

煤火源甲烷逃逸地基高光谱成像检测方法

刘艳秋¹, 秦凯¹, 曹飞², 仲晓星³, 田伟学¹, 科恩杰森¹, 包兴东²

1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;

2. 新疆维吾尔自治区矿山安全服务保障中心, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国矿业大学 安全工程学院, 徐州 221116

摘要: 中国新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区、内蒙古自治区等煤炭资源丰富的地区分布着数百个煤田火区。煤火自燃排放大量温室气体, 其无组织性致检测与量化工作面临困难。然而, 煤火甲烷在全球温室气体排放中的贡献是不可忽视的。鉴于卫星分辨率的限制, 本研究采用地基遥感手段开展煤火源甲烷检测, 利用2023年6月在新疆阜康煤田火区采集的宽幅全景地基高光谱影像集, 结合甲烷在短波红外的光学敏感特征和高光谱混合像元分解等方法, 提出了一套适用于不同地貌特征高温煤火源甲烷逃逸的检测算法, 并针对各算法的检测效果进行对比验证和效果评价。结果表明: (1) 与已有的甲烷反演指数CH₄I (CH₄ Index) 相比, 本研究提出的修正的最小二乘图像增强算法MLSIE (Modified Least Squares Image Enhancement)、比值导数光谱解混算法RCH4I (Ratio-based Derivative Spectral Unmixing for CH₄ Index) 和去阴影甲烷比值指数DSRCH4I (Deshadowed Spectral Ratio CH₄ Index) 在煤火源甲烷检测中表现更佳; (2) 2DSRCH4I3、MLSIE (2.3 μm) 和RCH4I1算法对于地貌复杂的煤火区检测效果较好, 其中, 2DSRCH4I和MLSIE (2.3 μm) 算法也适用于地貌相对单一的山地煤火区, 而RCH4I1算法更适用于泄露量大(燃烧剧烈)的活跃煤火区; (3) MLSIE (2.3 μm) 算法具有较强的普适性, 2DSRCH4I3算法有效抑制伪影/假阳性, 检测效果最佳; (4) 本文提出算法检测出的煤火区甲烷羽流以与燃烧的火焰共存和以自由扩散形式逸出共两种形式存在。本研究可为检测煤火源甲烷提供一种利用地基短波红外成像光谱仪的新方法, 也从甲烷逃逸角度为开展煤火自燃的早期识别与预警提供了新思路。

关键词: 煤火, 甲烷, 高光谱, 短波红外, 无组织排放, 羽流检测, 伪影抑制, 温室气体, 气候变化

中图分类号: X87/P2

引用格式: 刘艳秋, 秦凯, 曹飞, 仲晓星, 田伟学, 科恩杰森, 包兴东. 2025. 煤火源甲烷逃逸地基高光谱成像检测方法. 遥感学报, 29(8): 2575–2588

Liu Y Q, Qin K, Cao F, Zhong X X, Tian W X, Cohen J B and Bao X D. 2025. Ground-based hyperspectral imaging detection method for methane escape from coal fire sources. National Remote Sensing Bulletin, 29(8): 2575–2588 [DOI:10.11834/jrs.20254268]

1 引言

中国新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区、内蒙古自治区等煤炭资源丰富的地区分布着数百个不同规模的煤田火区(下文简称“煤火区”), 由煤层自燃引发的煤田火灾已成为中国煤炭开采中面临的重大自然灾害之一(邓进昌, 2023)。煤火自燃过程会释放CO、SO₂等有害气体和粉尘, 并伴有大量温室气体的无组织排放(Unorganized emissions)。研究表明, 不同变质程度的煤自燃会

产生甲烷(CH₄)等碳氢化合物, 并伴随其逃逸现象(梁运涛等, 2021)。根据《全球甲烷排放估算》报告(Sauniois等, 2020), 包括煤层自燃在内的能源领域无组织排放约占全球甲烷总排放量的17%—20%。然而, 由于无组织排放源的分散性和排放不稳定性, 监测和量化工作面临诸多挑战, 现有温室气体排放清单尚未将煤火排放源纳入核算范围。

CH₄是仅次于二氧化碳(CO₂)的全球第二大温室气体, 其20年时间尺度上的全球增温潜势是

收稿日期: 2024-07-11; 预印本: 2025-01-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区矿山安全服务保障中心项目(编号: 2022100102); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(编号: 2022B03003-3); 江苏省科技计划专项资金(国际科技合作/港澳台科技合作)(编号: BZ2024060)

第一作者简介: 刘艳秋, 研究方向为大气环境遥感。E-mail: liuyanqiu@cumt.edu.cn

通信作者简介: 秦凯, 研究方向为大气环境遥感。E-mail: qinkai@cumt.edu.cn

CO₂的81.2倍。政府间气候变化专门委员会在第六次评估综合报告(IPCC, 2023)中指出,减少甲烷排放是实现“1.5℃温控目标”的关键。2023年11月发布的《甲烷排放控制行动方案》(生态环境部等, 2023)提出,要加强甲烷排放的监测、核算、报告和核查体系建设,并推进能源领域甲烷排放控制等重点任务。控制和利用煤炭活动产生的甲烷排放,已成为“十四五”和“十五五”期间中国煤炭行业温室气体排放控制的重点。

随着高光谱技术的发展和甲烷排放监测需求的增长,越来越多的卫星传感器开始专注于重点区域的点源探测。例如加拿大的温室气体监测卫星GHGSat (GreenHouse Gas Satellite)、意大利的高光谱先驱卫星PRISMA (PRecursore IperSpetttrale della Missione Applicativa)、美国的新一代机载可见光红外成像光谱仪AVIRIS-NG (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer - Next Generation) (Jacob等, 2022)。基于匹配滤波法的卫星甲烷异常检测技术已得到广泛应用,国外对此进行了深入研究(Thompson等, 2015; Hulley等, 2016; Nesme等, 2021)。中国的高分五号卫星高光谱成像仪GF-5/AHSI (GaoFen-5/the Advanced HyperSpectral Imager)也已成功应用于点源尺度的甲烷排放检测与量化研究(Han等, 2024; Feng等, 2024; 康涵书等, 2024; 秦凯等, 2023)。

地表类型复杂且甲烷排放较高的区域被认为是甲烷异常探测的难点,目前相关研究较为有限。其主要原因在于地表设施在甲烷敏感波段的吸收特性与甲烷相似,现有卫星观测的频次和光谱分辨率不足,导致检测结果中普遍存在伪影(假阳性)现象(韩舸等, 2023)。标准的匹配滤波算法已无法适用于这些情况(Guanter等, 2021)。中国煤矿富集区地表类型通常比较复杂,现有技术在探测煤矿活动引起的甲烷排放时误差和不确定性较大(Qin等, 2024)。通过卫星遥感手段监测煤火区羽流信息的可行性尚不清晰。因此,可考虑将地基和机载监测手段应用于煤火自燃等无组织排放源,开展针对煤炭活动引发的甲烷排放的监测与评估试验。

为此,本研究针对新疆维吾尔自治区昌吉州两处地貌特征显著的活跃煤火区,利用地基实测的宽幅全景高光谱影像,结合甲烷在短波红外的光学敏感特性,开展典型地貌下单一煤火源甲烷

排放检测方法研究。旨在从甲烷逃逸的角度识别和评估潜伏于地下的煤火风险,为煤田火灾早期风险预警提供新的思路。

2 研究区域和数据源

2.1 研究区域

经过前期实地调研,本研究选取新疆维吾尔自治区昌吉州两处具有典型地貌特征的煤火1号点和3号点山地煤火区为研究区域(图1),利用地基遥测技术对无组织排放特征显著的煤火源开展全域覆盖的甲烷逃逸检测。研究区的发火原因及燃烧情况具体如下:该区域位于天山北麓博格达山前和准噶尔盆地南缘的前山丘陵地带,地貌主要为低山丘陵。研究区内的煤为高等植物形成的腐殖煤,易燃、烟浓、火焰长,有熔融或膨胀现象。近年来由于煤层露头开挖,煤层出露地表未及时覆盖,煤层长期氧化自燃。其中:1号点地表裂隙发育,青烟不断裂隙中冒出,地表可见明火,多塌陷坑;3号点燃烧剧烈,围岩受高温烘烤呈砖红色,裂隙发育,青烟不断从裂隙中冒出。

2.2 短波红外宽幅全景高光谱影像数据集

本研究采用的短波红外高光谱相机为HySpex SWIR-384,光谱范围覆盖950—2500 nm(谱段数288),分辨率可达5.45 nm,能够在光谱范围内同步观测多种气体分子(如CO₂、CH₄、H₂O等),并已广泛应用于温室气体浓度测量、区域排放估算及卫星数据验证(Frankenberg等, 2016; Köhler, 2016; Kupriyanov, 2020; Hochstaffl等, 2023)。因此,利用地面固定、走航观测和无人机平台搭载的HySpex高光谱成像仪进行甲烷逃逸检测与量化研究,具有充分的潜在可行性。其详细技术参数详见表1。

在甲烷遥感影像识别研究中,大气校正模型对甲烷光谱特征有显著削弱作用(孙袁超等, 2022),因此需直接使用定标后的数据,开展煤火区甲烷异常提取研究。本研究的地基高光谱影像数据集采集于2023年6月末,影像像元原始灰度值DN (Digital Number)经HySpex RAD模块处理后,由校准数据转换为定标后的辐射亮度值,单位为W/(m²·sr·nm)。镜头与排放源的水平距离约为100 m,影像的空间分辨率约为0.073 m,影像宽度约为28.2 m。

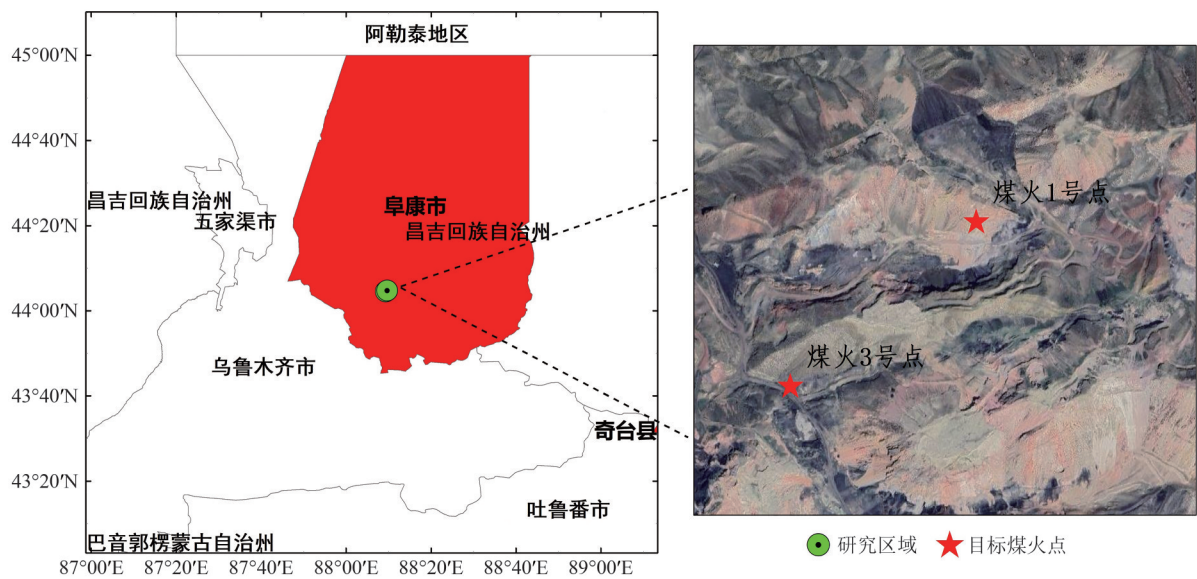


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the regions

表1 高光谱相机 SWIR-384主要参数
Table 1 Main parameters of the instrument of SWIR-384

技术指标	参数值	技术指标	参数值
光谱范围/ μm	0.95—2.5	动态范围	7500
波段数目	288	空间像素数	384
视场角/ $^\circ$	16	数字化/bit	16
瞬时视场角/mrad	0.73	最大帧率/Hz	400
光谱采样/nm	5.45	传感头重量/kg	5.7
噪声	150 e	传感头尺寸	38 cm×12 cm×17.5 cm
峰值信号比	>1:100	传感头功率/W	~30

2.3 HITRAN 光谱数据库

高分辨率透射分子吸收数据库 HITRAN (High Resolution Transmission Molecular Spectroscopic Database) 包含逐行光谱参数 (Line-by-line transitions), 红外吸收截面 (Cross-sections), 碰撞引起的吸收横截面 (Collision induced absorption cross-sections), 气溶胶折射率以及通用表等内容。HITRAN 数据库记录了 40 多种常见气体分子及其同位素的 Lambert-Beer 定律参数, 包括谱线位置、谱线宽度、温度变化系数、自然展宽系数及参考温度下的谱线强度等, 可用于准确模拟特定温度和压强条件下的气体浓度测量仿真。

HITRAN 2020 版本是 HITRAN 数据库的最新版本, 提供了高分辨率、高精度和广泛覆盖的分子光谱数据, 已广泛应用于气体检测、大气遥感和行星科学等领域, 成为分子光谱学研究的重要工

具之一 (Gordon 等, 2022)。

3 算法原理

3.1 最小二乘回归的 L2-范数

最小二乘法 (LST) 是一种数学优化技术, 也是机器学习常用算法, 其最佳的拟合准则是使 y_i 与 $f(x_i)$ 的距离的平方和最小, 具体计算公式如下:

$$\delta = \sum_{i=1}^m (f(x_i) - y_i)^2 \tag{1}$$

式中, δ 为残差平方和, x_i 为第 i 个样本的自变量, y_i 为第 i 个样本的观测值, $f(x_i)$ 为模型对 x_i 的预测值。

范数 (Norm), 是具有“长度”概念的函数, 定义为残差绝对值的最大值, 即所有数据点中残差距离的最大值。其中, L2-范数使用向量元素绝对值的平方和再开方表示, 常用来计算向量长度。

$$\|X\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \tag{2}$$

式中, $\|X\|_2$ 为向量 X 的 L2-范数, x_i 为 X 的第 i 个分量。

L_∞ -范数定义为所有向量元素绝对值中的最大值:

$$\|X\|_\infty = \max_i |x_i| \tag{3}$$

式中, $\|X\|_\infty$ 为向量 X 的 L_∞ -范数, x_i 为 X 的第 i 个分量。

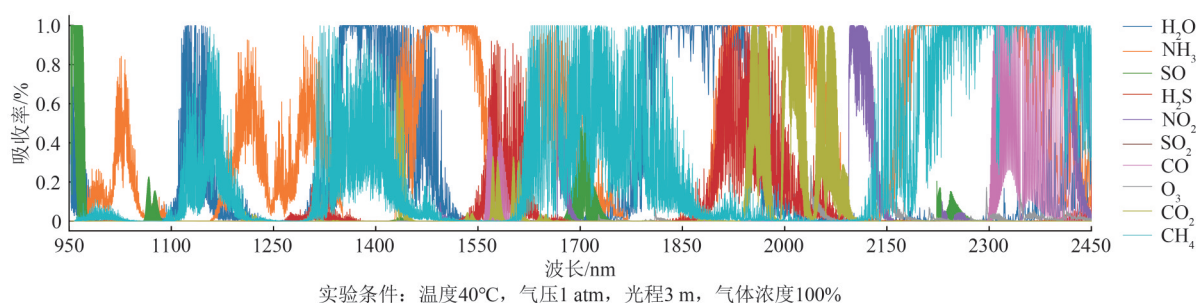
由此可知, 最小二乘法是 L2-范数的一个具体

应用。因此,最小二乘法可定义为:对于给定的数据集 $G = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$, 在取定的假设空间 H 中寻找一条多项式曲线 $f(x) \in H$, 使得残差的 L2-范数最小, 从而实现对数据的最佳拟合。

3.2 修正的最小二乘图像增强算法(MLSIE)

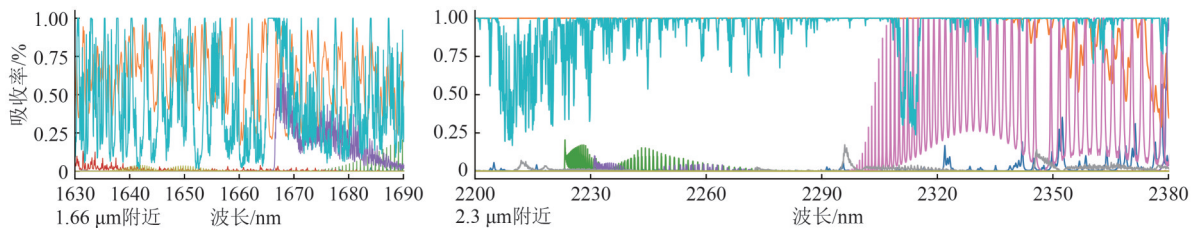
修正的最小二乘图像增强算法 MLSIE(Modified Least Square Image Enhancement), 核心内容为甲烷内部点和外部点 L2-范数(残差平方和)的比值运算, 原理如下:

煤自燃过程涉及到的最主要气体成分包括 CH_4 、 CO_2 、 CO 等; 不同变质程度的煤自燃时, 还会产生 CO 、 H_2S 、 SO_2 等有害气体, CH_4 、 C_2H_4 等碳氢化合物以及 CO 、 CO_2 等碳氧化合物, 其中 CO_2 和 CH_4 的体积分数较大(周东等, 2019)。不同气体分子的光谱特性各不相同, 即气体分子具有选择性吸收特性: 不同结构的气体分子会选择性吸收不同波长的电磁辐射, 导致特定波长光的能量衰减, 从而形成相应的吸收光谱图, 详见图 2(a), 该过程符合 Lambert-Beer 定律。



(a) 煤火自燃伴随的主要气体成分光谱吸收

(a) Spectral absorption of major gas components associated with coal spontaneous combustion



(b) 甲烷敏感波段范围内主要气体成分的光谱吸收

(b) Spectral absorption of major gas components in methane-sensitive bands

图2 煤火自燃过程伴随的主要气体成分的光谱特性

Fig. 2 Spectral characteristics of major gas compositions associated with coal spontaneous combustion process

检测甲烷含量增强的像素, 核心目的是消除甲烷间隔(计算辐射平均值)和大气窗口的地面强辐射影响。首先利用 SCIATRAN 辐射传输模型和 HITRAN 光谱数据库选取待检测气体甲烷的敏感波段范围 $1.66 \mu\text{m}$ 和 $2.3 \mu\text{m}$ 两部分(图 2(b)), 确定待检测影像的内部点(甲烷间隔)和外部点(透明间隔)的波长范围。本研究提出的甲烷内部点 Y_{in} 和甲烷外部点 Y_{out} 的 L2-范数, 计算公式如下:

$$\|z\|_2 =$$

$$\sqrt{|q(y) - y_{\text{in},1}|^2 + |q(y) - y_{\text{in},2}|^2 + \cdots + |q(y) - y_{\text{in},m}|^2} \quad (4)$$

$$\|e\|_2 =$$

$$\sqrt{|p(y) - y_{\text{out},1}|^2 + |p(y) - y_{\text{out},2}|^2 + \cdots + |p(y) - y_{\text{out},n}|^2} \quad (5)$$

式中, z 和 e 分别为甲烷内部点和外部点的残差向量, $q(y)$ 为内部点零阶多项式拟合结果, $p(y)$ 为外部点均值, $y_{\text{in},m}$ 表示第 m 个甲烷内部点的光谱值, $y_{\text{out},n}$ 表示第 n 个甲烷外部点的光谱值。

对上述两者的 L-2 范数进行比值计算, 得到新的光谱增强像素值, 记为 result:

$$\text{result} = \frac{\|z\|_2}{\|e\|_2} \quad (6)$$

3.3 高光谱图像比值导数光谱解混(DRS)

利用高光谱图像研究混合像元的组成及比例的过程称为混合像元分解 (Spectral unmixing)。比值导数法 DRS (Derivative Ratio Spectroscopy) 能够去除混合光谱中本底端元的影响, 通过增强光谱反差来提取目标端元, 相比于连续波段的反射率光谱特征, 该方法对于特征波段的选择效果较好 (郭伟 等, 2021)。在线性光谱混合模型中, 像元在某一波段的光谱反射率表示为占一定比例的各个基本端元组反射率的线性组合, 原理如下:

$$r(\lambda_m) = \sum_{n=1}^L C_n r_n(\lambda_m) + \xi(\lambda_m) \quad (7)$$

式中, m 为光谱通道, $r(\lambda_m)$ 为在 λ_m 波长处的反射率, n 为端元组分数目, C_n 对应混合物中第 n 个组分的丰度, $\xi(\lambda_m)$ 为第 m 个光谱通道的残余误差值。

当像元内仅包含两种组分时, 可简化为

$$r(\lambda_m) = C_1 \times r_1(\lambda_m) + C_2 \times r_2(\lambda_m) + \xi(\lambda_m) \quad (8)$$

式 (8) 等号两边同时除以第一种组分的光谱 $r_1(\lambda_m)$, 再对等号两边 λ_m 求导, 得到公式如下:

$$\frac{r(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)} = C_1 + \frac{C_2 \times r_2(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)} + \xi'(\lambda_m) \quad (9)$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)} \right) = C_2 \times \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_2(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)} \right) + \xi''(\lambda_m) \quad (10)$$

$$\text{式中, } \xi'(\lambda_m) = \frac{\xi(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)}, \quad \xi''(\lambda_m) = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\xi'(\lambda_m)}{r_1(\lambda_m)} \right)。$$

从式 (10) 中可以看出, 此时光谱求导结果已经与第一种组分的丰度无关, 即光谱求导后, 与作为除数的组分含量无关, 只与待求组分的含量线性相关。

直接使用未经大气校正的影像数据会影响岩石、植被、山体阴影等伪煤火区的真实光谱。研究表明, 光谱导数方法不仅能够增强光谱曲线在坡度上的细微变化, 还能部分消除大气效应 (卓伟 等, 2020)。本研究基于线性光谱混合模型的比值导数思想, 提出了一种适用于煤火源甲烷检测的比值导数光谱解混算法 RCH4I (Ratio-based Derivative Spectral Unmixing for CH₄ Index), 该算法通过压制伪煤火区的波谱特征 (图 3), 突出甲烷的光谱信息。

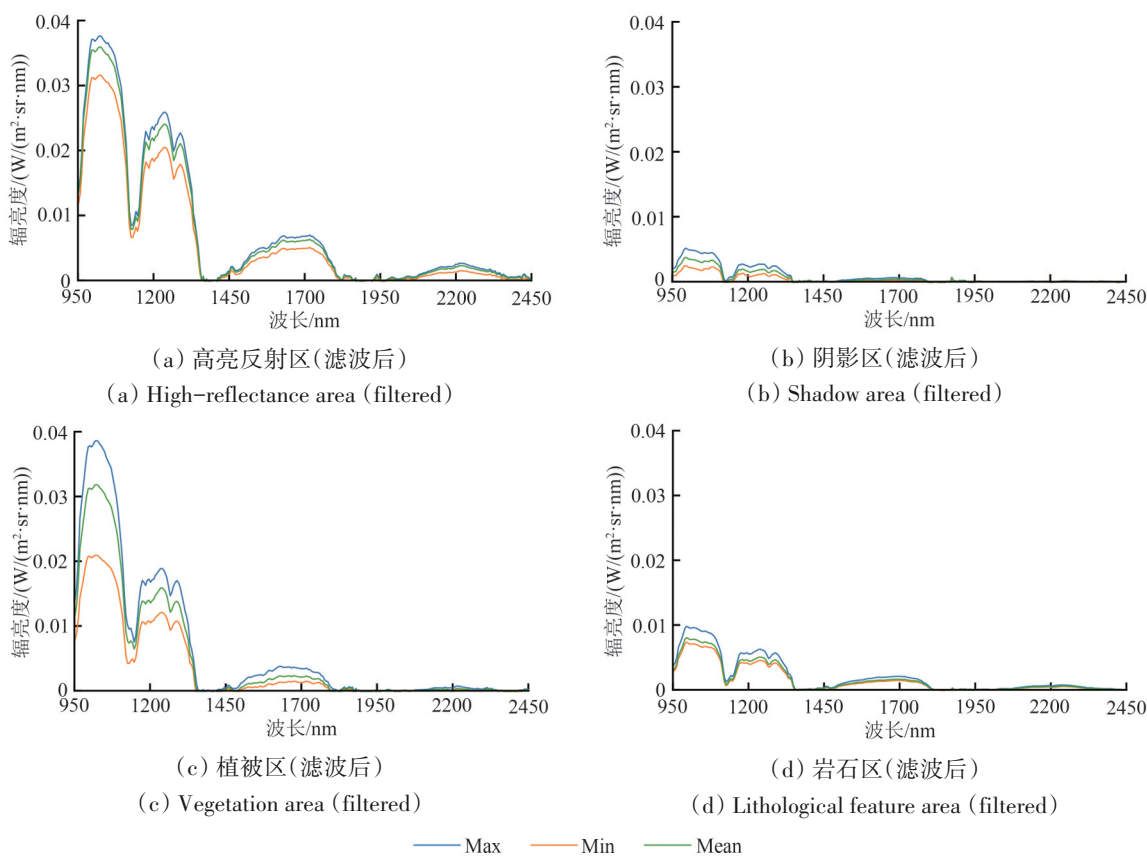


图3 伪煤火背景区主要地物类型光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of major land cover types in the pseudo-coal fire background areas

3.4 遥感影像伪影检测与抑制技术

大气散射在较短波长（可见光波段）范围内较强，而阴影中的扩散辐射在较长波长（近红外 NIR（Near-Infrared）和短波红外 SWIR（Short-Wave Infrared）波段）很弱；同时，植被、岩石、裸地等陆面物在 NIR 和 SWIR 波段反射率较高，伪影的暗化效应明显。假阳性和伪影主要由光照条件、环境噪声或数据处理算法的误差引起，通过改进算法、优化光照条件等方式可以有效抑制（Arroyo-Mora 等，2021）。因此，NIR 波段被广泛用于云阴影检测技术。王凌等（2016）提出的云指数 CI（Cloud Index）、归一化暗像元指数 NDPI（Normalized Dark Pixel Index）和比值阴影指数 RSI（Ratio Shadow Index）通过阈值分割和方位角搜索实现云影检测；Zhai 等（2018）进一步利用云阴影指数 CSI（Cloud Shadow Index）和空间共存关系提升算法 CSD-SI（Cloud and Shadow Detection via Spectral Indices）的精度。

矿物指数中的归一化差值阴影指数 NDSI（Normalized Difference Shadow Index）以及归一化差异建筑指数 NDBI（Normalized Difference Built-up Index）采用相同 SWIR1 和 NIR 波段。其中，NDSI 被广泛用于监测干旱情况（伪影）以及监测火灾多发区域的可燃物情况，同时减轻光照影响和大气效应，NDBI 可以突出生产建筑用地面积（高亮反射体）（García 和 Caselles，1991）。

$$NDSI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (11)$$

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (12)$$

式中，NIR 和 SWIR1 分别代表 NIR 波段和 SWIR1 波段的光谱值。

4 结果与分析

4.1 数据预处理

高光谱影像数据集的实测波谱包括地物波谱和噪声两部分。为了突出地物的波谱特征，需要进行去噪处理，即从信号中去除噪声或不需要的伪影（假阳性，Artifact）。本研究的地基高光谱数据集首先通过正、反主成分变换进行波段重叠解缠，保留约 80% 的信息量，去除残余噪声；随后采用双边滤波处理（同时考虑空间位置和像素差异），进一步去除背景噪声。

Bradley 等（2010）提出的甲烷反演指数（CH₄ Index, CH4I）的构建是基于甲烷在 2288—2358 nm 的光谱吸收特征，利用了其中 4 个光谱吸收谷和 3 个反射峰。算法如下：

$$CH4I = \frac{MEAN(B_{251} + B_{255} + B_{260})}{MEAN(B_{249} + B_{253} + B_{258} + B_{262})} \quad (13)$$

式中， B_i 代表本研究中高光谱影像第 i 个波段的辐射亮度值，MEAN 代表取均值。

4.2 MLSIE 算法实现

本研究中 MLSIE（1.66 μm）和 MLSIE（2.3 μm）两种算法设置的甲烷间隔和内部点波段条件，详见表 2，并根据式（6）计算得到甲烷像素增强影像。

表 2 MLSIE 算法主要参数

Table 2 Main parameters of MLSIE algorithms

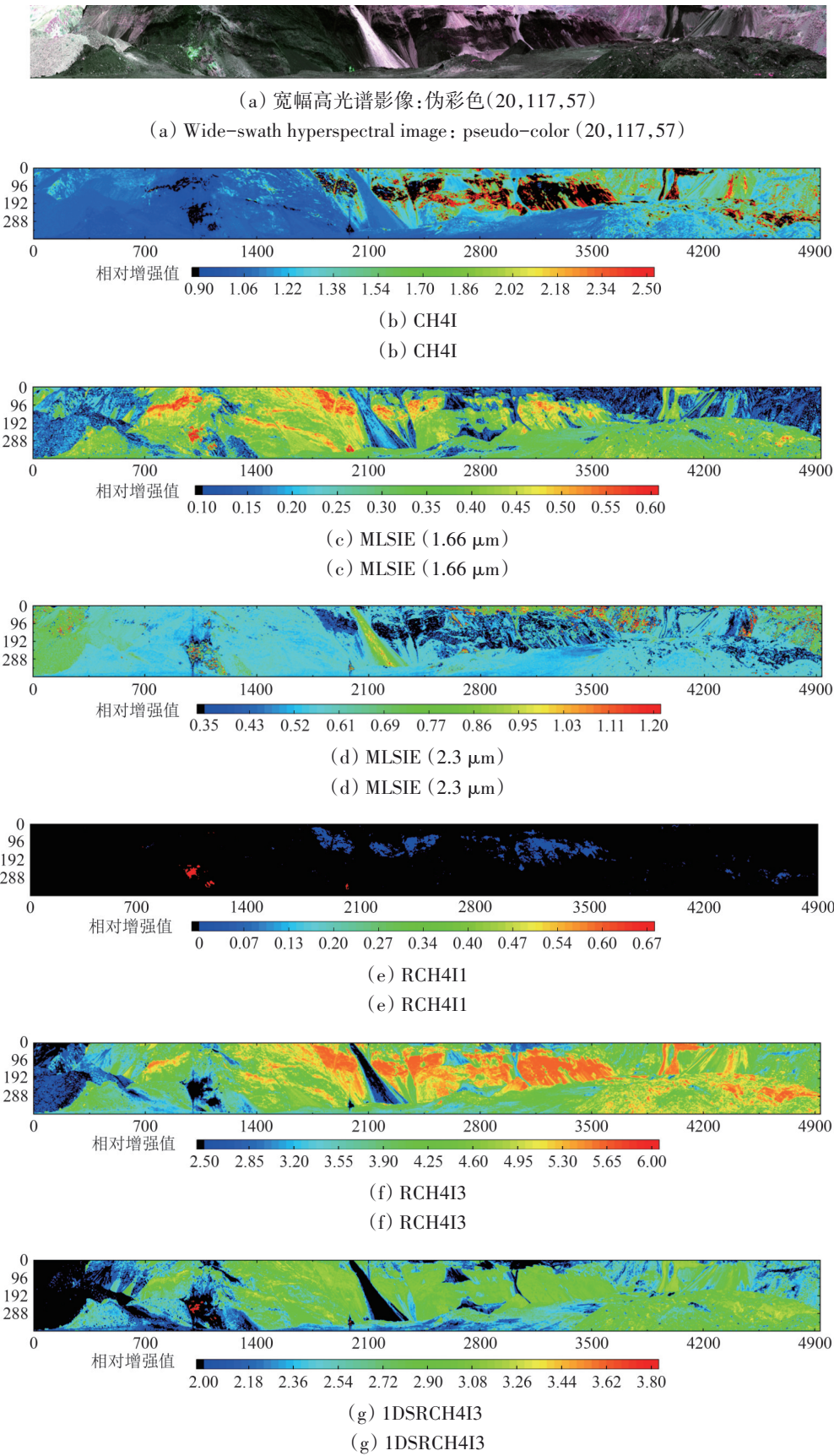
参数设置	MLSIE (1.66 μm)	MLSIE (2.3 μm)
甲烷间隔条件/nm	1652.9—1680.7 (±0.5)	2297.4—2324.6 (±0.5)
内部点条件/nm	1662.8—1669.2 (±0.5)	2313.5—2319.6 (±0.5)
外部点条件/nm	1652.9—1662.8 和 1669.2—1680.7 (±0.5)	2297.4—2313.5 和 2319.6—2324.6 (±0.5)
内部点数组	[2, y, 384]	[2, y, 384]
外部点数组	[4, y, 384]	[5, y, 384]

注：(±0.5) 表示波长范围允许的误差为 0.5 nm；y 代表每一景影像原始 DN 值的水平维度。

对于地貌复杂山地煤火 1 号点（图 4（a））的检测结果见图 4。显然，MLSIE 效果优于 CH4I 指数法，CH4I 指数在地貌类型复杂、空间异质性较大的区域，敏感性较差（图 4（b））；MLSIE（2.3 μm）的检测结果整体高于 MLSIE（1.66 μm）平均水平，

即高光谱影像在 2.3 μm 光谱窗口的敏感性明显比 1.66 μm 附近更高，这可能与混合气体成分有关。此外，MLSIE（1.66 μm）检测结果存在假阳性问题（如山体阴影处，图 4（c）），而 MLSIE（2.3 μm）检测结果也受到了地物异常反射（高亮反射体）

的影响（图4（d））。这是由于伪煤火地表类型在甲烷敏感波段内呈现出了与甲烷相似的吸收特性（图3），因此仅考虑单一甲烷光谱窗口的检测方法效果不理想。



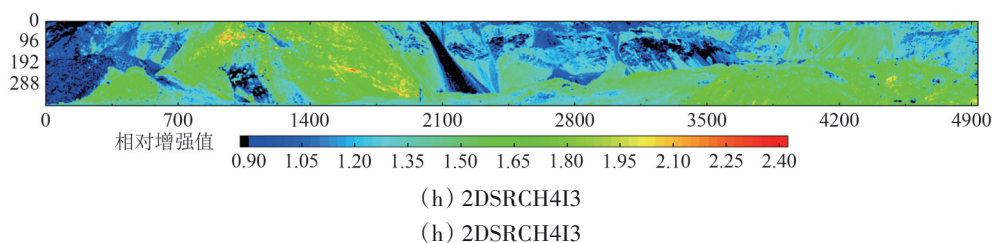


图4 煤火1号点宽幅高光谱影像各算法检测结果(地貌复杂山地煤火区)

Fig. 4 Detection results of various algorithms for the wide-swath hyperspectral imagery of coal fire point 1 (A mountain coal fire area with complex terrain)

4.3 RCH4I算法实现

结合CH4I和MLSIE检测结果,选取足够数量的重合伪煤火区感兴趣区域 ROIs (Regions of

Interest), 得到背景伪光谱均值 $\bar{y}$; 随后, 根据式 (10) 对待检测影像数据进行甲烷—伪煤火光谱比值导数光谱解混, 结果记为 DB_i (图5);

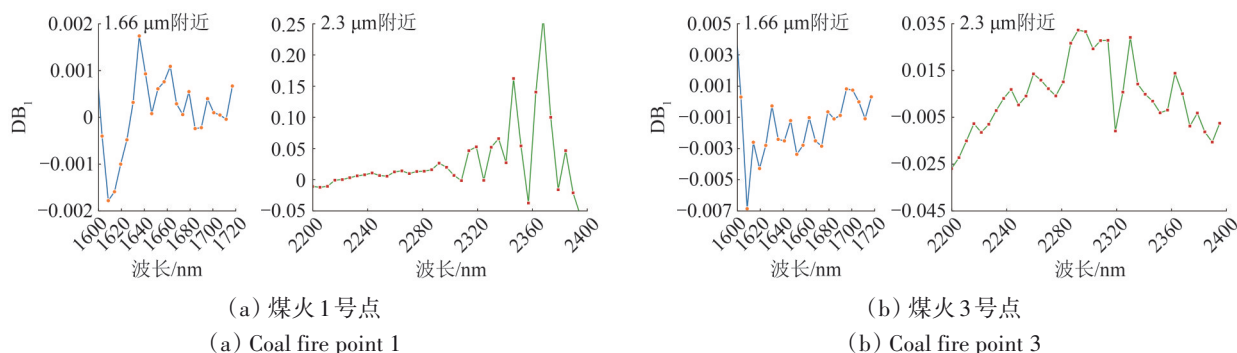


图5 甲烷—伪煤火比值导数光谱特征(甲烷敏感窗口内)

Fig. 5 Derivative spectral features of methane-to-pseudo coal fire ratio (Within methane-sensitive windows)

由 HITRAN 库获取相同环境条件下纯净甲烷的光谱吸收率 (记为 Absorption) 和辐射亮度数据 (记为 Radiance), 二者进行插值重采样处理, 调整成与高光谱影像相同的 288 个波段对应值。

进一步, 根据甲烷波谱比值导数曲线确定特征波段范围, 对 Radiance 与 DB_i 、Absorption 与 DB_i 分别进行相关性分析, 筛选出相关性总体更高的波段范围; 最后, 确定甲烷光谱 DB_i 谷值和峰值, 以及辐射亮度、吸收率的吸收谷和反射峰 (图6)。

根据将待测目标像元整体缩小和放大的遥感指数构建思想, 达到抑制伪煤火背景区和放大甲烷自身光学特征的目标, 本研究构建了两种甲烷比值导数光谱解混算法, 分别记为 RCH4I1 和 RCH4I3, 公式如下:

$$RCH4I1 = \frac{\text{MEAN}(B_{251} + B_{254} + B_{260}) \times (1 + DB_{127})}{\text{MEAN}(B_{239} + B_{252} + B_{255} + B_{261}) + DB_{130} + DB_{232}} \quad (14)$$

$$RCH4I3 = \frac{(B_{251} + B_{254} + B_{260}) + (DB_{127} - DB_{232})}{(B_{239} + B_{252} + B_{255} + B_{261}) + (DB_{127} + DB_{130})} \quad (15)$$

式中, B_i 代表高光谱影像第 i 个波段的辐射亮度吸收谷及反射峰值, DB_j 代表影像第 j 个波段的 DB_i 谷值及峰值, MEAN 代表取均值。

RCH4I 算法同时考虑了两个敏感窗口, 从图4(e)中可以看出, 它对于地貌类型丰富、空间异质性较大、泄漏量相对较大的区域具有较高普适性, 检测效果较好, 可以较为直观的放大甲烷排放源, 但仍存在一定的假阳性现象; 图4(f) RCH4I3 算法检测效果不理想, 虽然整体阈值放大, 伪阳性问题却更为突出。而对于地貌相对单一、泄漏量不大的煤火区 (图7(a)), RCH4I1 的敏感性不够 (图7(e)), 因此通过数值放大方法构造 RCH4I3 是有必要的; 针对地形相对单一的煤火区, 有待开发出一种抑制 RCH4I3 假阳性/伪影, 即放大甲烷与阴影差异的新方法。

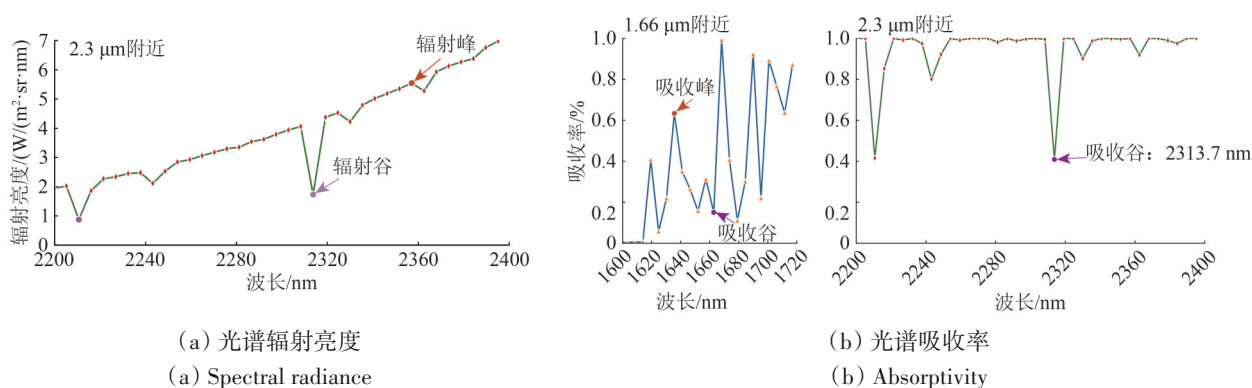


图6 插值的纯净甲烷光谱特征(甲烷敏感窗口内)

Fig. 6 Spectral characteristics of interpolated pure methane (Within methane-sensitive windows)

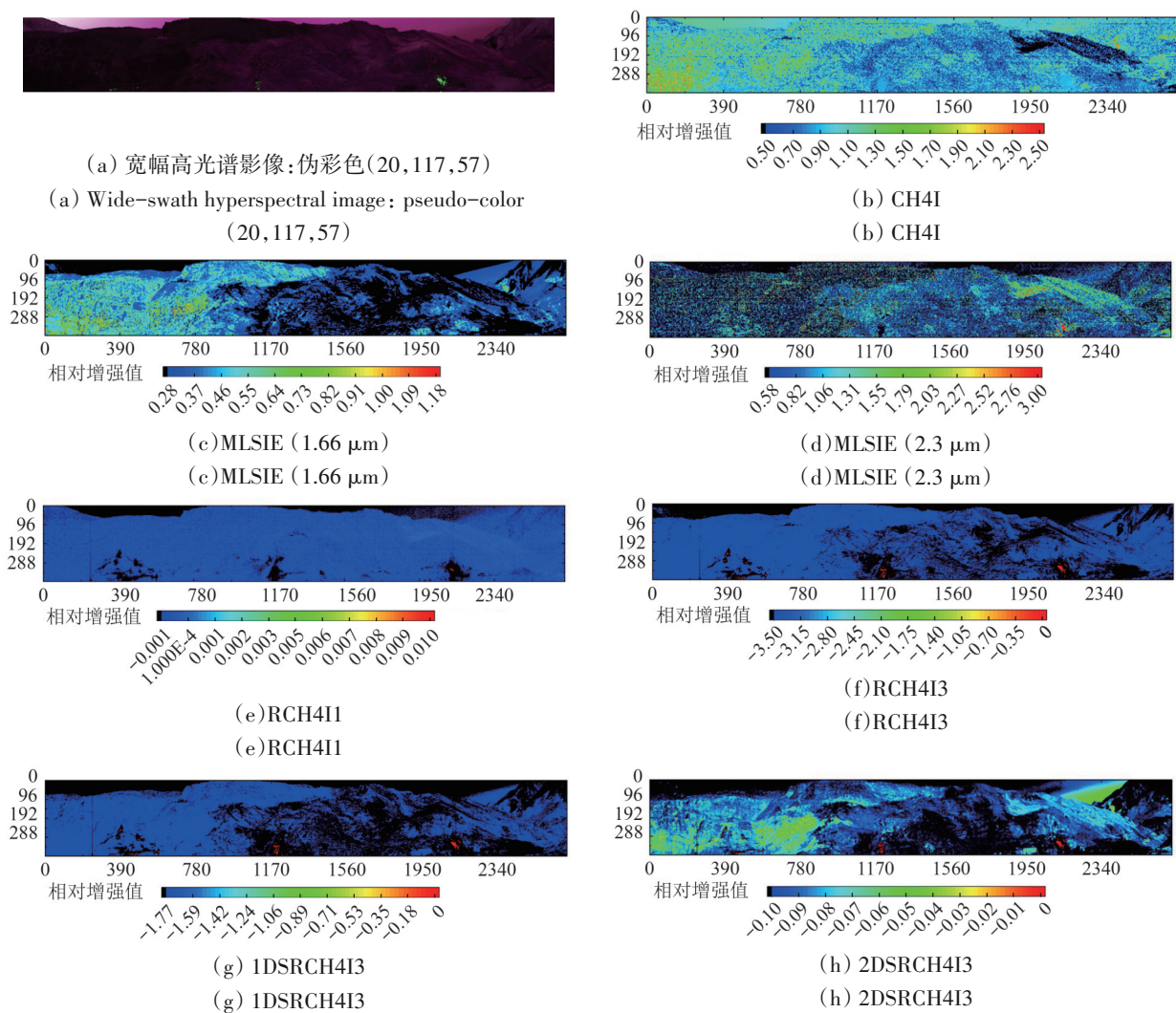


图7 煤火3号点宽幅高光谱影像各算法检测结果(地貌相对单一的山地煤火区)

Fig. 7 Detection results of various algorithms for the wide-swath hyperspectral imagery of coal fire point 3

(A mountain coal fire area with relatively simple terrain)

4.4 假阳性/伪影抑制下的DSRCH4I算法实现

为放大甲烷与伪影区的差异,本研究引入NDSI指数,构建去阴影甲烷比值指数DSRCH4I (Deshadowed Spectral Ratio CH₄ Index) 1DSRCH4I3;

同时,为抑制伪影区而突显甲烷增强区,引入NDBI指数,构建去阴影甲烷比值指数2DSRCH4I3。公式如下:

$$1DSRCH4I3 = \frac{RCH4I3}{1 + NDSI} \quad (16)$$

$2DSRCH4I3 = RCH4I3 \times (1 + NDBI)$ (17)

式中，RCH4I3 为式 (15) 甲烷比值导数光谱解混算法结果，NDSI 为式 (11) 的归一化差值阴影指数结果，NDBI 为式 (12) 的归一化差异建筑指数结果。

从图 4 (g) — (h) 可以看出，两种算法都在一定程度上抑制了伪影区域，但对于以煤火 1 号点为代表的地貌类型丰富的山地煤火区，2DSRCH4I 检测效果更佳，且与实际情况较符合 (图 4 (h))；煤火燃烧点在 1DSRCH4I 下突显 (图 4 (g) 和图 7 (g))。

4.5 算法评价及结果分析

4.5.1 不同应用场景的检测效果

从图 4 可以看出，2DSRCH4I3、MLSIE (2.3 μm) 和 RCH4I1 算法检测效果较好，对于地貌复杂的山地煤火区的检测效果最佳，三者相互印证，并与实际情况相吻合；从图 7 中可以看出，MLSIE (2.3 μm) 算法和 2DSRCH4I3 算法对于地貌相对单一 (仅山体岩石、山体阴影、煤火点等) 的山地煤火区的检测效果最佳，二者相互印证，并与实际情况相吻合。

4.5.2 甲烷羽流特征分析

图 4 (a) 煤火 1 号点影像规格为 384×4935×288，羽流占整幅 0.2062%，大小约为 20.825732 m²；图 7 (a) 煤火 3 号点影像规格为 384×2705×288，羽流占整幅 0.1741%，大小约为 9.634832 m²。文章检测出的煤火区甲烷羽流存在两种形态，即与燃烧火焰共存、以自由扩散形式逸出 (图 8)。这表

明煤的燃烧过程中常伴随着 CH₄ 燃烧，经过完全燃烧和不完全燃烧，部分 CH₄ 还会直接逃逸到大气中，并以自由扩散的形式分布在周围环境中。

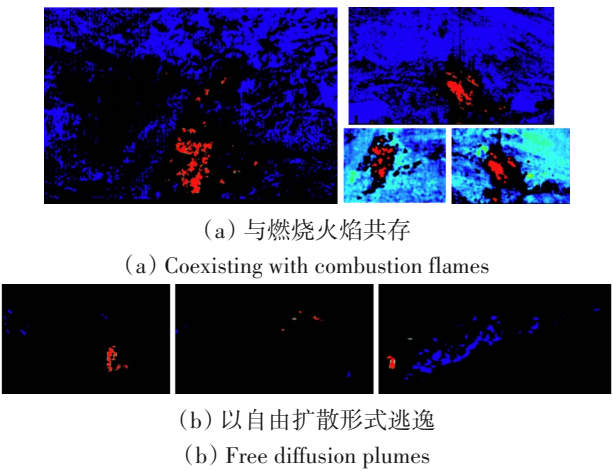


图 8 地基高光谱成像仪捕获的两种形式的甲烷羽流
Fig. 8 Two morphological patterns of methane plumes captured by ground-based hyperspectral imager

4.5.3 算法汇总与评价

结合图 3 和图 5，本研究从甲烷灵敏窗口、检测目标特征 (地貌特征和煤火特征)、应用场景的普适性 3 个方面出发，分别对上述 7 种甲烷逃逸检测算法进行效果评价。各算法对于不同地貌及煤火特征的高温煤火源的适配情况，详见下表 3。在两个甲烷敏感窗口 (1.66 μm 和 2.3 μm) 中，CO₂、H₂O、CO、NO_x、O₃ 等干扰气体仍然存在一定的吸收特征 (图 2 (b))，即使是很窄的光谱波段，除了目标反演分子的吸收，仍存在其他干扰分子的吸收，因此混合气体成分是导致文章算法性能差异的一个重要原因。

表 3 煤火源甲烷逃逸检验算法效果评价

Table 3 Evaluation on the effect of coal fire source methane escape detection algorithms				
算法名称	算法核心	甲烷敏感窗口/ μm	煤火 1 号点 地貌复杂的山地煤火区	煤火 3 号点 地貌相对单一的山地煤火区
CH4I		2.3	×	×
			伪影现象严重	敏感性差,存在伪影
MLSIE (1.66 μm)	最小二乘回归思想的 L2-范数比值	1.66	×	×
MLSIE (2.3 μm)	最小二乘回归思想的 L2-范数比值	2.3	~	~
			存在一定的高亮异常现象	存在一定的高亮异常现象
RCH4I1	甲烷—伪煤火比值导数光谱解混	1.66 和 2.3	√	×
RCH4I3	甲烷—伪煤火比值导数光谱解混	1.66 和 2.3	×	√
1DSRCH4I3	在 RCH4I3 算法基础上,引入矿物指数	1.66 和 2.3	√	√
			增强信息突出	增强信息突出
2DSRCH4I3	在 RCH4I3 算法基础上,引入矿物指数	1.66 和 2.3	√	√

注：煤火 1 号点地物类型包括山地岩体、山体阴影、植被、高亮反射体 (大理石、砂砾)、煤火，煤火泄露体量较大 (燃烧剧烈)；煤火 3 号点含山地岩体、山体阴影、煤火，处背阴面，煤火泄露体量小。表中“√”、“~”和“×”分别代表算法检测效果较优、存在局限性和效果差 3 个等级。

5 结 论

本文以无组织排放特征突出的煤火区为研究对象,提出了一种甲烷逃逸检测方法,实验结果表明,伪影/假阳性得到有效抑制,这在一定程度上弥补了现有匹配滤波算法在复杂地形区的甲烷异常探测中应用不佳的问题。主要结论如下:

(1) 甲烷敏感窗口方面,将两个敏感窗口同时纳入算法参数中的检测效果最好;高光谱影像在 2.3 μm 光谱窗口的敏感性明显高于 1.66 μm 附近,这一差异与混合气体成分和地貌类型密切相关。

(2) 检测目标特征方面,地貌复杂的煤火区适用 2DSRCH4I3、MLSIE (2.3 μm) 和 RCH4I1 这 3 种算法,2DSRCH4I 和 MLSIE (2.3 μm) 算法同样适用于地貌相对单一的山地煤火区,而 RCH4I1 算法则更适用于泄露量大(燃烧剧烈)的活跃煤火区。

(3) 算法检测出的甲烷羽流主要以两种形式存在:一是与燃烧火焰共存,二是以自由扩散形式逸出。

本研究仍存在一些不足之处。首先,煤火区常伴随较高浓度的吸光性气溶胶,这些气溶胶的混合状态和粒径分布特征不仅影响其物理、化学及光学性质,也可能对甲烷等气体的遥感探测产生干扰(Pilinis 等, 1995; Cohen 等, 2011; Tiwari 等, 2023)。本研究的检测算法在构建过程中并未考虑吸光性气溶胶对混合光谱的潜在影响,后续拓展研究考虑将气溶胶相关参数纳入改进算法中,在活跃煤火区与间歇性甲烷排放的遥感反演中进行验证与优化,从而提高煤火区甲烷检测的准确性和可靠性。

其次,本研究得到的甲烷增强信号中像素值含义不明,甲烷羽流量化工作是我们目前需要解决的问题。Knapp 等(2023)使用测风激光雷达测量不同高度下的风向和风速,将 SWIR 高光谱数据与三维风场信息结合,最终估算得到排放量,实现亚小时分辨率下局部源排放的远程动态测量,这对团队后续基于地基/机载高光谱影像光谱增强下的甲烷羽流量化工作具有一定的启发性。

参考文献(References)

Arroyo-Mora J P, Kalacska M, Løke T, Schlöpfer D, Coops N C, Luca-

- nus O and Leblanc G. 2021. Assessing the impact of illumination on UAV pushbroom hyperspectral imagery collected under various cloud cover conditions. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112396 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112396]
- Bradley E S, Leifer I, Roberts D A, Dennison P E and Washburn L. 2011. Detection of marine methane emissions with AVIRIS band ratios. *Geophysical Research Letters*, 38(10): L10702 [DOI: 10.1029/2011GL046729]
- Cohen J B, Prinn R G, and Wang C. The impact of detailed urban-scale processing on the composition, distribution, and radiative forcing of anthropogenic aerosols. *Geophysical Research Letters*, 38 [DOI: 10.1029/2011GL047417, 2011]
- Deng J C. 2023. Thermal Infrared Remote Sensing Inversion and the Characteristics of Typical Pollutant Emissions from Coalfield Fires. Xuzhou: China University of Mining and Technology (邓进昌. 2023. 煤田火灾热红外遥感反演与典型污染物排放特征分析研究. 徐州: 中国矿业大学) [DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.000093]
- Feng C X, Li F, Juan J R, Guanter L, Chen H L, Xie D L, Lin J, Fan L L, Cai J W and Zhang Y G. 2024. An optimized methane retrieval approach based on Kalman filter for mapping methane point source emissions from spaceborne imaging spectrometer [DOI: 10.2139/ssrn.4762395]
- Frankenberg C, Thorpe A K, Thompson D R, Hulley G, Kort E A, Vance N, Borchardt J, Krings T, Gerilowski K, Sweeney C, Conley S, Bue B D, Aubrey A D, Hook S and Green R O. 2016. Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(35): 9734-9739 [DOI: 10.1073/pnas.1605617113]
- García M J L and Caselles V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1): 31-37 [DOI: 10.1080/10106049109354290]
- Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, Hashemi R, Karlovets E V, Skinner F M, Conway E K, Hill C, Kochanov R V, Tan Y, Weislo P, Finenko A A, Nelson K, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Campargue A, Chance K V, Coustenis A, Drouin B J, Flaud J M, Gamache R R, Hodges J T, Jacquemart D, Mlawer E J, Nikitin A V, Perevalov V I, Rotger M, Tennyson J, Toon G C, Tran H, Tyuterev V G, Adkins E M, Baker A, Barbe A, Canè E, Császár A G, Dudaryonok A, Egorov O, Fleisher A J, Fleurbaey H, Foltynowicz A, Furttenbacher T, Harrison J J, Hartmann J M, Horneman V M, Huang X, Karman T, Karns J, Kassi S, Kleiner I, Kofman V, Kwabia - Tchana F, Lavrentieva N N, Lee T J, Long D A, Lukashevskaya A A, Lyulin O M, Makhnev V Y, Matt W, Massie S T, Melosso M, Mikhailenko S N, Mondelain D, Müller H S P, Naumenko O V, Perrin A, Polyansky O L, Raddaoui E, Raston P L, Reed Z D, Rey M, Richard C, Tóbiás R, Sadiek I, Schwenke D W, Starikova E, Sung K, Tamassia F, Tashkun S A, Vander Auwera J, Vasilenko I A, Vigasin A A, Villanueva G L, Vispoel B, Wagner G, Yachmenev A and Yurchenko S N. 2022. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectros-*

- copy and Radiative Transfer, 277: 107949 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949]
- Guanter L, Irakulis-Loitxate I, Gorroño J, Sánchez-García E, Cusworth D H, Varon D J, Cogliati S, Colombo R. 2021. Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 265: 112671 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112671]
- Guo W, Qiao H B, Zhao H Q, Zhang J J, Pei P C and Liu Z L. 2021. Cotton aphid damage monitoring using UAV hyperspectral data based on derivative of ratio spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(5): 1543-1550 (郭伟, 乔红波, 赵恒谦, 张娟娟, 裴鹏程, 刘泽龙. 2021. 基于比值导数法的棉花蚜害无人机成像光谱监测模型研究. *光谱学与光谱分析*, 41(5): 1543-1550) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1543-08]
- Han G, Pei Z P, Shi T Q, Mao H Q, Li S W, Mao F Y, Ma X, Zhang X Y and Gong W. 2024. Unveiling unprecedented methane hotspots in China's leading coal production hub: a satellite mapping revelation. *Geophysical Research Letters*, 51(10): e2024GL109065 [DOI: 10.1029/2024GL109065]
- Han G, Yang K Y, Ma X, Pei Z P, Li S W and Gong W. 2023. Methane anomaly inversion false positive removal method and system suitable for short-wave infrared spectrum imager. CN, 202310788088.7 (韩舫, 杨可意, 马昕, 裴志鹏, 李四维, 龚威. 2023. 一种适用于短波红外光谱成像仪的甲烷异常反演假阳性去除方法及系统. 中国, 202310788088.7)
- Hochstaffl P, Schreier F, Köhler C H, Baumgartner A and Cerra D. 2023. Methane retrievals from airborne HySpex observations in the shortwave infrared. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(18): 4195-4214 [DOI: 10.5194/amt-16-4195-2023]
- Hulley G C, Duren R M, Hopkins F M, Hook S J, Vance N, Guillevic P, Johnson W R, Eng B T, Mihaly J M, Jovanovic V M, Chazanoff S L, Staniszewski Z K, Kuai L, Worden J, Frankenberg C, Rivera G, Aubrey A D, Miller C E, Malakar N K, Sánchez Tomás J M and Holmes K T. 2016. High spatial resolution imaging of methane and other trace gases with the airborne Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES). *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(5): 2393-2408 [DOI: 10.5194/amt-9-2393-2016]
- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC: 35-115 [DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647]
- Jacob D J, Varon D J, Cusworth D H, Dennison P E, Frankenberg C, Gautam R, Guanter L, Kelley J, McKeever J, Ott L E, Poulter B, Qu Z, Thorpe A K, Worden J R, and Duren R M. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 9617-9646 [DOI: 10.5194/acp-22-9617-2022]
- Kang H S, Qin K, Lu F, Hu W, Xu Q and Cohen J B. 2024. Emission characteristics of methane point sources at coal mines in Shanxi Province based on Gaofen-5 satellite. *Journal of China Coal Society*, 49(9): 3960-3968 (康涵书, 秦凯, 鹿凡, 胡玮, 许庆, 科恩·杰森. 2024. 基于高分五号卫星的山西省煤炭行业甲烷点源排放特征. *煤炭学报*, 49(9): 3960-3968) [DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1247]
- Knapp M, Scheidweiler L, Külheim F, Kleinschek R, Necki J, Jagoda P and Butz A. 2023. Spectrometric imaging of sub-hourly methane emission dynamics from coal mine ventilation. *Environmental Research Letters*, 18(4): 044030 [DOI: 10.1088/1748-9326/acc346]
- Köhler C H. 2016. Airborne imaging spectrometer HySpex. *Journal of Large-Scale Research Facilities*, 2: A93 [DOI: 10.17815/jlsrf-2-151]
- Kupriyanov A. 2020. Analysis of Airborne Infrared Measurements to Estimate Localized Methane Emissions. Munich: Technische Universität München
- Liang Y T, Chen C F, Tian F C, Wang J Y. 2021. Methane gas detection technology and its application in coal mines. *Coal Science and Technology*, 49(4): 40-48 (梁运涛, 陈成峰, 田富超, 王敬燕. 2021. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用. *煤炭科学技术*, 49(4): 40-48) [DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.04.005]
- Ministry of Ecology and Environmental, People's Republic of China. 2023. Notice of 11 departments, including the Ministry of Ecology and Environment, on the issuance of the "Methane Emissions Control Action Plan" [EB/OL]. (2023-11-07)[2024-09-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202311/t20231107_1055437.html (生态环境部, 外交部, 国家发展改革委, 科技部, 工业和信息化部, 财政部, 自然资源部, 住房和城乡建设部, 农业农村部, 应急管理部, 国家能源局. 2023. 生态环境部等11部门关于印发《甲烷排放控制行动方案》的通知[EB/OL]. (2023-11-07)[2024-09-25] https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202311/t20231107_1055437.html)
- Nesme N, Marion R, Lezeaux O, Doz S, Camy-Peyret C and Foucher P Y. 2021. Joint use of in-scene background radiance estimation and optimal estimation methods for quantifying methane emissions using PRISMA hyperspectral satellite data: application to the Korpezhe industrial site. *Remote Sensing*, 13(24): 4992 [DOI: 10.3390/rs13244992]
- Pilinis, C, Pandis S N, and Seinfeld J H. Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosols to aerosol size and composition, *Geophysical Research Letters*, 100(D9), 18739-18754 [DOI: 10.1029/95JD02119]
- Qin K, He Q, Kang H S, Hu W, Lu F and Cohen J. 2023. Progress and prospect of satellite remote sensing research applied to methane emissions from the coal industry. *Acta Optica Sinica*, 43(18): 1899908 (秦凯, 何秦, 康涵书, 胡玮, 鹿凡, 科恩·杰森. 2023. 煤炭行业甲烷排放卫星遥感研究进展与展望. *光学学报*, 43(18): 1899908) [DOI: 10.3788/AOS231293]
- Qin K, Hu W, He Q, Lu F and Cohen J B. 2024. Individual coal mine methane emissions constrained by eddy covariance measurements: low bias and missing sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5): 3009-3028 [DOI: 10.5194/acp-24-3009-2024]
- Saunio M, Stavert A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K,

- Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlson K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguía-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C H, Peng S S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentreter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele L P, Thornton B F, Tian H Q, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, van der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W X, Zhang Z, Zhao Y H, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q and Zhuang Q L. 2020. The global methane budget 2000-2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561-1623 [DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020]
- Sun Y C, Wang Z H, Zeng Y Q, Qin H Y, Zhou T Y and Xing X W. 2022. Research on detection of marine methane based on AVIRIS hyperspectral data. *Remote Sensing Technology and Application*, 37(4): 781-788 (孙袁超, 王正海, 曾雅琦, 秦昊洋, 周桃勇, 邢学文. 2022. 基于 AVIRIS 高光谱数据的海表甲烷异常识别. *遥感技术与应用*, 37(4): 781-788) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.0781]
- Thompson D R, Leifer I, Bovensmann H, Eastwood M, Fladland M, Frankenberg C, Gerilowski K, Green R O, Kratwurst S, Krings T, Luna B and Thorpe A K. 2015. Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(10): 4383-4397 [DOI: 10.5194/amt-8-4383-2015]
- Tiwari P, Cohen J B, Wang X Y, Wang S and Qin K. 2023. Radiative forcing bias calculation based on COSMO (Core-Shell Mie model Optimization) and AERONET data. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1): 193 [DOI: 10.1038/s41612-023-00520-1]
- Wang L, Zhao G X, Jiang Y M, Zhu X C, Chang C Y and Wang M M. 2016. Detection of cloud shadow in Landsat 8 OLI image by shadow index and azimuth search method. *National Remote Sensing Bulletin*, 20(6): 1461-1469 (王凌, 赵庚星, 姜远茂, 朱西存, 常春艳, 王明媚. 2016. 利用阴影指数和方位搜索法检测 Landsat 8 OLI 影像中云影. *遥感学报*, 20(6): 1461-1469) [DOI: 10.11834/jrs.20165248]
- Zhai H, Zhang H Y, Zhang L P and Li P X. 2018. Cloud/shadow detection based on spectral indices for multi/hyperspectral optical remote sensing imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144: 235-253 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.07.006]
- Zhou D, Liu Z T, Qian J F, Lin S, Wang G H. 2019. Analysis of gas characteristics and generation rules of coal spontaneous combustion in goaf. *Industry and Mine Automation*, 45(3): 18-22 (周冬, 刘贞堂, 钱继发, 林松, 刘冠华. 采空区内煤自燃气体特征及产生规律分析. 2019. *工矿自动化*, 45(3): 18-22) [DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2018090037]
- Zhuo W, Yu X F, Li X T, Gong D D and Feng J. 2020. Non-destructive detection of potato leaf chlorophyll with hyperspectral imaging technology. *Optical Instruments*, 42(6): 1-8 (卓伟, 于旭峰, 李欣庭, 龚冬冬, 冯洁. 2020. 高光谱成像技术实现马铃薯叶片叶绿素无损检测. *光学仪器*, 42(6): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.06.001]

Ground-based hyperspectral imaging detection method for methane escape from coal fire sources

LIU Yanqiu¹, QIN Kai¹, CAO Fei², ZHONG Xiaoxing³, TIAN Weixue¹,
COHEN Jason Blake¹, BAO Xingdong²

1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Xinjiang Mine Safety Service Guarantee Center, Urumqi 830011, China;

3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Coal-rich regions such as Xinjiang, Ningxia, and Inner Mongolia frequently experience spontaneous combustion of coal seams. This phenomenon releases large quantities of methane, which is a high-impact greenhouse gas. The unorganized and diffuse nature of these emissions introduces great challenges for detection and quantification, which often contribute to the so-called “missing carbon” sector in greenhouse gas inventories. Owing to the limitations of satellite resolution and the inadequate adaptability of existing methane detection technologies in rugged terrains, this study focuses on coal fire areas characterized by unorganized emissions. Using wide-swath ground-based hyperspectral imagery, we developed a novel detection methodology for methane emissions from individual coal fire sources in diverse terrains. The goal is to analyze methane escape patterns and assess latent risks of underground coal fires, which offer a new framework for early-warning systems.

In this work, we investigated methane escape in two representative mountain coal fire areas located in Fukang, Xinjiang, using ground-based hyperspectral wide-swath imagery collected in June 2023. Seven distinct algorithms were applied: first, we proposed a Modified Least

Squares Image Enhancement (MLSIE) algorithm by applying the L2-norm least squares regression principle to methane-sensitive spectral windows (1.66 and 2.3 μm) in the SWIR range. Second, we developed the Methane Ratio Derivative Spectral Unmixing (RDSU) algorithm, which is represented by RCH4I1 and RCH4I3. These algorithms incorporate the spectral ratio derivative unmixing technique and the spectral sensitivity of methane to suppress background interference from pseudo-coal fire regions while enhancing the spectral signature of methane. Third, by integrating factors such as cloud shadow detection, mineral content, combustion characteristics, and building-related features, we developed two methane ratio indices: one is 1DSRCH4I3, which enhances the contrast between methane and artifacts; the other is 2DSRCH4I3, which mitigates artifact interference and highlights methane-enriched areas.

Our evaluation demonstrated the following results. (1) The proposed MLSIE, RDSU, and DSRCH4I algorithms significantly improved methane detection accuracy compared with the existing CH4I algorithm. (2) The 2DSRCH4I3, MLSIE (2.3 μm), and RCH4I1 algorithms exhibited superior performance in complex terrains, while 2DSRCH4I and MLSIE (2.3 μm) algorithms were also effective in relatively simple mountainous coal fire areas. (3) MLSIE (2.3 μm) displayed robust generalization ability. Moreover, 2DSRCH4I3 effectively minimized artifacts and false positives, which led to superior detection accuracy. RCH4I1 also demonstrated clear detection efficacy in coal fire areas with significant methane leakage. (4) Methane plumes were detected in two distinct forms: one coexisting with combustion flames, and the other freely escaping into the surrounding atmosphere.

This work presents a novel methodology for detecting methane emissions from high-temperature and panoramic coal fire sources with diverse geomorphic characteristics. The findings provide valuable technical support for the identification and assessment of underground coal fire risks. Furthermore, this work introduces a new approach to early-warning systems for coal fire disasters, with the use of methane escape as a diagnostic indicator of potential fire formation. However, we recognize that the influence of black carbon aerosols, which may interfere with mixed spectral signals, was not addressed. Future research could explore the dynamic quantification of methane plumes by integrating hyperspectral image spectral enhancement techniques to improve detection accuracy.

Key words: coal fire, methane, hyperspectral imaging, SWIR, unorganized emissions, plume detection, artifact suppression, greenhouse gas, climate change

Supported by Xinjiang Uygur Autonomous Region Mine Safety Service Support Center Project (No. 2022100102); Xinjiang Key Research and Development Special Task (No. 2022B03003-3); Jiangsu Province Science and Technology Plan Special Funds (International Science and Technology Cooperation) (No. BZ2024060)