

荧光分析法和ABC-BP神经网络相结合的多环芳烃的检测

王书涛 陈东营* 王兴龙 韩欢欢 王佳亮

燕山大学电气工程学院河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 分析了苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)和两者混合物的荧光特性,结果表明 BkF 存在 2 个荧光特征峰, BaP 存在 6 个荧光特征峰, BkF 和 BaP 的最佳发射波长均为 405 nm。不同浓度配比的混合物荧光特性差异较大,但最佳发射波长没有发生变化,仍为 405 nm。在激发波长为 250~400 nm,发射波长为 350~500 nm 范围内, BkF 和 BaP 荧光光谱重叠较为严重。为了准确检测混合物中两者的质量浓度,采用人工蜂群(ABC)算法优化的误差逆向传播(BP)神经网络对其进行检测,结果表明 ABC-BP 神经网络优于遗传算法(GA)-BP 神经网络。ABC-BP 神经网络能够准确检测质量浓度为 1.000~10.000 ng/L 的混合物中 BkF 和 BaP 的质量浓度。10 组混合物样本中, BkF 和 BaP 的回收率平均值分别为 99.19% 和 99.26%。

关键词 光谱学; 荧光光谱; 人工蜂群-误差逆向传播神经网络; 浓度检测; 多环芳烃

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1115001

Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Combining Fluorescence Analysis with ABC-BP Neural Network

Wang Shutao Chen Dongying Wang Xinglong Han Huanhuan Wang Jiali

Hebei Provincial Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Fluorescence spectrum properties of benzo [k] fluoranthene (BkF), benzo[a]pyrene (BaP), and their mixture are analyzed. The experimental results show that there are two characteristic fluorescence peaks existing in BkF and six characteristic fluorescence peaks in BaP. The optimal emission wavelength of BkF and BaP is 405 nm. The fluorescence characteristics of the mixture vary widely when there are different concentration ratios. But the optimal emission wavelength of the mixture with different concentration ratios does not change, remaining at 405 nm. When the excitation wavelength is 250~400 nm and the emission wavelength is 350~500 nm, serious overlapping occurs in the fluorescence spectra of BkF and BaP. In order to detect their concentrations in the mixture precisely, back propagation (BP) neural network optimized by artificial bee colony (ABC) algorithm is applied. The result indicates that the ABC-BP neural network is better than the genetic algorithm (GA)-BP method. The ABC-BP neural network can accurately detect the concentration of BkF and BaP in their mixture when the concentration is in the range of 1.000~10.000 ng/L. The average recovery of BkF and BaP in ten mixture groups is 99.19% and 99.26%, respectively.

Key words spectroscopy; fluorescence spectrum; artificial bee colony-back propagation neural network; concentration detection; polycyclic aromatic hydrocarbons

OCIS codes 300.6280; 070.4790; 040.1880

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61201110)

作者简介: 王书涛(1978—),男,博士,教授,主要从事环境多参量检测、光电检测和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: wangshutao@ysu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: chendongyingcdy@163.com

1 引言

多环芳烃(PAHs)作为有机污染物的一种,由多个苯环组成,具有分布广、稳定性强、迁移性强等特点^[1-2]。苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)是两种较常见的多环芳烃,被美国环境保护署列入16种多环芳烃优先检测污染物^[3]。据疾病中心报道,大部分PAHs能够导致细胞畸形和突变从而诱发癌症^[4],严重危害人体健康,其中BaP对人体的危害最大。因此,各国对PAHs在食品和环境中的含量都有严格限制,其中波兰法规规定BaP在水中的最大含量为10 ng/L^[5]。

为了减小检测误差、提高检测准确性,痕量检测对检测精度和检测技术的要求相对更高。在过去的几年里,研究人员提出了多种多环芳香烃痕量检测方法,如高效液相色谱、气相色谱分析-质谱法、液相色谱质谱等^[6-7]。Takino等^[8]通过液相色谱质谱法得出河水中多环芳香烃的质量浓度范围为1~30 ng/L。荧光光谱法具有分析时间短、无需前处理、操作简单的特性^[9-10],明显优于前几种检测方法。荧光光谱法在水质检测、藻类识别、食品安全等方面的应用已经相当成熟^[11],与其他分析方法如平行因子分析、主成分分析、小波分析等方法相结合的应用也颇为广泛。本文选取BkF和BaP痕量检测的浓度范围为1~10 ng/L。

多环芳香烃的种类较多,在生活中大多以混合物的形式存在,因此有必要对其混合物中各成分的含量进行研究。在多环芳香烃混合物中BkF和BaP的混合物较为常见,BkF和BaP作为一对同分异构体,具有很大的共性,给鉴别和检测带来了很大困难。通过分析BkF和BaP的荧光光谱特性,根据其荧光光谱特性的差异能够对两者加以区分。由于二者的荧光光谱存在严重重叠,而且BkF会对BaP的荧光光谱产生干扰^[12],因此,质量浓度和荧光强度的关系复杂,必须借助其他分析方法才能够对混合物中二者的浓度进行准确测定。

误差逆向传播(BP)神经网络是一种多层前馈神经网络,信息处理能力强,在故障诊断、聚类分析、风险预测等方面应用广泛^[13]。BP神经网络存在收敛速度慢、训练时间长、局部最小等缺陷,会降低网络的运行效率甚至导致网络训练的失败。人工蜂群(ABC)算法是一种基于蜜蜂采蜜行为的智能算法^[14],全局寻优能力强于遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)算法,本文将其用于BP神经网络的优化中。

2 实验部分

实验主要仪器是FS920荧光光谱仪,该仪器由英国Edinburgh Instruments公司生产,波长范围为200~900 nm,信噪比为6000:1,激发光源为450 W的Xe900氙灯。根据BkF和BaP的荧光特性,BkF的激发波长和发射波长范围分别设置为200~350 nm和250~500 nm,BaP的激发波长和发射波长范围分别设置为290~400 nm和360~480 nm,BkF和BaP激发波长和发射波长的步长分别设置为5 nm和2 nm。

化学试剂采用由中国计量科学研究院提供的BkF和BaP,以色谱纯甲醇为溶剂,质量浓度均为4.00 $\mu\text{g/mL}$ 。稀释BkF和BaP溶液得到10组不同浓度的溶液,其质量浓度分别为1.000、2.000、3.000、4.000、5.000、6.000、7.000、8.000、9.000、10.000 ng/L,两两混合得到100组不同浓度配比的混合溶液。对BkF、BaP以及混合物进行荧光光谱的扫描,得到相应的荧光光谱图。

3 数据分析

3.1 荧光分析

荧光分析法是一种光学领域中用于荧光物质分析的常用方法。根据朗伯-比尔定律,当荧光物质的浓度较低时,荧光强度与物质的浓度成正比,因此,此方法适用于单一荧光物质的痕量检测。BkF和BaP的分

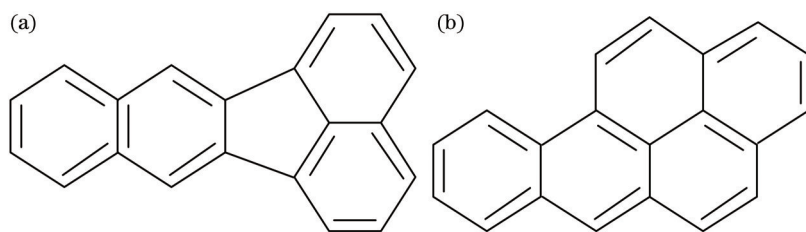


图1 BkF和BaP的分子结构。(a) BkF;(b) BaP

Fig.1 Molecular structures of BkF and BaP. (a) BkF; (b) BaP

子式均为 $C_{20}H_{12}$, 分子结构如图 1 所示, 多个苯环相连的刚性平面结构决定了 BkF 和 BaP 具有强荧光特性。因此, 荧光分析法可以用于 BkF 和 BaP 的荧光特性分析。

溶剂甲醇也是荧光物质, 考虑其对 BkF 和 BaP 的影响, 需要对甲醇的荧光特性进行分析。图 2 为溶剂甲醇的等高线光谱图, 由图 2 可知, 甲醇的荧光特征峰为 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=300\text{ nm}/350\text{ nm}$, 当激发波长大于 500 nm 时, 光谱中存在严重的瑞利散射。为了避免瑞利散射对 BkF 和 BaP 荧光光谱的影响, BkF 和 BaP 激发波长的范围设置为小于 500 nm。

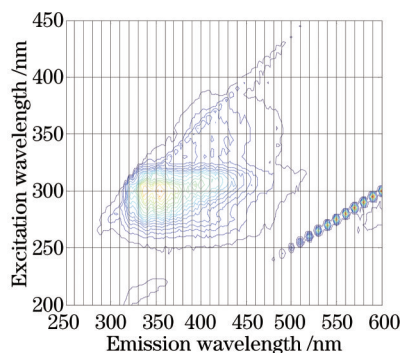


图 2 甲醇的等高线光谱图

Fig.2 Contour fluorescence spectra of methanol

当 BkF 的质量浓度为 4.000 ng/L 时, BkF 的三维荧光光谱和等高线荧光光谱图如图 3 所示。由图 3 可得, BkF 的激发波长和发射波长有效范围分别为 260~350 nm 和 380~500 nm。BkF 存在两个荧光特征峰分别为 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=306\text{ nm}/405\text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=306\text{ nm}/430\text{ nm}$, 这两个荧光特征峰的最佳激发波长都为 306 nm。

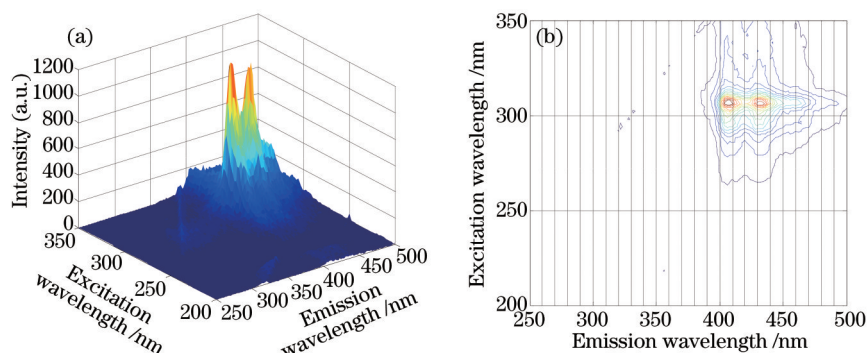


图 3 BkF 的荧光光谱。(a) 三维荧光光谱; (b) 等高线荧光光谱图

Fig.3 Fluorescence spectra of BkF. (a) Three dimensional fluorescence spectra; (b) contour fluorescence spectra

当 BaP 的质量浓度为 4.000 ng/L 时, BaP 的三维荧光光谱和等高线荧光光谱图如图 4 所示。由图 4 可得, BaP 的激发波长有效范围为 290~300 nm 和 335~390 nm, 发射波长的有效范围为 390~440 nm。BkF 存在 6 个荧光特征峰, 分别为 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=295\text{ nm}/405\text{ nm}$, $365\text{ nm}/405\text{ nm}$, $380\text{ nm}/405\text{ nm}$, $295\text{ nm}/430\text{ nm}$, $365\text{ nm}/430\text{ nm}$ 和

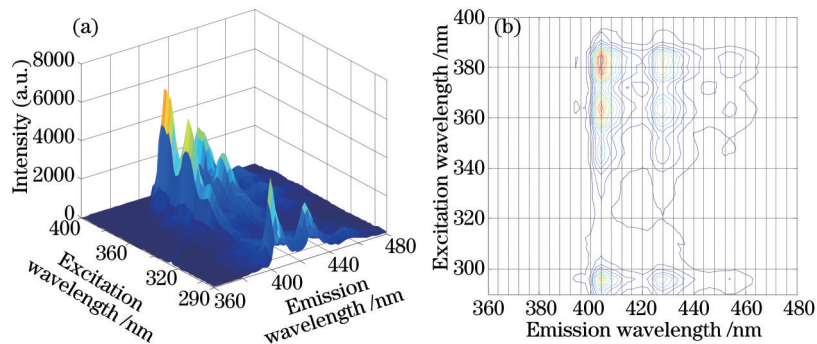


图 4 BaP 的荧光光谱。(a) 三维荧光光谱; (b) 等高线荧光光谱图

Fig.4 Fluorescence spectra of BaP. (a) Three dimensional fluorescence spectra; (b) contour fluorescence spectra

380 nm/430 nm, 其中最高的荧光特征峰为 380 nm/405 nm, 因此 BaP 的最佳激发波长和发射波长分别为 380 nm 和 405 nm。

通过以上分析可以得出, 甲醇的荧光特征峰距离 BkF 和 BaP 的荧光特征峰比较远, 因此甲醇对 BkF 和 BaP 的荧光特性干扰较小。BkF 和 BaP 存在两个相同的发射波长, 分别为 405 nm 和 430 nm, BkF 的荧光特征峰 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=306\text{ nm}/405\text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=306\text{ nm}/430\text{ nm}$, 分别与 BaP 的荧光特征峰 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=295\text{ nm}/405\text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=295\text{ nm}/430\text{ nm}$ 距离较近。因此, BkF 和 BaP 混合物中 BkF 和 BaP 的荧光重叠较为严重, BkF 和 BaP 的激发和发射波长会相互干扰, 混合物的荧光光谱变化多样。图 5 为 8 组不同浓度配比 BkF 和 BaP 混合溶液的等高线荧光光谱图, 从图 5 可以看出, 在激发波长为 250~400 nm, 发射波长为 350~500 nm 范围内, 不同浓度配比混合溶液的荧光特性受浓度配比的影响, 并且所有混合溶液存在一个相同的最佳发射波长 $\lambda_{em}=405\text{ nm}$ 。

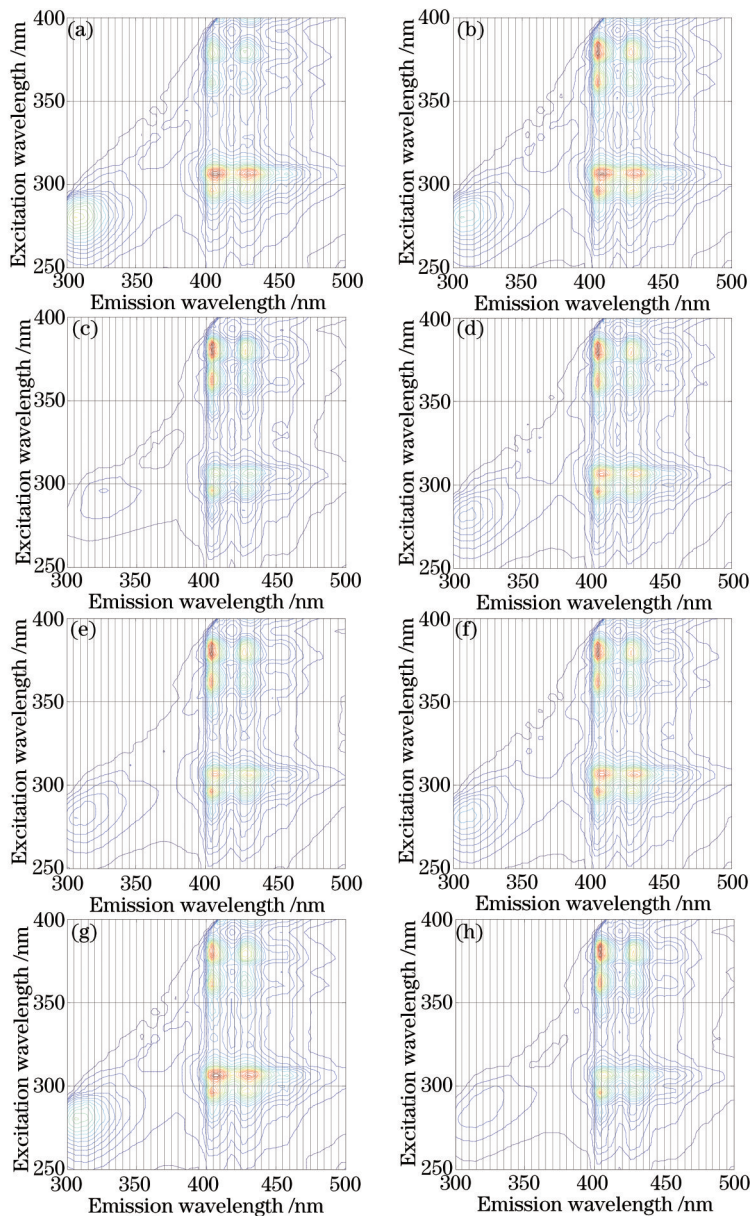


图 5 8 组混合物的等高线荧光光谱图。(a) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 1.000 ng/L; (b) BkF: 6.000 ng/L, BaP: 7.000 ng/L;
 (c) BkF: 2.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L; (d) BkF: 4.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L; (e) BkF: 2.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L;
 (f) BkF: 4.000 ng/L, BaP: 5.000 ng/L; (g) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 2.000 ng/L; (h) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 5.000 ng/L

Fig.5 Contour fluorescence spectra of 8 groups of mixtures. (a) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 1.000 ng/L; (b) BkF: 6.000 ng/L, BaP: 7.000 ng/L;
 (c) BkF: 2.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L; (d) BkF: 4.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L; (e) BkF: 2.000 ng/L, BaP: 6.000 ng/L;
 (f) BkF: 4.000 ng/L, BaP: 5.000 ng/L; (g) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 2.000 ng/L; (h) BkF: 3.000 ng/L, BaP: 5.000 ng/L

3.2 浓度检测

BP神经网络的拓扑结构通常包括输入层、隐含层和输出层。BP神经网络通过误差的反向传播来调整网络的权值和阈值^[15],使均方根误差(MSE)达到误差要求。鉴于BP神经网络的缺陷,采用ABC算法对BP神经网络的权值和阈值进行调整,以加快网络训练速度、提高准确度。

ABC算法是根据蜜蜂寻找蜜源而提出的一种优化算法,蜜源的位置被抽象成空间中的点,蜜蜂寻找蜜源的过程等同于优化问题中寻找最优解的过程^[16]。ABC算法中定义的人工蜂群主要有引领蜂、跟随蜂和侦察蜂。在蜂群中,假设引领蜂和跟随蜂的数量分别为 N_e 和 N_o ,解的数目为 N_s ,则有 $N_e=N_o=N_s$ 。如果需要优化的参数有 D 个,则蜂群中的每个解都是一个 D 维向量。在ABC算法中,更新失败次数的极限值为 N_{limit} ,即最大循环次数(MCN)。

算法初始化后,引领蜂首先对相应的解进行一次邻域搜索,如果搜索到解的适应度值优于以前的值,则用新解的位置代替旧解的位置,否则保持不变^[17]。所有的引领蜂完成搜索后,将适应度值传达给跟随蜂。跟随蜂根据得到的适应度按照概率选择解。跟随蜂选中解后,也进行一次邻域搜索,并保留较好的解。

引领蜂和跟随蜂的位置更新公式为

$$V_i = X_i + R_i(X_i - X_k), \quad (1)$$

式中 $k \in \{1, 2, \dots, N_s\}$, $k \neq i$, R_i 是 $[-1, 1]$ 上的一个随机数,控制 X_i 邻域的生成范围,随着搜索接近最优解,邻域的范围逐渐减小。

解的可能值计算公式为

$$P_i = \frac{f(X_i)}{\sum_{n=1}^{N_s} f(X_n)}, \quad (2)$$

跟随蜂根据这些可能值从现有解的邻域中搜索新解。

若某个解连续经过 N_{limit} 次循环后没有得到改善,表明这个解陷入局部最优,则这个位置就要被放弃,此解对应的引领蜂变为侦察蜂,侦察蜂将会随机产生一个新解将其替代,新解计算公式为

$$X_i = X_{min} + \text{rand}(0, 1)(X_{max} - X_{min}). \quad (3)$$

在ABC-BP神经网络中,每个解的适应度值为

$$f(X_i) = \begin{cases} 1 & f_{MSE}(i) = 0 \\ \frac{1}{f_{MSE}(i) + 1} & f_{MSE}(i) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N_s$, $f_{MSE}(i)$ 为第 i 个解的BP神经网络均方根误差。

ABC算法通过调整BP神经网络权值和阈值达到对其进行优化的目的,具体算法流程如图6所示。

从100个混合溶液样本中选择90个样本作为训练样本,其他10个样本作为预测样本。当发射波长为405 nm时,ABC-BP神经网络的输入为激发波长在250~400 nm范围内的31个激发波长对应的相对荧光强度,网络的输出为BkF和BaP的质量浓度,因此输入和输出神经元数分别为31和2。隐含层神经元个数的设置较为复杂,根据经验公式

$$h = \sqrt{m + n} + a, \quad a = 1, 2, \dots, 10, \quad (5)$$

式中 m 、 n 、 h 分别为输入层、输出层、隐含层的神经元个数,经过多次实验,得出隐含层神经元数最佳值为9,因此所创建的网络结构为31-9-2。

在ABC-BP算法中, D 维初始解 $X_i(i = 1, 2, \dots, N_s)$ 为 $(-1, 1)$ 区间内的随机数, $N_e=N_o=N_s=100$, $N_{limit}=100$, $f_{MCN}=200$,均方根误差为 10^{-3} 。在建立网络模型之前,为了保证网络的稳定性和预测结果的准确性,需要对样本数据进行标准化处理,将其映射到 $[0, 1]$ 区间内,标准化公式为

$$D'_i = \frac{D_i - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad (6)$$

式中 D'_i 为标准化值, D_i 为原始数据, D_{min} 和 D_{max} 分别为原始数据的最小值和最大值。

为了更好地体现ABC-BP神经网络的优越性,采用GA-BP神经网络与之对比,两者的均方根误差曲线

如图7所示。从图7可以看出,当ABC-BP神经网络的训练代数为161时,达到 10^{-3} 误差要求,训练代数明显少于GA-BP神经网络。

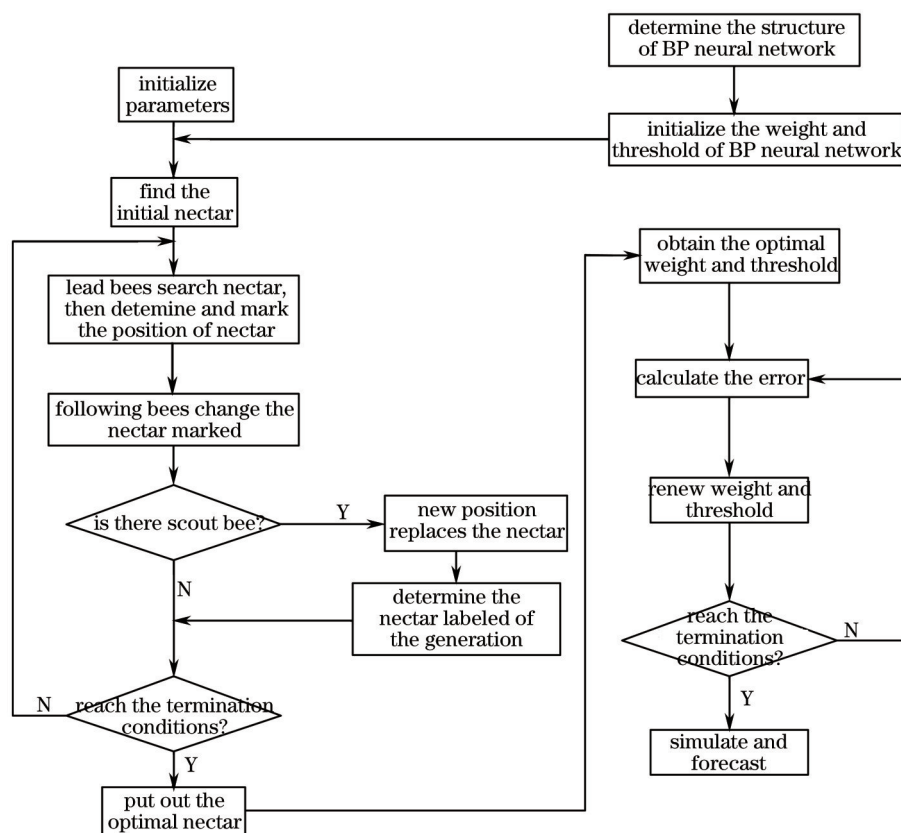


图6 ABC-BP算法的程序

Fig.6 Procedure of ABC-BP algorithm

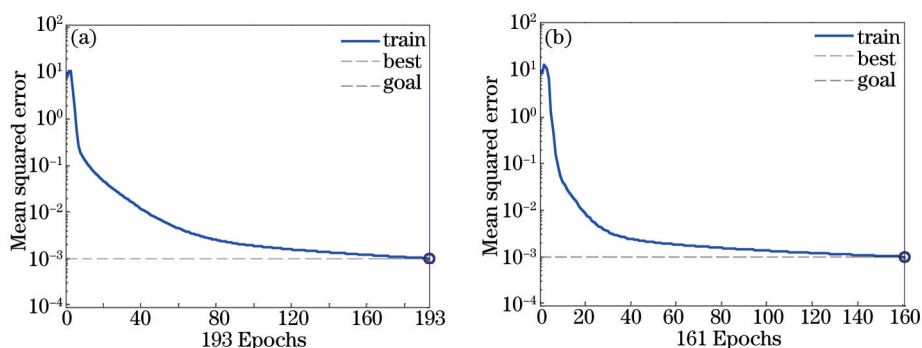


图7 训练过程的误差曲线。(a) GA-BP算法; (b) ABC-BP算法

Fig.7 Error curves in the training process. (a) GA-BP algorithm; (b) ABC-BP algorithm

ABC-BP神经网络的测试结果如表1所示,采用回收率来评价网络预测结果,回收率计算公式为

$$R = \frac{C'_i}{C_i} \times 100\% , \quad (7)$$

式中 C_i 为溶液的实际浓度值, C'_i 为网络预测值。

从表1可知,10组混合溶液中BkF和BaP的回收率都在98%以上,BkF和BaP的回收率平均值分别为99.16%和99.14%。该预测结果证明检测误差较小,达到较为理想的预测结果。

4 结 论

采用FS920荧光光谱仪检测了BkF、BaP及两者混合物的荧光光谱,通过荧光光谱分析得出,BkF和BaP的荧光光谱受甲醇溶剂的干扰较小,但是BkF和BaP之间存在荧光干扰和荧光重叠。因此,BkF和BaP的混

表 1 ABC-BP神经网络的预测结果

Table 1 Prediction results of ABC-BP network

Prediction samples	Actual value /(ng/L)		Predicted value /(ng/L)		Recovery rate /%	
	BkF	BaP	BkF	BaP	BkF	BaP
1	1.000	8.000	0.990	7.950	99.01	99.37
2	2.000	7.000	1.982	6.959	99.12	99.42
3	3.000	5.000	2.984	4.950	99.45	98.99
4	4.000	10.000	3.968	9.926	99.19	99.26
5	5.000	3.000	4.962	2.979	99.23	99.31
6	6.000	4.000	5.962	3.972	99.36	99.29
7	7.000	6.000	6.936	5.929	99.08	98.81
8	8.000	9.000	7.991	8.907	98.89	98.97
9	9.000	1.000	8.934	0.992	99.27	99.15
10	10.000	2.000	9.895	1.978	98.95	98.89

合物仅仅依据荧光分析法无法完成各物质浓度的检测,为解决这一难题引进了BP神经网络对浓度进行检测。针对BP神经网络的缺陷,采用ABC算法对其进行优化,并将优化后的神经网络用于BkF和BaP的浓度检测中。以质量浓度范围为1.000~10.000 ng/L的BkF和BaP为研究对象,设计了BkF和BaP浓度的ABC-BP检测模型,10组混合溶液中BkF和BaP的回收率都在98%以上,达到了较为理想的检测效果。提出了一种新颖有效的混合物中BkF和BaP检测的新方法,同时其他浓度范围的检测还待进一步的探讨。

参 考 文 献

- 1 Shao Y X, Wang Y X, Xu X Q, *et al.*. Occurrence and source apportionment of PAHs in highly vulnerable karst system[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 153-160.
- 2 Alomirah H, Al-Zenkia S, Al-Hooti S, *et al.*. Concentrations and dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from grilled an smoked foods[J]. *Food Control*, 2011, 22(12): 2028-2035.
- 3 Li W H, Tian Y Z, Shi G L, *et al.*. Concentrations and sources of PAHs in surface sediments of the Fenhe reservoir and watershed[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 75: 198-206.
- 4 Wang P, Wu T H, Zhang Y. Monitoring and visualizing of PAHs into mangrove plant by two-photon laser confocal scanning microscopy [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(8): 1654-1658.
- 5 Nowacka A, Włodarczyk-Makula M. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in water during preparation processes[J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2013, 33(5): 430-450.
- 6 Fang Jie, Wang Kaixiong. Multiresidual analysis of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in marine shellfishes by gas chromatography-ion trap mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35 (11): 1607-1613.
方 杰, 王凯雄. 气相色谱-离子阱质谱法测定海洋贝类中多残留有机氯农药、多氯联苯和多环芳烃[J]. *分析化学*, 2007, 35(11): 1607-1613.
- 7 Grova N, Salquère G, Schroeder H, *et al.*. Determination of PAHs and OH-PAHs in rat brain by gas chromatography tandem (triple quadrupole) mass spectrometry[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2011, 24(10): 1653-1667.
- 8 Takino M, Daishima S, Yamaguchi K, *et al.*. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry using silver nitrate as a post-column reagent[J]. *Journal of Chromatography A*, 2001, 928(1): 53-61.
- 9 Yang Lili, Wang Yutian, Lu Xinqiong. Identification and measurement of petroleum pollutant by three-dimensional matrix fluorescence with second order calibration methods[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0615002.
杨丽丽, 王玉田, 鲁信琼. 三维荧光光谱结合二阶校正法用于石油类污染物的识别和检测[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0615002.
- 10 Kong Fanbiao, Chen Guoqing, Huang Qifeng, *et al.*. Detection of carrageenan in the orange juice using fluorescence spectra methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 126-130.
孔凡标, 陈国庆, 黄奇峰, 等. 橙汁中卡拉胶的荧光光谱检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(1): 126-130.
- 11 Wang Yutian, Xu Jing, Zhou Yanling. Study on mineral oil identification based on a dimension study method of three dimensional

- fluorescence spectra reduction[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1215002.
 王玉田, 徐 婧, 周艳岭. 基于三维荧光光谱降维处理的矿物油识别研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1215002.
- 12 Zhao Chao. Rapid Detection of Benzene [a] Pyrene by Synchronous Fluorescence Spectrometry[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009: 27-31.
 赵 超. 同步荧光法快速检测苯并[a]芘的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009: 27-31.
- 13 Luo Y, Chen S W, He X J, *et al.*. Alphanumeric character recognition based on BP neural network classification and combined features [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2013, 6(6): 1108-1115.
- 14 Kuang Fangjun, Xu Weihong, Jin Zhong. Artificial bee colony algorithm based on self-adaptive Tent chaos search[J]. Control Theory and Applications, 2014, 31(11): 1502-1509.
 匡芳君, 徐蔚鸿, 金 忠. 自适应 Tent 混沌搜索的人工蜂群算法[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1502-1509.
- 15 Xu Zhaomei, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Quality prediction of laser milling based on optimized back propagation networks by genetic algorithms[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603004.
 许兆美, 周建忠, 黄 舒, 等. 基于遗传算法优化反向传播神经网络的激光铣削层质量预测[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603004.
- 16 Kang F, Li J J, Li H J. Artificial bee colony algorithm and pattern search hybridized for global optimization[J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(4): 1781-1791.
- 17 Yang Lin, Kong Feng. Hybrid artificial bee colony algorithm mixed with particle swarm optimization algorithm[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(1): 50-53.
 杨 琳, 孔 峰. 嵌入粒子群优化算法的混合人工蜂群算法[J]. 自动化仪表, 2013, 34(1): 50-53.

栏目编辑: 吴秀娟