

光学学报

三维荧光光谱结合 ICSO-SVM 对性激素的分类鉴别

王书涛, 展书杰*, 刘诗瑜, 张靖昆

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 为了提高复杂水环境中性激素的分类识别率, 提出一种三维荧光光谱法结合改进的鸡群算法(ICSO)优化支持向量机(SVM)的模型。利用 FS920 荧光光谱仪对雌酮、雌二醇和雌三醇 3 种典型性激素的单组分溶液及混合溶液进行荧光特性分析, 并在光谱重叠严重的前提下建立 ICSO-SVM 模型对 3 种性激素进行分类鉴别。ICSO-SVM 模型不仅训练过程稳定, 收敛速度快, 而且测试集性激素识别率为 100%, 均优于 PSO-SVM 模型。结果表明, 三维荧光光谱法结合 ICSO-SVM 模型是一种有效的性激素检测方法。

关键词 光谱学; 支持向量机(SVM); 改进鸡群算法; 性激素检测

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1030004

Classification and Identification of Sex Hormones by Three-Dimensional Fluorescence Spectroscopy Combined with ICSO-SVM

Wang Shutao, Zhan Shujie*, Liu Shiyu, Zhang Jingkun

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

Abstract To increase the classification and recognition rate of sex hormones in a complex water environment, we proposed to combine three-dimensional fluorescence spectroscopy with a model of improved chicken swarm optimization based support vector machine (ICSO-SVM). An FS920 fluorescence spectrometer was used to analyze the fluorescence characteristics of single-component solutions and mixed solutions of three typical sex hormones, i.e., estrone, estradiol, and estriol. On the premise of severe spectral overlap, the ICSO-SVM model was established to classify and identify the three sex hormones. The proposed model has stable training, fast convergence, and 100% sex hormone recognition rate for the test set, and thus it outperforms the PSO-SVM model. In conclusion, three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with ICSO-SVM model is effective for sex hormone detection.

Key words spectroscopy; support vector machine (SVM); improved chicken swarm optimization; sex hormone detection

OCIS codes 300.2530; 070.4790; 300.6280; 300.6170

1 引言

性激素是由动物体的性腺以及胎盘、肾上腺皮质网状带等组织合成的甾体激素, 具有促进性器官成熟、副性征发育及维持性功能等作用^[1]。性激素具有重要的生理功能, 已被广泛使用在药物、化妆品

等领域。在药物中添加性激素可以促进骨骼的发育、治疗男性性功能衰退^[2]等, 但是使用不当会造成内分泌紊乱, 甚至增加患癌的风险。在化妆品中添加性激素可以短时促进毛发的生长、防止皮肤衰老、增加皮肤弹性等^[3]。近年来, 随着生活水平不断提高, 人们也更加注重自身的健康和外貌, 因此对化妆

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-22; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61771419)、河北自然科学基金(F2017203220)

* E-mail: 390174886@qq.com

品的需求也日益增加。但是,长期过量使用含有性激素等禁用成分的化妆品也会对人的健康造成不同程度的危害,症状轻者会出现皮肤泛红、搔痒、皮肤敏感等问题,严重者则会影响身体发育,甚至造成癌变。

目前,性激素的检测方法有高效液相色谱检测法^[4]、高效液相色谱串联检测法、超高效液相色谱法、气相色谱技术串联质谱检测法等^[5],但是这些方法也存在一定的局限性,例如液相色谱法能够对物质进行定性分析,但是前期需要处理大量工作,耗时费力;而气相色谱法虽然克服了液相色谱检测的大部分困难,但是实验仪器昂贵、实验条件复杂,难以用于大量的化妆品检测中。考虑到实验的复杂性和仪器设备的成本,本实验选用荧光光谱法^[6]检测水溶液环境下性激素中的 3 种成分并进行分析研究。

支持向量机(SVM)是近几年机器学习领域的一个热点,SVM 建立了一套完整的机器学习理论算法,在很大程度上降低了算法设计的复杂性,极大地提高了效率,在模式识别、降维、回归分析等方面有着广泛的应用。张毅等^[7]将 SVM 结合荧光光谱来预测食用色素的纯度;李素梅等^[8]将 SVM 用于非线性荧光光谱的识别;陈海菊^[9]将 SVM 与荧光光谱结合用于溢油识别。单一的 SVM 对于参数 C 和 σ 的选择有一定的经验成分,存在局限性,王书涛等^[10]将粒子群优化 SVM 用于水中多环芳烃的荧光检测,得到的自适应度约为 68.5%。使用粒子群(PSO)来优化 SVM 的参数(即 PSO-SVM 算法),分类结果可以得到一定程度的优化,但仍不理想。本文采用改进的鸡群算法(ICSO)来优化 SVM 参数(即 ICSO-SVM 算法),结合荧光光谱法对混合性激素样本进行定性分析,并将结果与 PSO-SVM 算法所得的结果进行对比,结果表明本文提出的 ICSO-SVM 算法的定性结果优于 PSO-SVM 算法。

2 原理与方法

2.1 SVM

SVM 的基本思想是分类,即寻找一个最优的超平面,对现有的数据进行分类^[11]。SVM 是从线性分类中引入,为了解决非线性的分类问题,引入了核函数,把数据映射到高维空间来解决原始空间中线性不可分的问题,同时把高维空间的运算转化到低维空间,从而降低计算量。在分类过程中,个别数据可能会影响整个分类的结果,将这些点称为噪声或干扰点,假如在分类时舍去它们,可以得到更好的结

果,为了解决这个问题,引入了松弛变量 ξ_i 和惩罚参数 C 。

假设存在一个高维训练集 $T = \{y_1x_1, y_2x_2, \dots, y_i x_i, \dots, y_N x_N\}$, $x_i \in \mathbf{R}^n$, $y_i \in [+1, -1]$, 其中 x_i 表示第 i 个样本, y_i 表示 x_i 的类别标记。当 y_i 取 +1 时,表示 x_i 为正样本;当 y_i 取 -1 时,表示 x_i 为负样本, (x_i, y_i) 为样本点。本实验在分类过程选用径向基核函数,其计算公式为

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: x_i 和 x_j 为两个特征向量; σ 为径向基的宽度。目标函数 β 及其约束条件为

$$\beta = \max_a \sum_{i=1}^N a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [a_i y_i K(x_i, y_i) y_j x_j], \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N a_i y_i = 0, \quad 0 < a_i < C, \quad (3)$$

其分类决策函数为

$$f(x) = \text{sign}(\omega^T x + b) = \text{sign}\left[\sum_{i=1}^n a_i^* y_i K(x_i, x_j) + b^*\right], \quad (4)$$

式中: a_i^* 为最优解,可由 $b^* = y_j - \sum_{i=1}^n y_i a_i^* K(x_i, x_j)$ 推导得到; b 为超平面的法向量; ω 为超平面的截距向量。由于惩罚因子 C 和径向基 σ 决定了 SVM 分类的准确性,因此,寻找到最优的 C 和 σ 是提高分类准确性的关键。根据分析,本实验选择改进的鸡群算法来优化参数 C 和 σ ,并将其与粒子群算法优化的参数进行对比。

2.2 鸡群算法

鸡群算法是根据鸡的生活习惯和行为建立的一种仿生学智能优化算法,它是由 Meng 等^[12]于 2014 年首先提出。每个鸡群由几个不同的群体组成,每个群体可以划分为公鸡、母鸡和小鸡三个部分。其中公鸡是适应值最好的鸡,并且是每个群体的领头鸡,公鸡在搜索食物时的位置更新公式为

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t)[1 + \text{randn}(0, \sigma^2)], \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} 1, & f_{i,r} < f_{k,r} \\ \exp\left(\frac{f_{k,r} - f_{i,r}}{|f_{i,r}| + \epsilon}\right), & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\text{randn}(0, \sigma^2)$ 表示标准差为 σ , 均值为 0 的高斯分布函数; ϵ 是一个很小的常数; $f_{k,r}$ 和 $f_{i,r}$ 分别是第 k 只公鸡和第 i 只公鸡的适应度值,且 $i \neq k$; $x_{i,j}(t)$ 和 $x_{i,j}(t+1)$ 分别表示在第 t 时刻和 $t+1$ 时

刻第 i 只鸡在第 j 维空间的位置。

鸡群中母鸡随机选择一个群体, 跟随对应的公鸡进行食物搜寻, 它们的位置更新公式为

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + C_1 \text{rand}[x_{r_1,j}(t) - x_{i,j}(t)] + C_2 \text{rand}[x_{r_2,j}(t) - x_{i,j}(t)], \quad (7)$$

$$C_1 = \exp\{(f_{i,h} - f)/[\text{abs}(f_i + \epsilon)]\}, \quad (8)$$

$$C_2 = \exp[f_{r_2} - f_i], \quad (9)$$

式中: C_1 为母鸡在所处群体中所占的比例; C_2 为母鸡在鸡群的其他群体中所占的比例; $x_{r_1,j}(t)$ 为母鸡所在群体公鸡的位置; $x_{r_2,j}(t)$ 为其他群体公鸡的位置。

鸡群中小鸡跟着母鸡在群体中觅食, 其位置更新公式为

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + F[x_{m,j}(t) - x_{i,j}(t)], \quad (10)$$

式中: $x_{m,j}(t)$ 为小鸡所跟随母鸡的位置; F 为小鸡跟随母鸡觅食的跟随系数, $F \in (0, 2)$ 。

改进的鸡群算法^[13] 针对群体中小鸡只跟随母鸡觅食而造成的搜索能力差进行改进, 引入新的学

习因子 C_3, C_4 , 让小鸡不仅是跟随母鸡进行觅食, 还能跟随群体中的公鸡进行觅食, 以提高小鸡的学习效率, 避免鸡群算法陷入局部最优解, 提高算法搜寻全局最优解的能力。改进后小鸡的位置为

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + F[x_{m,j}(t) - x_{i,j}(t)] + C_3[x_{r_3,j}(t) - x_{i,j}(t)] + C_4[x_{r_4,j}(t) - x_{i,j}(t)], \quad (11)$$

式中: C_3 为小鸡跟随所在群体公鸡的学习因子; C_4 为小鸡跟随其他群体公鸡的学习因子; $x_{r_3,j}(t)$ 和 $x_{r_4,j}(t)$ 分别为对应的小鸡位置。

2.3 ICSO-SVM 模型建立及实现过程

将实验所得数据进行预处理后, 得到 68×17 的数值矩阵, 将其导入 SVM 模型中进行训练, 得到性激素溶液的分类模型。设置鸡群的初始化参数, 计算其适应度值, 更新粒子的位置; 根据计算结果更新个体极值与全局极值, 确定最优参数 $C = 61.3628$ 和 $g = 0.34643$ 。将参数代入到训练好的 SVM 模型中, 实现对水溶液中性激素的定性分析。ICSO-SVM 模型的算法流程如图 1 所示。

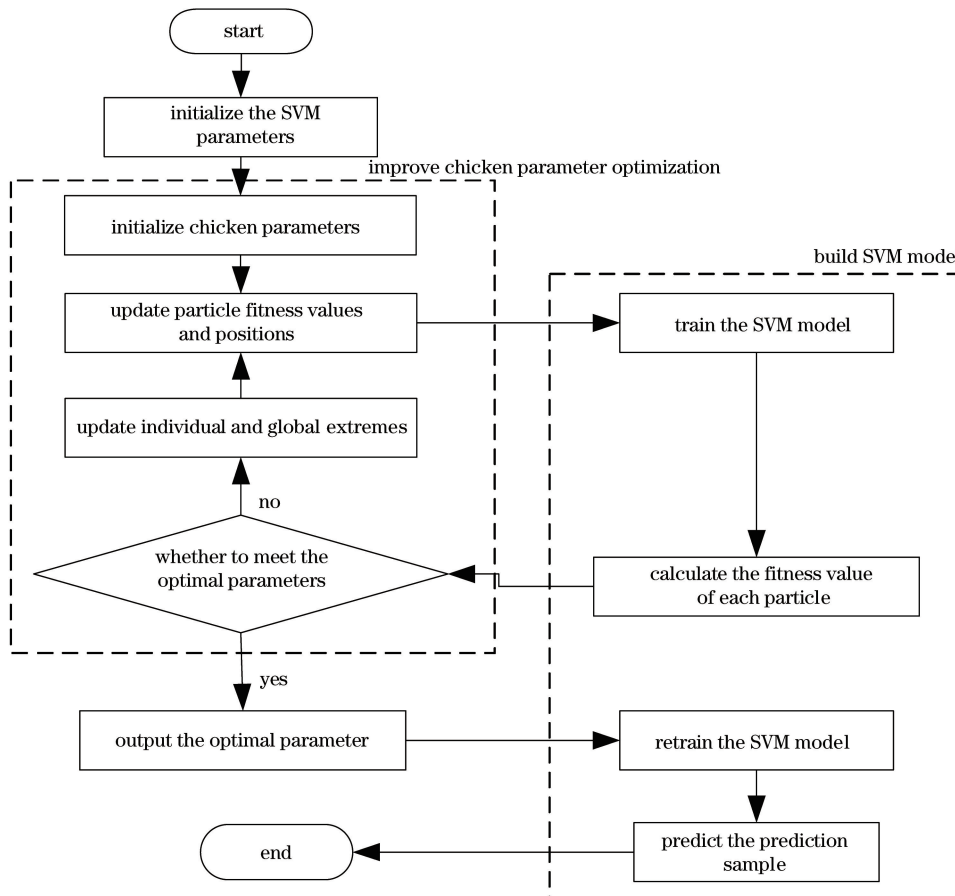


图 1 ICSO-SVM 算法流程图
Fig. 1 Flow chart of ICSO-SVM algorithm

3 实验研究

3.1 实验仪器设备

采用英国 Edinburgh Instruments 公司生产的 FS920 稳态荧光光谱仪对性激素的荧光特性进行研究。设置实验扫描激发波长为 200~310 nm, 步长为 2 nm; 发射波长为 270~470 nm, 步长为 5 nm, 狭缝宽度为 2.5 nm。配制样本溶液时, 采用天津天马衡基仪器公司的精密度为 0.1 mg 的 FA1004 精密电子秤。

3.2 样本溶液配制

本实验选用的样本试剂包括雌酮、雌二醇、雌三醇和甲醇^[14], 甲醇样品均购买于上海阿拉丁生化科技公司。分别取 3 个 100 mL 的容量瓶, 用精密电子秤分别称取雌酮 0.025 g、雌二醇 0.02 g、雌三醇 0.05 g, 选用甲醇溶剂将这 3 种物质分别充分溶于 100 mL 容量瓶内并定容, 配制成质量浓度分别为 250 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌酮、雌二醇、雌三醇溶液。选取 10 mL 的容量瓶, 取不同体积的雌酮和雌二醇溶液混合配制成 16 种不同浓度

的混合溶液, 其中 8 组作为预测样本(P11~P18), 8 组作为校正样本(C11~C18); 取不同体积的雌酮和雌三醇溶液混合配制成 18 种不同浓度的混合液, 其中 9 组作为预测样本(P21~P29), 9 组作为校正样本(C21~C29); 取不同体积的雌二醇和雌三醇溶液混合配制成 16 种不同浓度的混合溶液, 其中 8 组作为预测样本(P31~P38), 8 组作为校正样本(C31~C38); 分别取不同体积的雌酮、雌二醇、雌三醇, 配制成 18 组不同浓度的混合溶液, 其中 9 组作为预测样本(P41~P49), 9 组作为校正样本(C41~C49)。

4 结果与讨论

4.1 单组分光谱分析

由于实验的三种待测物质(雌酮、雌二醇和雌三醇)均难溶于水, 故实验选用溶解度较高的甲醇溶液作为溶剂。为确定甲醇的荧光特性对所测物质的影响, 首先对甲醇溶液的荧光特性进行分析, 图 2 所示为甲醇溶液的荧光光谱, 可以看到, 甲醇的荧光特性很弱, 几乎全被一阶瑞利散射光谱覆盖。

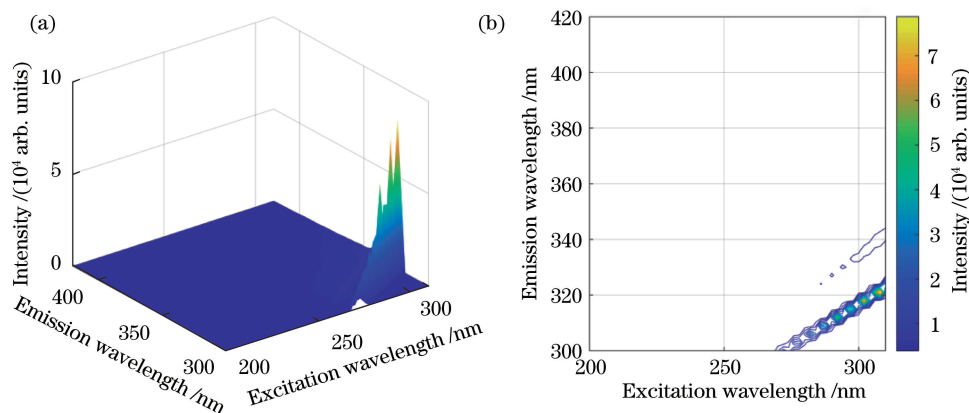


图 2 甲醇的荧光光谱。(a)三维荧光光谱; (b)溶液的等高线图

Fig. 2 Fluorescence spectrum of methanol. (a) Three-dimensional fluorescence spectrum; (b) contour map of solution

由于甲醇溶液的光谱几乎全被一阶瑞利散射光谱覆盖, 且其荧光特性很弱, 对溶质的影响很小, 因此甲醇可以作为雌酮、雌二醇及雌三醇的溶剂。分别配制质量浓度为 60 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、2.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、1.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌酮、雌二醇、雌三醇溶液, 利用 FS920 扫描得到的荧光光谱如图 3 所示。

从图 3(a1)、(b1)可以看出, 雌酮样本溶液的有效激发波长范围为 250~310 nm, 有效发射波长范围为 305~420 nm, 在有效波长范围内, 雌酮存在两个荧光峰, 其中, 主峰位于激发/发射波长的 290 nm/315 nm 处, 次峰位于激发/发射波长的 290 nm/

430 nm 处。因此, 确定雌酮样本溶液的最佳激发波长为 290 nm。从图 3(a2)、(b2)可以看出, 雌二醇样本溶液的有效激发波长范围为 250~310 nm, 有效发射波长范围为 305~366 nm, 在有效波长范围内, 雌二醇存在一个荧光峰, 位于激发/发射波长的 288 nm/315 nm 处, 因此雌二醇样本溶液的最佳激发波长为 288 nm。从图 3(a3)、(b3)可以看出, 雌三醇样本溶液的有效激发波长范围为 255~310 nm, 有效发射波长范围为 305~360 nm, 在有效波长范围内, 雌三醇存在一个荧光峰, 位于激发/发射波长的 286 nm/315 nm 处, 因此雌三醇样本溶液

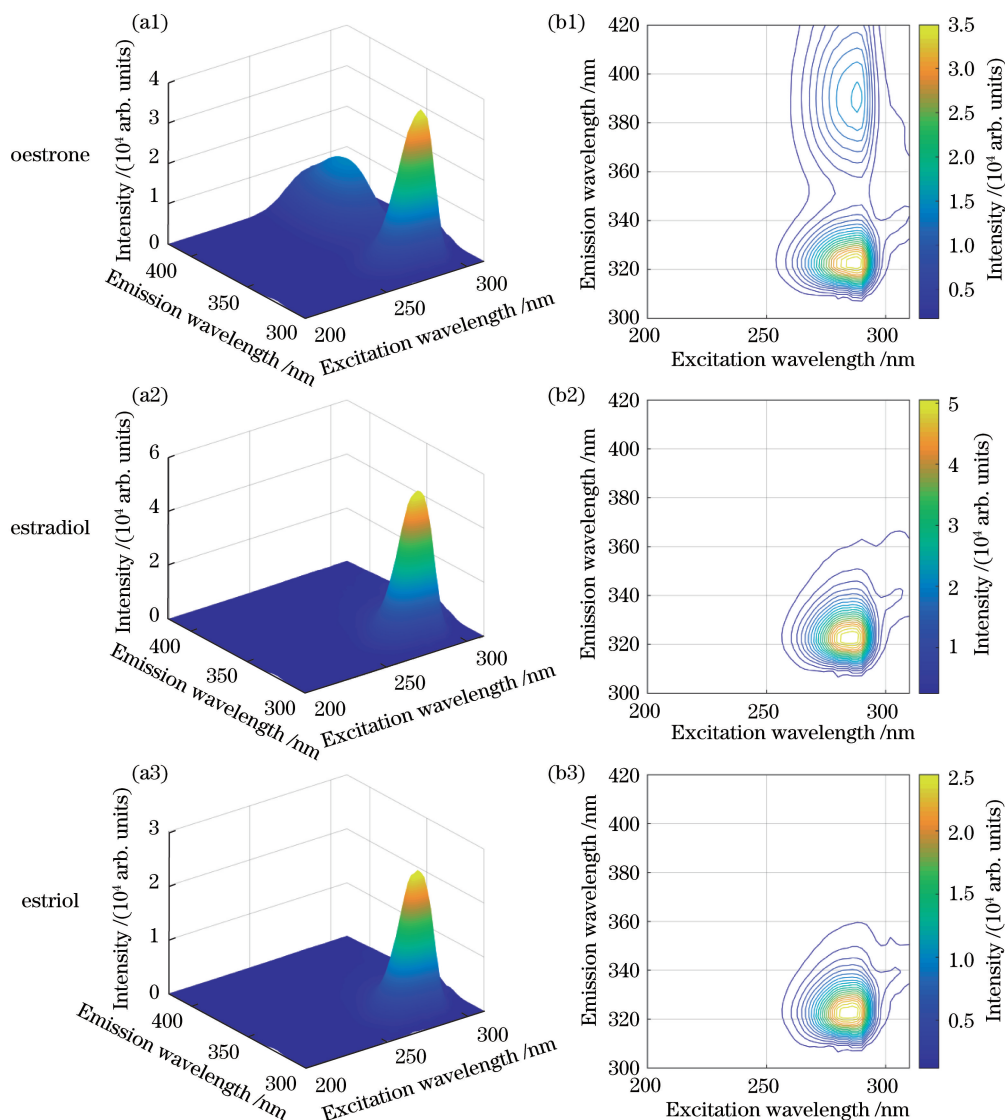


图 3 雌酮、雌二醇、雌三醇溶液的荧光光谱。(a) 三维荧光光谱; (b) 溶液的等高线图

Fig. 3 Fluorescence spectra of oestrone, estradiol, and estriol solutions. (a) Three-dimensional fluorescence spectra; (b) contour maps of solution

的最佳激发波长为 286 nm。

通过比较雌酮、雌二醇以及雌三醇样本溶液的荧光光谱,可以发现雌酮的主峰和雌二醇、雌三醇的荧光峰严重重叠。

4.2 混合光谱分析

选取质量浓度为 62 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌酮和 1.8 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌二醇混合溶液为样本 1,质量浓度为 70 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌酮和 1.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌三醇混合溶液为样本 2,质量浓度为 3.6 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌二醇和 2.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌三醇混合溶液为样本 3,质量浓度为 58 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌酮、1.4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌二醇和质量浓度为 0.9 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的雌三醇混合溶液为样本 4,绘制其荧光光谱,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看到,与雌酮混合的样本溶液都有

两个荧光峰,且其荧光峰都与雌酮的荧光峰重叠,雌酮的次峰等高线相比单组分溶液较为稀疏,即混合溶液的荧光光谱中雌酮次峰的荧光强度减弱了,混合溶液的荧光特性发生了变化。在雌酮的主峰位置,由于荧光强度不同,可能会出现强荧光覆盖弱荧光的情况,雌二醇与雌三醇的混合溶液只有一个荧光峰,与单组分光谱的荧光峰相似,依靠视觉无法分辨其光谱图,因此,采用 ICSO-SVM 模型处理混合后的性激素溶液,实现对性激素的定性分析。

4.3 ICSO-SVM 模型分析

将预测样本和校正样本矩阵代入 ICSO 中,设置鸡群的种群数量为 100,迭代次数为 200,种群的更新频率为 10,优化得到最优惩罚因子 $C = 40.2573$ 、最优核参数 $g = 0.86344$ 。其训练过程的

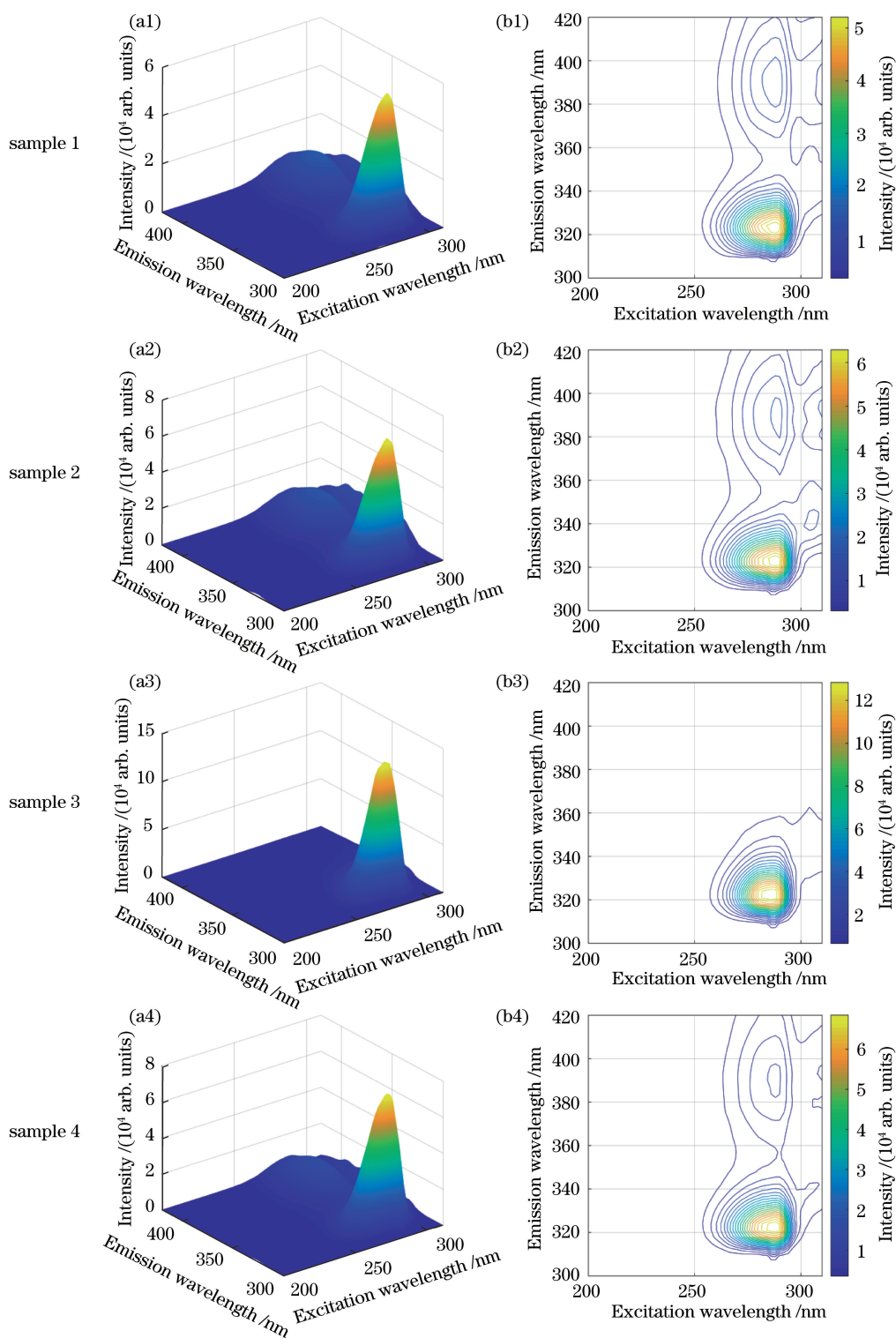


图 4 不同混合溶液的荧光光谱。(a) 三维荧光光谱；(b) 溶液的等高线图

Fig. 4 Fluorescence spectra of different mixed solutions. (a) Three-dimensional fluorescence spectra; (b) contour maps of solution

适应度曲线如图 5(a) 所示, 可以看到, 适应度在第 2 代达到最大值并保持不变, 其最佳适应度为 93.9394%。采用 PSO 算法作为对比, 设置粒子群的种群数量为 20, 迭代次数为 200, 优化得到的最优

惩罚因子 $C = 61.3628$ 、最优核参数 $g = 0.34643$, 其训练过程的适应度曲线如图 5(b) 所示, 可以看到, 适应度在第 2 代到第 37 代保持不变, 在第 38 代达到最大值并保持不变, 其最佳适应度为 85.2941%。

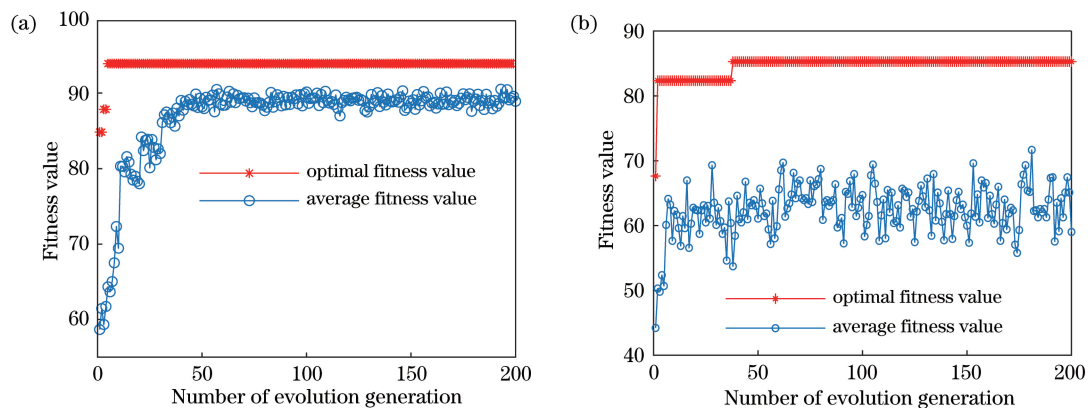


图 5 两种优化算法的适应度曲线。(a) ICSO-SVM 的适应度曲线；(b) PSO-SVM 的适应度曲线

Fig. 5 Fitness curves of two optimization algorithms. (a) ICSO-SVM fitness curve; (b) PSO-SVM fitness curve

ICSO-SVM 算法的最佳适应度能较早达到稳定,并且平均自适应曲线在整个迭代过程的收敛速度明显快于 PSO-SVM 算法,由此可得出 ICSO 算法的搜索能力稳定性和准确性高于 PSO 算法。

将训练过程得到的参数 C 和 g 代入 SVM 分类模型,对样本溶液进行分类,分类结果如图 6 所示。

图 6(a) 为 ICSO-SVM 模型的分类型图,图 6(b) 为 PSO-SVM 模型的分类型图。从分类结果可以看到,ICSO-SVM 的分类结果全部正确,分类准确率达到 100%,PSO-SVM 的分类结果有一个分类错误,分类准确率为 97.0588%。显然,ICSO-SVM 更适合用于性激素成分的识别。

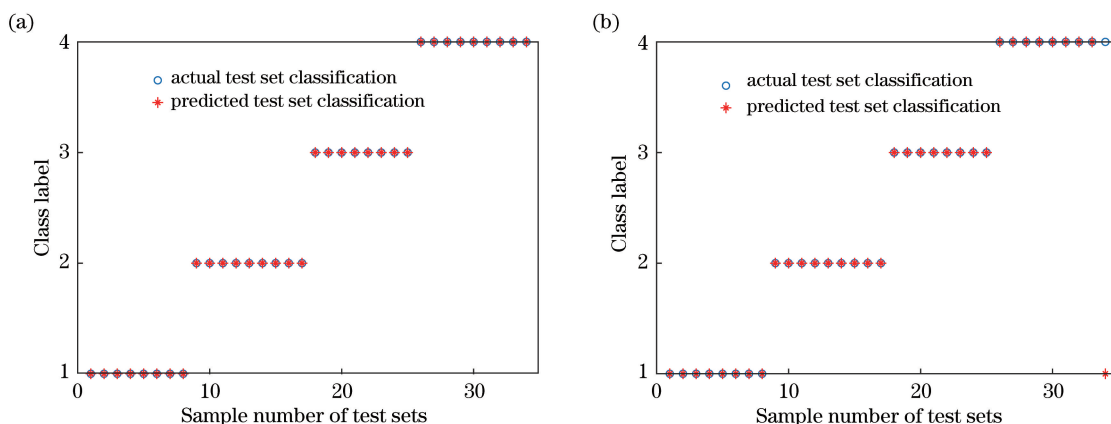


图 6 两种优化算法的样本分类结果。(a) ICSO-SVM 样本分类；(b) PSO-SVM 样本分类

Fig. 6 Sample classification results of two optimization algorithms. (a) ICSO-SVM sample classification; (b) PSO-SVM sample classification

ICSO-SVM 和 PSO-SVM 的分类结果如表 1 所示,从表 1 可以看到,ICSO-SVM 的分类准确性、最佳适应度和稳定迭代次数均优于 PSO-SVM,ICSO-SVM 模型可以更准确地对水溶液中性激素进行识别。

表 1 混合性激素样本溶液分类结果

Table 1 Classification results of mixed hormone sample solution

Model	Classification accuracy / %	Optimum fitness value / %	Number of stable iterations
ICSO-SVM	100.0000	93.9394	2
PSO-SVM	97.0588	85.2941	38

5 结 论

针对水溶液中性激素混合组分在定性分析中出现的光谱严重重叠问题,采用 ICSO 算法来优化 SVM 的输入参数,完成对性激素混合水溶液的分类鉴别。与 PSO-SVM 方法相比,ICSO-SVM 所训练的模型稳定性高,收敛速度快,对 3 种典型性激素的分类准确率可达到 100%。ICSO-SVM 方法的识别率高,对环境无污染,能够节省大量的人力、物力,可以作为性激素荧光检测的一种替代方法。

参 考 文 献

[1] Jin F L. Chromatographic methods of sexual hormones

- in animal-derived food [D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2013: 1-5.
- 靳凤龙. 动物源食品中性激素的色谱测定方法研究 [D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2013: 1-5.
- [2] Rao Y K, Li Z, Zhang D Y, et al. Simultaneous determination of 14 sexual hormones in health care products by ultra performance liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-triple quadrupole mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, 37(6): 626-633.
- 饶雅琨, 李卓, 张荻悦, 等. 超高效液相色谱-大气压化学电离-三重四极杆质谱法同时测定保健食品中 14 种性激素类药物 [J]. 色谱, 2019, 37(6): 626-633.
- [3] Hu B, Li L X, Liu H, et al. Research progress on detection of sex hormones in cosmetics [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2020, 50(9): 629-637.
- 胡贝, 李丽霞, 刘红, 等. 化妆品中性激素的检测方法研究进展 [J]. 日用化学工业, 2020, 50(9): 629-637.
- [4] Lukha P, Dixon P F. Some recent high-performance liquid chromatography assays of steroid hormones and their conjugates [J]. Biochemical Society Transactions, 1985, 13(6): 1064-1066.
- [5] Lu Y. Determination of endogenous steroids based on high-performance liquid chromatography and liquid chromatography-mass spectrometry [D]. Shanghai: Fudan University, 2013: 7-11.
- 陆焯. 基于液相色谱及液质联用技术测定内源性激素的方法研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2013: 7-11.
- [6] Zuo Z L, Zhao N J, Meng D S, et al. Identification of petroleum organic matter in soil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222601.
- 左兆陆, 赵南京, 孟德硕, 等. 基于三维荧光光谱的土壤中石油类有机物分类识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222601.
- [7] Zhang Y, Chen G Q, Zhu C, et al. Soft measurement of the purity of the synthetic edible pigment powder using fluorescence spectroscopy combined with SVM [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12): 3978-3985.
- 张毅, 陈国庆, 朱纯, 等. 荧光光谱结合支持向量机测定食用色素纯度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 3978-3985.
- [8] Li S M, Han Y Z, Zhang Y X, et al. Recognition of nonlinear fluorescence spectrum of support vector machine networks [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 147-151.
- 李素梅, 韩应哲, 张延焯, 等. 基于支持向量机的非线性荧光光谱的识别 [J]. 光学学报, 2006, 26(1): 147-151.
- [9] Chen H J. Research on the application of support vector machine in oil spill fluorescence spectrum analysis [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008: 27-39.
- 陈海菊. 支持向量机在溢油荧光光谱分析中的应用研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008: 27-39.
- [10] Wang S T, Wu X, Zhu W H, et al. Fluorescence detection of polycyclic aromatic hydrocarbons by parallel factor combined with support vector machine [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0530002.
- 王书涛, 吴兴, 朱文浩, 等. 平行因子结合支持向量机对多环芳烃的荧光检测 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0530002.
- [11] He X H. Research on text classification based on support vector machine [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2019: 23-24.
- 贺心皓. 基于支持向量机的文本分类研究 [D]. 成都: 成都信息工程大学, 2019: 23-24.
- [12] Meng X B, Liu Y, Gao X Z, et al. A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization [M] // Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2014: 86-94.
- [13] Xu Y X, Li W, Li D D, et al. Disaggregation for non-invasive domestic appliances based on the improved chicken swarm optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 27-32.
- 许仪勋, 李旺, 李东东, 等. 基于改进鸡群算法的非侵入式家电负荷分解 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 27-32.
- [14] Zhao X T, Che X G, Wang S T, et al. Rapid detection of quinolones in water based on fluorescence spectrometry and BLS/RBL [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0930001.
- 赵兴涛, 车先阁, 王书涛, 等. 荧光光谱法结合 BLS/RBL 用于快速检测水中喹诺酮类抗生素 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0930001.