

引用格式: Sun Yuanchao, Wang Zhenghai, Zeng Yaqi, *et al.* Research on Detection of Marine Methane based on AVIRIS Hyperspectral Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(4): 781-788. [孙袁超, 王正海, 曾雅琦, 等. 基于AVIRIS高光谱数据的海表甲烷异常识别[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(4): 781-788.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.0781

## 基于AVIRIS高光谱数据的海表甲烷异常识别

孙袁超<sup>1</sup>, 王正海<sup>1</sup>, 曾雅琦<sup>1</sup>, 秦昊洋<sup>1</sup>, 周桃勇<sup>1</sup>, 邢学文<sup>2</sup>

(1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 研究海洋表面烃类富集状况在监测海洋环境和探测海底油气资源中具有重要意义, 海表渗漏烃中, 甲烷是气态烃中最具代表性的组分。为了精准识别海表甲烷异常, 研究设计了相应光谱实验, 以海水为背景测定甲烷光谱反射率, 基于实测数据分析甲烷的光谱特征, 运用比值导数光谱法削弱海水背景组分的光谱干扰, 提取出甲烷光谱吸收特征波段。研究发现甲烷在1 642—1 672 nm和2 169—2 378 nm波长范围存在光谱吸收, 通过比值导数处理后显著增强了其中1 642—1 672 nm和2 169—2 208 nm区间的甲烷吸收特征, 在Rebecca等提出的CH<sub>4</sub>I甲烷反演指数的基础上加入比值导数参数, 建立了基于AVIRIS数据的海表甲烷含量指数MI, 与甲烷含量的相关系数 $R^2=0.994\ 2$ , 将其应用于美国加利福尼亚州圣芭芭拉海峡Coal Oil Point(COP)烃渗漏区甲烷异常识别, 并与CH<sub>4</sub>I指数和Bradley等提出的AVIRIS CH<sub>4</sub>指数 $\zeta(L2298/L2058)$ 进行反演效果对比。结果表明: 运用MI指数可以有效识别海表甲烷浓度异常, 与 $\zeta$ 、CH<sub>4</sub>I指数反演结果相比, MI指示的甲烷浓度异常分布与 $\zeta$ 指数反演结果更为吻合, 效果显著优于CH<sub>4</sub>I指数反演结果。

**关键词:** 高光谱; 油气资源遥感; 海表甲烷; 比值导数光谱

**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2022)04-0781-08

### 1 引言

海底油气成藏过程中往往会产生烃渗漏, 渗漏的气态烃进入近海表大气中, 使得近海表大气甲烷富集<sup>[1-2]</sup>。研究海表的烃类富集在监测海洋环境和圈定海底油气藏分布等方面具有重要意义。甲烷既是海表烃类代表物质, 也是最为重要的一种温室气体, 研究表明, 在100 a的尺度内, CH<sub>4</sub>的增温潜势可达CO<sub>2</sub>的28—36倍, 如果时间尺度缩小到20 a内, CH<sub>4</sub>的增温潜势将达到CO<sub>2</sub>的84—87倍<sup>[3-4]</sup>。CH<sub>4</sub>在光学、热辐射等物理性质上具有可识别特征, 因此可利用遥感技术提取海表甲烷异常。

在使用影像提取甲烷异常之前, 主要依靠烃渗漏区附近监测站测定的碳氢化合物浓度总量来研

究甲烷渗漏排放特征, 或者利用浮标测定海水中渗漏的气体通量及排放位置来划分甲烷渗漏区域。也可通过海表声呐数据圈定海洋烃渗漏范围, 再结合火焰离子探测器进行实地测量验证<sup>[5-6]</sup>。

随着高光谱技术的发展, 机载可见—红外成像光谱仪AVIRIS(Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)高光谱影像得以应用, Leifer等<sup>[7]</sup>在加利福尼亚州圣芭芭拉海峡的Coal Oil Point渗漏区对现场数据进行辐射传输计算, 验证了使用AVIRIS探测海表甲烷的可行性。利用Modtran 5.2生成的大气背景辐射值和AVIRIS光谱数据2 248—2 298 nm波长范围内的平均残差得出甲烷富集区, 识别的甲烷异常接近已知的烃渗漏区<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572316)。

作者简介: 孙袁超(1995—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事遥感地质应用研究。E-mail: 18162417165@163.com

通讯作者: 王正海(1971—), 男, 安徽怀宁人, 副教授, 博士生导师, 主要从事地学信息技术与成矿预测研究。E-mail: wzhenh@mail.sysu.edu.cn

利用高日光的海洋 AVIRIS 图像,Bradley 等<sup>[9-10]</sup>提出了一种使用  $\text{CH}_4$  吸收波段和  $\text{CO}_2$  吸收波段的辐射率比值  $\zeta(\text{L2298}/\text{L2058})$  指数反演甲烷含量。可以探测到海洋烃渗漏引起的甲烷气浓度异常并首次运用遥感影像显示甲烷羽流结构。

研究者们基于甲烷在 2 288—2 358 nm 间的光谱吸收特征,利用其中 4 个光谱吸收谷和 3 个反射峰构建了一个甲烷反演指数  $\text{CH}_4\text{I}$ ,并成功运用于 AVIRIS 数据,识别出了 Aliso Canyon 地区渗漏的甲烷羽流分布<sup>[11]</sup>。

$$\text{CH}_4\text{I} = \frac{\text{MEAN}(B_{204} + B_{206} + B_{209})}{\text{MEAN}(B_{203} + B_{205} + B_{208} + B_{210})} \quad (1)$$

其中:  $B_{203}$ 、 $B_{204}$ 、 $B_{205}$ 、 $B_{206}$ 、 $B_{208}$ 、 $B_{209}$ 、 $B_{210}$  分别代表 AVIRIS 影像第 203、204、205、206、208、209、210 波段的辐射亮度值。

在地面实测方面,曾雅琦等<sup>[12]</sup>设计了严谨的实验方案,实测了模拟海水背景下不同浓度甲烷的光谱反射率,系统总结了甲烷光谱特征,并构建了相应的定量反演模型。

目前能够应用于高光谱数据准确识别海表甲烷异常的方法并不多,一些对于甲烷光谱特征的研究是基于 MODTRAN 模型模拟的甲烷光谱曲线<sup>[9]</sup>,对海表的甲烷的实测光谱分析研究较少,本文结合曾雅琦等<sup>[12]</sup>对海水背景下不同浓度的甲烷定量反演研究与 Rebecca 等提出的甲烷反演指数  $\text{CH}_4\text{I}$ <sup>[11]</sup>,针对 AVIRIS 高光谱数据,运用比值导数法削弱海水背景影响,构建新的甲烷浓度指数,提取海表甲烷浓度异常信息。

## 2 研究区概况及影像数据

研究区是位于美国加利福尼亚州圣芭芭拉海峡 (Santa Barbara Channel) 北部的 Coal Oil Point (COP) 烃渗区,圣芭芭拉海峡北部地区是世界上油气渗漏最严重的地区之一<sup>[13-14]</sup>,是极佳的海表烃渗漏研究区域。该区的碳氢化合物以液态、气态两种形式渗漏,其中以气体烃渗漏为主的离岸通风口是本研究的重点。

而这片地区烃渗漏最严重的部分是 COP 渗漏区。该区的烃渗漏持续活跃了 0.5 Ma 以上<sup>[15]</sup>。根据声呐探测数据<sup>[16]</sup>和直接通量测量<sup>[17]</sup>,每天大约有  $1.0\text{—}1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$  的气体从  $3 \text{ km}^2$  左右的海底释放到大气,与溶解到附近海水中的含量大致相等<sup>[18]</sup>。

AVIRIS 是由美国航空航天局和喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 联合开发的机载

高光谱传感器,光谱覆盖了 400—2 500 nm,光谱分辨率为 10 nm,共 224 个波段,空间分辨率为 20 m<sup>[19]</sup>。本文选用 Bradley 等提出  $\zeta$  指数所用的同一景 AVIRIS 影像,条带号为 f080619t01p00r05,成像是 2008 年 6 月 19 日 19:59:45 (格林尼治时间),飞行高度约为 8.95 km。选取的图像成像良好,辐射亮度较高(图 1)。

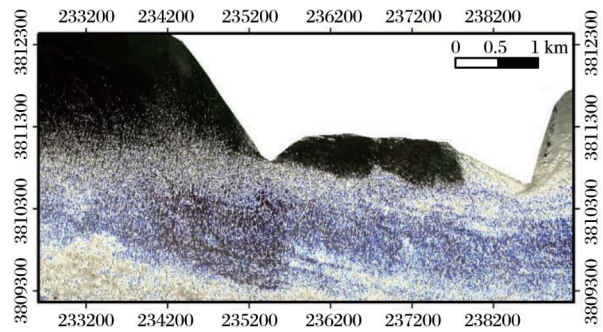


图1 研究区 AVIRIS 影像

Fig.1 AVIRIS image and study area

该影像采集时,研究区的风向主要为西南方向 ( $236^\circ$ ),风力较小 ( $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),海表洋流主要为西—北西向,流速  $25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,波浪来自西南方向,有效波高约为  $1 \text{ m}$ <sup>[9]</sup>。

在海表甲烷遥感影像识别研究中,一般都是使用定标后的辐射亮度值,不会对影像进行常规的大气校正,现有的大气校正模型对甲烷特征会有显著削弱,以 FLAASH 模型为例,本文对大气校正前后的海表甲烷光谱曲线进行了对比(图 2)。

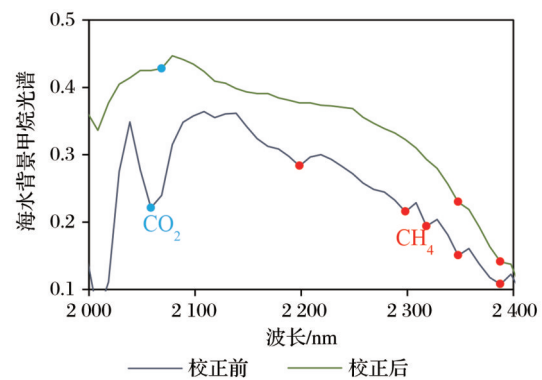


图2 FLAASH 大气校正前后海表甲烷光谱曲线

Fig.2 Methane spectral curve before and after FLAASH atmospheric correction

由图 2 可知 FLAASH 大气校正对  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  光谱特征都有明显的削弱作用,因此本文不对影像数据进行大气校正处理,使用定标后的辐射亮度数据进行海表甲烷异常提取的研究。

2 实验装置与方法

实验所用的主要仪器是美国 Spectral Evolution 公司的野外便携式地物波谱仪 PSR-3 500(表 1)。其他装置有标准白板、石英卤素灯、光源支架、气压计、105 ml 玻璃管、真空泵、1 000 ml 烧杯和甲烷注射器等。

表 1 PSR-3500 波谱仪参数	
Table 1 Parameters of PSR-3500 Spectrometer	
参数名称	值
光谱范围	350—2 500 nm
	3.5 nm (350—1 000 nm)
光谱分辨率	10 nm @ 1 500 nm
	7 nm @ 2 100 nm
采样间隔	1 nm,共 2 151 个光谱通道
波长重复性	0.1 nm
波长精度	±0.5 nm
最大扫描速度	100 ms
光纤探头视场角	25°

为减少干扰,保障实验的准确性,本实验全程在暗室中进行,用两盏全波段卤素灯模拟太阳光源。初始时,玻璃管内全为空气,管内外气压一致,测量空气状态下海水及容器背景光谱,然后将锡纸包裹的玻璃管抽成真空状态,向内注入 1ml 甲烷后,从空气阀注入空气,使管内气压恢复自然状态再采集光谱。往后逐次定量增加甲烷注入量,每次都需重新将玻璃管抽至真空再注甲烷。实验装置设计见图 3<sup>[12]</sup>。

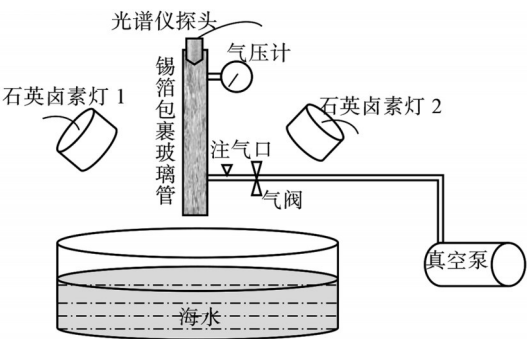


图 3 实验装置图<sup>[12]</sup>

Fig.3 Experimental Equipment<sup>[12]</sup>

实际波谱采集时,甲烷体积梯度在 1—10 ml 区间每增加 1 ml 甲烷采集一次光谱(共 10 组),10—105 ml 区间每增加 5 ml 甲烷采集一次光谱(共 20 组),最终采集到海水背景下甲烷光谱反射率曲线 30 组,经平滑去噪以后,将各组数据重采样成 AVIRIS 数据的格式得到 366—2 497 nm 之间共 224

个波段的海水背景甲烷反射率值。

3 数据处理与分析

3.1 实测甲烷光谱反射率特征

根据本实验所测得的海水背景甲烷光谱反射率(图 4)可知,在 190—210(2 200—2 450 nm)波段之间,随着甲烷浓度增加,光谱反射率逐渐减小。这是因为由-CH<sub>3</sub>、>CH<sub>2</sub>的振动,使甲烷在 2 300 nm 附近会产生十分强烈的光谱吸收,而-CH<sub>3</sub>、>CH<sub>2</sub>和-CH 的基团振动其实也会在 1 660 nm(波段 138)附近产生稍弱的光谱吸收<sup>[20-21]</sup>。但是由于海水背景反射率对甲烷光谱反射率的掩盖,138 波段附近的甲烷吸收并不明显。

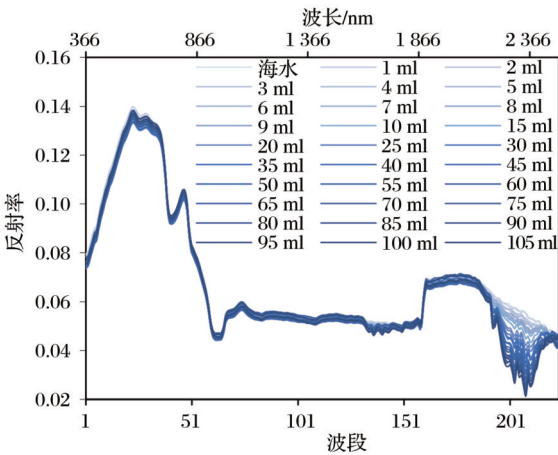


图 4 重采样后的甲烷波谱反射率

Fig.4 CH<sub>4</sub> spectra reflectance after resampling

3.2 光谱比值导数解混原理

在混合像元中不同地物之间不存在多次散射的理想状态下,传感器可以接收直接接收到混合像元中各种单类型地物反射的辐射亮度。此时像元整体反射的光谱值可以近似当做各地物端元反射光谱与各占比例的线性组合。而当像元内仅包含两种组分时,可得二元线性混合模型:

$$R(\lambda)=A\ast R_a(\lambda)+B\ast R_b(\lambda)+\sigma(\lambda)$$
 (2)

其中:λ为波段数;R(λ)为混合像元在λ波长处的光谱值;R<sub>a</sub>(λ)为端元 a 的光谱值;R<sub>b</sub>(λ)为端元 b 的光谱值;A、B 分别对应两个端元组分的丰度;σ(λ)为第 λ 波段真实值与模拟值的残差值。将式(2)等号两侧同时除以组分 a 的光谱 R<sub>a</sub>(λ)得到式(3),将式(3)等号两边同时对 λ 求导:

$$\frac{R(\lambda)}{R_a(\lambda)}=A+\frac{B\ast R_b(\lambda)}{R_a(\lambda)}+\sigma'(\lambda)$$
 (3)



$$\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{R(\lambda)}{R_a(\lambda)} \right) = B^* \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{R_b(\lambda)}{R_a(\lambda)} \right) + \sigma^-(\lambda) \quad (4)$$

从式(4)可知,光谱比值导数已经与a端元组分的丰度A无关,只和b端元组分的含量线性相关。

当背景较为均一且端元较简单,可近似当做二元线性光谱混合时,运用比值导数法可以有效抑制或剔除背景光谱的影响<sup>[22-23]</sup>。本研究中海水背景均一单调,海表相对陆表端元更为简单,可以考虑应用比值导数法削弱海水背景的干扰。

### 3.3 甲烷光谱比值导数特征

由实测海水背景甲烷光谱反射率可以看出,以海水为背景的甲烷光谱反射率曲线整体上与纯海水的光谱反射率曲线形态一致,作为背景的海水光谱在混合光谱中占比较大,对微量甲烷光谱的干扰较大。

将各组数据与甲烷含量为0的纯海水光谱反射率计算光谱比值导数,得到甲烷-海水光谱比值导数曲线,截取甲烷主要吸收波段的部分见图5。

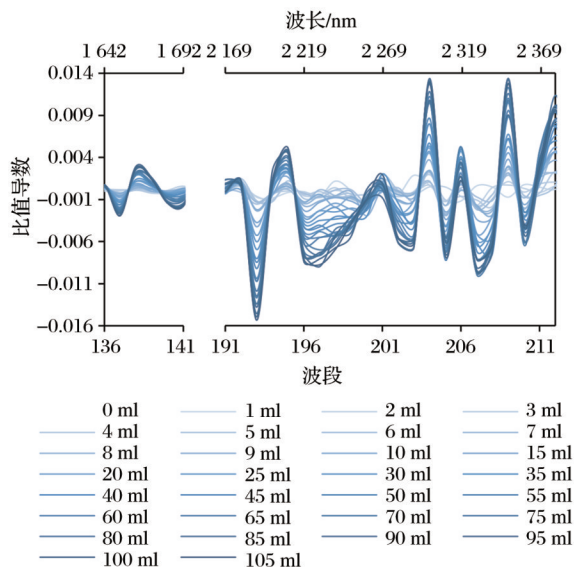


图5 甲烷光谱比值导数曲线图

Fig.5 CH<sub>4</sub> spectra after derivative of ratio spectroscopy

经过比值导数处理以后,甲烷特征波段比值导数光谱值随着甲烷含量的变化较为明显,曲线的峰形变得更单一,特征突出。尤其在136—139波段(1 642—1 672 nm)和191—195波段(2 169—2 208 nm)之间,甲烷的光谱吸收特征提升显著,确实一定程度上抑制了海水背景光谱的干扰。

### 3.4 甲烷异常识别指数MI的确定

参考Rebecca等<sup>[9-10]</sup>利用甲烷光谱特征提出的CH<sub>4</sub>I甲烷指数,结合本次光谱实测数据以及反射率

比值导数分析结果,选取特征最为突出的136—139波段(1 642—1 672 nm)和191—212波段(2 169—2 378 nm),提出了一个AVIRIS高光谱影像甲烷含量指数MI(Methane Index):

$$MI = \frac{B_{204} + B_{206} + B_{209} + DB_{138}}{B_{203} + B_{205} + B_{208} + B_{210} + DB_{137} + DB_{192}} \quad (5)$$

其中: $B_{203}$ — $B_{210}$ 为AVIRIS影像波段203—210的反射率,且 $B_{203}$ 、 $B_{205}$ 、 $B_{208}$ 、 $B_{210}$ 对应甲烷在2 200—2 450 nm处4个吸收谷; $B_{204}$ 、 $B_{206}$ 、 $B_{209}$ 对应其中的3个反射峰(图6); $DB_{137}$ 、 $DB_{138}$ 和 $DB_{192}$ 则是波段137、138、192对应的反射率比值导数,分别是波长为1 652.09 nm和2 178.80 nm的吸收谷以及1 662.06 nm处的反射峰(图6)。

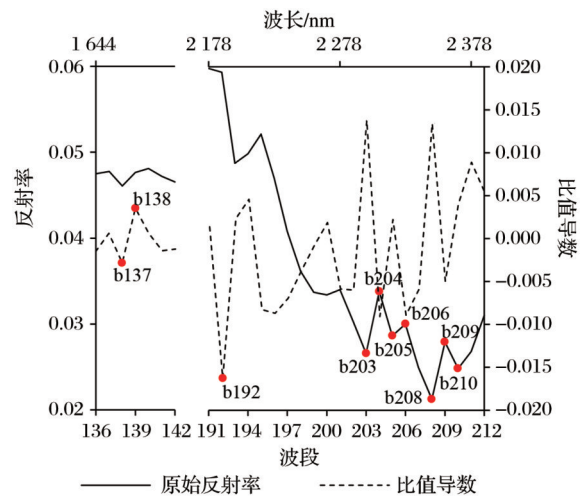


图6 甲烷光谱反射率及比值导数特征

Fig.6 Spectral characteristics of CH<sub>4</sub> before and after derivative of ratio spectroscopy

为了初步验证MI在高光谱影像应用的可行性,利用实测数据分别计算MI、CH<sub>4</sub>I、 $\zeta$ ,并分别与对应的30组实测甲烷含量进行回归分析,结果如图7所示。

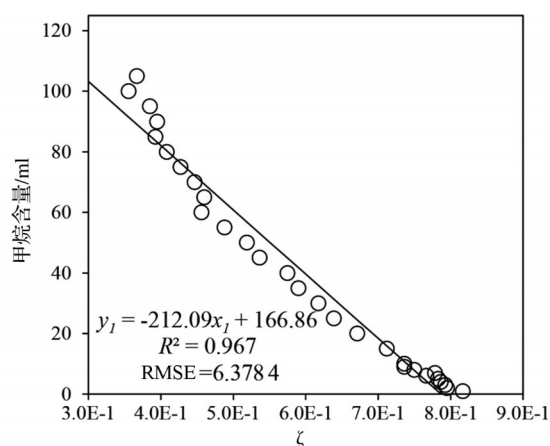
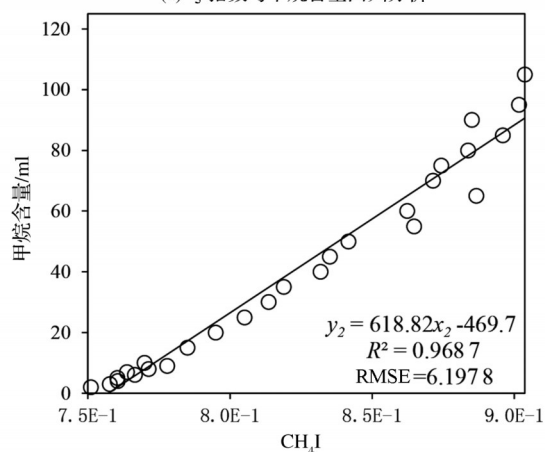
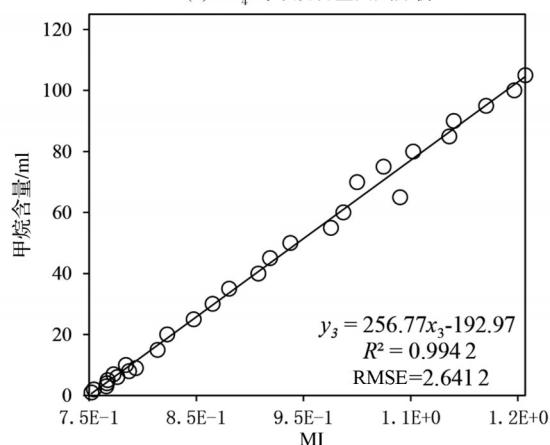
从回归分析的结果来看,3种指数与甲烷含量相关性都十分显著,其中甲烷含量-MI相关系数( $R^2=0.994\ 2$ )最高,而甲烷含量-CH<sub>4</sub>I的相关系数( $R^2=0.968\ 7$ )略高于甲烷含量- $\zeta$ 的相关系数( $R^2=0.967$ ),MI、CH<sub>4</sub>I与甲烷含量正相关,而 $\zeta$ 与甲烷含量负相关。三者所构建的回归方程可以作为甲烷含量反演的参考模型:

$$y_1 = -212.09x_1 + 166.86 \quad (6)$$

$$y_3 = 256.77x_3 - 192.97 \quad (7)$$

$$y_2 = 618.82x_2 - 469.7 \quad (8)$$

其中: $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 均代表反演的甲烷含量(ml), $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$

(a)  $\zeta$  指数与甲烷含量回归分析(b)  $\text{CH}_4\text{I}$  与甲烷含量回归分析

(c) MI 与甲烷含量回归分析

○ 实测值 — 线性

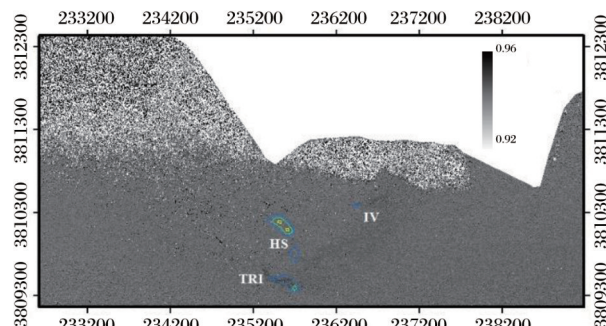
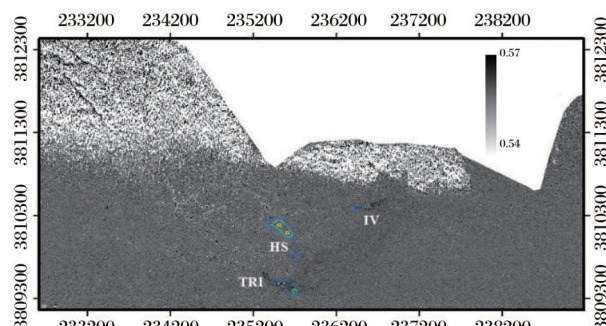
图 7  $\zeta$ 、 $\text{CH}_4\text{I}$ 、MI 与甲烷含量回归分析Fig.7 Scatter diagram of  $\text{CH}_4$  content- $\zeta$ 、 $\text{CH}_4$  content- $\text{CH}_4\text{I}$  and  $\text{CH}_4$  content-MI

则分别对应  $\zeta$ 、 $\text{CH}_4\text{I}$ 、MI 甲烷反演指数。

#### 4 结果与讨论

3 种指数与甲烷含量相关性都较为显著,为研究对比三者在高光谱影像中实际应用结果的差异

性,分别对研究区的 AVIRIS 影像进行 MI、 $\text{CH}_4\text{I}$ 、 $\zeta$  的计算,得到三者反演的甲烷浓度异常分布结果,如图 8(a)一图 8(c)所示。

(a) AVIRIS 影像  $\text{CH}_4\text{I}$  指数甲烷异常反演结果

(b) AVIRIS 影像 MI 指数甲烷异常反演结果

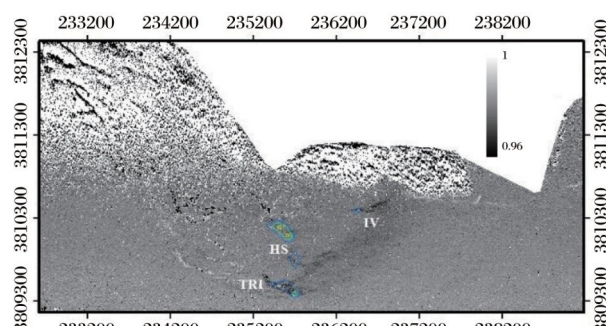
(c) AVIRIS 影像  $\zeta$  指数甲烷异常反演结果图 8  $\text{CH}_4\text{I}$ 、MI、 $\zeta$  AVIRIS 甲烷异常反演结果Fig.8 Inversion results of AVIRIS methane concentration anomaly by  $\text{CH}_4\text{I}$ 、MI、 $\zeta$  index

图 8 中蓝色圈定区域为 COP 的 3 个较大的渗漏区,分别是 Trilogy Seep (TRI)、Horseshoe Seep (HS)、IV Super Seep (IV)<sup>[6]</sup>。

3 个指数的异常范围存在一定差异,反演的结果都显示出了甲烷区域性聚集分布,基本接近已知渗漏区分布范围,其中 TRI 渗漏区范围最大,3 个指数都提取出了较为吻合的结果。其次是 IV 渗漏区,这一渗漏区附近也出现了较为明显的甲烷异常,但是 3 个指数的反演结果都与渗漏位置略有偏差,反演的甲烷异常集中在 IV 渗漏点的北东方向,这很有

可能是受当时西南风向的影响,此外,北部近岸处影像的亮度值较低,可能也是造成渗漏区与反演结果略有偏差的原因。对于HS渗漏区,3个指数提取的甲烷异常均较弱, $\text{CH}_4\text{I}$ 对该渗漏区的提取效果最不显著。整体上, $\zeta$ 指数与MI指数都提取出了甲烷羽流纹理,而 $\text{CH}_4\text{I}$ 指数未能显示出甲烷羽流。

$\text{CH}_4$ 指数 $\zeta$ 对COP渗漏区具有很强针对性,该指数是通过甲烷渗漏区的AVIRIS数据逐波段比值,得到 $L2298/L2058(\zeta)$ 这一异常值,其反演结果非常理想,甲烷羽流结构十分清晰,而且与声呐测定的海表烃渗漏区相吻合,甲烷集散方向也符合当时的气候条件。 $\zeta$ 指数可以作为其他甲烷异常指数的参照标准。

对室内实测数据分别进行MI指数、 $\text{CH}_4\text{I}$ 指数与 $\zeta$ 指数和甲烷含量相关性分析所得出的结果差异不大, $R^2_{\text{MI}}=0.994\ 2$ , $R^2_{\text{CH}_4\text{I}}=0.968\ 7$ , $R^2_{\zeta}=0.967$ ,整体上拟合效果都非常好。一方面,说明三者对于甲烷的定量反演都是可行的;另一方面,三者的差异较小主要是因为室内实验变量单一,条件稳定,几乎无太大的干扰因素。

对于海表甲烷异常识别,海水背景的状态可能会造成显著影响,减少海水背景干扰具有重要意义,本文所用的比值导数法,虽然不能对所有甲烷特征波段的起到优化作用,但是由图8可知,在137—139(1 650—1 680 nm)波段和192(2 189 nm)波段两处甲烷特征波范围内,原始光谱反射率经比值导数处理后,和甲烷含量相关性获得了显著提升。最低提升了13.3%(138波段),最高提升了53.2%(192

波段)。

整体上,实测光谱反射率在192(2 189 nm)波段之前的波段区间内,经过比值导数处理后均显著提高了与甲烷含量的相关性。而192波段之后的甲烷主要吸收波段内,比值导数处理并无优化效果,因此保留该波段的原始特征光谱,增加137—139(1 650—1 680 nm)波段和192(2 189 nm)波段的比值导数构建了MI指数,既可以对背景海水干扰起到较好的削弱作用,又最大程度保留甲烷吸收特征。MI指数与 $\text{CH}_4\text{I}$ 的差别就在于加入了137—139(1 650—1 680 nm)波段和192(2 189 nm)波段的比值导数,MI最终反演结果优于 $\text{CH}_4\text{I}$ 反演结果,且与指数 $\zeta$ 提取结果更接近,在实际应用中体现了比值导数法的作用。

## 5 结 论

基于前人提出的烃类光谱吸收特征,本文设计了以海水为背景的甲烷光谱反射率测定实验,提取甲烷特征光谱,并引入比值导数处理方法抑制海水背景影响,构建了基于AVIRIS高光谱数据的甲烷反演指数MI及反演模型,并将其运用于COP烃渗漏区海表甲烷异常反演研究,结论如下:

(1) 通过实测海水背景甲烷光谱反射率,筛选出了甲烷光谱吸收特征波段范围为137—139(1 650—1 680 nm)波段、192(2 189 nm)波段、2 180—2 210 nm波段。

(2) 运用光谱比值导数法可以有效削弱背景海水对甲烷光谱吸收特征的影响,抑制效果最佳甲烷特征波段是137—139(1 650—1 680 nm)波段和192(2 189 nm)波段。

(3) 利用比值导数处理后的光谱特征值,构建甲烷反演指数MI。建立了基于MI、 $\zeta$ 、 $\text{CH}_4\text{I}$ 甲烷反演指数海表甲烷含量反演模型。其中,MI指数甲烷含量反演模型的 $R^2$ 最高,达到0.994 2, RMSE最低,仅为2.641 2,拟合效果最佳。

(4) COP烃渗漏区AVIRIS数据海表甲烷异常识别结果表明:MI与 $\zeta$ 指数反演结果接近,与已知的烃渗漏分布情况较吻合,比 $\text{CH}_4\text{I}$ 指数的反演结果更为精准。

对于海表甲烷富集异常的高光谱识别,运用MI作为定量反演指数具有一定的准确度和适用性,与 $\text{CH}_4\text{I}$ 指数反演结果相比,体现出了比值导数法在本研究中的优化作用,有效抑制了海水背景的干扰。

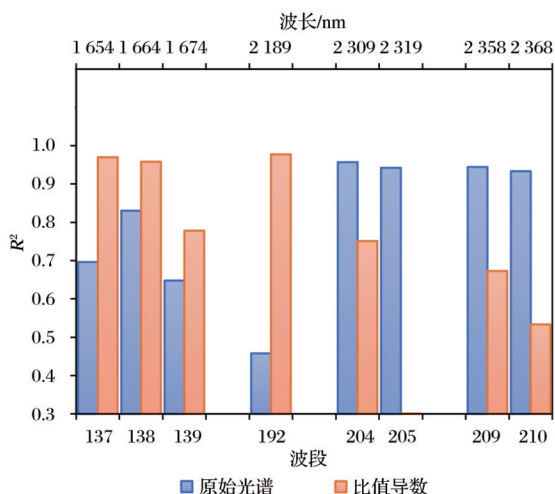


图9 比值导数处理前后甲烷光谱反射率与含量相关性

Fig.9 Correlation between spectral reflectance and content of  $\text{CH}_4$  before and after derivative of ratio spectroscopy



当然,由于海洋表面环境因素复杂,室内实验条件无法完全复原海表真实情况,海水温跃层、风向、波浪、潮汐、洋流甚至海洋浮游生物等气象或生物条件,都可能对海表渗漏烃的分布产生影响,也有可能影响到遥感影像的质量。这些因素对海表甲烷反演的影响仍然是值得深入研究和加以改善的,最大限度降低背景因素影响,才可以逐步实现大气中甲烷的精确定量识别,特别是微量甲烷的异常识别,对于油气资源开发、环境监测以及全球气候变化的研究具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Solomon E A, Kastner M, Macdonald I R, *et al.* Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 561-565.
- [2] Lu Yingcheng, Hu Chuanmin, Sun Shaojie, *et al.* Overview of optical remote sensing of marine oil spills and hydrocarbon seepage[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1259-1269.[陆应诚,胡传民,孙绍杰等. 海洋溢油与烃渗漏的光学遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1259-1269.]
- [3] Zhang B, Li H Z, Zhong B, *et al.* The situation, problems and countermeasures for the controls of China's methane emissions[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(2): 1-10.[张博,李蕙竹,仲冰,等. 中国甲烷控排面临的形势,问题与对策[J]. *中国矿业*, 2022, 31(2): 1-10.]
- [4] Etminan M, Myher G, Highwood E J, *et al.* Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(24): 12614-12623.
- [5] Bradley E S, Leifer I, Roberts D. Long-term monitoring of a marine geologic hydrocarbon source by a coastal air pollution station in Southern California[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(38): 4973-4981.
- [6] Clark J F, Washburn L, Emery K S. Variability of gas composition and flux intensity in natural marine hydrocarbon seeps[J]. *Geo-Marine Letters*, 2010, 30(3-4): 389-389.
- [7] Leifer I, Roberts D, Margolis J, *et al.* In situ sensing of methane emissions from natural marine hydrocarbon seeps: A potential remote sensing technology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(3-4): 509-522.
- [8] Roberts D A, Bradley E S, Cheung R, *et al.* Mapping methane emissions from a marine geological seep source using imaging spectrometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 592-606.
- [9] Bradley E S, Leifer I, Roberts D A, *et al.* Detection of marine methane emissions with AVIRIS band ratios[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): 415-421.
- [10] Roberts D A, Bradley E S, Christopher C F, *et al.* High resolution mapping of methane emissions from marine and terrestrial sources using a cluster-tuned matched filter technique and imaging spectrometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134(3): 305-318.
- [11] Scafutto R D M, Werff H V D, Bakker W H, *et al.* An evaluation of airborne SWIR imaging spectrometers for CH<sub>4</sub> mapping: Implications of band positioning, spectral sampling and noise[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 94: 102233. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102233.
- [12] Zeng Yaqi, Wang Zhenghai, Xing Xuewen, *et al.* Hyperspectral quantitative retrieval of methane content in different concentrations in the seawater[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(12): 1525-1533.[曾雅琦,王正海,邢学文,等. 海水背景下不同浓度的甲烷含量高光谱定量反演[J]. *遥感学报*, 2020, 24(12): 1525-1533.]
- [13] Funk C C, Theiler J, Roberts D A, *et al.* Clustering to improve matched filter detection of weak gas plumes in hyperspectral thermal imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 39(7): 1410-1420.
- [14] Hornafius J S, Quigley D, Luyendyk B P. The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (coal oil point, Santa Barbara Channel, California): Quantification of emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C9): 20703-20711.
- [15] Wilson R D, Monaghan P H, Osanik A, *et al.* Natural marine oil seepage[J]. *Science*, 1974, 184(4139): 857-865.
- [16] Leifer I, Kamerling M J, Luyendyk B P, *et al.* Geologic control of natural marine hydrocarbon seep emissions, coal oil point seep field, California[J]. *Geo-Marine Letters*, 2010, 30(3-4): 331-338.
- [17] Washburn L, Clark J F, Kyriakidis P. The spatial scales, distribution, and intensity of natural marine hydrocarbon seeps near coal oil point, California[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2005, 22(4): 569-578.
- [18] Clark J F, Washburn L, Hornafius J S, *et al.* Dissolved hydrocarbon flux from natural marine seeps to the Southern California Bight[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2000, 105(C5): 11509-11522.
- [19] Wei Jing, Ming Yanfang, Liu Fujiang. Hyperspectral mineral mapping method based on spectral characteristic parameter combination[J]. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 2015, 40(8): 1432-1440.[韦晶,明艳芳,刘福江. 基于光谱特征参数组合的高光谱数据矿物填图方法[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(8): 1432-1440.]
- [20] Gao L Z, Yang B L. A study on near infrared spectral characteristics of petroleum matter applied to remote sensing of oil and gas resources[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 1991, 3(4): 9-12, 29.[高来之,杨柏林. 应用于油气资源

- 遥感的近红外石油物质光谱特征研究[J]. 国土资源遥感, 1991, 3(4): 9-12, 29.]
- [21] Zhang Yu, Wang Yiding, Li Li, *et al.* The principle and technical analysis of methane detection using infrared absorption spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008 (11): 2515-2519.[张宇, 王一丁, 李黎, 等. 甲烷红外吸收光谱原理与处理技术分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008(11): 2515-2519.]
- [22] Zhao Hengqian, Zhang Lifu, Wu Taixia, *et al.* Research on the model of spectral unmixing for minerals based on derivative of ratio spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 172-176.[赵恒谦, 张立福, 吴太夏, 等. 比值导数法矿物组分光谱解混模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 172-176.]
- [23] Lv Shuqiang, Yin Qinli, Hou Miaole, *et al.* Spectral unmixing of mineral pigment mixture by using derivative of ratio spectroscopy based on the mode [J]. The Journal of Light Scattering, 2017, 29(3): 261-265.[吕书强, 尹琴丽, 侯妙乐, 等. 基于众数的比值导数法在混合颜料解混中的研究[J]. 光散射学报, 2017, 29(3): 261-265.]

## Research on Detection of Marine Methane based on AVIRIS Hyperspectral Data

Sun Yuanchao<sup>1</sup>, Wang Zhenghai<sup>1</sup>, Zeng Yaqi<sup>1</sup>, Qin Haoyang<sup>1</sup>,  
Zhou Taoyong<sup>1</sup>, Xing Xuewen<sup>2</sup>

(1.School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2.Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Methane is the most representative component of the gaseous hydrocarbon in the marine hydrocarbon seepage. In order to detect the marine methane anomalies accurately, a methane spectra experiment was designed to obtain hyperspectral data of different methane content in seawater background. Based on the measured data, the spectral characteristics of methane are analyzed. The ratio derivative spectrum method is used to weaken the spectral interference of seawater background components for extracting the absorption characteristic band of methane. The results show that methane has spectral absorption in the wavelength range of 1 642—1 672 nm and 2 169—2 378 nm, and the absorption characteristics of methane in the range of 1 642—1 672 nm and 2 169—2 208 nm are significantly enhanced by ratio derivative treatment. Based on the methane index  $\text{CH}_4\text{I}$ , the ratio derivative parameter is added to establish the marine  $\text{CH}_4$  content index MI for AVIRIS data. The correlation coefficient  $R^2$  between MI and methane content is 0.994 2. MI index is applied to the identification of methane anomalies in the hydrocarbon seepage area of the Santa Barbara Channel Coal Oil Point (COP), California, USA. Compared with the inversion results of  $\text{CH}_4\text{I}$  index and  $\text{CH}_4$  index  $\zeta$  (L2298/L2058). The abnormal distribution of methane concentration indicated by MI is more consistent with the hydrocarbon leakage area, and the results is better than the inversion results of  $\text{CH}_4\text{I}$  index.

**Key words:** Hyperspectral; Remote sensing of oil-gas resources; Marine methane; Derivative of ratio spectroscopy