

三维荧光光谱结合 EEMD 与 SWATLD 测定水中多环芳烃

张 慧¹, 张立娟^{1,2}, 王玉田¹, 商凤凯^{1*}, 张 艳¹, 孙洋洋¹, 王选瑞¹, 王书涛¹

1. 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 066004

2. 河北环境工程学院, 河北 秦皇岛 066102

摘 要 多环芳烃(PAHs)类物质具有致畸、致癌、致突变的性质, 严重污染生态环境, 进而对人类的健康及动植物生长造成威胁。PAHs 通过排污、大气沉降、地表径流等各种循环途径进入水环境中, 由于种类众多且化学性质相似, 常规的检测方法如化学滴定法、电化学法等很难实现快速准确的测定。为实现复杂体系中 PAHs 的定性与定量, 工作中基于三维荧光光谱分析法, 结合集合经验模态分解(EEMD)去噪与自加权交替三线性分解(SWATLD)二阶校正, 对超纯水以及池塘水环境中的萘(ANA)和萘(NAP)进行分析测定。首先选择合理的浓度配制样本, 用 FS920 荧光光谱仪测得样品的三维荧光光谱, 利用空白扣除法将光谱数据中的散射消除, 得到真实的光谱数据。然后对去除散射的数据进行 EEMD 降噪处理, 该方法具有自适应性强、参数设置简便的优点, 能够去除嘈杂信息, 提高数据信噪比, 并将去噪参数与快速傅里叶变换、小波滤波和经验模态分解进行比较。最后用 SWATLD 算法以“数学分离”代替“化学分离”, 对超纯水和池塘水环境中光谱重叠的 ANA 和 NAP 进行定性识别和定量预测, 该算法对组分数的选择不敏感, 能够在未知干扰物共存情况下实现多组分目标分析物的同时检测, 即具有“二阶优势”, 并将预测结果与平行因子分析进行比较。结果表明空白扣除法能够成功将拉曼散射消除。EEMD 降噪方法使 ANA 和 NAP 的光谱更加规整平滑, 有效信息更加突出, 该方法去噪后数据信噪比为 16.845 2, 均方根误差为 11.136 6, 波形相似系数为 0.990 9, 三项指标均优于快速傅里叶变换和经验模态分解等其他去噪方法, 能达到小波滤波的去噪效果并且不用设置先验参数。利用 SWATLD 二阶校正方法得到验证样本中 ANA 与 NAP 的分解光谱与实际光谱基本吻合, 平均预测回收率分别为 96.4% 和 104.2%, 预测均方根误差分别为 0.105 和 0.092 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 在存在未知干扰物的池塘水样本中, 分解出的光谱依然能与实际光谱吻合, ANA 与 NAP 两者的平均预测回收率分别为 94.8% 和 105.5%, 预测均方根误差分别为 0.067 和 0.169 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 与平行因子分析相比, 两项指标均具有优势。

关键词 多环芳烃; 三维荧光光谱; 集合经验模态分解; 自加权交替三线性

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2595-07

引 言

水是人类赖以生存的重要资源之一, 随着煤、石油在社会生产和生活中的广泛应用, 有机污染物多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)通过排污、大气沉降、地表径流等途径进入水环境, 引发了严重的水环境污染问题。PAHs 是指分子中两个或两个以上苯环以稠环形式连接在一起的碳氢化合物, 具有“三致”作用, 严重威胁着人类的健康^[1]。1990 年我国提出的水中优先控制的 68 种污染物中,

PAHs 有 7 种^[2], 因此开展对水环境中痕量 PAHs 的定性和定量分析研究显得尤为重要。

检测水环境中 PAHs 较为常用的方法主要有气相色谱-质谱联用法(GC-MS)和高效液相色谱法(HPLC)。国外 Santos Leila. O 等^[3]采用单滴微萃取/气相色谱-质谱法(SDME/GC-MS)测定地表水和地下水中的 8 种 PAHs, 方法检出限为 0.01~0.03 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 回收率在 36%~152%之间; 国内陈静等^[4]采用在线固相萃取-高效液相法(Online SPE-HPLC)测定水体中残留的多环芳烃, 检出限小于 0.02 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均回收率在 85%~116%之间。但是 GC-MS 对目标

收稿日期: 2018-07-24, 修订日期: 2018-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61471312, 61771419)和河北省自然科学基金项目(F2017203220)资助

作者简介: 王玉田, 1952 年生, 燕山大学电气工程学院教授 e-mail: y. t. wang@163. com

* 通讯联系人 e-mail: shang_f_k@163. com

物的纯度要求高,提取过程复杂,灵敏度和回收率偏低;HPLC 抗干扰能力较差,且容易出现假阳性问题;因此近年来灵敏度高、专属性强的荧光分析法在水环境检测领域得到广泛应用。

文章采用的三维荧光光谱分析法,不仅灵敏度高、选择性强,而且所包含的目标物信息较为完整。为解决 PAHs 光谱中的噪声问题,选用自适应性强、应用简便的集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)。针对两种目标分析物的光谱重叠严重问题,采用基于自加权交替三线性分解(self-weighted alternating trilinear decomposition, SWATLD)的二阶校正算法,简单快速地实现了水中痕量 PAHs 的检测,实现了以“数学分离”取代繁琐的“化学分离”。

1 原理部分

1.1 荧光分析原理

不同的物质由于其能级结构不同,在相同的激励下所产生的荧光特性也不同,故利用荧光分析法,能够实现物质的定性鉴别;另外对于同种物质的稀释溶液,其荧光强度与物质浓度成正比,因此荧光分析法也可用于定量检测。

1.2 EEMD 去噪原理

EEMD 的具体步骤如下:

原始信号 $x(t)$ 中加入白噪声 $n_i(t)$

$$X_i(t) = x(t) + n_i(t) \quad (1)$$

对新的信号 $X_i(t)$ 进行 EMD 分解,对得到 s 个 IMF 分量 $c_{i,s}(t)$ 和残差量 $r_{i,s}(t)$ 重构

$$X_i(t) = \sum_{s=1}^s c_{i,s}(t) + r_{i,s}(t) \quad (2)$$

重复加入 M 次白噪声进行分解,得到 $\{c_{1,s}(t)\}, \{c_{2,s}(t)\}, \dots, \{c_{M,s}(t)\}$; 得到信号的 IMF 分量 $c_n(t)$ 。

$$c_n(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M c_{i,s}(t) \quad (3)$$

在 EEMD 分解中,原始信号添加高斯白噪声次数 M 越多,重构信号越接近真实信号,但是 M 不是无限添加的。

去噪效果用信噪比(signal to noise ratio, SNR)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、波形相似系数(correlation coefficient, R)来衡量。

$$\text{SNR} = 10 \log \left[\frac{\sum_n \hat{x}^2(n)}{\sum_n [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \right] \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})^2}} \quad (6)$$

其中 x 是原始光谱信号, \hat{x} 是去噪后光谱信号, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_n x_i$, $\bar{\hat{x}} = \frac{1}{n} \sum_n \hat{x}_i$ 。

1.3 二阶校正方法原理

1.3.1 三线性模型

三维荧光二阶校正中用到的三线性模型可以表示为

$$x_{ijk} = \sum_{n=1}^N a_{in} b_{jn} c_{kn} + e_{ijk}, \quad i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

其中, K 表示实验样本个数, I 和 J 表示在选定的 I 个激发波长和 J 个发射波长范围内对样本进行扫描,组成大小为 $I \times J \times K$ 的三维响应矩阵。 a_{in} 对应相对激发阵 A 中的元素, b_{jn} 对应相对发射阵 B 中的元素, c_{kn} 对应相对浓度阵 C 中的元素, e_{ijk} 是相对残差阵 E 中的元素。

1.3.2 SWATLD 算法

SWATLD 算法是二阶校正算法,可以解决数据中的共线性问题,具有收敛速度快、对过量组分不敏感的优点。在 SWATLD 算法中,损失函数是残差平方和(SSR),可写成

$$\text{SSR} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(x_{ijk} - \sum_{n=1}^N a_{in} b_{jn} c_{kn} \right)^2 \quad (8)$$

其迭代公式如下

$$c_{(k)}^T = \frac{1}{2} (\text{diagm}(B^+ X_{..k} A) / \text{diagm}(A^T A) + \text{diagm}(A^+ X_{..k} B) / \text{diagm}(B^T B)) \quad (k = 1, \dots, K) \quad (9)$$

$$b_{(j)}^T = \frac{1}{2} (\text{diagm}(A^+ X_{.j} C) / \text{diagm}(C^T C) + \text{diagm}(C^+ X_{.j} A) / \text{diagm}(A^T A)) \quad (j = 1, \dots, J) \quad (10)$$

$$a_{(i)}^T = \frac{1}{2} (\text{diagm}(C^+ X_{i..} B) / \text{diagm}(B^T B) + \text{diagm}(B^+ X_{i..} C) / \text{diagm}(C^T C)) \quad (i = 1, \dots, I) \quad (11)$$

其中 $\text{diagm}(\ast)$ 表示括号中矩阵对角元素组成的新矢量,等式左端代表矩阵 A , B 和 C 的行矢量,迭代过程中 A 和 B 做逐列归一化处理,交替迭代求解直至损失函数收敛为止,收敛准则为 $\text{SSR} < 1 \times 10^{-6}$ 。

2 实验部分

2.1 仪器及相关设置

称取实验品所用电子秤为 FA1004 精密电子秤。实验所用光谱图皆由 Edinburgh Instruments 公司生产的 FS920 稳态荧光光谱仪测得,光谱波长响应范围 200~900 nm,液氮制冷范围 77~320 K,激发光源为功率 450 W 的脉冲氙灯,信噪比 6 000 : 1,所有检测均使用 1 cm 石英比色皿进行激发发射扫描。

取 ANA 和 NAP 作为实验对象,为避免一级瑞利散射的影响,起始发射波长始终滞后起始激发波长 40 nm,仪器参数设置:激发波长为 200~370 nm,步长 10 nm,发射波长为 240~390 nm,步长 2 nm,狭缝宽度为 1.11 mm,对应荧光光谱分辨率为 2 nm。

2.2 试剂及样品配置

实验所用试剂 ANA、NAP、甲醇(均购于上海阿拉丁生化科技公司)均为分析纯,实验用水均为超纯水,实验用池塘水取自燕山大学后海池塘(使用前用 0.45 μm 滤膜进行过滤)。

储备液和工作液的配制：称取两种 PAHs 标准样品各 0.01 g，用甲醇溶解并分别定容于 2 个 10 mL 容量瓶中，得到浓度为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的一级储备液于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下避光保存。分别取 0.1 mL 一级储备液用超纯水稀释并定容于 2 个 10 mL 容量瓶中，震荡得到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的二级储备液。分别取 0.1 mL 二级储备液，用超纯水稀释并定容于 2 个 10 mL 的容量瓶中，震荡得到 $100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的工作液。

表 1 样本配制浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 1 Sample concentrations ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

Sample	ANA	NAP	Interferon	Sample	ANA	NAP	Interferon
C1	1.0	0.0	—	C9	3.5	1.5	—
C2	0.0	1.0	—	C10	4.0	1.0	—
C3	0.5	4.5	—	T1	3.0	3.0	—
C4	1.0	4.0	—	T2	4.0	3.0	—
C5	1.5	3.5	—	T3	1.0	1.0	—
C6	2.0	3.0	—	T4	1.0	2.0	—
C7	2.5	2.5	—	T5	1.0	3.0	pond water
C8	3.0	2.0	—	T6	2.0	3.0	pond water

校正样的配制：取 10 个 10 mL 容量瓶，编号为 C1—

C10，分别加入两种物质不同体积的工作液，并用超纯水定容。作为校正样本，其浓度见表 1。

验证样的配制：取 4 个 10 mL 容量瓶，编号为 T1—T4，分别加入两种物质不同体积的工作液，并用超纯水定容。作为验证样本，其浓度见表 1。

实际样的配制：取 2 个 10 mL 容量瓶，编号为 T5—T6，分别加入两种物质不同体积的工作液，并用池塘水定容。作为实际样本，其浓度见表 1。

3 结果与讨论

3.1 光谱预处理

采用空白扣除法减去溶剂空白样本，来达到消除拉曼 (Raman) 散射的目的。以 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NAP 为例，图 1(a,b) 为原始光谱图，可以看出除了物质的荧光峰之外，周围边缘存在很多由溶剂 Raman 造成的起伏矮峰，会对物质的分析与检测造成影响。采用空白扣除法处理后如图 2(a,b) 所示，由等高线图可以明显看出 Raman 散射被消除，物质原有信息基本保持不变。

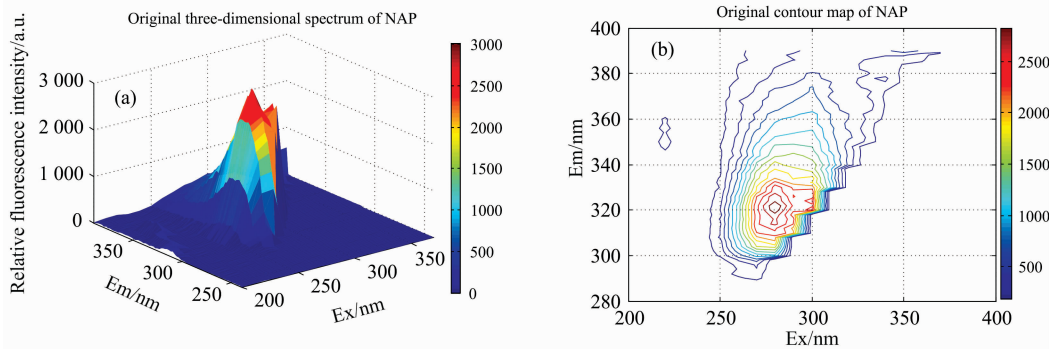


图 1 萘 (NAP) 原始三维光谱图 (a) 和等高线图 (b)

Fig. 1 Original three-dimensional spectrum (a) and contour map of NAP (b)

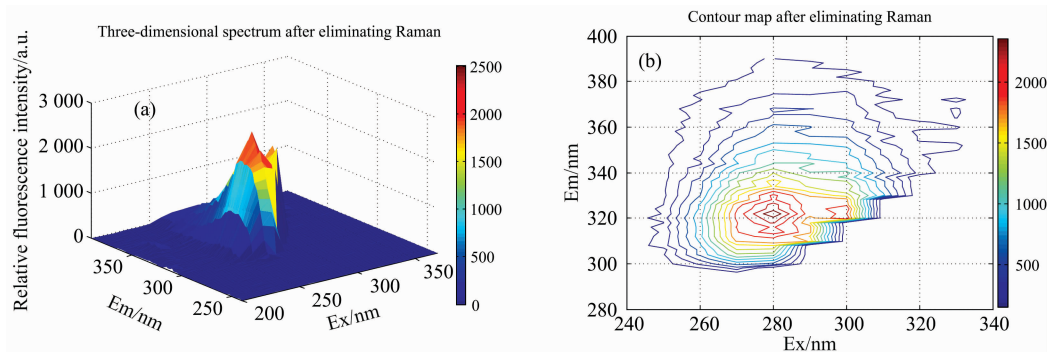


图 2 萘 (NAP) 消除拉曼后三维光谱图 (a) 和等高线图 (b)

Fig. 2 Three-dimensional spectrum (a) and contour map of NAP (b) after eliminating Raman

3.2 EEMD 去噪效果分析

以 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ANA 为例，进行 EEMD 降噪处理，从降噪效果的衡量指标来看，与快速傅里叶变换 (FFT)、小波

滤波 (Wavelet)、EMD 的去噪效果对比如表 2 所示，Wavelet 与 EEMD 的去噪效果较其他两种方法要好，其中 EEMD 具有自适应性，省去了参数的经验选取，比 Wavelet 更加简便。

表 2 去噪效果对比

Table 2 Comparison of de-noising effect

Method	SNR	RMSE	R
FFT	13.452 6	13.021 1	0.753 4
Wavelet	16.294 8	11.140 9	0.706 7
EMD	15.672 1	12.384 0	0.867 4
EEMD	16.845 2	11.136 6	0.990 9

从去噪效果图来看,去噪前等高线和发射光谱图如图 3(a,b)所示,去噪后如图 4(a,b)所示,可以明显看出光谱谱线趋于平滑,噪声干扰基本消除,且保留了 ANA 的两个荧光峰,物质的光谱信息在保持原有波形特征的基础上更加明

显,有利于进行后续的定性和定量数据分析。

3.3 二阶校正定性定量分析

近年来随着化学计量学的发展,三维荧光光谱与二阶校正方法的结合广泛地用于环境污染物检测、食品安全检测、药物含量检测等研究领域^[5]。文章采用 SWATLD 二阶算法对 ANA 和 NAP 的混合物进行分析测定,结果与讨论如下。

3.3.1 未加干扰的验证样本定性分析

选取样本 C1—C10, T1—T4 构成 $18 \times 76 \times 14$ 的三维数据矩阵,根据核一致诊断法(core consistency diagnosis, CORCONDIA)和实际情况确定组分数为 2,用 SWATLD 算法进行分析,如图 5(a,b)所示。可以看出算法分解出的 ANA 与 NAP 的光谱与实际光谱基本吻合,波峰位置与强度

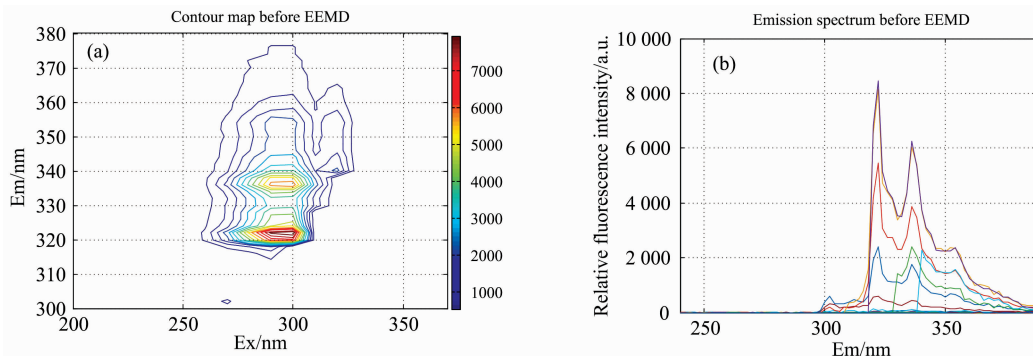


图 3 ANA 去噪前等高线图(a)和发射光谱图(b)

Fig. 3 Contour map (a) and emission spectrum (b) of NAP before de-noising

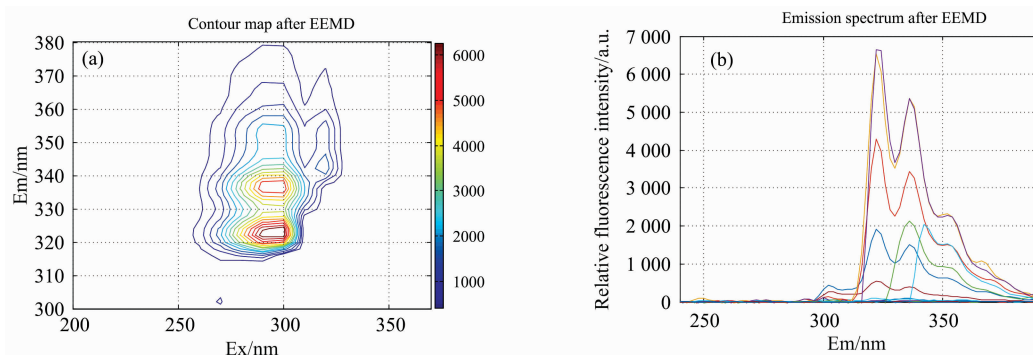


图 4 ANA 去噪后等高线图(a)和发射光谱图(b)

Fig. 4 Contour map (a) and emission spectrum (b) of NAP after EEMD

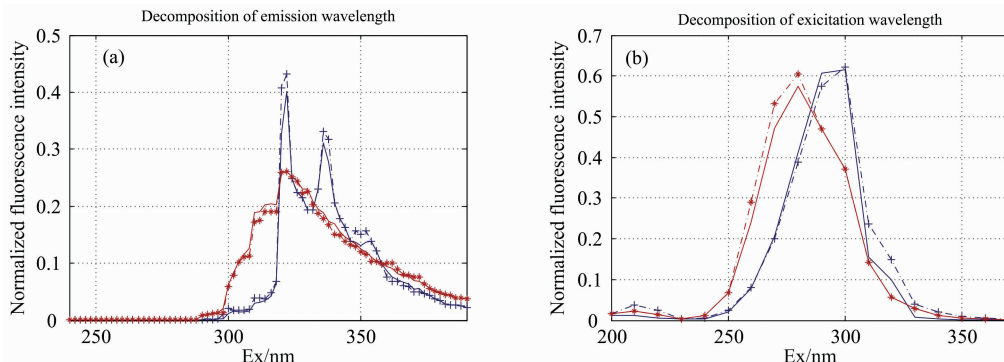


图 5 激发(a)与发射光谱(b)分解图

Fig. 5 Decomposition of excitation (a) and emission (b) spectrum

等关键信息都能够很好的识别出来,说明 SWATLD 算法可用于多组分 PAHs 的种类识别。

3.3.2 加入干扰的实际样本定性分析

选取样本 C1—C10, T1—T6 构成 $18 \times 76 \times 16$ 的三维数

据矩阵,根据 CORCONDIA 和实际情况确定组分数为 3,定性结果如图 6(a,b)所示。由图可以看出实际光谱与分解光谱基本吻合,在干扰共存的情况下 SWATLD 算法依然可以定性识别出两种 PAHs。

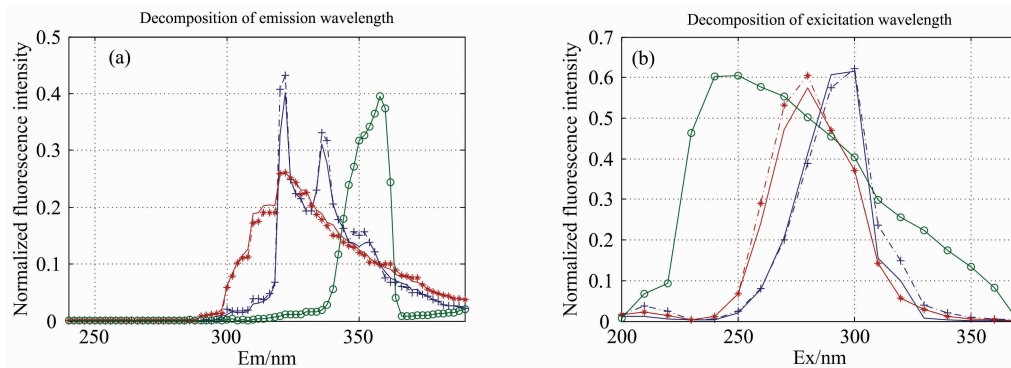


图 6 含干扰的激发(a)与发射光谱(b)分解图

Fig. 6 Decomposition of excitation (a) and emission spectrum (b) with interference

3.3.3 验证样本与实际样本定量分析

对不含干扰的和含干扰的两类样本进行浓度预测,结果见表 3。可以看出平均回收率在 94.8%~105.5%之间,均方根误差小于 $0.169 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在干扰存在的情况下 SWATLD

算法依然得到了很好的预测效果。与平行因子分析(parallel factor analysis, PARAFAC)相比,平均预测回收率高出约 3.5%,均方根误差降低约 $0.05 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,SWATLD 算法的总体效果较好。

表 3 浓度预测结果

Table 3 Concentration prediction results

Sample	Actual concentration / $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		SWATLD		PARAFAC	
			Predictive concentration/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ [Recovery(%)]		Predictive concentration/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ [Recovery(%)]	
	ANA	NAP	ANA	NAP	ANA	NAP
T1	3.00	3.00	2.86 [95.3]	3.12 [104.0]	2.88 [96.0]	3.20 [106.7]
T2	4.00	3.00	3.85 [96.2]	3.07 [102.3]	3.76 [94.0]	3.15 [105]
T3	1.00	1.00	0.96 [96.0]	1.05 [105.0]	0.89 [89.0]	1.13 [113.0]
T4	1.00	2.00	0.98 [98.0]	2.11 [105.5]	0.89 [89.0]	2.14 [107.0]
	Average recovery/%		96.4±4.0	104.2±4.2	92.0±8.3	107.9±7.5
	RMSEP/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		0.105	0.092	0.155	0.157
T5	1.00	3.00	0.92 [92.0]	3.20 [106.7]	0.85 [85.0]	3.25 [108.3]
T6	2.00	3.00	1.95 [97.5]	3.13 [104.3]	1.90 [95.0]	3.20 [106.7]
	Average recovery/%		94.8±5.2	105.5±5.5	90.0±8.5	107.5±7.2
	RMSEP/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		0.067	0.169	0.127	0.226

4 结 论

利用 EEMD 进行光谱去噪,去噪效果优于 FFT 和

EMD,可以达到小波去噪的效果且无需频繁设置参数,有效解决了光谱中的噪声问题。

实验利用三维荧光光谱与二阶校正方法 SWATLD 结合,能够直接测定复杂水环境中光谱重叠严重的多环芳烃范

和萘,体现了“二阶优势”,其预测回收率和均方根误差优于绿色分析化学理念。PARAFAC方法,实现了“数学分离”代替“化学分离”,符合

References

- [1] DU Fang-fang, YANG Yi, LIU Min, et al(杜芳芳, 杨毅, 刘敏, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2014, 34(4): 989.
- [2] MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, et al(母清林, 方杰, 邵君波, 等). Environmental Science(环境科学), 2015, 36(3): 839.
- [3] Santos L O, Dos Anjos J P, Ferreira S L C, et al. Microchemical Journal, 2017, 133: 431.
- [4] CHEN Jing, DAI Zhen-yu, XU Qun, et al(陈静, 戴振宇, 许群, 等). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 2014, 42(12): 1785.
- [5] SUN Yan-mei, WU Hai-long, WANG Jian-yao, et al(孙艳梅, 吴海龙, 王建瑶, 等). Chemical Journal of Chinese Universities(高等学校化学学报), 2013, 34(5): 1084.

Determination of PAHs in Water by Using EEMD and SWATLD Coupled with Three-Dimensional Fluorescence Spectroscopy

ZHANG Hui¹, ZHANG Li-juan^{1,2}, WANG Yu-tian¹, SHANG Feng-kai^{1*}, ZHANG Yan¹, SUN Yang-yang¹, WANG Xuan-rui¹, WANG Shu-tao¹

1. Measurement Technology and Instrument Key Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
2. Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066102, China

Abstract Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) have teratogenic, carcinogenic and mutagenic properties, which seriously pollute the ecological environment and threaten the health of human beings and the growth of animals and plants. PAHs enter into the water environment through various ways, such as sewage discharge, atmospheric settlement and surface runoff. Because of their large variety and similar chemical properties, it is difficult to achieve rapid and accurate determination of the conventional methods, such as chemical titration and electrochemical methods. In order to realize the qualitative and quantitative analysis of the PAHs in complex system, this article is based on the three-dimensional fluorescence spectrum analysis, and combined with the ensemble empirical mode decomposition(EEMD) which is used to de-noise, and the self-weighted alternating trilinear decomposition(SWATLD) which is used to do two order correction, the ANA and NAP in water and pond water environment were analyzed and measured. The sample is prepared by a reasonable concentration, and the three-dimensional fluorescence spectrum of the sample is measured by the FS920 fluorescence spectrometer. The real spectral data can be obtained by eliminating the scattering of the spectral data by the blank deduction method. Then the EEMD is carried out to remove the noisy information and improve the signal to noise ratio. This method has the advantages of strong self-adaptive and simple parameter setting. The denoising parameters were compared with fast Fourier transform, wavelet filtering and empirical mode decomposition. Finally, using “mathematical separation” instead of “chemical separation”, the SWATLD algorithm is used to identify and predict the ANA and NAP in ultra pure water and pond water environment. The algorithm is not sensitive to the selection of the group fraction, and can be used to detect the multi component object simultaneously under the coexistence of unknown interferon. It has the “two-order advantage”, and the prediction results are compared with parallel factor analysis. The results show that the EEMD method makes the spectrum of ANA and NAP more regular and smooth, and the effective information is more prominent. The signal to noise ratio of the de-noised data is 16.845 2, the root mean square error is 11.136 6, the waveform similarity coefficient is 0.990 9, and this three indexes are better than the other de-noising methods, such as fast Fourier transform and empirical mode decomposition. It can achieve the denoising effect of wavelet filtering without setting a priori parameter. Using the SWATLD two order correction method, the decomposition spectra of ANA and NAP in the verified samples are basically consistent with the actual spectra, and the average predicted recovery rates are 96.4% and 104.2% respectively. The predicted mean square root errors are 0.105 and 0.092 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. In the pool water samples with unknown interferon, the decomposition spectrum is still consistent with the actual spectrum. The average prediction recovery of ANA and NAP is 94.8% and 105.5%, respectively, and the root mean square error is 0.067 and 0.169 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. Compared with the parallel factor analysis,

this two indexes have the advantages.

Keywords Polycyclic aromatic hydrocarbons; Three-dimensional fluorescence spectroscopy; Ensemble empirical mode decomposition; Self-weighted alternating trilinear decomposition

(Received Jul. 24, 2018; accepted Dec. 5, 2018)

* Corresponding author

本 刊 声 明

近期以来, 一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义, 以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报, 现有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任, 维护本刊权利。

本刊官方网站已正式开通, 网址为

<http://www.gpxygpx.com/>

在此郑重声明, 本网址为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益, 防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日