

基于三维荧光光谱的土壤中石油类有机物分类识别

左兆陆^{1,2,3}, 赵南京^{1,3*}, 孟德硕^{1,3}, 黄尧^{1,2,3}, 殷高方^{1,3}, 刘建国^{1,3}, 谷艳红⁴

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院合肥物质科学研究院安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴合肥学院先进制造工程学院, 安徽 合肥 230601

摘要 基于三维荧光光谱法,以含有不同类型润滑油、机油、柴油、汽油的土壤样品为研究对象,分别提取不同土壤样品的三维荧光光谱,然后计算不同样品的荧光强度均值、标准差、重心横纵坐标、相关系数、长轴斜率、偏度和峰度等 7 个特征参数,并作为不同油类的识别特征。对 7 个特征参数进行主成分分析(PCA),前 3 个主成分累计贡献率为 88.79%,但经聚类分析发现 5w-40 型润滑油和 15w-40 型润滑油的主成分混叠较强,无法准确实现分类。将经 PCA 得到的 3 个主成分作为反向传输人工神经网络的输入量,将石油烃有机物的种类作为输出量,以进行油类识别,综合识别率达到 95.6%。实验结果表明,基于三维荧光光谱方法直接从油污土壤中识别污染油可行,该方法为后续研究基于三维荧光光谱识别土壤中油类污染物提供了技术支持,具有较好的应用前景。

关键词 物理光学; 土壤; 三维荧光光谱; 石油烃有机物; 识别; 聚类; 主成分分析

中图分类号 O657.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.222601

Identification of Petroleum Organic Matter in Soil Based on Three-Dimensional Fluorescence Spectroscopy

Zuo Zhaolu^{1,2,3}, Zhao Nanjing^{1,3*}, Meng Deshuo^{1,3}, Huang Yao^{1,2,3},

Yin Gaofang^{1,3}, Liu Jianguo^{1,3}, Gu Yanhong⁴

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Anhui Province Key Laboratory of Optical Monitoring Technology for Environment, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract This study focuses on selected soil samples containing different types of lubricating oil, engine oil, diesel oil, and gasoline. Three-dimensional (3D) fluorescence spectra are extracted from different soil samples, and 7 characteristic parameters are calculated for each of them, including the fluorescence intensity mean, standard deviation, transverse and longitudinal coordinates of center of gravity, correlation coefficient, long-axis slope, skewness, and kurtosis. Spectral data are used as identification characteristics for oil. Principal component analysis (PCA) is performed on the 7 characteristic parameters, and the feature vectors of the first 3 principal components after dimension reduction are extracted, accounting for a cumulative contribution rate of 88.79%. Clustering analysis reveals highly similar principal components of 5w-40 and 15w-40 lubricating oils; therefore, these oils can not be accurately classified. Subsequently, the first 3 principal components obtained by PCA are input into the back-propagation artificial neural network and the types of petroleum organic matter are used as outputs for oil

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-08; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0800902-2)、国家自然科学基金(61705238)、安徽省科技重大专项(16030801117)、安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0547)、中科院安徽光学精密机械研究所所长基金(AGHH201602)

* E-mail: njzhao@aiofm.ac.cn

identification, resulting in a 95.6% comprehensive recognition rate. Experimental results demonstrate the feasibility of identifying oil pollutants directly using 3D fluorescence spectroscopy of oily soil. Additionally, technical support is provided for subsequent research on oil pollutant identification in soil based on 3D fluorescence spectroscopy, indicating good application prospects.

Key words physical optics; soils; three-dimensional fluorescence spectroscopy; petroleum organic matter; identification; clustering; principal component analysis

OCIS codes 260.2510; 160.4890; 300.6280

1 引言

石油是人类在生产生活中使用的重要能源之一,伴随着工业的迅猛发展,石油的开发和利用力度逐渐增加,人们对石油进行精炼、加工,得到了多种石油制品,但在油品生产和运输过程中,由于各种原因部分油品会泄漏进入土壤^[1-2],对土壤造成严重的污染。石油类制品及其分解产物中的多种有毒物质会严重破坏生态环境,制约土壤的可持续利用^[3-4],并通过食物链进入人体,危害人体健康。为控制油品泄露进入土壤,许多国家都采取了一系列的措施来控制 and 减少石油类有机物在土壤中的排放^[5]。在油品运输线路上的土壤中对污染油进行分类识别可以推断出泄露石油制品的生产厂商,进而通知厂商进行运输整改。在油品生产厂内、仓库附近等场地对未知油品污渍进行识别,可以及时对该油种的包装进行检查处理^[6]。因此,对土壤中污染油种类进行准确识别是生产、环保部门监控土壤中石油类污染物的重要工作之一。

由于土壤结构和性质复杂,分析土壤中石油类有机污染物有一定的困难。目前,已经有很多检测石油类污染物的方法,如气相色谱法、高效液相色谱法、气质联用技术、超临界流体层析色谱等,这些方法需要复杂的预处理,操作繁琐、费时费力,且不能保证石油类有机污染物的完全提取,无法满足普查、动态监测土壤污染状况的需求^[7-9]。激光诱导荧光技术(LIF)具有灵敏度高、选择性好、可实现原位在线检测等优点,已被应用于土壤环境中油类有机物的定性及定量分析^[10]。Löhmannsröben等^[11]利用LIF对土壤表层中的有机污染物进行原位定量测量,并对测量结果进行了误差分析,测量效果良好。杨仁杰等^[12]研究土壤颗粒大小对荧光特性的影响,并进行了校正。吴维兴^[13]应用LIF采集各地14处土壤,对各土壤样品中的16种多环芳烃进行快速定量检测,统计出16种多环芳烃在部分区域的分布状况。一些学者也应用三维荧光光谱法对不同介质中的有机物进行了相关研究。Christensen等^[14]采用平行因子法证实油类荧光光谱中含有萘、菲、芴、芘

4类物质的荧光信号。王春艳等^[15]使用三维同步扫描荧光光谱法测量不同浓度的水油混合溶液,得到了较高准确性的测量结果。华北理工大学陈至坤等^[16]应用缺损数据重构法去除瑞利散射,还原了三维荧光光谱的有效信息,证明该方法是比较理想的瑞利散射消除方法。燕山大学的王玉田等^[17]在激发光为250~380 nm范围内应用三维荧光光谱法研究油类在有机溶剂中的特征,论证了该方法识别各种油类的可行性。山西省地质调研所的李爱民等^[18]利用三维荧光光谱从土壤中检测出萘、芘、菲3种多环芳烃。

本文以土壤中常见石油类制品为研究对象,分别提取不同土壤样本中石油类制品的三维荧光光谱,计算出纯油荧光光谱的强度均值、标准差、重心、相关系数、长轴斜率、偏度和峰度7个统计学参数,用这些参数进行不同种类及不同型号油类污染物的识别特征,再用主成分分析算法(PCA)和人工神经网络对土壤中石油类制品进行分类识别。

2 实验

2.1 样品制备

所用土壤采自合肥市科学岛董铺水库周边,经烘干、100目(颗粒直径为150 μm)国标标准筛过筛、研磨等步骤后,去除土壤中大颗粒石子,使土质干燥细腻。石油样品选取中石化92#汽油、中石化0#柴油、壳牌5w-40型润滑油、壳牌15w-40型润滑油、采埃孚VN2变速箱机油、汇绿牌复合型生物柴油。土壤经天平称重,与不同种类石油单独混合,搅拌、摇匀,成为实验所用的土壤样品。

2.2 荧光检测

利用日本日立公司的HITACHI F-7000型三维荧光分光光度计获取土壤样品的三维荧光光谱。该仪器的光源是氙灯,经分光系统射出不同波长的入射光。在不同波长的入射光照射下,土壤样品中的荧光物质发射出不同波长、不同强度的荧光。设置三维荧光扫描仪的激发与发射狭缝宽度为5 nm,对应的光谱分辨率为2 nm,积分时间为0.5 s,光电

倍增管电压为 600 V。荧光发射波长范围为 200~400 nm,步长为 2 nm;设置激发波长范围为 200~500 nm,步长为 2 nm。将制备好的土壤样品放入三维荧光扫描仪的样品池中,并进行扫描。采集多种土壤样品的三维荧光信号的光谱,在 MATLAB 软件中进行数据处理和分析。

3 数据分析

为消除浓度对分析数据带来的影响,将采集的各

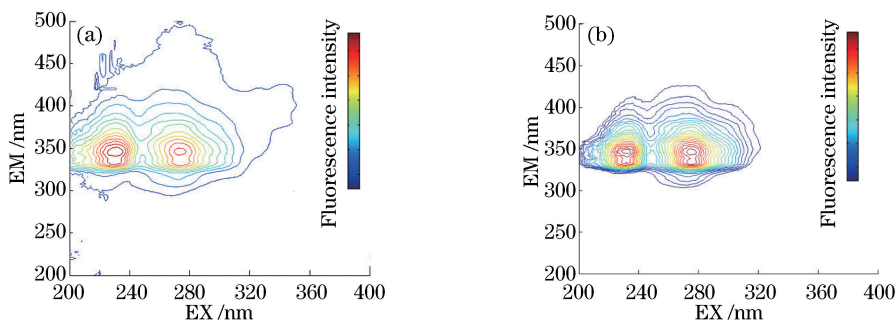


图 1 0#柴油降噪前后的效果比较。(a)降噪前;(b)降噪后

Fig. 1 Comparison of effects before and after noise reduction of 0# diesel. (a) Before noise reduction; (b) after noise reduction

图 1(a)中,0#柴油样品光谱存在明显噪声,经去除负值算法滤波降噪后,得到图 1(b)较纯净的 0#柴油的三维荧光光谱。依此方法,得到 6 种纯油的标准三维荧光光谱。

在图 2 中,因为各种油是混合物,它们不同的成分堆叠形成了他们各自独有的特征。石油类有机物成分具有相似性,其中包含很多荧光物质,其中占主导地位的是芳香族化合物和含共轭双键化合物,这些化合物主要是多环芳烃萘、蒽、菲、荧蒽、苯并芘、含有重金属和氢的卟啉等。图 2 中 6 种油的吸收中心分布在 220~300 nm,这与它们的主要成分有关。各种油指纹区域内的峰值位置坐标如表 1 所示。

应用二维荧光光谱法识别多种石油烃时,人们往往选取靠近油类吸收中心附近波长的光作激发光源,以便获取较强的光谱信息。各种油类的吸收峰中心波长不同,6 种油在左右指纹区域内的峰值坐标不同,因此在使用二维荧光光谱方法时,用某一种波长的光源不能保证发射波长都能穿过每种油的吸收中心,获取的各种石油类有机物的荧光光谱也不能完全显示出各种石油类有机物的光谱特征,这会导致土壤中各种石油烃的识别率相对较低。相对而言,三维荧光光谱的信息量更多,更有利于提高土壤中各种石油烃的识别率。

分别计算出 6 种油的三维荧光光谱的平均值

种土壤样品的三维荧光光谱进行浓度归一化处理,然后去除土壤基底背景的三维荧光信号,用 Eemscat 函数去除拉曼散射与瑞利散射。在溶液中,一般只是去除乙醇、 CCl_4 等纯净的有机溶剂背景,即可得到纯净的油类样品三维荧光光谱。土壤背景光谱较复杂,实验时难以保证所有土样的土壤背景信号完全一致,所以对除去土壤背景后油类的三维荧光信号采用平滑滤波降噪处理。以 0#柴油为例,如图 1 所示,其中 EM 为发射波长,EX 为激发波长。

(\bar{z})、标准差(σ)、重心(m_x, m_y)、相关系数(ρ)、偏度(s_{ke})、峰度(k_{ur})和长轴斜率(f_i),三维光谱的统计参数如表 2 所示。

平均值(\bar{z})代表三维荧光光谱的平均能量强度;标准差(σ)反映荧光强度值在值域的波动性;重心(m_x, m_y)反映矿物油激发-发射能量集中的波长位置;相关系数(ρ)反映发射光与激发光之间相互关系的密切程度,当荧光峰单一时,相关系数较大,当有多个荧光峰时,相关系数较小;长轴斜率(f_i)是光谱等效密集椭圆的长轴方向,能够代表能量集中的走向,可视为光谱分布的主方向;偏度(s_{ke})表征发射峰的对称性;峰度(k_{ur})表征谱峰的形状, k_{ur} 值越大,峰形变化越平缓。

为对土壤中各种石油类有机物进行分类识别,首先尝试 PCA,即以 6 种油类的 8 个统计学参数作为主成分提取的对象,在执行程序中设置累计贡献率阈值不低于 85%,计算出前 3 种主成分的累计贡献率及主成分得分矩阵,如表 3 和表 4 所示。

在第一主成分 PC1 中,标准差 σ 、峰度 k_{ur} 和偏度 s_{ke} 得分相对较高,是鉴别土壤中油类的主要特征因素;在第二主成分 PC2 中,重心横坐标 m_x 和重心纵坐标 m_y 得分较高;在第三主成分 PC3 中,相关系数 ρ 得分较为突出。最后求得 6 种油的前三种主成分,如图 3 所示。

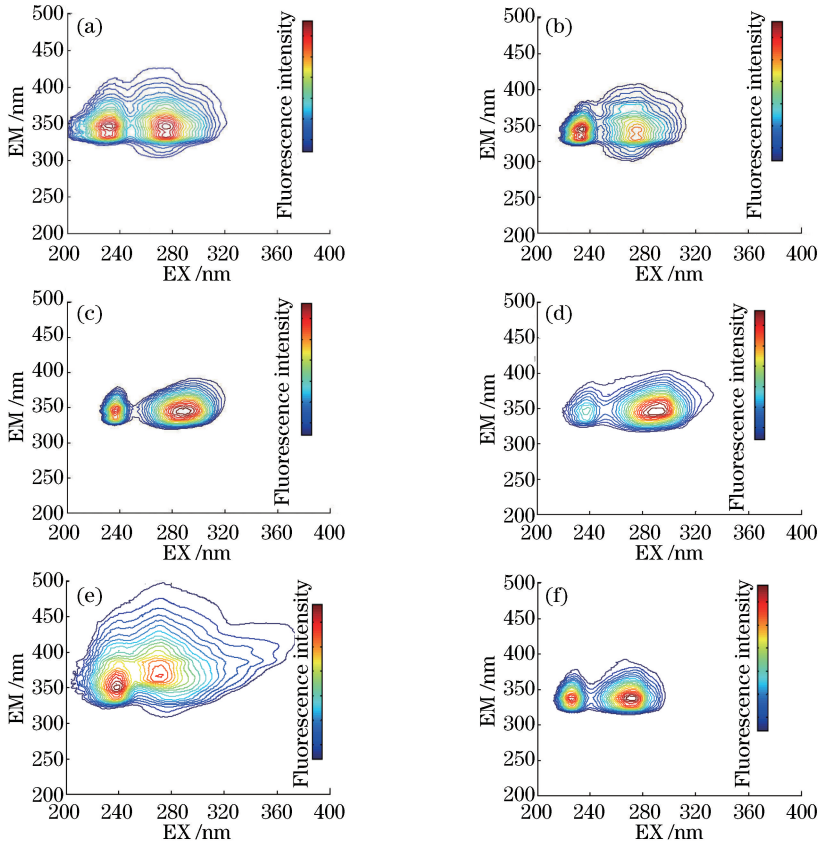


图 2 土壤中 6 种油的三维荧光光谱信号。(a) 0# 柴油;(b) 生物柴油;(c) 5w-40 型润滑油;
(d) 15w-40 型润滑油;(e) VN2 变速箱机油;(f) 92# 汽油

Fig. 2 Three-dimensional fluorescence signals of 6 oils in soil. (a) 0# diesel; (b) biodiesel; (c) 5w-40 lubricating oil;
(d) 15w-40 lubricating oil; (e) VN2 gearbox oil; (f) 92# gasoline

表 1 6 种油指纹区域内的峰值位置坐标

Table 1 Coordinates of peak positions in fingerprint areas of 6 oils

Type of petroleum products	Left area(EX, EM)	Right area(EX, EM)
0# diesel	(232, 334)	(288, 334)
Biodiesel	(230, 346)	(276, 334)
5w-40 lubricating oil	(236, 336)	(290, 348)
11w-40 lubricating oil	(236, 346)	(290, 344)
VN2 gearbox oil	(238, 346)	(270, 372)
92# gasoline	(226, 338)	(270, 336)

表 2 6 种样品的三维光谱统计参数

Table 2 3D spectral statistical parameters of 6 samples

Type of petroleum products	z	σ	(m_x, m_y)	s_{ke}	k_{ur}	ρ	f_i
0# diesel	55.17	127.8	(257.4, 352.7)	0.6547	2.221	-0.1057	3.340
	53.87	122.0	(256.9, 353.0)	0.6619	2.707	-0.1624	3.107
	55.81	128.2	(255.1, 353.7)	0.6095	2.077	-0.1226	3.307
	54.97	130.1	(259.7, 353.9)	0.6927	2.304	-0.1403	2.996
Biodiesel	49.65	102.7	(251.2, 347.7)	0.6605	4.803	-0.0645	3.078
	48.21	107.3	(248.0, 345.1)	0.7015	4.701	-0.0579	3.104
	48.77	100.6	(252.1, 346.5)	0.6822	4.543	-0.0533	3.093
	49.15	105.8	(249.7, 345.4)	0.6431	4.933	-0.0688	3.089

Type of petroleum products	z	σ	(m_x, m_y)	s_{ke}	k_{ur}	ρ	f_i
5w-40 lubricating oil	22.85	77.73	(273.4, 351.2)	2.527	7.709	-0.4140	4.036
	24.63	80.98	(271.6, 349.1)	2.579	7.534	-0.4937	4.311
	23.57	75.20	(275.8, 350.9)	2.611	7.378	-0.4107	4.089
	22.13	73.31	(270.6, 352.0)	2.499	7.944	-3.9527	4.151
	20.20	70.35	(280.7, 353.2)	2.117	9.273	-0.5840	4.288
15w-40 lubricating oil	19.61	71.35	(284.9, 352.8)	1.989	10.27	-0.6347	3.864
	19.77	69.44	(281.1, 353.4)	2.366	8.964	-0.5238	4.291
	17.05	67.87	(283.7, 353.5)	2.034	9.541	-0.6049	4.850
	70.88	134.4	(272.6, 384.5)	0.465	1.425	-0.0622	2.805
VN2 gearbox oil	73.58	128.6	(269.6, 380.7)	0.399	1.945	-0.1037	2.143
	67.42	139.7	(270.1, 386.2)	0.507	1.843	-0.0894	3.027
	69.83	133.1	(273.4, 380.5)	0.473	2.157	-0.0576	3.101
	9.233	31.15	(254.1, 334.8)	2.008	9.080	-0.1251	3.584
92# gasoline	10.35	34.23	(252.4, 334.2)	2.105	7.671	-0.2089	4.647
	8.181	33.75	(251.3, 333.6)	2.360	10.45	-0.1114	5.252
	8.293	29.82	(255.6, 337.3)	2.032	9.197	-0.2139	3.374

表 3 前 3 种主成分的累计贡献率

Table 3 Cumulative contribution rates of first 3 principal components

Principal component	Contribution rate /%	Cumulative contribution rate /%
PC1	45.34	45.34
PC2	26.16	71.50
PC3	17.29	88.79

表 4 前 3 种主成分的得分矩阵

Table 4 Score matrices of first 3 principal components

Principal component	z	σ	m_x	m_y	s_{ke}	k_{ur}	ρ	f_i
PC1	0.708	0.897	-0.204	0.302	-0.821	-0.772	0.219	-0.391
PC2	0.114	0.221	0.710	0.622	0.179	-0.056	-0.282	0.258
PC3	-0.066	-0.135	0.272	0.153	-0.085	0.228	0.888	0.179

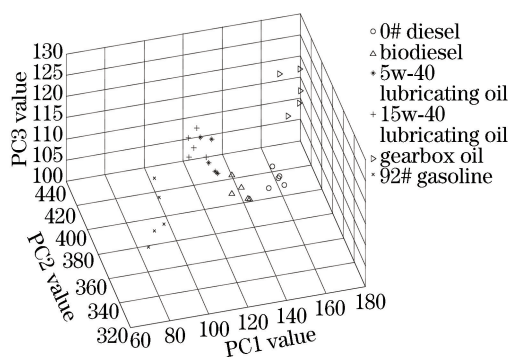


图 3 土壤中 6 种油的前三个主成分

Fig. 3 First 3 principal components of 6 oils in soil

根据图 3 可知, 土壤中不同类型的石油样品均表现出了一定程度的聚类, 但是仍然存在一定的重叠区域, 其中 92# 汽油、变速箱机油聚类与其他油类相距较远, 5w-40 型润滑油和 15w-40 型润滑油存在一定的重叠区域。这是因为 5w-40 型润滑油和 15w-40 型润滑油的基础油非常类似, 但为使润滑油

的黏度降低, 提高润滑油在低温下的流动性, 5w-40 型润滑油比 15w-40 型润滑油中添加了更多的环烷类添加剂。因此, 仅仅使用 PCA 不能对土壤中各种石油类有机物进行准确分类。

反向传输人工神经网络(BP-ANN)是常用的分类模型之一, 但如果将 6 种油的统计参数作为特征向量直接代入 BP-ANN 进行油类识别, 会导致训练速度过慢和训练过饱和的问题。所以, 需要对 7 个特征向量进行降维。根据主成分的方差累计贡献率大于 85% 的最优主成分选取原则, 提取前 3 个主成分, 它们包含了样品的绝大部分光谱信息, 同时也是对原来 7 种特征变量的降维。在处理多种油品分类时, 降维后的 3 个主成分可以作为 BP-ANN 的输入变量, 进而提高分类效率。

将 BP-ANN 的隐藏层设定为 1, 激活函数选择双极性 Sigmoid 函数。输出层为 6 种石油制品土壤样品的主成分, 激活函数为 softmax 函数。每种油

污土壤样品制备 100 份,其中 70 份作为训练集,30 份作为预测集,分类结果如表 5 所示。

表 5 BP-ANN 分类结果

Table 5 Classification results of BP-ANN

Type of petroleum products	0 # diesel	Biodiesel	5w-40 lubricating oil	15w-40 lubricating oil	Gearbox oil	92 # gasoline
Amount of samples	30	30	30	30	30	30
Identify the correct amount	29	29	26	28	30	30
Correct rate / %	96.7	96.7	86.7	93.3	100	100
Average correct rate / %	95.6					

分类结果显示 92 # 汽油和变速箱机油的识别率最好,正确率达到了 100%,润滑油分类的正确率略低,其中 5w-40 型润滑油正确率为 86.7%,BP-ANN 将 5w-40 型润滑油识别成为 15w-40 型润滑油,说明这 2 种润滑油的特征仍存在混叠。总体上,利用 BP-ANN 的综合识别率为 95.6%。

4 结 论

为对土壤中各种石油烃有机物进行识别分类,使用三维荧光光谱的荧光强度均值、标准差、重心横纵坐标、相关系数、长轴斜率、偏度和峰度等 7 个统计参数作为分类特征,经 PCA 得到各种石油制品的 3 个主成分,其累计贡献率达到 88.79%。经主成分聚类分析发现,5w-40 型润滑油和 15w-40 型润滑油混叠较强。为进一步实现土壤中油类的准确分类,用降维后的 3 个主成分作为特征向量输入 BP-ANN,进而对土壤中石油制品进行分类,综合识别率达到 95.6%。因此,基于三维荧光光谱对土壤中石油类有机物进行识别是可行的。

参 考 文 献

- [1] Wang X, Zhao N J, Yu Z M, *et al.* Detection method progress and development trend of organic pollutants in soil using laser-induced fluorescence spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 857-863.
王翔, 赵南京, 俞志敏, 等. 土壤有机污染物激光诱导荧光光谱检测方法研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 857-863.
- [2] Wang J, Zhang F, Wang X P, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristics by parallel factor method coupled with self-organizing map and its relationship with water quality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0730003.
王娟, 张飞, 王小平, 等. 平行因子法结合自组织映射神经网络的三维荧光特征及其与水质的关系[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0730003.
- [3] Kong D M, Zhang C X, Cui Y Y, *et al.* Detection of oil species in mixed oil based on alternating penalty trilinear decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1130005.
孔德明, 张春祥, 崔耀耀, 等. 基于交替惩罚三线性分解的混合油液油种成分的检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1130005.
- [4] Chen Z K, Mi Y, Shen X W, *et al.* Fluorescence detection of oil pollutants based on PARAFAC and ART algorithms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 013004.
陈至坤, 弭阳, 沈小伟, 等. 基于 PARAFAC 和 ART 算法的油类污染物荧光检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 013004.
- [5] Lemke M, Fernández-Trujillo R, Löhmansröben H G. *In-situ* LIF analysis of biological and petroleum-based hydraulic oils on soil[J]. *Sensors*, 2005, 5(1): 61-69.
- [6] Ding Y T, Jiang W H, Yu P. Hopf-zero bifurcation in a generalized Gopalsamy neural network model[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 70(2): 1037-1050.
- [7] Bublitz J, Christophersen A, Schade W. Laser-based detection of PAHs and BTXE-aromatics in oil polluted soil samples [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1996, 355(5/6): 684-686.
- [8] Mbaye O M A, Maroto A, Gaye-Seye M D, *et al.* A new direct laser photo-induced fluorescence method coupled on-line with liquid chromatographic separation for the simultaneous determination of anilides pesticides[J]. *Talanta*, 2015, 132: 909-914.
- [9] Feng W W, Wang R, Sun P Y, *et al.* The study of fluorescence spectrum using ultraviolet-laser for several typical oil pollutants [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1168-1170.
冯巍巍, 王锐, 孙培艳, 等. 几种典型石油类污染物紫外激光诱导荧光光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1168-1170.
- [10] Lai W H, Zhou M R, Wang Y, *et al.* Application of counterfeit liquor recognition based on deep learning and laser induced fluorescence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 043001.

- 来文豪, 周孟然, 王亚, 等. 深度学习与激光诱导荧光在假酒识别中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 043001.
- [11] Löhmannsröben H G, Roch T. *In situ* laser-induced fluorescence (LIF) analysis of petroleum product-contaminated soil samples [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2000, 2(1): 17-22.
- [12] Yang R J, Shang L P, Bao Z B, *et al.* Feasibility of using laser-induced fluorescence to detect directly polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2148-2150.
- 杨仁杰, 尚丽平, 鲍振博, 等. 激光诱导荧光快速直接检测土壤中多环芳烃污染物的可行性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2148-2150.
- [13] Wu W X. Research progress on the pollution and environmental behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(25): 8563-8565, 8568.
- 吴维兴. 土壤中多环芳烃污染及其环境行为研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(25): 8563-8565, 8568.
- [14] Christensen J H, Hansen A B, Mortensen J, *et al.* Characterization and matching of oil samples using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. Analytical Chemistry, 2005, 77(7): 2210-2217.
- [15] Wang C Y, Wang X S, Wang Y H, *et al.* Fluorescence analysis of crude oil samples with different spectral approaches [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(4): 728-732.
- 王春艳, 王新顺, 王延华, 等. 基于不同光谱技术的原油样品的荧光分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 728-732.
- [16] Chen Z K, Huang W, Shen X W, *et al.* Elimination method of Rayleigh scattering for three dimensional fluorescence spectra of oil pollutants [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(11): 121-126.
- 陈至坤, 黄微, 沈小伟, 等. 油类污染物三维荧光光谱的瑞利散射消除方法[J]. 中国测试, 2018, 44(11): 121-126.
- [17] Wang Y T, Zhang Y L, Wang J Y. Oil identification technique based on analysis of three-dimensional fluorescence spectra feature [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1330-1333.
- 王玉田, 张艳林, 王金玉. 基于三维荧光光谱特征分析的油种鉴别技术的研究[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1330-1333.
- [18] Li A M, Lian Z Y, Yang R J, *et al.* Direct determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(4): 910-912.
- 李爱民, 连增艳, 杨仁杰, 等. 基于三维荧光光谱直测土壤中的多环芳烃[J]. 环境化学, 2018, 37(4): 910-912.