

海面溢油的紫外辐射特性

李羿轩^{1,2}, 李博^{2*}, 林冠宇², 黄煜², 杨迪^{3**}, 马岩³

¹中国科学院大学, 北京 100049;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 利用三个测量波段(290, 320, 355 nm), 进行了海水目标及溢油目标(原油、重油、柴油、汽油、棕榈油)反射特性的室外实验, 获得了探测目标的上升辐射强度和溢油-海水对比度与太阳高度角和方位角的关系曲线。结果表明, 当太阳高度角为 40°~60°时, 原油-海水对比度为 14%~44%, 重油-海水对比度为 15%~35%, 汽油-海水对比度为 12%~26%, 棕榈油-海水对比度为 15%~47%, 柴油-海水对比度为 3%~12%。说明联合三个波段, 可以在不同太阳高度角和方位角下实现对不同油的探测和识别, 表明紫外波段在海面溢油的早期探测和识别方面具有突出优势。

关键词 海洋光学; 溢油; 紫外探测; 太阳高度角; 太阳方位角; 海水-溢油对比度

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0801001

Ultraviolet Radiation Characteristic of Oil Spills on Sea Surface

Li Yixuan^{1,2}, Li Bo^{2*}, Lin Guanyu², Huang Yu², Yang Di^{3**}, Ma Yan³

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

³Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract The outdoor experiments at three wavebands (290, 320, and 355 nm) are carried out to study the reflection characteristics of seawater targets and oil spill targets (e.g., crude oil, heavy oil, diesel oil, gasoline, and palm oil). The relationship curves of upwelling radiation intensity and the oil-seawater contrast of the detected target with the solar altitude angle and azimuth angle are obtained. Results show that when the solar altitude angle is 40°–60°, the contrast ratio between crude oil and seawater is 14%–44%, that between dead oil and seawater is 15%–35%, that between gasoline and seawater is 12%–26%, that between palm oil and seawater is 15%–47%, and that between diesel oil and seawater is 3%–12%. These results indicate that the detection and identification of different oils can be realized at different solar altitude angles and azimuth angles by the combination of three wavebands, among which the ultraviolet waveband exhibits an outstanding advantage in the early detection and identification of oil spills on sea surface.

Key words oceanic optics; oil spill; ultraviolet detection; solar altitude angle; solar azimuth angle; contrast of seawater and oil spill

OCIS codes 010.4450; 280.4991; 300.6540

1 引 言

海上运输、海面开采及原油自然渗漏等导致的海面溢油事故会对海洋自然生态环境和海洋生物资源造成极大的危害。原油本身具有毒性, 通常成品油的毒性还要高于原油^[1]。溢油事故的发生不仅会

使海洋生态资源遭到巨大损失, 同时也会严重影响到海水养殖业、渔业、旅游业等海洋产业^[2-3]。由以往发生的海面溢油事故可知, 海面溢油具有突发性强、发生后污染分布范围广、易于扩散等特点, 因此海面溢油事故的早期发现和治理具有重要意义。

对原油泄漏而言, 视觉检测是不可靠的^[4], 通常

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2019-12-22; 录用日期: 2020-01-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11573025)、国家自然科学基金重大项目(61890965)

* E-mail: libo0008429@163.com; ** E-mail: guangxuesheji@sina.com

要采用其他的技术手段来实现海面溢油的监测。目前,在监测海面溢油的常用手段中,遥感是公认最有效的技术手段之一,包括近红外遥感技术^[5]、紫外遥感技术^[6-8]、合成孔径雷达^[9]、高光谱^[10-11]、激光荧光法^[12-14]等。目前还没有一种方法能够完全胜任海面溢油的监测,因此通常采用多种遥感联合的方式^[15]。其中紫外遥感技术具有对油种和油膜厚度的敏感度高的特点^[6-7],在海面溢油事故的早期探测中具有突出优势。然而,目前对紫外波段的海面溢油光谱反射特性和溢油-海水对比度的研究较少。1994年,Levin^[16]对波长范围为300~800 nm的溢油目标进行了溢油-海水对比度分析,结果表明溢油-海水对比度与光照条件、探测波长、太阳高度角及探测天顶角有关。2001年,Otremba等^[17]研究了波长为350~750 nm的原油溢油光谱反射特性的影响因素,研究结果表明,原油溢油的反射率受太阳高度角、太阳方位角、波长、溢油油膜厚度等因素影响。2008年,Carnesecchi等^[18]通过建立油膜覆盖的海水的上升辐射模型,解释了不同油膜厚度下最佳的相对探测方位角,这里油膜的厚薄取决于其对探测波长的吸收系数。国内近年来也开展了关于这方面的研究工作。2010年,方四安等^[6]对海面溢油中的四种典型模拟目标(汽油、煤油、柴油、润滑油)的紫外波段反射光谱进行了测试,分析了320~400 nm波段不同厚度油膜下的溢油-海水反差,测量结果表明在320 nm时,柴油、汽油、润滑油与海水的反射率相近,而在350 nm时差异很大。2019年,任广波等^[7]在335 nm波段利用紫外推扫相机对紫外溢油目标进行了探测,证明紫外推扫成像技术适用于监测海面溢油的薄油膜污染领域。

目前我国对溢油的监测研究局限在可见光和红外波段,紫外监测溢油方面的研究工作还很少,测量波段均大于320 nm,且研究主要集中在油种与油膜厚度对探测结果影响的方面。而溢油事故是突发性事故,其发生的时间、地点无法预期,且对同一种油膜而言,影响海水-油对比度的因素不仅包括油膜厚度,还包括探测波段、太阳高度角、相对太阳方位角^[17]。针对这一问题,本文采用三个紫外通道(290,320,355 nm),对溢油事故中的五种常见油种(原油、重油、柴油、棕榈油、汽油)在不同的太阳高度角和方位角下的上升辐射强度进行测量,并得到了对应的溢油-海水对比度。结果表明,建立紫外波段下太阳高度角、相对方位角与不同油种上升辐射以及溢油-海水对比度间的关系,有利于

建立更完善的海面溢油观测模型,可提高溢油发生判断的能力和溢油种类的识别能力。

2 探测原理及方法

2.1 探测原理

对海面溢油监测的目的在于将受溢油污染的海面与清澈海面区分开。对遥感仪器,这种区别体现为不同波段探测信号的差别。溢油与类型相关是客观存在的。溢油的特征光谱与油本身的性质相关,当光线照射到油膜表面时,不同类型油中元素对不同波段的吸收程度是不同的,因此反射后的光谱携带了该类型油的特征^[19-22]。而对同一种类型的溢油油膜而言,油膜厚度、太阳高度角、探测相对方位角等因素均会影响探测结果,这种影响可能会导致同类型溢油在三个波长上的光谱信号出现不同的变化。对于清澈海水,探测仪器测量到的上升辐射信号主要有三个来源,即镜面反射信号、离水辐射信号、大气路径辐射信号,如图1所示。镜面反射信号包括太阳光和天空漫反射光;离水辐射信号指光线进入水体后,与水体发生透射、散射、吸收等相互作用后,最终离开水面的辐射能量;大气路径辐射信号指未与海水产生任何作用,直接通过大气传输至探测器的部分辐射能量。对于海面溢油监测而言,只有离水辐射信号是有效测量信号,要尽量消除镜面反射信号与大气路径辐射信号的影响。为避免太阳耀斑的影响,探测仪器避开了太阳光镜面反射的方向,此时探测到的镜面反射信号主要来源于天空漫反射光。

油类与海水的折射率和对光的吸收能力不同,导致其镜面反射信号和离水辐射信号存在差别。同样条件下,若油类的折射率大于海水,则油类的镜面反射信号强度大于海水,若油类对光的吸收能力大于海水,则其离水辐射信号强度小于海水。且镜面反射信号主要来源于天空漫反射光,对一种水体而言,其变化只与太阳高度角有关,与太阳方位角无关,而离水辐射信号同时受太阳高度角和方位角的影响。因此由探测器探测到的清澈海水和溢油覆盖的海水的上升辐射强度可表示为

$$L_{sw}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda) = L_{sky_refl}(0^+, \theta_h, \lambda) + L_{water_leav}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda) + L_{path}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda), \quad (1)$$

$$L_{oil}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda) = L_{sky_refl}(0^+, \theta_h, \lambda) + L_{water_leav}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda) + L_{path}(0^+, \theta_h, \Delta\theta, \lambda), \quad (2)$$

式中: 0^+ 指上界面处; θ_h 指太阳高度角; $\Delta\theta = \theta_s - \theta_v$, θ_s 指太阳方位角, θ_v 指探测器观测方位角; λ 指探

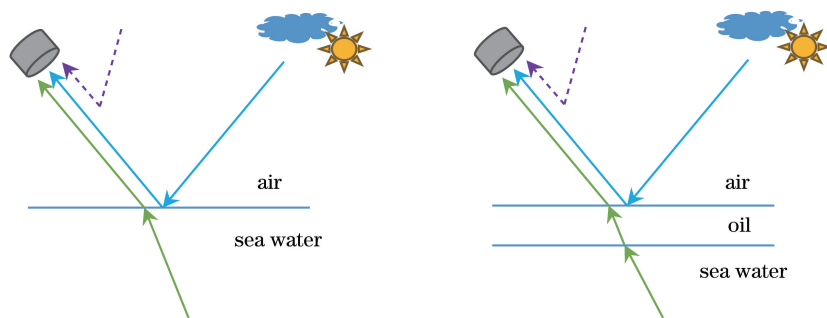


图 1 清澈海水和油覆盖的海水的上升辐射模式

Fig. 1 Upwelling radiation modes of clear seawater and oily seawater

测波长; L_{sw} 指清澈海水的上升辐射强度; L_{oil} 指油覆盖的海水的上升辐射强度。覆盖有油膜的海水的镜面反射信号 L_{water_leav} 存在于空气-溢油界面和溢油-海水界面, 其中溢油-海水界面的镜面反射信号强度比空气-溢油界面的至少低 2 个数量级, 因此忽略其影响。

为了量化分析溢油与清澈海水上升辐射间的差异, 定义溢油-海水对比度为实际测量得到的油膜覆盖的海水与清澈海水间的上升辐射强度净差, 这相当于对清澈海水上升辐射强度作归一化处理, 从而减少了入射光的变化对测量结果的影响^[18]。定义溢油-海水对比度为

$$C = \left| \frac{L_{sw} - L_{oil}}{L_{sw} + L_{oil}} \right|, \quad (3)$$

溢油-海水对比度的大小反映了溢油的可分辨程度, 对比度越大, 则溢油与海水间的差别就越大, 越易于区分辨别。

2.2 探测设备组成

如图 2 所示, 实验采用了一个尺寸为 3000 mm × 2000 mm 的蓄水池, 池底铺设了蓝布来模拟浅海环境。海水是经过过滤的清澈海水。在池中设置 6 支口径为 150 mm 的亚克力管, 管中液面高度基本与池中一致。在其中 5 支亚克力管中, 分别加入 75 mL 的汽油、棕榈油、柴油和 150 mL 的原油、重油, 另外 1 支亚克力管中为清澈海水作为对照。

实验采用一台紫外成像仪作为探测设备。该成像仪拥有 290, 320, 355 nm 三个测量波段, 通过切换滤光片轮的方式来选择测量通道。探测数据是在不同的太阳高度角下获取的, 测试系统简图如图 3 所示, 成像仪放置于三脚架上, 光轴与水平方向成



图 2 实验用蓄水池

Fig. 2 Experimental reservoir

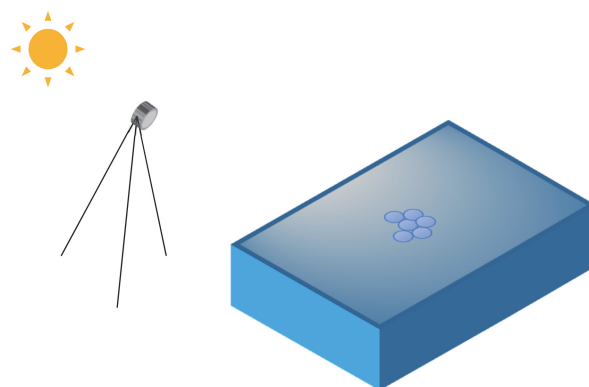


图 3 测试系统示意图

Fig. 3 Schematic of practice system

30°。为减少液面表面太阳光镜面反射的影响, 将成像仪设置在水池的南边。

不同油种具有不同的特性。汽油最易挥发, 柴油次之, 因此在实验中途补充了几次汽油与柴油; 重油和原油黏度大, 不易流动, 会粘附于亚克力管内壁, 为了保证其能够铺满亚克力管中的水面, 重油和原油各多添加 75 mL。具体如表 1 所示。

表 1 不同油种及其特点
Table 1 Different oils and their characteristics

Oil	Density / (g · mL ⁻¹)	Appearance	Volatility	Remark
Crude oil	0.78–0.97	Dark brown with green fluorescence, high viscosity	Nonvolatile	Two more quantity
Dead oil	0.82–0.95	Furvous, high viscosity	Nonvolatile	Two more quantity
Diesel oil	0.83–0.85	Transparent green	Volatile	Be replenished in experiment
Palm oil	0.87–0.90	Semisolid at room temperature	Nonvolatile	Disperse over water
Gasoline	0.70–0.78	Transparent yellow	Easy to volatilize	Replenish in experiment

2.3 光谱数据收集

实验地点在青岛鳌山基地,毗邻渤海,日照充足。实验时间为 2019 年 5 月 10 日 11:05–16:23,每隔约 0.5 h 测量一次,每次测量包括暗信号测量、290 nm 波段测量、320 nm 波段测量及 355 nm 波段测量。

2.3.1 太阳高度角计算

太阳高度角指太阳的入射方向与地平面之间的夹角,与天顶角互余。对于地面上某一点,太阳高度角的计算公式^[23]为

$$\sin \theta_h = \sin \theta_1 \sin \theta_d + \cos \theta_1 \cos \theta_d \cos \theta_t, \quad (4)$$

式中: θ_1 指测量点纬度; θ_d 指测量点赤纬; θ_t 指测量点时角。时角为天子午圈与天体的赤经圈在北极所成的球面角,与地球自转有关,以 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 代替 $0 \sim 24$ h,当地正午对应 0° ,1 h 对应 15° ,1 min 对应 $15'$ 。赤纬为地球赤道平面与太阳和地球中心连线的夹角,是太阳直射点的纬度值。赤纬的计算公式^[24]为

$$\sin \theta_d = 0.39795 \cos [0.98563(N - 173)\pi/180], \quad (5)$$

式中: θ_d 单位为 rad; N 指日数,实验时间为 2019 年 5 月 10 日,则 N 为 102。将 N 代入(5)式可得赤纬为 7.83° 。青岛鳌山基地对应的纬度为 36.34° ,根据测量时间可计算出对应的时角。将 θ_1 、 θ_d 、 θ_t 代入(4)式可得不同测量时间的太阳高度角,如表 2 所示。

2.3.2 太阳方位角计算

太阳方位角范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。太阳方位角的计算公式^[25]为

$$\sin \theta_s = \frac{-\sin \theta_1 \cos \theta_d}{\cos \theta_h}. \quad (6)$$

因为实验场地位于北半球,太阳投影位置始终位于目标的南侧,因此可知:

表 2 不同时间各波段的太阳高度角

Table 2 Solar altitude angle of each wavelength under different time

Measurement No.	Measure time	290 nm	320 nm	355 nm
1	11:05–11:10	58.86°	59.12°	59.30°
2	11:40–12:02	61.13°	61.29°	61.49°
3	12:11–12:14	61.38°	61.34°	61.31°
4	12:51–12:56	59.21°	59.04°	58.76°
5	13:20–13:27	56.16°	55.79°	55.28°
6	14:19–14:24	47.43°	46.92°	46.58°
7	14:51–14:55	41.81°	41.45°	41.09°
8	15:21–15:25	36.23°	35.85°	35.47°
9	15:53–15:57	30.04°	29.65°	29.26°
10	16:19–16:23	24.91°	24.51°	24.11°

$$\theta_s = \pi - \arcsin \left(\frac{-\sin \theta_1 \cos \theta_d}{\cos \theta_h} \right). \quad (7)$$

结合 2.3.1 小节,得出不同太阳高度角和时角下对应的太阳方位角,如图 4 所示。

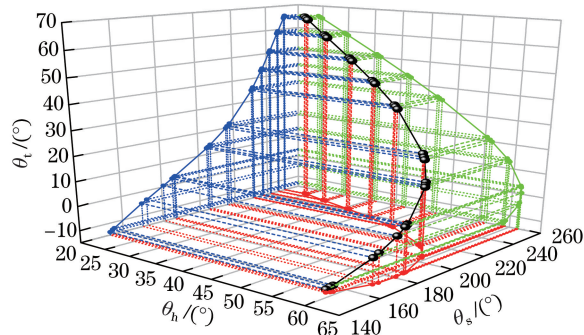


图 4 不同太阳高度角与时角下对应的太阳方位角
Fig. 4 Solar azimuth corresponding to different solar altitude angles and time angles

3 探测结果及分析

令成像仪倾斜观测,为避免油品边缘和亚克力

管的干扰,取每个管内中心区域的浮油作为测量对象。由中国科学院北京跟踪与通信技术研究所提供风速信息,实验当天间歇性有风,风速始终低于 2 m/s。由于在第 8 次测量过程中装有汽油的亚克力管发生了泄漏,第 9 次和第 10 次(太阳高度角小于 30°)的汽油测量值无意义。

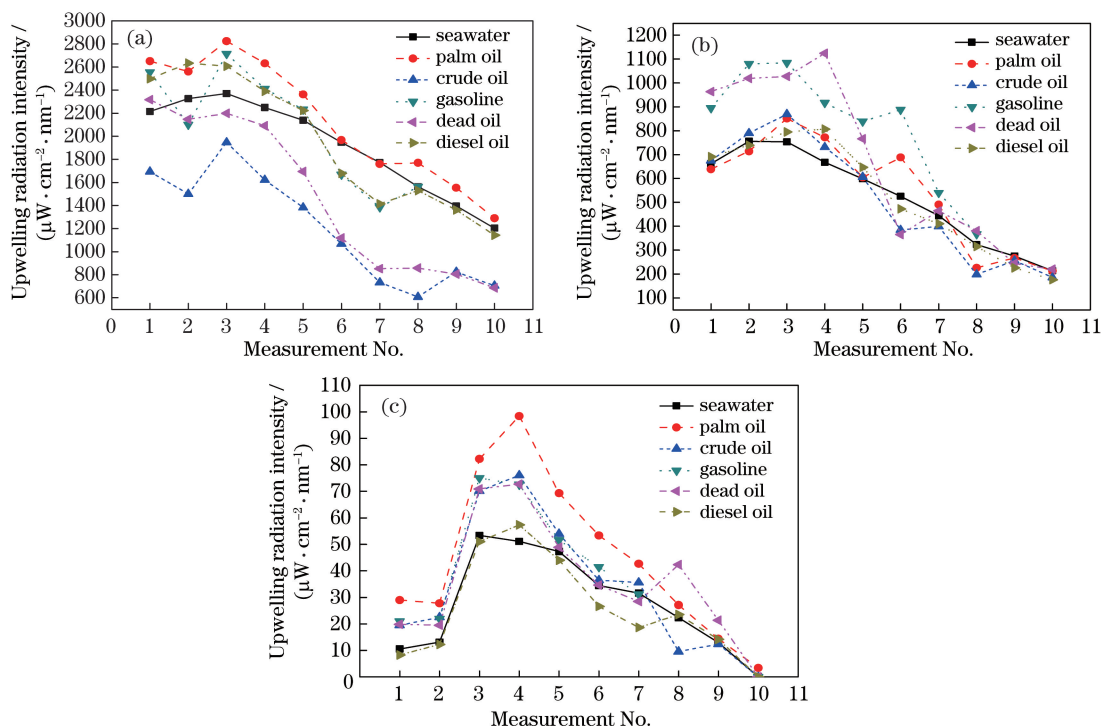


图 5 不同波长下不同油种上升辐射强度的平均值。(a) 355 nm; (b) 320 nm; (c) 290 nm

Fig. 5 Average value of upwelling radiation intensity of different oils under different wavelengths.

(a) 355 nm; (b) 320 nm; (c) 290 nm

图 5 中横轴为测量序号,对应表 2 中不同的测量时间。在测量开始时天气为阴,因此从图 5 中可以看出,前 2 次测量中(对应时间为 11:05–12:02)各种油种的上升辐射强度均偏低;从第 3 次测量开始,随着太阳高度角的减小,海水及各种油的上升辐射强度均在降低。以下分析不包括前 2 次的测量结果。由图 5(a)可以看出,对于 355 nm 波段,在太阳高度角 $\theta_h > 59.21^\circ$ 时,柴油、棕榈油、汽油的上升辐射强度均略大于海水,重油上升辐射强度略小于海水;在太阳高度角 $\theta_h < 56.16^\circ$ 时,柴油、棕榈油、汽油的上升辐射强度均与海水相当,重油上升辐射强度远小于海水;原油的上升辐射强度始终远小于海水。由图 5(b)可以看出,对于 320 nm 波段,在太阳高度角 $\theta_h > 55.79^\circ$ 时,重油的上升辐射强度远大于海水;在太阳高度角 $\theta_h < 56.16^\circ$ 时,重油的上升辐射强度与海水相当;在太阳高度角 $\theta_h > 41.45^\circ$ 时,汽油的上升辐射强度远大于海水;在太阳高度角 $\theta_h \leq 41.45^\circ$ 时,

3.1 水-油上升辐射强度平均值变化分析

对应不同的太阳高度角和方位角,令紫外成像仪由南朝北倾斜观测,当探测天顶角为 60° 时,得到 355, 320, 290 nm 波段下不同油种的绝对辐照度值,取每次测量的平均值为测量值,测量结果如图 5 所示。

柴油、棕榈油、原油的上升辐射强度始终与海水相当。由图 5(c)可以看出,对于 290 nm 波段,在太阳高度角 $\theta_h > 41.09^\circ$ 时,棕榈油的上升辐射强度远大于海水;在太阳高度角 $\theta_h > 58.76^\circ$ 时,重油、汽油、原油的上升辐射强度均大于海水。由于 290 nm 波长接近日盲区(< 280 nm),此时测到的信号相对较弱。

3.2 溢油-海水对比度变化分析

不同种类油的溢油-海水对比度的计算结果如图 6 所示。

前 2 次测量时天气为阴,因此分析第 3 次测量及以后的溢油-海水对比度。由 3.1 节可知,对 290 nm 波段,当太阳高度角较低时,探测到的信号值极弱,因此不考虑最后一组的测量结果。由图 6(a)可以看出,对 355 nm 波段,原油的溢油-海水对比度始终大于 10%,且随着太阳高度角的降低而升高;重油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h > 59^\circ$ 时小于 1%,在太阳高度角 $\theta_h < 59^\circ$ 时大于

10%，且随着太阳高度角的降低而升高；汽油和柴油的溢油-海水对比度基本一致，除太阳高度角 $\theta_h = 41.81^\circ$ 时大于 10%，其余情况均小于 10%；棕榈油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h > 47^\circ$ 时大于 5%。由图 6(b)可以看出，对 320 nm 波段，当太阳高度角 $\theta_h > 41^\circ$ 时，汽油的溢油-海水对比度始终大于 10%，在太阳高度角 $\theta_h = 46.92^\circ$ 时对比度达到最大；重油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h > 47^\circ$ 时均大于 12%；棕榈油和原油的溢油-海水对比度基本一致，在太阳高度角 $\theta_h > 36^\circ$ 时，除太阳高度角为 55.79° 时，其余情况溢油-海水对比度均大于 10%；柴油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h = 59.04^\circ$ 和太阳高度

角 $\theta_h < 30^\circ$ 时大于 15%，其余情况均小于 10%。由图 6(c)可以看出，对 290 nm 波段，棕榈油的溢油-海水对比度随太阳高度角的降低而降低，且在太阳高度角 $\theta_h > 41^\circ$ 时，始终大于 15%；原油、汽油、重油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h > 55^\circ$ 时基本一致，且均大于 15%；原油的溢油-海水对比度在太阳高度角 $\theta_h < 35^\circ$ 时大于 25%；除太阳高度角 $\theta_h = 41.09^\circ$ 外，其余情况柴油的溢油-海水对比度均小于 15%。根据测试结果可以看出，随着太阳高度角和探测相对方位角的变化，不同类型溢油在三个波长上的溢油-海水对比度均存在差异。这些发现表明，紫外波段在海面溢油自动监测和类型识别方面具有发展潜力。

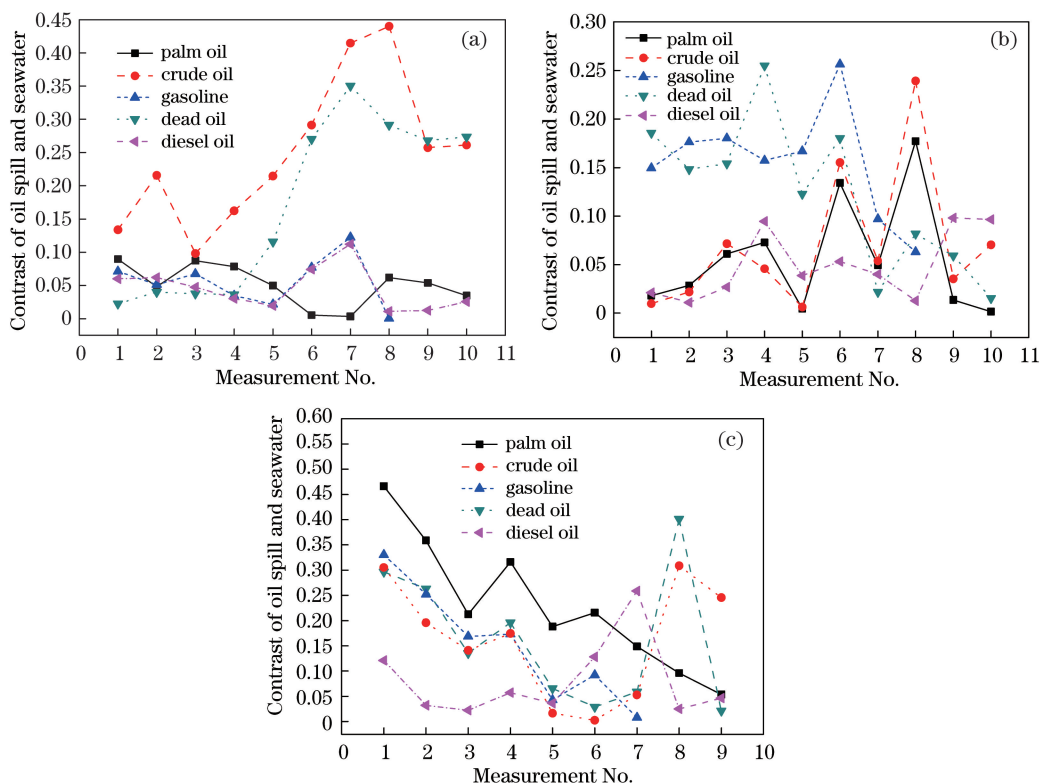


图 6 不同波长下溢油-海水对比度。(a) 355 nm；(b) 320 nm；(c) 290 nm

Fig. 6 Contrast of oil spill and seawater under different wavelengths.

(a) 355 nm；(b) 320 nm；(c) 290 nm

综上所述，随着太阳高度角和方位角的变化，不同波段下不同油膜覆盖的海水的上升辐射强度与清澈海水的上升辐射强度是存在区别的，同一种油膜对不同探测波段的灵敏度会随太阳高度角和方位角的变化而变化，且这种变化对不同类型的溢油-海水对比度的影响也是不同的，因此研究太阳高度角和方位角对溢油监测结果的影响是有意义的。

4 结 论

在不同的太阳高度角和方位角下，利用三个紫

外波段(355, 320, 290 nm)，对覆盖有五种常见油种(原油、重油、柴油、棕榈油、汽油)的海水及清澈海水的上升辐射强度进行了测量和量化分析，并分析了溢油-海水对比度。在紫外波段，覆盖有油膜的海水的上升辐射强度会随着太阳高度角和方位角的变化而变化，且这种变化对不同波段和油种是不同的。棕榈油的上升辐射强度在 290 nm 波段有较高的响应度，汽油的上升辐射强度在 320 nm 波段有较高的响应度，原油和重油的上升辐射强度在 355 nm 波段有较高的响应度，联合 3 个波段探测，可以在不

同太阳高度角($40^{\circ}\sim 60^{\circ}$)下实现对覆盖有油的海水与清澈海水的探测和识别。阴天条件下,虽然整体上升辐射强度降低,但是溢油-海水对比度相比晴天更大,说明阴天有利于海面溢油的监测。

然而在探测中,太阳方位角是随着太阳高度角的变化而变化的,而在不同纬度、不同日期时,太阳高度角和方位角的对应关系会改变,因此下一步需要控制变量,独立研究太阳高度角和方位角对海水上升辐射强度与分布的影响。并在获取大量数据的基础上,进一步结合机器学习算法以实现海面溢油的早期自动监测和类型识别^[26],提高海面溢油早期监测识别率。

参 考 文 献

- [1] Alam M S, Sidike P. Trends in oil spill detection via hyperspectral imaging[C]//2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering, December 20-22, 2012, Dhaka, Bangladesh. New York: IEEE, 2012: 858-862.
- [2] Wei D M. Effectiveness assessment of oil spill response materials and emergency waste disposal technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
魏冬铭. 溢油应急物质有效性评估及应急废物处置技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [3] Chen J T, Li S J, Sun J C, et al. Progress and perspective on numerical simulation of hazardous chemicals' drift-diffusion in the sea[J]. Marine Sciences, 2018, 42(7): 158-166.
陈俊天, 李淑江, 孙俊川, 等. 海上危化品漂移扩散数值模拟研究进展[J]. 海洋科学, 2018, 42(7): 158-166.
- [4] Yu H, Wang Q, Zhang Z, et al. Oil spill detection using hyperspectral infrared camera[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10030: 100301G.
- [5] Viallefont-Robinet F, Moussous A, Déliot P, et al. Analysis of water-in-oil emulsion hyperspectral signature: contribution of pool experiment[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10784: 107840C.
- [6] Fang S A, Huang X X, Yin D Y, et al. Research on the ultraviolet reflectivity characteristic of simulative targets of oil spill on the ocean[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 738-742.
方四安, 黄小仙, 尹达一, 等. 海洋溢油模拟目标的紫外反射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 738-742.
- [7] Ren G B, Guo J, Ma Y, et al. Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV hyperspectral imaging[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 146-158.
- [8] Cong H F. Characteristics of UV reflection spectra of oil spill based on bidirectional reflectance distribution function[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 1012002.
丛海芳. 基于双向反射率函数分布的海洋溢油紫外反射光谱特性研究[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 1012002.
- [9] Lang H T, Zhang X Y, Xi Y Y, et al. Dark-spot segmentation for oil spill detection based on multifeature fusion classification in single-pol synthetic aperture radar imagery [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(1): 015006.
- [10] Liu D L, Li Z H, Zhang J Q. Study of cloud background suppression for oil spill detection from hyperspectral data[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0530002.
刘德连, 李昭慧, 张建奇. 高光谱溢油检测中云背景抑制方法研究[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0530002.
- [11] Liu D L, Han L, Zhang J Q. Study of automatic marine oil spills detection using imaging spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(11): 3116-3119.
刘德连, 韩亮, 张建奇. 高光谱图像的海面溢油自动检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11): 3116-3119.
- [12] Han Z Z, Wan J H, Li Y P, et al. Detection method of marine oil spilling and emulsified oil based on hyperspectral imaging under UV induction[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0130002.
韩仲志, 万剑华, 李永平, 等. 紫外诱导高光谱成像的海洋溢油及乳化探测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0130002.
- [13] Huo Y W, Zeng X D, Cao C Q, et al. A technique for identification of petroleum and lubricant on simulated sea surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1015001.
霍熠炜, 曾晓东, 曹长庆, 等. 一种模拟海面石油与润滑油鉴别技术[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1015001.
- [14] Li J, Li X L, Tang Q H, et al. Spectral analysis and optimization of time-resolved oil fluorescence based on PCA[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 884-890.
李杰, 李晓龙, 唐秋华, 等. 基于PCA的时间分辨油荧光光谱分析及优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 884-890.
- [15] Liu D D, Hou Y H, Jing Y B. Methods for monitoring oil spill based on aerial remote sensing

- [J]. Science and Technology & Innovation, 2016(19): 82, 87.
刘东东, 侯云海, 荆云波. 面向航空遥感的海面溢油监测方法[J]. 科技与创新, 2016(19): 82, 87.
- [16] Levin I M. Spectral contrast of oil films on the sea surface: influence of water type, wind velocity, and solar altitude[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2258: 759-767.
- [17] Otremba Z, Piskozub J. Modelling of the optical contrast of an oil film on a sea surface[J]. Optics Express, 2001, 9(8): 411-416.
- [18] Carnesecchi F, Byfield V, Cipollini P, et al. An optical model for the interpretation of remotely sensed multispectral images of oil spill [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7105: 710504.
- [19] Zheng P C, Tan G N, Wang J M, et al. Detection of metallic elements in lubricating oil by substrate-assisted laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0711002.
郑培超, 谭癸宁, 王金梅, 等. 基底辅助激光诱导击穿光谱技术检测润滑油中的金属元素[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0711002.
- [20] Yang L, Wu G Z, Hu X H, et al. Study on spectral characteristics of oil-polluted water [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(11): 52-54.
杨露, 吴国忠, 胡鑫浩, 等. 含油污水光谱特性的研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(11): 52-54.
- [21] Jin W. Oil spill monitoring based its spectral characteristics[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
靳伟. 基于波谱特征的溢油识别和监测[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [22] Ye Z, Liu L, Wei C X, et al. Experimental methods and result analysis of a variety of spectral reflectance properties of the thin oil film [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6): 1695-1699.
叶舟, 刘力, 魏传新, 等. 多种薄油膜光谱反射率特性外场测试方法及结果分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1695-1699.
- [23] Fei Y X, Wang C S. Understanding of solar altitude angle and its calculation method [J]. Management Technoloty of SME, 2008(1): 116-117.
费云霞, 王春顺. 对太阳高度角的了解及其计算方法[J]. 中小企业管理与科技, 2008(1): 116-117.
- [24] Du C X, Wang P, Ma C F, et al. A high accuracy algorithm for the calculation of solar position [J]. Energy Engineering, 2010(2): 41-44, 48.
杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 一种高精度太阳位置算法[J]. 能源工程, 2010(2): 41-44, 48.
- [25] Wang G A, Mi H T, Deng T H, et al. Calculation of the change range of the sun high angle and the azimuth of sunrise and sunset in one year [J]. Meteorllogical and Environmental Sciences, 2007, 30(s1): 161-164.
王国安, 米鸿涛, 邓天宏, 等. 太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角一年变化范围的计算[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(s1): 161-164.
- [26] Ge X Y, Ding J L, Wang J Z, et al. Estimation of soil moisture content based on competitive adaptive reweighted sampling algorithm coupled with machine learning [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (10): 1030001.
葛翔宇, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于竞争适应重加权采样算法耦合机器学习的土壤含水量估算[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1030001.