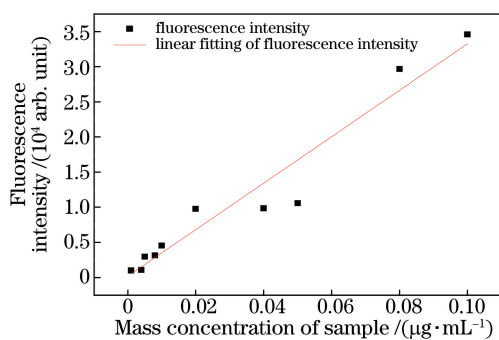


图 11 原始荧光强度线性拟合图

Fig. 11 Linear fitting diagram of original fluorescence intensity

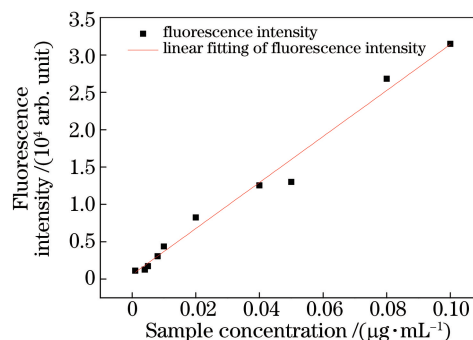


图 12 EMD 阈值去噪后荧光强度线性拟合图

Fig. 12 Linear fitting diagram of fluorescence intensity after EMD threshold denoising

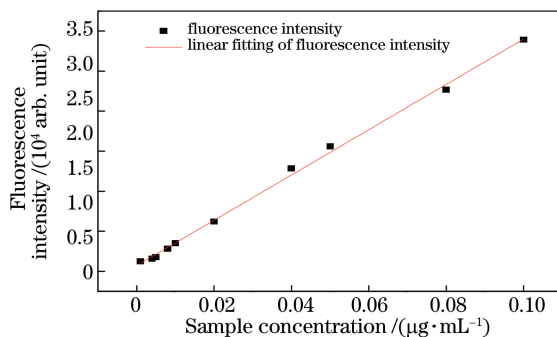


图 13 EMD 改进阈值结合数学形态学去噪后荧光强度线性拟合图

Fig. 13 Linear fitting diagram of fluorescence intensity after improved EMD threshold denoising combined with mathematical morphology

$$R_{SN} = 10 \lg \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{y(n)^2}{[x(n) - y(n)]^2} \right\}, \quad (14)$$

$$R_{MSE} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2}, \quad (15)$$

式中  $x(n)$  为去噪前的原始光谱信号,  $y(n)$  为去噪后的光谱信号。

光谱信号经 EMD 改进阈值结合数学形态学去噪后  $R_{SN}$  为 38.0137,  $R_{MSE}$  为 0.0012; 而经 EMD 阈值去噪后  $R_{SN}$  为 22.8358,  $R_{MSE}$  为 0.0053。可见, 提出的去噪方法信噪比较高, 去噪后信号和原始信号的均方误差也有所降低, 去噪效果较好。



## 4 结 论

根据多环芳烃的强荧光特性,构建了荧光检测实验系统,并制备了 10 份不同浓度的 BkF 的甲醇溶液样品,分析了其荧光特性。为了更好地对 BkF 进行定性和定量分析,采用 EMD 改进阈值结合数学形态学对样品荧光光谱进行了一定的去噪处理。对不同浓度的 BkF 甲醇溶液的荧光光谱进行 EMD 后,采用数学形态学中形态开-闭和闭-开运算实现每一层 IMF 滤波,再计算得到噪声强度和噪声方差  $\sigma^2$ ,并采用  $3\sigma$  作为每一层 IMF 的阈值,从而更好地实现对光谱的去噪处理。通过与 EMD 阈值去噪方法进行对比可得,提出的去噪方法效果较好,去噪后的光谱更加平滑,样品浓度和荧光强度的线性拟合度较高,达到 0.99746;信噪比较高;去噪后信号和原始信号的均方误差从 0.0053 降低至 0.0012,证明了该处理方法的有效性。此方法可应用于一些荧光光谱信号的去噪预处理中,操作方便,通用性强,具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Kim K H, Jahan S A, Kabir E, *et al.* A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects[J]. *Environment International*, 2013, 60: 71-80.
- [2] Veyrand B, Brosseaud A, Sarcher L, *et al.* Innovative method for determination of 19 polycyclic aromatic hydrocarbons in food and oil samples using gas chromatography coupled to tandem mass spectrometry based on an isotope dilution approach[J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, 1149(2): 333-344.
- [3] You Fan, Zhu Lan, He Ling, *et al.* Simultaneous determination of seven metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in human urine by online solid phase extraction-high performance liquid chromatography[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2014, 42(12): 1723-1728.  
游 钊, 朱 岚, 何 玲, 等. 在线固相萃取-高效液相色谱法同时测定人尿液中 7 种多环芳烃代谢物[J]. *分析化学*, 2014, 42(12): 1723-1728.
- [4] Zhou R Z, Jiang J, Mao T, *et al.* Multiresidue analysis of environmental pollutants in edible vegetable oils by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 43-50.
- [5] Chen Xin, Ni Xinjiong, Zhang Jiayu, *et al.* On-line preconcentration for sensitive analysis of PAHs in cosmetics by reversed microemulsion electrokinetic chromatography[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2015, 43(1): 81-86.  
陈 新, 倪鑫炯, 张佳瑜, 等. 反向微乳毛细管电泳法在线富集技术灵敏检测化妆品中的多环芳烃[J]. *分析化学*, 2015, 43(1): 81-86.
- [6] Zeng Yaling, Jiang Long, Cai Xiaoyu, *et al.* Identification of the characteristic vibrations for 16 PAHs based on Raman spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 2999-3004.  
曾娅玲, 姜 龙, 蔡啸宇, 等. 拉曼光谱的 16 种多环芳烃(PAHs)特征振动光谱辨识[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 2999-3004.
- [7] Zhou R Z, Jiang J, Mao T, *et al.* Multiresidue analysis of environmental pollutants in edible vegetable oils by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 43-50.
- [8] Wang Shutao, Zeng Qiuju, Wang Liyuan, *et al.* Research on the spectrum signal denoising based on NLMS filter fluorescence detecting Benzo (a) pyrene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0130001.  
王书涛, 曾秋菊, 王丽媛, 等. 基于 NLMS 滤波器的荧光检测苯并(a)芘光谱信号的去噪研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0130001.
- [9] Li Hui, Lin Qizhong, Wang Qinjun, *et al.* Research on spectrum denoising methods based on the combination of wavelet package transformation and mathematical morphology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 644-648.  
李 慧, 蔺启忠, 王钦军, 等. 基于小波包变换和数学形态学结合的光谱去噪方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(3): 644-648.
- [10] Chen Cong, Lu Qipeng, Peng Zhongqi. Preprocessing methods of near-infrared spectrum based on NLMS adaptive filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0530001.  
陈 丛, 卢启鹏, 彭忠琦. 基于 NLMS 自适应滤波的近红外光谱去噪处理方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0530001.
- [11] Yang Zhe, Wang Yutian, Pan Zhao. Fluorescence spectrum denoising method for low concentration petroleum pollutants based on EMD-LWT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0530001.

- 杨 哲, 王玉田, 潘 钊. 基于 EMD-LWT 的低浓度石油类污染物荧光光谱去噪法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0530001.
- [12] Wang Wenbo, Zhang Xiaodong, Wang Xiangli. Chaotic signal denoising method based on independent component analysis and empirical mode decomposition[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 050201.  
王文波, 张晓东, 汪祥莉. 基于独立成分分析和经验模态分解的混沌信号降噪[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 050201.
- [13] Wang Wenbo, Zhang Xiaodong, Wang Xiangli. Pulsar signal denoising method based on empirical mode decomposition mode cell proportion shrinking[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 069701.  
王文波, 张晓东, 汪祥莉. 脉冲星信号的经验模态分解模态单元比例萎缩消噪算法[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 069701.
- [14] Shi P, An S, Li P, *et al.* Signal feature extraction based on cascaded multi-stable stochastic resonance denoising and EMD method[J]. Measurement, 2016, 90: 318-328.
- [15] Zheng Suzhen, Cao Yiping. Five steps of unequal step online three-dimensional inspection based on two-dimensional empirical mode decomposition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208004.  
郑素珍, 曹益平. 基于二维经验模态分解的五步非等步在线三维检测[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208004.
- [16] Yu Minjie, Liu Minghui, Dong Zuoren, *et al.* Study on measuring concentration of ammonia and sulphur dioxide by differential optical absorption spectrometry based on fast Fourier transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0915001.  
郁敏捷, 刘铭晖, 董作人, 等. 基于傅里叶变换的差分吸收光谱法测量  $\text{NH}_3$  和  $\text{SO}_2$  浓度的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0915001.
- [17] Han Qingyang, Sun Qiang, Wang Xiaodong, *et al.* Application of CEEMDAN in Raman spectroscopy denoising[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 113003.  
韩庆阳, 孙 强, 王晓东, 等. CEEMDAN 去噪在拉曼光谱中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 113003.
- [18] Pan Zhao. Method and experimental study on identification and measurement of petroleum pollutant based on fluorescence spectroscopy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.  
潘 钊. 基于荧光光谱分析的石油类污染物识别测量方法及其实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [19] Cui Bingbo, Chen Xiyuan, Song Rui. Application of EMD threshold filtering for fiber optical gyro drift signal denoising [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0207001.  
崔冰波, 陈熙源, 宋 锐. EMD 阈值滤波在光纤陀螺漂移信号去噪中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0207001.
- [20] Li Min, Song Yanan, Zhou Tong, *et al.* Defect feature extraction in ultrasonic blind zone based on mathematical morphology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 16-22.  
黎 敏, 宋亚男, 周 通, 等. 基于数学形态学的超声信号盲区内缺陷特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 16-22.
- [21] Zhang Liguang, Yang Jin, Li Jing, *et al.* Image characteristic extraction method based on wavelet packet and mathematical morphology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2285-2290.  
张立国, 杨 瑾, 李 晶, 等. 基于小波包和数学形态学结合的图像特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2285-2290.
- [22] Tang Jingtian, Li Jin, Xiao Xiao, *et al.* Mathematical morphology filtering and noise suppression of magnetotelluric sounding data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1784-1793.  
汤井田, 李 晋, 肖 晓, 等. 数学形态滤波与大地电磁噪声压制[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1784-1793.