

# 高光谱特征波段在海洋典型溢油油种识别中的精度评估

杨俊芳<sup>1</sup>, 万剑华<sup>1</sup>, 马毅<sup>2,3</sup>, 姜宗辰<sup>2,4</sup>, 胡亚斌<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061; 4. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 溢油种类精准识别对快速有效地治理污染具有重要的意义, 高光谱遥感在海面溢油油种识别中至关重要。为探讨海洋典型溢油油种识别的高光谱特征波段范围, 通过设计室外模拟溢油实验, 在获取原油、燃料油、柴油、汽油和棕榈油等 5 种油种的实测高光谱数据基础上, 运用因子分析和光谱标准偏差分析法遴选溢油油种的光谱特征波段, 并利用支持向量机模型开展基于光谱特征波段的油种识别精度评价。结果表明, 基于光谱标准偏差分析和因子分析获得的特征波段的油种识别精度分别是 83.33%和 90.74%, 与基于全波段的识别精度相比, 整体精度分别提高了 3.7%和 11.11%。选取的特征波段(360~540 nm, 560~600 nm, 610~630 nm, 640~660 nm)可作为 5 种油种相互区分的最佳高光谱波段。

**关键词:** 高光谱数据; 光谱分析; 最佳波段; 油种识别; 精度评价

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)04-0097-09

DOI: 10.11759/hyxx20200720003

近年来, 海上溢油事件频发, 石油及其制品进入海洋, 对世界海洋环境、人类健康和经济发展造成严重危害<sup>[1-4]</sup>。海面溢油类型涉及溯源处罚和清理方案的制定, 溢油种类精准识别对快速有效地治理污染有重要的意义。油膜的光谱特性与它们的化学成分、基本分子振动及其组合有关, 不同种类油品的光谱吸收特征是区分油品种类的重要依据<sup>[5]</sup>, 确定油种的特征波段对油种识别具有重要指导意义。近年来, 光谱分析技术成为溢油油种识别的新兴手段。

高光谱数据光谱分辨率高, 细节信息突出, 可有效区分油膜和海水背景<sup>[6-9]</sup>, 还能根据油膜的光谱特征差异来识别油品的种类<sup>[10-11]</sup>。然而, 波段数众多使相邻波段间存在较强的相关性, 产生信息冗余, 若将全部波段用于地物分类过程, 计算量大且耗时, 且易造成“Hughes”效应。已有研究表明, 相对于宽波段, 位于光谱特定位置的窄带可以显著提高地物的分辨能力和分类精度<sup>[12]</sup>。Thenkabail 等<sup>[13]</sup>、Hu 等<sup>[14]</sup>分别基于实测的多种地物类型光谱数据, 采用几种光谱分析方法获取了地物类型的高光谱特征波段, 有效提高了分类精度。Lu 等<sup>[15]</sup>设计了实验室实验, 测量不同浓度的油包水和水包油乳化物的光谱特性, 发现表征二者的最佳波长, 建立了油乳化物类型分类的光学模型。赵冬至等<sup>[16]</sup>、刘丙新等<sup>[17]</sup>分别测量了不同油品的光谱反射率数

据, 并基于其光谱特性开展油种鉴别研究, 但均未给出有利于油种识别的特征波段范围。利用高光谱手段开展海面溢油监测是近年来的研究热点, 但海面典型溢油油种高光谱识别方面的研究工作较少, 尤其是在溢油油种高光谱特征波段选择的基础研究方面。

本文设计了室外模拟溢油实验, 使用 ASD (analytical spectral devices)地物光谱仪采集了 5 种典型油品在 350~2 500 nm 范围内的反射率光谱数据, 分别运用因子分析和光谱标准偏差分析方法对数百个光谱波段进行综合评估, 以选择提供有效信息的特征波段。在此基础上, 利用支持向量机模型开展基于光谱特征波段的油种识别精度评价, 确定海面典型溢油油种相互区分的最佳高光谱波段。

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600); 国家自然科学基金重大项目课题(61890964); 山东省联合基金项目(U1906217); 国家自然科学基金青年项目(41706208); 国家自然科学基金面上项目(42076182)

[Foundation: National Key Research and Development Project, No. 2017YFC1405600; National Natural Science Foundation of China Major Project, No. 61890964; National Natural Science Foundation of China Joint Fund, No. U1906217; National Natural Science Foundation, No. 41706208, No. 42076182]

作者简介: 杨俊芳(1991—), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事海洋溢油遥感监测研究, E-mail: yangjunfang113@163.com; 马毅(1973—), 通信作者, 男, 研究员, 主要从事海岛海岸带遥感与应用研究, E-mail: mayimail@fio.org.cn

# 1 材料和数据

## 1.1 实验油品材料

根据海面溢油来源及以往发生的溢油事件, 选取了 5 种典型海面溢油油品(图 1)开展实验, 油品的性质及描述如表 1 所示。

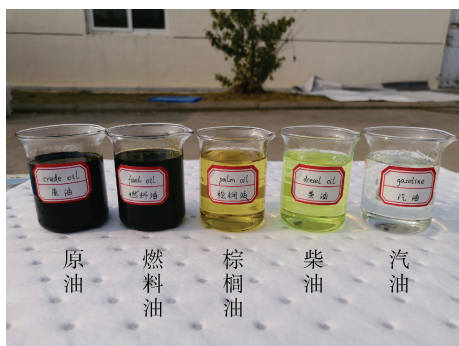


图 1 实验油品  
Fig. 1 Experimental oils

表 1 油品的性质及描述

Tab. 1 The properties and description of five oils

油品	密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	颜色	描述
原油	0.882	黑色	产于中国胜利油田, 加入防凝剂后的产品, 属于偏重的常规原油
燃料油	0.853	墨青色	大型船舶发动机的燃料, 原油提取汽油、柴油后的剩余重质油
棕榈油	0.836	棕黄色	目前国际贸易量最大的植物油品种, 中国已经成为全球第一大棕榈油进口国
0#柴油	0.835	浅青色	小型船舶发动机的燃料
95#汽油	0.737	淡黄透明色	2018 年, 在中国东海泄漏的凝析油也被称为天然汽油, 性质与汽油相似, 均易挥发

## 1.2 光谱数据获取及预处理

选择天气晴朗、风力小于 4 级(风速为 6~8 m/s)的环境条件下, 在聚氯乙烯水池(图 2a)中摆放亚克力力管, 注入青岛近岸海水。将预先盛于 5 个烧杯中的等体积原油、燃料油、柴油、汽油和棕榈油, 缓缓倾倒入已编号的直径为 15 cm 的亚克力管中(图 2c), 使其铺满水面。应用 ASD FieldSpec4 地物光谱仪(图 2b)依次测量朗伯体标准板、5 种油品、海水和天空光(图 2d)的光谱辐亮度, 每隔 0.5 或 1 h 测量一组光谱。测量期间应尽量保证光线照射稳定, 无阴影和强反射体的影响, 并利用水温计测量海水温度, 利用风速仪测量风速, 做好记录。

对采集到的光谱开展质量控制, 剔除无效和异常光谱, 并根据公式 1—4 将测量的各油种的辐亮度转化为遥感反射率。在忽略太阳耀斑和白帽等外界影响情况下, 光谱仪测量的海面辐亮度  $L_{Surface}$  可以表示为:

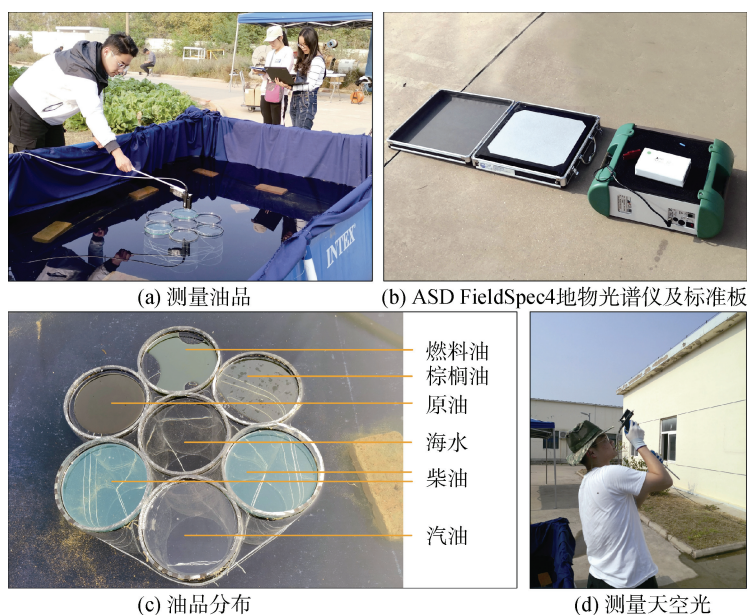


图 2 外场光谱测量过程  
Fig. 2 Measurement process of field spectrum

$$L_{\text{Surface}} = L_{\text{Water}} + \rho \cdot L_{\text{Sky}} \quad (1)$$

由此可得离水辐亮度为:

$$L_{\text{Water}} = L_{\text{Surface}} - \rho \cdot L_{\text{Sky}} \quad (2)$$

式中,  $\rho$ 表示气-油界面反射率, 宜采用 1.0%<sup>[1]</sup>。  $L_{\text{Sky}}$ 表示天空光辐亮度。

遥感反射率  $R$ 可用离水辐亮度  $L_{\text{Water}}$ 和海面入射辐照度  $E(\lambda)$ 的比值表示, 即

$$R = \frac{L_{\text{Water}}}{E(\lambda)} \quad (3)$$

其中,  $E(\lambda)$ 可由测量标准板得出:

$$E(\lambda) = \frac{L(\lambda)\pi}{\rho(\lambda)} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$ 表示波长,  $\rho(\lambda)$ 表示标准板的反射率, 要求在 10%~35%,  $L(\lambda)$ 表示测得的标准板辐亮度。

## 2 研究方法

### 2.1 光谱标准偏差特征分析方法

光谱标准偏差分析方法是基于原始光谱数据的搜索策略方法, 根据给定的准则函数进行波段选择, 寻找最好的波段, 以形成最佳的解决方案。由于油品的光谱曲线具有相似的光谱特征, 很难直接从原始光谱中提取各种油品的特征信息, 因此在文献[1]中, 我们采用包络线去除结合光谱标准偏差特征分析方法获取轻质油种间可分性光谱范围, 即先对原始光谱进行包络线去除, 以突出地物光谱的吸收和反射特征<sup>[18]</sup>, 而后根据在光谱波长 $\lambda$ 处, 油品  $i$  与油品  $j$  光谱反射率差值的绝对值  $|\sigma_{\lambda,i,j}|$  大于两种油品光谱反射率分别在波段 $\lambda$ 处的标准偏差  $S_{\lambda,i}$  和  $S_{\lambda,j}$  之和, 即

$$|\sigma_{\lambda,i,j}| > (S_{\lambda,i} + S_{\lambda,j}) \quad (5)$$

在这种情况下, 就可以认为两种油品  $i$  与油品  $j$  在波长 $\lambda$ 处具有可分性, 波长 $\lambda$ 就是能区分这两种油品的高光谱特征波段。

### 2.2 因子分析方法

因子分析方法是在挖掘原始光谱特征基础上的排序方法, 根据优先准则量化每个波段的重要性, 并在排序序列中选择排名靠前的波段。本文采用的因子分析方法核心思想为: 首先根据累积方差贡献率(大于 95%)确定参与特征波段选择的因子数量。通常第 1 个因子包含的样本信息量最多, 第 2 个因子包含的信息量次之, 但每个因子间彼此独立。由因子载荷矩阵可知, 不同光谱波长对每个因子的相关性是不一样的, 根据因子载荷来判断这些波长的重要性, 光谱波长的

因子载荷越大, 说明该光谱波长与该因子的相关性也越大, 即可认为是该因子的光谱波长。通过构建一定的规则, 可获取因子的光谱波长集合  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 。其中,  $B_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $B_2 = \{x_2, x_3, \dots, x_m\}$  是第一个因子和第二个因子的光谱波长集合。由于光谱波长是唯一的 ( $\{x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_m, \dots, x_p\}; n, m \in p$ ), 即  $B_1$  和  $B_2$  中的光谱波长  $x_2$  是同一光谱波长。因此统计光谱波长集合  $B$  中各光谱波长出现的频次, 再根据筛选准则(公式 6)即可获取最终的特征波长范围。

$$f_n = \left\{ \frac{Q}{M_n} \times 100\% > 70\% \right\} \quad (6)$$

其中,  $n$  为实验数据集类别,  $f_n$  为第  $n$  个数据集对应的频次比集合  $\{f\}$ ,  $Q$  为选取的波谱范围对应的频次集合  $\{q\}$ ,  $M_n$  为第  $n$  个实验数据集获取的波谱范围最大频次, 集合  $f_n$  元素满足公式(6)时, 该元素对应的波谱范围即为特征波长范围。

### 2.3 支持向量机模型

本文开展油种识别采用的算法是支持向量机中的 C-SVC 模型<sup>[19]</sup>, 其思想是建立一个分类超平面作为决策曲面, 使得正例和反例之间的隔离边缘最大化。核函数选择的是 RBF(radial basis function), 故决策函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^n \omega_i e^{-\gamma \|x_i - x\|^2} + b \right) \quad (7)$$

其中,  $\omega_i$  表示支持向量的系数,  $\gamma$  是核函数中的参数,  $x_i$  表示支持向量,  $x$  是待预测标签的样本,  $b$  为偏置系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 油种反射率光谱

实验采集了标准板、原油、燃料油、柴油、棕榈油、汽油、海水和天空光等的反射率光谱, 共 18 组, 获得 5 种典型油品和海水的均值遥感反射率(图 3a)。此外, 考虑到光谱仪感知光谱的末端存在系统的测量误差, 本文剔除了受大气吸收严重影响的波段(1 341~1 459 nm 和 1 801~1 979 nm)和水气强吸收影响的波段(1.4  $\mu\text{m}$ , 1.9  $\mu\text{m}$ )区间, 保留 360~1 340 nm、1 460~1 800 nm 和 1 980~2 400 nm 的光谱范围(图 3b)来研究海面典型溢油油种相互区分的最佳高光谱波段。

如图 3b 所示, 柴油、汽油和棕榈油等轻质油的反射率光谱曲线与海水大体一致, 而原油和燃料油等重质油的反射率光谱曲线与海水存在明显差异, 表现为在 390~730 nm 的可见光范围内, 低于海水反射率; 在 730~2 500 nm 的近红外和短波红外范围内,



高于海水反射率。在光谱的近红外和短波红外范围, 5种油品的反射率均高于海水反射率, 其中原油的反射率明显高于其他油种的反射率, 这是因为纯净的自然水体在近红外波段近似于一个黑体, 几乎吸收

了全部的能量; 原油的近红外和短波红外波段吸收大量太阳辐射能量, 并以热能的形式向外辐射。因此在 780~2 500 nm 范围内, 较纯净的自然水体的反射率很低, 趋近于 0, 而原油的反射率却很高。

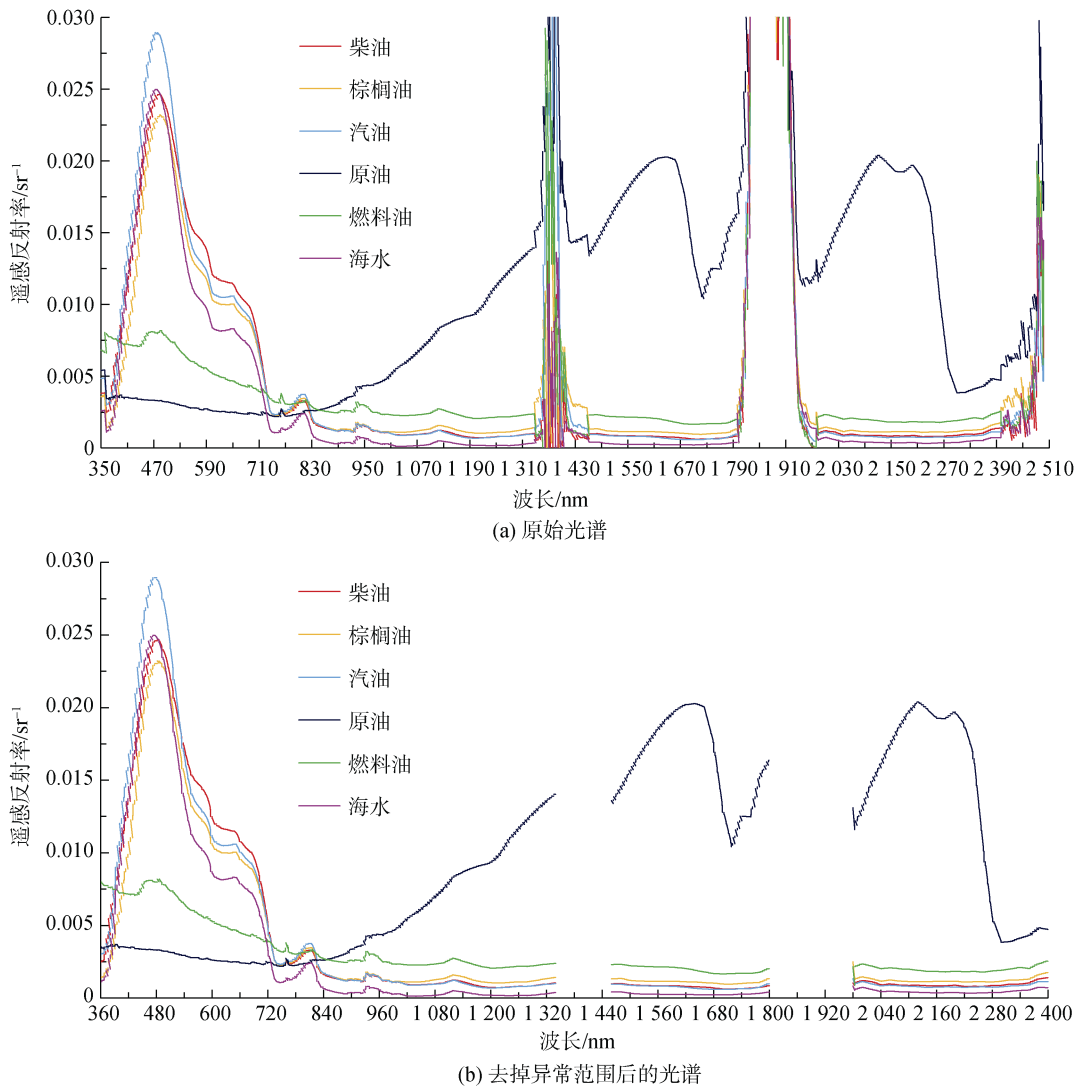


图3 典型油品和海水的均值光谱反射率  
Fig. 3 Mean spectral reflectance of common oils and seawater

### 3.2 基于光谱标准偏差特征可分性的油种识别

由图 4a 可知, 3 种轻质油的反射率光谱曲线极其相似, 仅在可见光蓝光波段 480 nm 处的反射峰和 550~620 nm 的绿光波段存在微小的差异, 因此, 开展轻质油间的可分性分析是非常必要的; 而对于图 4b 所示的包络线去除处理后的轻质油光谱, 可以发现在紫光波段、绿光波段和红光波段出现了明显的光谱区别, 且在同一光谱波段处最大值和最小值之

间的差异超过了原始数据。分析图 4c—h, 柴油、汽油和棕榈油的原始反射率光谱两两可分性波段较窄, 而经过包络线去除变换后, 可分性波段均被扩大。

表 2 给出了包络线去除变换前后 3 种轻质油类型两两区分特征光谱的查找表。表中未加粗的右上部分是 3 种轻质油类型原始光谱曲线中的两两可分波段(380~490 nm), 加粗的左下部分是包络线去除变换后光谱曲线中两两可分波段(375~455 nm, 485~630 nm)。

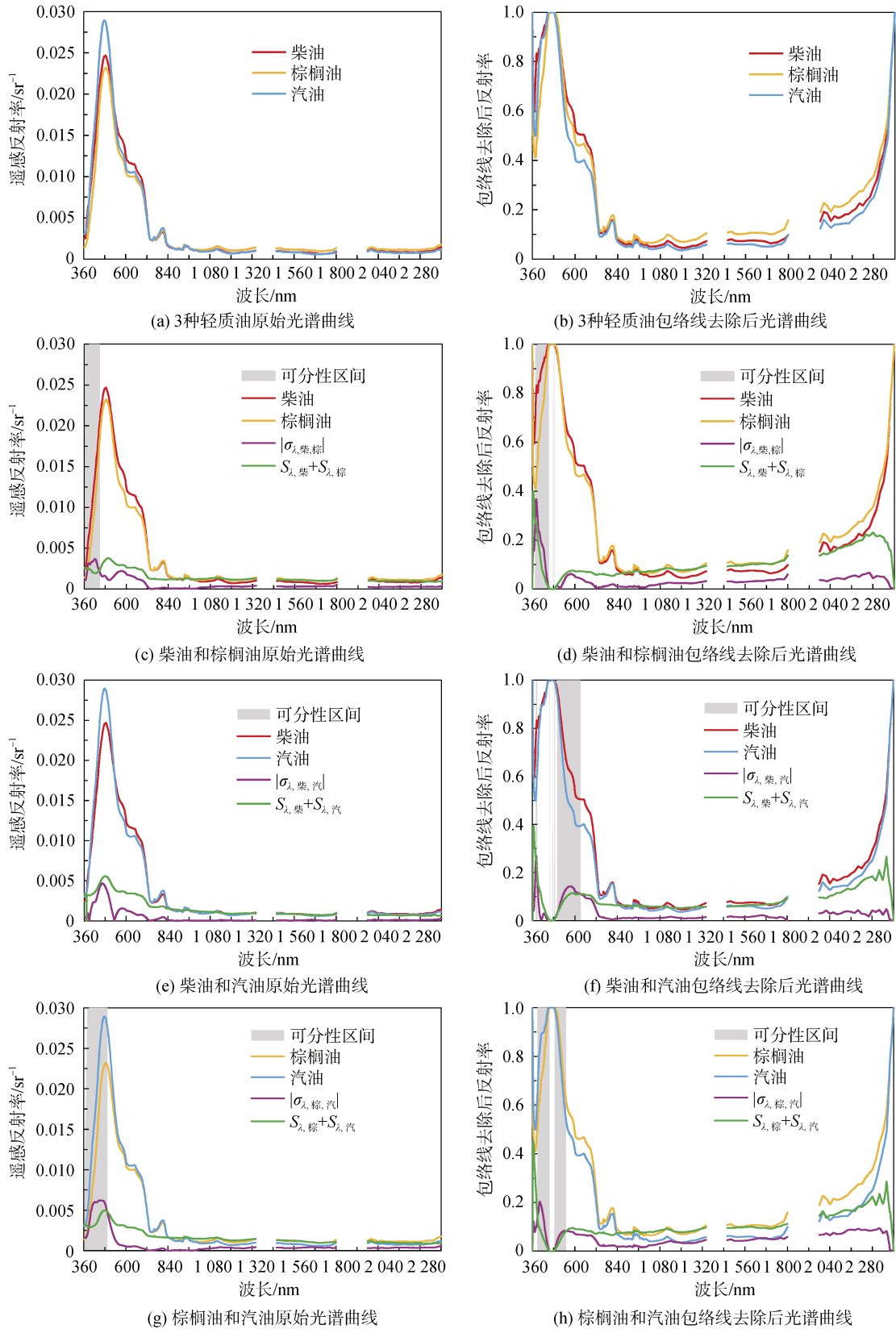


图 4 轻质油种间两两相互区分的特征波段区间

Fig. 4 Separability waveband ranges among the three light oils

注: 灰色区域为可分性波段

表 2 典型轻质油种两两区分光谱范围/nm  
Tab. 2 Separable spectral ranges among three light oil species/nm

油品	柴油	汽油	棕榈油
柴油	—	无	380~445
汽油	500~630	—	390~490
棕榈油	375~450	385~455 485~550	—

注：字体未加粗为基于原始光谱结果，加粗为经过包络线去除变换后结果

在实验过程中将 9 组数据(54 个样本)用于 SVM 模型训练，另外的 9 组数据(54 个样本)用于验证模型的油种识别结果，图 5 中的蓝色圆圈代表实际测试集分类，红色米字代表预测测试集分类，当红色米字落入蓝色圆圈中，表明预测测试集分类与实际测试集分类一致，识别精度优；反之，表明预测测试集

分类与实际测试集分类不符，如图 5a 柴油中存在一个空的蓝色圆圈，其对应的红色米字落在表示海水的一行中，表明该柴油样本被错误识别为海水。由图 5a 可知，基于全波段的总体油种识别精度为 43/54=79.63%。原油、燃料油等重质油的识别精度较好，达到 8/9=88.89%，轻质油种中的汽油和棕榈油识别精度一般，仅有 55.56%和 66.67%。基于光谱标准差特征分析方法获得的轻质油原始光谱可分特征波段(380~490 nm)，得到总体的油种识别精度为 42/54=77.78%。虽然总体的油种识别精度并未提高，但燃料油和水的识别率得到提高。基于包络线去除后的轻质油可分特征波段范围(375~455 nm, 485~630 nm)的总体油种识别精度为 45/54=83.33%(图 5b)，与基于全波段的识别精度相比，精度整体提高了 3.7%，其中，除柴油和汽油外，其他油种识别率均有显著提高。

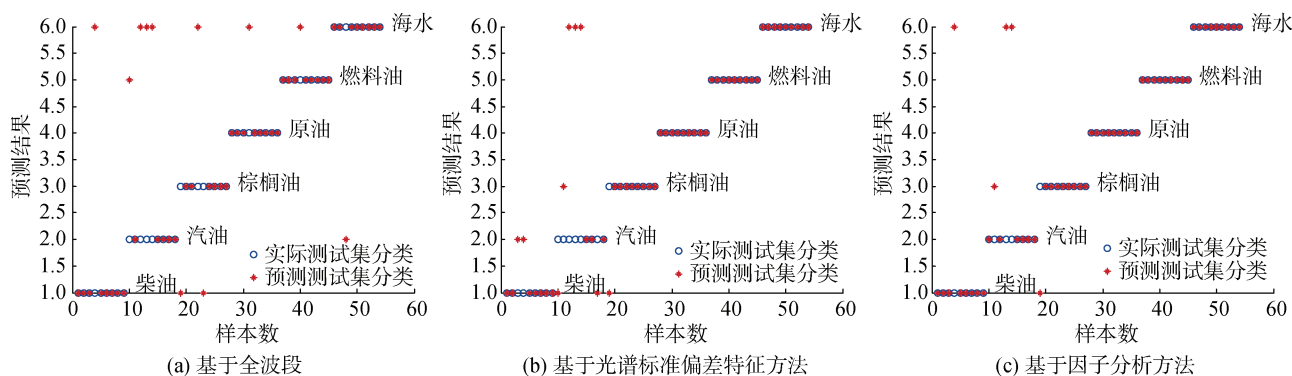


图 5 SVM 油种识别结果图  
Fig. 5 Oil identification results using SVM

### 3.3 基于因子分析可分性的油种识别

由表 3 可知，5 种油品和海水的前 4 个因子就能概括 97%以上的变量特征，故选择前 4 个因子参与特征波段选择。针对每种类型的每一因子，选择具有最高因子载荷的前 200 个波长，例如，柴油的因子 1 具有最高因子载荷的前 200 个波长范围是 910~920 nm、930~950 nm、1 100~1 170 nm 和 1 240~1 340 nm。分别针对全油种和海水(6 种类型)、轻质油种和海水(4 种类型)及轻质油种(3 种类型)3 组数据集统计 4 个因子特征变量集中各波长出现的频次，详见表 3。

特征波长出现的频次决定符合限定条件的特征波长的数量，与油种识别精度密切相关，基于某一特定频次的特征波长集合可以获取最大的油种识别精度。在频次一览表(表 3)的基础上，根据构建的

筛选准则(公式 6)进行 3 组数据集特征波长筛选。全油种和海水实验数据集中波长最大出现频次是 11 次，满足公式 6 条件的频次是 8 次(对应特征波长范围为 360~520 nm, 560~580 nm)，同理可知，轻质油种和海水实验数据组与轻质油种实验数据组中选取的频次分别为 5 次和 4 次(对应特征波长范围为 360~540 nm, 560~600 nm, 610~630 nm, 640~660 nm)。

在全油种和海水(6 种类型)、轻质油种和海水(4 种类型)和轻质油种(3 种类型)等 3 组数据集中，分别选择频次大于等于数据集中类型数量的特征变量开展油种识别。由表 4 可知，基于满足公式 6 特征波段的油种识别精度在各自数据集中的识别精度均是最高，分别是 85.18%，90.74%和 90.74%(图 5c)，与基于

表 3 油品和海水具有最高因子载荷的前 200 波长的出现频次一览表

Tab. 3 Frequency of the first 200 wavelengths with the highest factor loading for oils and seawater

波长/nm	频次			波长/nm	频次			波长/nm	频次		
	全	轻水	轻		全	轻水	轻		全	轻水	轻
360~390	11	7	5	910~920	2	0	0	1 460~1 480	3	2	1
390~400	10	7	5	930~960	4	3	3	1 480~1 520	2	2	1
400~420	10	7	5	960~980	1	1	1	1 520~1 530	1	1	1
420~440	9	7	5	980~1 000	1	0	0	1 570~1 590	1	1	1
440~500	9	6	5	1 010~1 070	2	1	1	1 610~1 680	1	1	1
500~520	8	6	5	1 070~1 090	3	1	1	1 680~1 690	1	3	2
520~540	7	5	4	1 090~1 100	4	2	1	1 690~1 710	4	3	2
540~560	5	4	2	1 100~1 110	4	3	2	1 710~1 730	2	1	1
560~570	8	5	4	1 110~1 150	1	1	1	1 730~1 790	1	1	1
570~580	8	5	5	1 150~1 160	4	3	2	1 980~1 990	4	2	1
580~600	7	5	5	1 160~1 170	3	2	1	1 990~2 000	5	4	3
600~610	5	4	3	1 170~1 200	2	0	0	2 000~2 020	5	3	3
610~630	5	5	4	1 200~1 220	2	2	1	2 020~2 060	3	2	1
630~640	5	4	3	1 220~1 230	1	0	0	2 060~2 090	4	2	1
640~660	5	5	4	1 240~1 250	1	1	1	2 090~2 110	3	1	1
660~700	3	3	2	1 250~1 270	3	3	2	2 110~2 120	1	0	0
700~720	3	2	1	1 270~1 280	2	2	2	2 260~2 280	1	0	0
720~730	2	0	0	1 280~1 300	3	3	2	2 280~2 370	2	0	0
790~800	1	0	0	1 300~1 320	3	2	2	2 370~2 380	4	2	2
800~830	2	0	0	1 320~1 330	4	3	2	2 380~2 390	6	3	3
830~850	1	0	0	1 330~1 340	3	2	2	2 390~2 400	7	4	3

表 4 基于因子分析方法的特征波段油种识别精度

Tab. 4 Identification accuracy of oil based on characteristic waveband obtained by factor analysis

数据集	波长范围/nm	在波长范围内的波长数	精度/%
全油种 和海水	频次 ≥ 6 360~540, 560~600, 2 380~2 400	243	45/54=83.33
	频次 ≥ 7 360~540, 560~600, 2 390~2 400	233	44/54=81.48
	频次 ≥ 8 360~520, 560~580	182	46/54=85.18
	频次 ≥ 9 360~500	141	44/54=81.48
轻质油种 和海水	频次 ≥ 4 360~660, 1990~2 000, 2 390~2 400	323	45/54=83.33
	频次 ≥ 5 360~540, 560~600, 610~630, 640~660	264	49/54=90.74
	频次 ≥ 6 360~520	161	47/54=87.04
	频次 ≥ 7 360~440	81	44/54=81.48
轻质油种	频次 ≥ 3 360~540, 560~660, 930~950, 1 990~2 020, 2 380~2 400	355	46/54=85.19
	频次 ≥ 4 360~540, 560~600, 610~630, 640~660	264	49/54=90.74
	频次 ≥ 5 360~520, 570~600	192	47/54=87.04

全波段的识别效果相比, 精度整体提高了 5.55%, 11.11%和 11.11%。同时, 可以发现油种识别精度为 90.74%的两组特征波段是相同的, 故可认为 360~540 nm, 560~600 nm, 610~630 nm 和 640~660 nm 是

识别 5 种海洋典型溢油油种的最佳特征波段。

## 4 结论

不同的海面溢油来源可能导致海面溢油类型的

不同。本文通过设计的室外模拟溢油实验,获取原油、燃料油、柴油、汽油和棕榈油等 5 种油种的实测光谱数据,分别运用光谱标准偏差分析和因子分析方法对特征波段进行选择,并基于特征波段利用支持向量机模型开展油种识别实验。结果表明,基于光谱标准偏差分析和因子分析的油种识别精度分别是 83.33%和 90.74%,与基于全波段的识别精度相比,整体精度分别提高了 3.7%和 11.11%。除汽油外,其它油种和海水的识别精度均得到提高,这是由于汽油极易挥发,与海水存在误分的情况。同时可以发现,获得的特征波段集中在紫外波段和蓝绿光波段,这与蓝绿光对水体的透射率高和紫外对薄油膜敏感有关。基于因子分析获取的特征波段(360~540 nm, 560~600 nm, 610~630 nm, 640~660 nm)可作为 5 种油种相互区分的最佳高光谱波段。

海洋溢油发生后往往不会被立即发现并清除,在风化的过程中,油品会经历漂移、扩散、溶解、乳化和生物降解等物理和化学的变化,导致油品的光谱响应发生变化,对乳化后油品的油种识别还有待进一步的研究。卫星影像数据在轨处理是未来发展的必然趋势,特征波段的有效选择,极大的减少处理的数据量,对实现溢油影像数据在轨快速处理有较好的借鉴意义,进而可在溢油场景发生时推广应用。

#### 参考文献:

- [1] YANG J F, WAN J H, MA Y, et al. Characterization analysis and identification of common marine oil spill types using hyperspectral remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(18): 7163-7185.
- [2] LEIFER I, LEHR W J, SIMECEK-BEATTY D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124(9): 185-209.
- [3] YANG J F, WAN J H, MA Y, et al. Research on Object-oriented Decision Fusion for Oil Spill Detection on Sea Surface[C]//IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019, 9772-9775.
- [4] CALLY C. Unique oil spill in East China Sea frustrates scientists[J]. Nature, 2018, 554(7690): 17-18.
- [5] KOKALY R F, COUVILLION B R, HOLLOWAY J A M, et al. Spectroscopic remote sensing of the distribution and persistence of oil from the Deepwater Horizon spill in Barataria Bay marshes[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129(2): 210-230.
- [6] LU Y C, LI X, TIAN Q J, et al. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories[J]. Marine Geodesy, 2013, 36 (1): 334-346.
- [7] FINGAS M, BROWN C. Review of oil spill remote sensing[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(1): 9-23.
- [8] HU C, FENG L, HOLMES J, et al. Remote sensing estimation of surface oil volume during the 2010 Deepwater Horizon oil blowout in the Gulf of Mexico: scaling up AVIRIS observations with MODIS measurements[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12 (2), 026008.
- [9] LU Y C, TIAN Q J, WANG X Y, et al. Determining oil slick thickness using hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea of China[J]. International Journal of Digital Earth, 2013, 6(1): 76-93.
- [10] 李颖, 刘丙新, 陈澎. 高光谱遥感技术在水上溢油监测中的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 158-162. LI Ying, LIU Bingxin, CHEN Peng. Research progress of hyperspectral remote sensing technology in oil spill monitoring[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(3): 158-162.
- [11] WETTLE M, DANIEL P J, LOGAN G A, et al. Assessing the effect of hydrocarbon oil type and thickness on a remote sensing signal: A sensitivity study based on the optical properties of two different oil types and the HYMAP and Quickbird sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): 2000-2010.
- [12] THENKABAIL P S. Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(14): 839-877.
- [13] THENKABAIL P S, ENCLONA E A, ASHTON M S, et al. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4): 354-376.
- [14] HU Y B, ZHANG J, MA Y, et al. Hyperspectral coastal wetland classification based on a multi-object convolutional neural network model and decision fusion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(7): 1110-1114.
- [15] LU Y C, SHI J, WEN Y S, et al. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean-Part I: Laboratory measurements and proof-of-concept with AVIRIS observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 230(5): 2000-2010.
- [16] 赵冬至, 丛丕福. 海面溢油的可见光波段地物光谱特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2000, 3(15): 160-164. ZHAO Dongzhi, CONG Pifu. Research on spectral characteristics of oil spill in visible light band[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 3(15): 160-164.
- [17] 刘丙新, 李颖, 韩亮. 基于光谱反射率数据的水面油



- 种鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 1100-1103.
- LIU Bingxin, LI Ying, HAN Liang. Identification of oil type using spectral reflectance characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 1100-1103.
- [18] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- DENG Shubin. ENVI Remote Sensing Image Processing Method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [19] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems & Technology, 2011, 2(3): 1-39.

## Accuracy assessments of hyperspectral characteristic waveband for common marine oil spill types identification

YANG Jun-fang<sup>1</sup>, WAN Jian-hua<sup>1</sup>, MA Yi<sup>2, 3</sup>, JIANG Zong-chen<sup>2, 4</sup>, HU Ya-bin<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Received:** Jul. 20, 2020

**Key words:** hyperspectral data; spectral analysis; optimal waveband; oil type identification; accuracy assessment

**Abstract:** Accurate identification of the oil spill type is of great significance for rapid and effective treatment. Hyperspectral remote sensing plays an important role in oil spill identification. In order to explore the hyperspectral characteristic wavebands of marine oil spill types identification, we designed an outdoor oil spill experiment. The spectral characteristic wavebands were selected by factor analysis and spectral standard deviation analysis methods based on the measured spectral reflectance data of crude oil, fuel oil, diesel oil, gasoline and palm oil. Oil type identification accuracy evaluation were performed using the Support Vector Machine (SVM) model. The results show that oil type identification accuracy using characteristic wavebands obtained by spectral standard deviation analysis and factor analysis are 83.33% and 90.74%, respectively, and the overall accuracy is improved by 3.7% and 11.11% respectively compared with that using the full spectrum. The selected characteristic wavebands (360~540 nm, 560~600 nm, 610~630 nm, 640~660 nm) can be regarded as the best hyperspectral wavebands to distinguish the five common oil types, which has a good reference significance for the realization of on orbit rapid processing of oil spill image.

(本文编辑: 丛培秀)