

基于 Sentinel-2/MSI 数据的煤层气烃微渗漏植被异常区提取

韩谷怀^{1,2}, 孙元亨^{1,3}, 秦其明^{1,4}

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;

3. 大连海事大学 航海学院, 大连 116026;

4. 自然资源部地理信息系统技术创新中心, 北京 100034

摘要: 地下油气(含煤层气)的烃微渗漏会引起地表土壤、植被的光谱变化。利用遥感技术探测烃微渗漏是覆盖范围大而成本低廉的煤层气前期探测新方法。然而, 目前此类方法的研究主要针对裸土矿物, 而对大面积植被覆盖区却研究甚少, 其中重要原因便是烃微渗漏对植被根系毒害的生物物理过程复杂, 可用于提取植被异常区的光谱特征含糊不清。而根据少量采样光谱选取的光谱特征也有偶然性, 导致提取结果的精度较低。因此, 本文首先探讨烃微渗漏对植被根系毒害的机理并基于 PROSAIL 模型优选光谱特征, 然后利用实验区大量煤层气采集井统计最受烃微渗漏影响的异常植被光谱, 并与对照区植被光谱对比, 最后利用 Sentinel-2/MSI 数据以及合适的特征组合阈值提取烃微渗漏区并验证。在山林区能达到采集井 60 m 缓冲区内植被样本 80% 召回率与对照区植被样本 5% 误分率左右的平衡, 表明了本文方法的有效性。本文分析与优选烃微渗漏影响的植被光谱特征并利用多光谱数据构建光谱指数提取烃微渗漏植被异常的方法, 可为遥感提取烃微渗漏植被异常研究提供参考。

关键词: 煤层气, 烃微渗漏, 植被, 遥感, PROSAIL 模型, 沁水盆地

中图分类号: P2

引用格式: 韩谷怀, 孙元亨, 秦其明. 2023. 基于 Sentinel-2/MSI 数据的煤层气烃微渗漏植被异常区提取. 遥感学报, 27(7): 1713-1730

Han G H, Sun Y H, Qin Q M. 2023. Extraction of vegetation anomaly caused by coalbed methane hydrocarbon microseepage based on Sentinel-2/MSI. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1713-1730 [DOI: 10.11834/jrs.20232208]

1 引言

煤层气又称为煤层瓦斯, 是指赋存在部分煤层中以甲烷等烃类气体为主(甲烷含量通常占 50% 以上), 同时含有二氧化碳、氮气等其他气体的混合气体, 是一种重要的非常规油气资源(戴金星等, 1986; Clayton, 1998)。由于温室效应、煤矿安全、常规能源缺乏等问题, 近年来国家对煤层气的开采十分重视(张华珍等, 2013; 张海龙, 2014; 赵路正等, 2020; 贾爱林等, 2021)。油气藏(含煤层气)的形成是在一定的生、储、盖、圈闭及运移条件下形成的, 其盖层的封闭能

力对油气藏的形成与破坏有重要影响(蒋涛等, 2011)。研究表明, 即便盖层封闭完好, 烃类物质依然会沿着上覆盖层的断裂、节理、微裂隙及孔隙向地表渗漏, 这一现象被称为烃微渗漏(陈理, 2015)。现有 85% 以上的油田中都存在着烃微渗漏现象(谢青云和丁树柏, 1994); 同时, 很多大油田正是通过地表的烃微渗漏现象才得以发现(Everett 等, 2002; 申晋利等, 2010)。油气藏(含煤层气)中的烃类物质与少量的非烃物质(如二氧化碳及硫化氢等气体), 在不断向地表运移的过程中, 与上覆岩层进行氧化还原反应, 从而形成氧化还原柱, 使上覆岩层至地表的岩石矿物发

收稿日期: 2022-05-23; 预印本: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42071314)

第一作者简介: 韩谷怀, 研究方向为煤层气富集区遥感与大地电磁探测。E-mail: 1601110520@pku.edu.cn

通信作者简介: 秦其明, 研究方向为定量遥感与遥感图像智能理解。E-mail: qmqin@pku.edu.cn

生蚀变, 并导致土壤的化学组成和化学环境发生变化, 进而影响植被的生长 (Hunt 和 Ashley, 1979; Ben-Dor 和 Kruse, 1995; Van Der Meer 等, 2002; 胡畔 等, 2009; 崔鑫 等, 2019)。烃类微渗漏导致的地表土壤岩石蚀变主要有黏土矿化、碳酸盐岩化、红层褪色等 (Van Der Meer 等, 2002; 胡畔 等, 2009; 尤金凤, 2015; 崔鑫 等, 2019)。而植被由于根系受到毒害也会引起病变枯萎 (Hunt 和 Ashley, 1979; Crosta 和 Moore, 1989; Ben-Dor 和 Kruse, 1995)。地表的这些变化也导致了地物光谱的变化, 从而为遥感探测提供了理论基础。

由于遥感技术具有大范围、高效率、低成本的特性, 多年来一些研究者探索了利用遥感探测烃微渗漏区并寻找油气资源的方法, 取得了不少成果 (Collins 等, 1974; Khan 和 Jacobson, 2008; Lammoglia 和 De Souza Filho, 2013; Molan 等, 2014), 其中也包括对煤层气的勘探 (Zhang 等, 2015; 陈理, 2015)。

目前遥感探测烃微渗漏主要针对土壤矿物区, 因此对土壤矿物的化学蚀变机理及其导致的主要光谱变化已经有了较充分的认识 (Van Der Meer 等, 2002; 胡畔 等, 2009; 陈理, 2015; 崔鑫 等, 2019)。而针对植被异常的烃微渗漏遥感提取研究则较少, 且提取效果也不理想 (陈理, 2015; 尤金凤 等, 2016), 这主要是因为植被生长涉及的因素复杂且烃微渗漏毒害植被的机理不清, 一些用遥感提取烃微渗漏植被异常的研究也没有与烃微渗漏植被毒害的机理深入结合, 导致提取植被异常区时选用光谱特征不理想, 提取结果的精度较低。已有研究中使用过多种植被光谱特征如近红外反射平台、红边斜率、红边位置、红谷深度、红谷位置等, 或者使用由这些光谱特征构成的各种指数, 但哪种特征或指数效果更佳却无定论 (Noomen 等, 2012; Li 等, 2012; Adamu 等, 2013; 陈理, 2015; 尤金凤 等, 2016; Huang 等, 2019; Garain 等, 2021)。另一方面, 植被毒害区常发生在矿山内部, 山路崎岖, 要充分实地考察采样或验证都十分困难, 利用少量采样植被光谱研究烃微渗漏植被毒害也有很大偶然性。然而, 在矿区中植被区面积比例往往大于裸土岩石区, 因此基于植被异常的烃微渗漏遥感提取研究非常具有现实意义。

近年来新增的一些烃气体处理植被的实验研究让烃微渗漏影响植被生长的机理更加清晰 (Noomen, 2007; Jamaludin 等, 2015), 再结合 PROSAIL 模型 (Jacquemoud 等, 2009) 分析受烃微渗漏影响的植被光谱特征则更有理论依据, 有机会解决植被异常光谱特征选用不清的问题。目前中国的煤层气开发已形成一定规模, 留下较多采集井样本可用于统计植被光谱特征与验证, 相比于少量采样光谱更有稳定性。因此可以针对烃微渗漏植被异常遥感提取开展更成体系的方法研究, 获取进一步成果。

针对以上问题, 本文选取煤层气开发度已经较高的山西沁水县附近煤层气富集区作为实验区, 在煤层气含气量较低的邻近区域选择对照区。研究从已有的利用烃气体处理植被的实验成果探索烃微渗漏对植被的影响机理入手, 通过模拟实验分析并选取主要影响的光谱特征, 然后利用 Sentinel-2/MSI 影像获取受烃微渗漏影响较重的采集井缓冲区内植被的时序光谱特征并与对照区光谱特征对比, 进一步确实沁水县烃微渗漏对几种植被光谱特征的实际影响。最后, 利用 70% 的采集井缓冲区植被样本与对照区植被样本优选用以提取烃微渗漏区的光谱特征组合阈值, 并利用 30% 采集井缓冲区植被样本对提取结果进行验证。

2 研究区与数据

2.1 研究区

中国是世界三大煤层气储备国之一, 而沁水盆地是中国煤层气开发的主力盆地 (王勃, 2013)。沁水盆地位于山西省东南部, 盆地内构造简单, 次一级褶皱发育, 断层较少。其太原组、山西组内煤层发达、含气量高、可采性强, 主要分为埋深 400 m 左右的 3 号煤层气与埋深 600 m 左右的 15 号煤层气。

沁水盆地煤层气主体部分集中于南部沁水县附近, 主要划分为樊庄、潘庄、郑庄等 3 个区块, 总面积 3630 km², 煤层气总资源量达 4500×10⁸ m³, 尤其在端氏镇附近储藏最为丰富 (图 1) (魏伟, 2010; 叶建平和陆小霞, 2016)。2007 年起, 中石油公司便对沁水盆地南部进行了成规模的煤层气开发, 但长期存在低产井较多的问题 (吕玉民 等, 2020)。由于沁水县内煤层气开发程度已较高, 积

累了很多地质资料与采集井资料, 因此对此区域内煤层气富集区烃微渗漏提取研究便于验证, 利于发展出较为成熟的煤层气遥感探测方法。另一

方面根据现有测井数据, 煤层气含量在沁水县范围后急速下降, 东至高平市或南至阳城县时已经很低 (图1), 便于选择对照区验证。

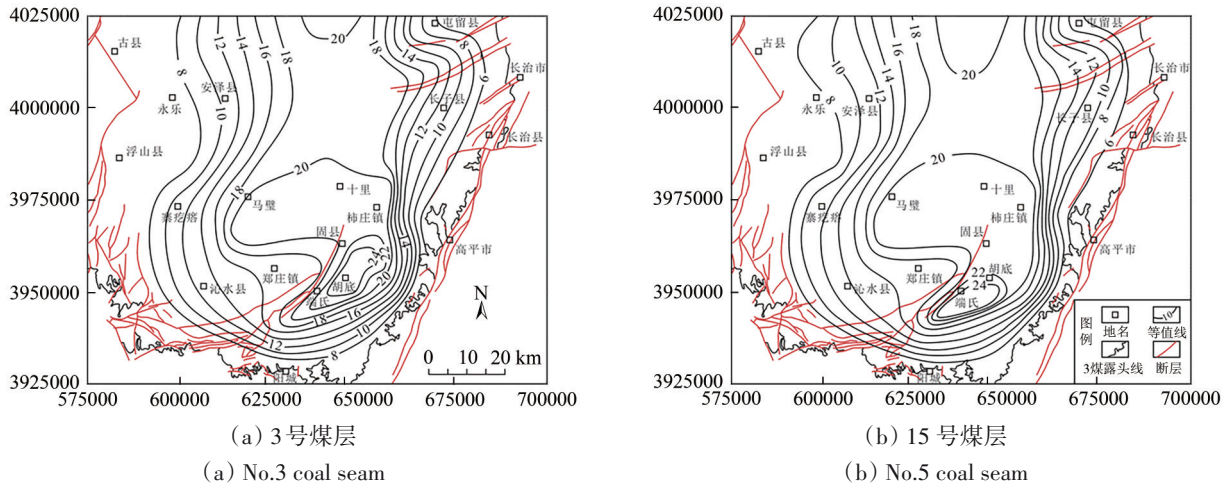


图1 沁水盆地南部煤层含气量等值线分布图(张政,2016)

Fig. 1 Isogram distribution of coalbed methane content in southern Qinshui basin (Zhang, 2016)

因此, 本文研究区划分为实验区与对照区 (图2)。煤层气富集的实验区选择在沁水县端氏镇附近, 主要范围在 (112.25°E — 112.78°E , 35.53°N — 35.95°N) 区域, 并在出高平与阳城后选择最近山区或农田地带作为非煤层气富集的对照区, 对照区的主要范围分别为对照区1 (111.58°E — 112.21°E , 35.10°N — 35.55°N)、对照区2 (112.25°E — 112.78°E , 35.10°N — 35.52°N)、对照区3 (112.92°E — 113.42°E ,

35.53°N — 35.95°N)。实验区和3个对照区距离较近, 以保证植被类型、气候、降雨等条件一致。实验区和对照区2既包含大范围山林区域, 也包含大范围人类活动与农田聚集区域, 而对照区1只选取山林区域, 对照区3只选取人类活动与农田聚集区域。所选山林区均为暖温带落叶阔叶林区, 农田聚集区的作物则有小麦、玉米、棉花等多种类型。

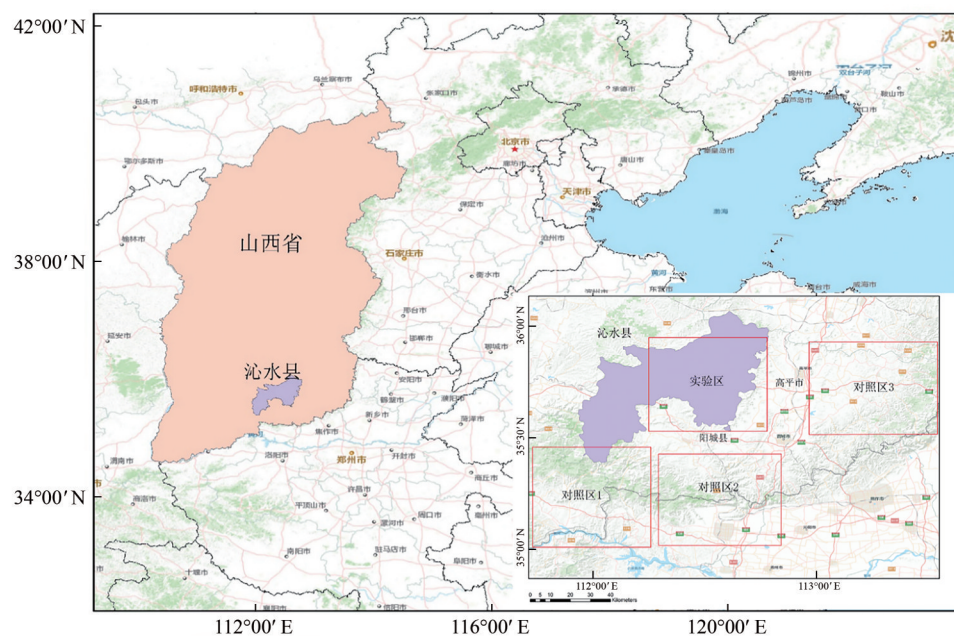


图2 实验区与对照区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental area and control area

2.2 Sentinel-2/MSI数据

Sentinel-2是欧洲航天局发射的宽条带、高分辨率多光谱成像卫星。Sentinel-2A、B星分别于2015年和2017年发射,两颗卫星组网后重访周期5天。它提供最高10 m空间分辨率的可见光至短波红外观测波段,其中包含3个红边波段,因此对研究植被胁迫问题有独特优势。经过大气校正后的

L2A级影像产品可通过Google Earth Engine (GEE)平台 (<https://earthengine.google.com/>[2021-06-18])获取。本文下载了实验区与对照区2020年与2021年各自5月1日至9月31日的时序影像,以对比研究植被茂盛季节里烃微渗漏对植被光谱的影响。现选取2021年7月9日的实验区影像示例(图3(a))与3个对照区影像示例(依序见图3(b)—3(d))。

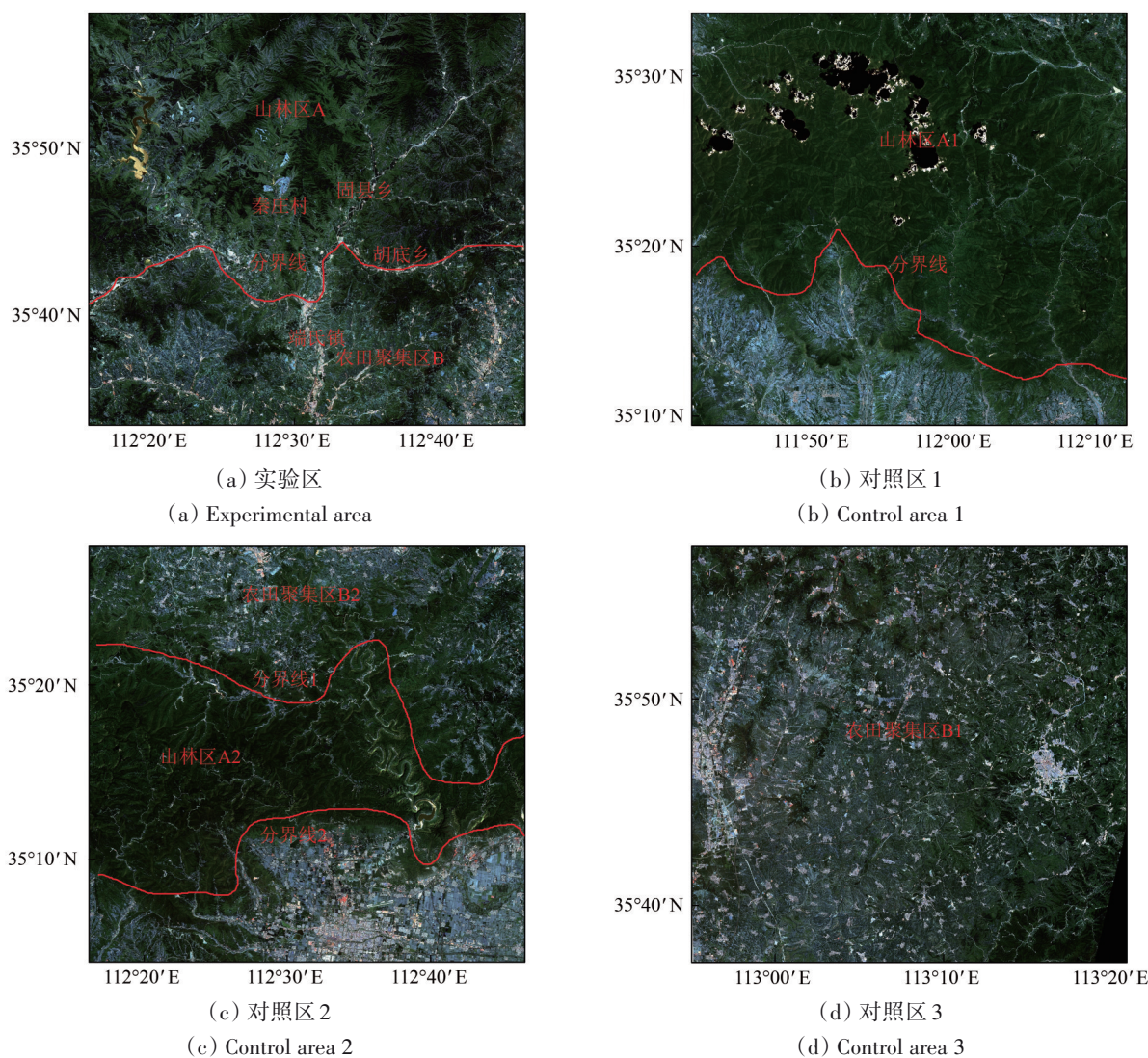


图3 研究区Sentinel-2/MSI真彩色影像示例图

Fig. 3 Example of Sentinel-2/MSI true color image in the study area

2.3 实验区采集井站点数据

目前对烃微渗漏区植被光谱的研究主要还靠实地采样,对遥感提取结果进行验证主要也是与已知采集井分布对比。然而植被毒害区往往在矿山内部,很难充分实地考察,也难以获取大量采集井分布。因此本文采用基于Google Earth高分辨

率影像标注结合实地抽样考察的方法获取大量采集井样本,既利于统计烃微渗漏区植被光谱特征,也便于对烃微渗漏区植被异常提取结果进行验证。

采集井具备一定规律性的形态特征(如平整地段、黑色条纹、水池等),可在Google Earth上观察到(图4)。我们据此对整个实验区范围内进

行了查找与标注, 于 2021 年 6 月 18、19 日分别前往实验区内秦庄村与胡底乡的两侧山脉, 抽取标注的 50 多个点位进行了考察, 发现抽取到的标注点位均为真实采集井, 验证了标注方法的可靠性。采集井标注点如图 5 所示。



图4 Google影像上显示的采集井

Fig. 4 The mine shown in Google image

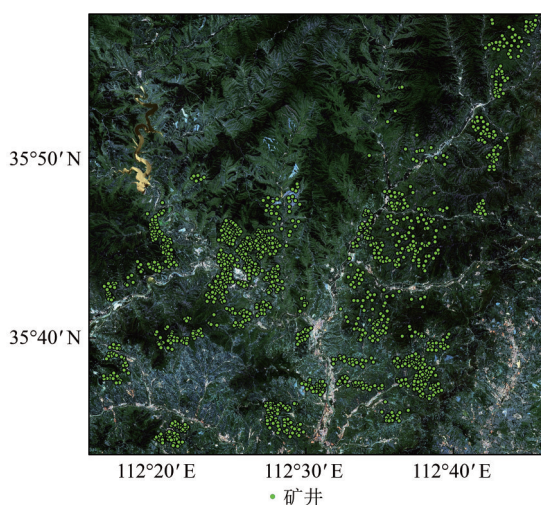


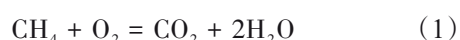
图5 实验区采集井分布图

Fig. 5 Mine distribution map in experimental area

3 植被异常的影响机理

3.1 植被受烃毒害影响的主要参数

土壤中烃类气体与 CO_2 过量会使植被由于缺氧而阻断呼吸作用 (式 (1)), 同时烃类气体以及其与土壤中硫酸根离子氧化还原反应产生的 H_2S 气体还会对植物根部有毒害作用 (式 (2)), 最终导致植物发育不良或病变, 进而导致光谱异常 (Drew, 1983; Saunders 等, 1999; 甘贵元 等, 2005)。



从植物生理学来讲, 植被根系长期缺氧会直

接阻碍叶绿体合成过程, 其最直接的表现便是植物叶片叶绿素含量降低 (Al-Abbas 等, 1974; Huang 等, 1997; 王平荣 等, 2009; 郑小兰 等, 2017), 胁迫非常严重时才会进一步影响植被叶面积指数与覆盖度等指标, 因此一些研究者认为烃微渗漏对植被的主要影响是叶片叶绿素含量降低 (Pirone, 1960; Pyšek 和 Pyšek, 1989; Smith 等, 2004)。但近年来也有学者用烃类气体对植被做了长期测试实验 (Noomen, 2007; Jamaludin 等, 2015), 发现虽然烃气体中甲烷不会对植物根产生直接毒害, 只会在大量泄漏时使植被缺氧而影响叶片叶绿素含量, 但若混有一定含量的乙烷等其他烃类气体, 则会对植被直接毒害而先影响叶面积指数, 从而使植被变得稀疏 (Noomen, 2007)。因此, 烃微渗漏对植被叶片叶绿素含量、叶面积指数与植被覆盖度都可能造成不同程度的损害, 而具体的损害比例与研究区实际烃微渗漏成分与强度有关。

3.2 其他影响植被异常的因素

在植被生长环境中, 也存在可能影响叶片叶绿素含量与叶面积指数的其他因素, 我们需要考虑并排除这些因素的影响, 以确定本文方法的适用条件。

当气候类型不同时, 光照、温度、降雨等诸多自然因素有较大差异, 因而生长的植被类型和植被状况都不同, 其叶片叶绿素含量、叶面积指数与植被覆盖状况也随之呈现出差异。但气候类型的差异通常只在地域跨度大或地形差异巨大的研究区才会体现出来。

植被的类型与状态本身差异较大时, 也会导致植被各项参数的差异。植被的类型主要受气候、地理环境等因素影响, 目前各省都有主要植被类型的划分资料, 研究区应选在同一植被类型划分区域内, 并在实地考察时注意植被类型是否还有明显区别。若山脉呈东西走向, 山脉南面与北面有明显光照差异从而形成阴阳坡现象, 则植被的类型与状态也会产生差异, 差异显著时需要将阴阳坡植被进行分类后再进一步分析。植被的状态还与物候期有关, 不同物候期植被叶片叶绿素含量、叶面积指数与植被覆盖状况不同, 判断植被异常的标准也不同, 因此分析植被异常时要充分考虑时间性。若研究涉及多种植被类型, 则还需

考虑各类植被物候期的差异,可用于分析植被异常的合理时间可能有区别。

植被受到严重土壤水分持续胁迫时也可能导致叶片叶绿素含量降低 (Von Wettstein 等, 1995; Shabala S, 2017)。为排除长期水分胁迫带来的干扰,可从当地降雨降水状况入手了解区域水分情况。

研究表明,铜、铅、锌等重金属胁迫也会导致植被叶片叶绿素含量与叶面积指数的变化 (Prasad, 2004; 周超, 2016)。然而,植被明显的重金属胁迫主要出现在金属矿区以及邻近严重污染地域,而中国主要的重金属矿分布以及重金属污染区已有详细的资料可查。

另一种可能影响叶片叶绿素含量与叶面积指数变化的因素是病虫害 (张竞成 等, 2012)。病虫害的种类很多,并且除了叶面积指数和叶片叶绿素以外还会损害多种叶片结构,因此各种病虫害有其特定的光谱特征 (张竞成 等, 2012)。各类病虫害通常都能在现场考察时发现特定的叶片视觉特征,然后在遥感提取时可利用该类病虫害的一些特殊光谱特征进行排除。

综上所述,只要提前调查与掌握研究区背景资料,并开展综合分析,确定研究区所在范围大体上属于煤层气资源富集区,而不是重金属矿产资源富集区,且实验区与对照区地域跨度不大、地形差异不大、植被类型差异不大,排除植被受严重的水分胁迫,那么植被叶片叶绿素含量与叶面积指数等的变化,就具有对煤层气富集区烃微渗漏的指示性。病虫害问题可以通过现场考察或者分析遥感数据中特定植被光谱特征进行排除。当然,植被生长过程是复杂的,某些影响因素需要根据实际区域环境特点进行分析。在煤层气富集区烃微渗漏往往也会引起地表黏土矿化、红层褪色等多种识别特征,因此利用植被光谱识别烃微渗漏只是遥感勘查煤层气富集区的手段之一。

实际上,我们所选择的研究区主要为煤层气富集区,地层以沉积相为主,不含金属矿区。区域内气候类型单一,植被生长季节降雨量较为充沛,山脉主要呈南北走向,整体阴阳坡现象不明显。调研中发现各处农田作物类型有一定差异,但山林植被类型差异不大,并且没有发现明显病虫害迹象。通过上述分析,本文认为可以从叶片叶绿素含量、叶面积指数与植被覆盖度异常来反映实验区与对照区的烃微渗漏情况。

4 烃微渗漏植被异常区提取方法

4.1 植被光谱特征模拟优选与特征指数构建

已有研究表明,烃微渗漏区植被光谱可能伴有近红外高反射平台变低、红边斜率变低、黄边斜率变低、红边蓝移、绿峰降低、红谷反射率增大等诊断特征,但是对这些特征形成的原理,以及各种特征的适用性并没有详细的说明 (Noomen 等, 2012; Adamu 等, 2013; 陈理, 2015; 尤金凤 等, 2016; Huang 等, 2019)。这些异常光谱特征可能只有一部分或者某些特定搭配能有效反映烃微渗漏。因此有必要分析这些光谱特征与烃微渗漏可能影响的植被参数 (叶面积指数、叶片叶绿素含量、植被覆盖度) 间的具体关系,以避免误用光谱特征带来的无效识别。

PROSAIL模型是目前应用最广泛的植被辐射传输模型之一,其是由PROSPECT叶片模型与SAIL冠层反射率模型耦合而成 (Jacquemoud 和 Baret, 1990; Kuusk, 1991)。PROSAIL模型综合考虑了植被冠层结构、生理生化组分及遥感观测环境等对植被冠层反射率的影响,可通过控制与改变植被与土壤的各项理化参数及卫星观测几何来模拟植被反射光谱的响应变化 (Jacquemoud 等, 2009; 苏伟 等, 2021)。

本次实验我们将模拟叶片叶绿素含量、叶面积指数、植被覆盖度3个参数变化所引起的植被光谱变化,以优选出最能反映植被烃毒害的光谱特征组合。结合研究区调研情况,PROSAIL模型地面背景设置直接选用模型内置的土壤光谱,干湿土按0.5比例混合。每次模拟时控制其他变量为固定值 (表1),以获取光谱曲线随自变量变化的响应结果。最后利用植被与土壤覆盖面积加权的线性光谱混合模型来模拟植被覆盖度变化引起的植被光谱变化。为了了解不同情况的变化,模拟时对重要参数都尝试了两组固定值。

除了光谱曲线整体的变化以外,我们还需依据光谱曲线定义出一些具体的光谱特征,并分析植被参数对这些光谱特征的影响。结合现有研究的成果 (Adamu 等, 2013; 陈理, 2015; Huang 等, 2019),我们选择了以下几个特征:

(1) 近红外反射平台高度:指820—840 nm波段平均反射率。

- (2) 红谷深度: 红光最强吸收处反射率。
- (3) 红谷位置: 红光最强吸收处波长。
- (4) 红边斜率: 680—780 nm 波段反射率拟合直线的斜率。
- (5) 红边最大斜率: 680—780 nm 反射率斜率最大值。
- (6) 红边位置: 红边最大斜率位置对应的波长。

表 1 PROSAIL 模型输入参数及其数值列表
Table 1 List of input parameters of Prosail model and their numerical values

参数类型	参数名称及单位	符号	固定值
叶片尺度	叶绿素含量(μg/cm ²)	Cab	30、70
	干物质含量(g/cm ²)	Cm	0.09
	叶片结构参数	N	1.5
	类胡萝卜素含量(μg/cm ²)	Ccar	5
	棕色素含量(μg/cm ²)	Cbrown	0
	花青素含量(μg/cm ²)	Canth	0
	等效水厚度(cm)	Cw	0.01
冠层尺度	叶面积指数(m ² /m ²)	LAI	2、5
	平均叶倾角(度)	ALA	50
背景土壤	干土壤所占比例	Soil	0.5
	太阳天顶角(度)	SZA	30
观测几何	观测天顶角(度)	VZA	10
	相对方位角(度)	RAA	0

我们要舍弃与叶片叶绿素含量、叶面积指数、植被覆盖度 3 个参数关系不大的光谱特征, 也舍弃与 3 个参数同时相关或关系复杂不明确的光谱特征, 最终优选出分别与 3 个参数有明确对应相关关系的光谱特征, 以便于进一步进行研究区实际光谱统计与确定用于提取烃微渗漏的特征组合阈值。

由于高光谱数据存在不易获取、空间覆盖范围小、空间分辨率低、处理复杂等问题, 不利于大范围应用; 如果利用多光谱数据能得到与高光谱相近的光谱特征结果, 在应用中更具现实意义。然而, 多光谱数据的光谱分辨率有限, 所需特征未必能直接根据定义式获取, 只能通过拟合或插值等方法构建相应光谱特征指数作为近似。光谱特征指数构建的优劣可通过再次利用 PROSAIL 模型模拟并与定义式模拟结果的对比中看出。

Sentinel-2/MSI 数据包含了 3 个红边波段, 空间分辨率高, 可能满足本文所需。因此我们结合 Sentinel-2 数据特点, 针对上述优选的光谱特征, 选择合适的拟合或插值方法, 进行特征指数构建。

4.2 时序光谱特征统计与阈值选取

本文选取的实验区整体处于沁水盆地煤层气含量较高的区域位置, 而其中已经被勘探且开采的采集井位置则是煤层气烃微渗漏的重点位置, 因此我们将采集井缓冲区内植被像元作为阳性样本, 用于统计受烃微渗漏影响的异常植被光谱与验证。3 个对照区位于煤层气很低的区域, 因此 3 个对照区的植被像元为阴性样本, 用于统计正常植被光谱与验证。

在 4.1 节我们分析了烃微渗漏最可能影响的光谱特征, 而从 3.1 节可知烃微渗漏对植被各光谱特征的影响与研究区实际情况紧密相关, 因此需要对实验区阳性样本与对照区阴性样本的光谱特征进行统计与对比。为保证统计结果的稳定性与准确性, 我们对样本做了长时序的光谱统计, 并进一步确定适合提取烃微渗漏植被异常的时间范围和特征组合。由于遥感探测是初步探测, 目的在于为进一步实地勘探缩小范围节约成本, 应在尽量避免无效区域的前提下提取出烃微渗漏主要区域。阳性样本 P 中被正确识别为烃微渗漏异常植被像元 TP 的比例为召回率 R (式 (3)), 阴性样本 N 中被错误识别为烃微渗漏异常植被像元 FP 的比例为误分率 E (式 (4))。最终提取结果应在较低的误分率前提下得到较高召回率 (如 10% 以内误分率 70% 以上召回率), 才是有意义的结果。

$$R = \frac{TP}{P}$$
 (3)

$$E = \frac{FP}{N}$$
 (4)

由于在经过实际光谱特征统计后决定 3 个光谱特征均被采用, 因此本文将利用阈值组合进行烃微渗漏植被异常区提取。本文采用阈值空间的形式权衡采集井缓冲区植被像元召回率与对照区植被像元误分率。利用红边位置植被指数 RPVI (Red-edge Position Vegetation Index) 小于阈值 x , 近红外反射率小于阈值 y , 红谷反射率大于阈值 z 进行组合提取, 则阈值空间示例如图 6 所示。

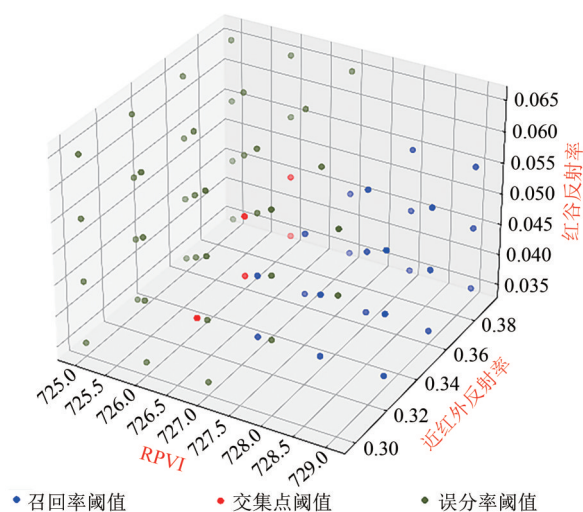
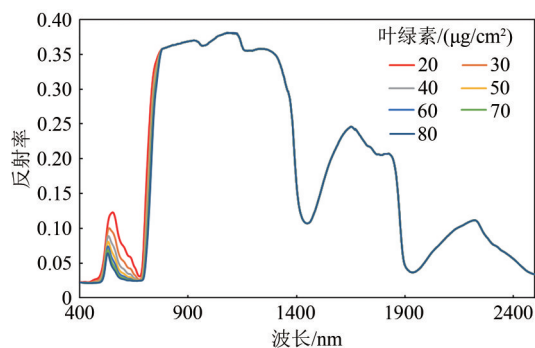


图6 阈值空间示例图

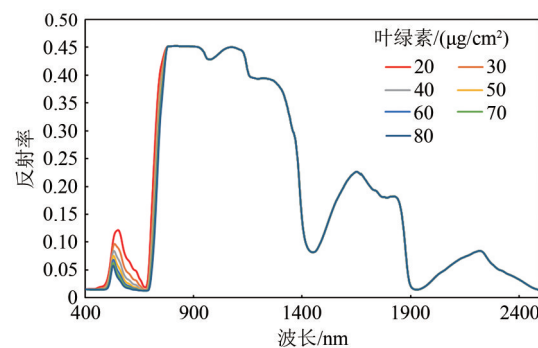
Fig. 6 Example diagram of threshold space

图6中蓝点为只满足召回率大于某值(如80%)的阈值组合,绿点为只满足误分率小于某值



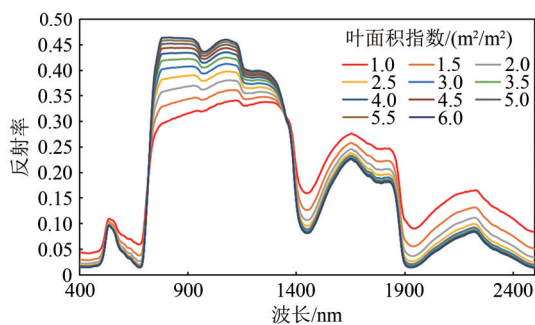
(a) LAI=2时光谱曲线随Cab变化

(a) The spectral curve changes with Cab when LAI=2



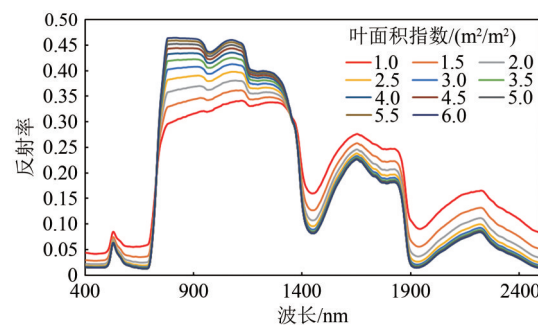
(b) LAI=5时光谱曲线随Cab变化

(b) The spectral curve changes with Cab when LAI=5



(c) Cab=30时光谱曲线随LAI变化

(c) The spectral curve changes with LAI when Cab=30



(d) Cab=70时光谱曲线随LAI变化

(d) The spectral curve changes with LAI when Cab=70

图7 植被光谱曲线PROSAIL模拟结果图

Fig. 7 PROSAIL simulation results of vegetation spectrum curve

对于不同控制变量固定值下,光谱曲线与自变量之间的响应规律具有一致性,光谱的具体幅值略有不同。而我们后续模拟发现情况也是如此,因此后续模拟主要展示取中间固定值(LAI=3、Cab=50)时的结果。光谱曲线随植被覆盖度变化

(如5%)的阈值组合,红点为同时满足二者的阈值组合。由于3维图展示效果,颜色深的点靠近屏幕(即近红外反射率较小),颜色浅的点远离屏幕(即近红外反射率较大)。为了得到高召回率与低误分的平衡,应设置适当的召回率与误分率标准,使阈值空间图出现红点,并选取红点所处位置的阈值组合进行烃微渗漏植被异常区提取。

本文将采集并缓冲区内植被样本随机划分为70%训练集与30%测试集,利用训练集构建阈值空间图并找出合适的阈值组合,然后用测试集进行验证。

5 结果与讨论

5.1 植被光谱特征模拟优选

植被光谱模拟的结果如图7所示。

模拟结果见图8。

叶片叶绿素含量、叶面积指数、植被覆盖度改变均会引起植被光谱较大变化。近红外反射平台与红谷反射率等诸多特征都可以反映叶面积指数与植被覆盖度的情况,而叶片叶绿素含量与绿

峰到红边的一些光谱特征相关, 这与其他学者的模拟分析结果相一致 (王李娟和牛铮, 2014; 黄爽, 2015)。

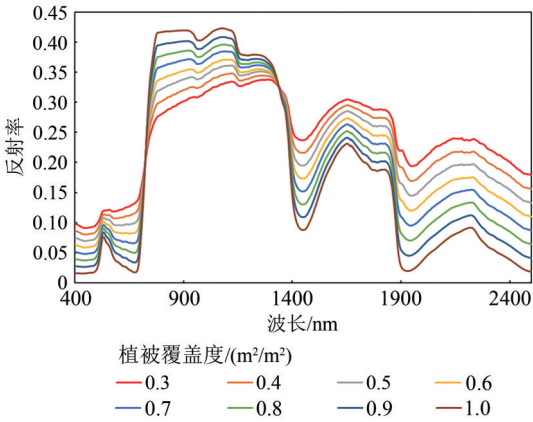


图 8 光谱曲线随植被覆盖度变化模拟图
Fig. 8 Simulation diagram of spectrum change with vegetation coverage

在初步观测叶片叶绿素含量、叶面积指数、植被覆盖度对光谱曲线的影响之后, 我们按照 4.1 小节各特征的定义对其进行了进一步模拟, 随着各植被参数的增大, 光谱特征变化范围、趋势与相关系数 r 结果见表 2 (其中, 计算 Cab 为自变量的相关系数时舍弃了 Cab=20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的离群点, 原因见图 11)。

近红外反射平台、红谷深度、红谷位置、红边斜率、红边最大斜率 5 个特征都受叶面积指数与植被覆盖度影响明显, 而与叶绿素关系很小 (结合变化幅度与相关系数)。其中, 植被覆盖度增大近红外平台抬升的同时也会使红谷反射率显著降低, 而叶面积指数增大近红外反射平台抬升更强却对红谷的影响很小, 这还可用于区分叶面积指数与植被覆盖度。因此近红外反射平台与红谷深度适合用于反映叶面积指数与植被覆盖度。

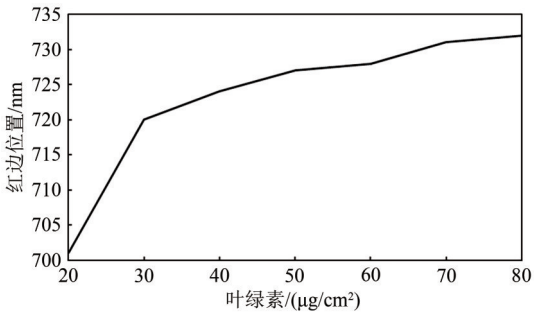
表 2 各光谱特征随植被参数变化模拟结果

Table 2 Simulation results of spectral characteristics changing with vegetation parameters

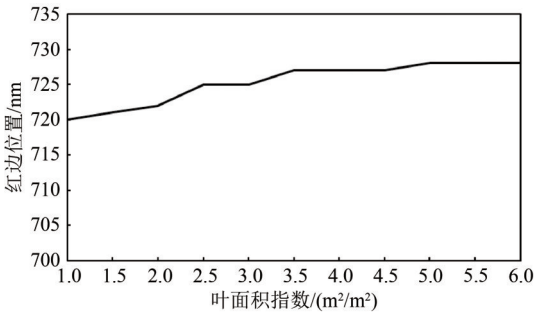
因变量(单位)	自变量(取值范围)					
	Cab(20—80 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		LAI(1—6 m^2/m^2)		FVC(0.3—1 m^2/m^2)	
	变化范围及趋势	r	变化范围及趋势	r	变化范围及趋势	r
近红外反射平台	不变	0	0.3—0.46 递增	0.97	0.29—0.42 线性递增	1.00
红谷深度	0.02—0.014 先减后平	-0.81	0.05—0.01 递减	-0.97	0.12—0.02 线性递减	-1.00
红谷位置/nm	676—668 递减	-0.82	665—677 递增	0.99	600—676 线性递增	0.96
红边斜率/ nm^{-1}	0.0046—0.005 先增后平	0.81	0.003—0.006 递增	0.94	0.002—0.005 线性递增	1.00
红边最大斜率/ nm^{-1}	0.0076—0.0082 间波动	0.97	0.005—0.009 递增	0.92	0.003—0.008 线性递增	1.00
红边位置/nm	701—732 递增	0.97	720—728 递增	0.93	不变	0

另一方面, 只有红边位置受叶绿素影响最明显 (图 9 (a)), 且与植被覆盖度无关。虽然红边位置与 LAI 相关性也较高, 但变化幅度较小 (图 9 (b)),

且可根据近红外反射平台区分 LAI 与叶片叶绿素含量变化。因此红边位置可用于重点反映叶片叶绿素含量。



(a) 红边位置随叶片叶绿素含量变化
(a) Red edge position changes with Cab



(b) 红边位置随叶面积指数变化
(b) Red edge position changes with LAI

图 9 红边位置随植被参数变化模拟图

Fig. 9 Simulation diagram of red edge position changing with vegetation parameters

因此,近红外反射平台、红谷深度与红边位置最能反映烃微渗漏植被毒害机理,而其他光谱特征的主要信息与之重复且缺乏针对性。但是,这3个光谱特征的具体影响程度与比例仍需要通过研究区实际样本的光谱特征统计决定。

5.2 Sentinel-2光谱特征指数

根据5.1节光谱优选结果,我们主要考虑红谷反射率、近红外反射平台与红边位置3个特征。其中红谷反射率与近红外反射平台可以直接利用Sentinel-2的B4、B8两个波段反射率近似。至于红边位置,经过试验Sentinel-2/MSI数据不适合多项式拟合或拉格朗日插值等方法,因而本文采用线性拟合插值法构建红边指数。先利用B5、B6、B7等3个红边波段反射率拟合出近似红边直线的

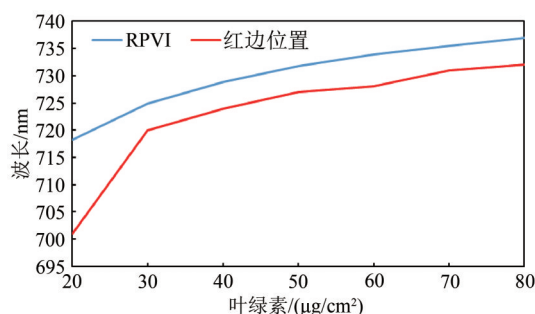
斜率 k 与截距 b 。然后将红光波段B4、近红外波段B8反射率代入拟合直线,得到直线两端的近似波长位置 W_1 、 W_2 。最后取 W_1 、 W_2 平均得到拟合直线中心位置近似为红边位置,此即红边位置植被指数(RPVI)(式(5)—式(7))。

$$W_1 = \frac{R_{\text{red}} - b}{k} \quad (5)$$

$$W_2 = \frac{R_{\text{nir}} - b}{k} \quad (6)$$

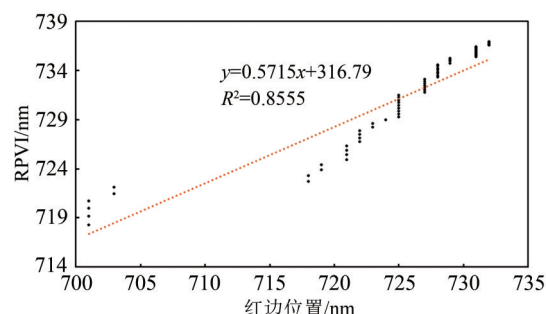
$$\text{RPVI} = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad (7)$$

我们再次利用PROSAIL模型对RPVI进行了模拟,发现在3个植被参数改变过程中,RPVI的变化趋势与之前红边位置定义式模拟结果非常相似。图10(a)为叶绿素变化时二者模拟结果,图10(b)为二者对应的散点图。



(a) Cab变化时RPVI与红边位置的变化

(a) Simulation curve of RPVI and red edge position when Cab changes



(b) RPVI与红边位置散点图

(b) Scatter diagram of RPVI and red edge position

图10 RPVI与红边位置随Cab变化关系模拟图

Fig. 10 Simulation diagram of the relationship between RPVI and red edge position with Cab

可见,尽管整体数值上RPVI偏大一些,但变化趋势与红边位置保持一致, R^2 达0.8555,因而并不会影响按一定阈值判断叶片叶绿素含量偏大或偏小的定性结论。我们也发现在叶片叶绿素含量小于 $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时,红边位置比RPVI下降更陡。并且散点图中红边位置连续性没有RPVI好,表现为710 nm附近不连续。这是由于红边位置是红边斜率最大的位置,而红边斜率是复杂的。我们让叶片叶绿素含量从 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 逐增到 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,模拟整个红边波段的斜率分布,发现红边波段的斜率分布其实有两个局部最大。在叶片叶绿素含量大于 $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时全局最大就是720 nm附近的局部最大,而叶片叶绿素含量小于 $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时全局最大就会在某一位置(如 $24 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)变为700 nm附近的局部最大(图11),因此造成了红边位置在低叶绿素含量时的不连续。

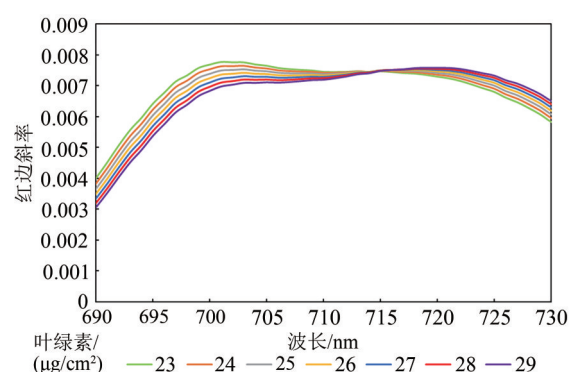


图11 红边斜率分布模拟图

Fig. 11 Simulation diagram of red slope distribution

这种不连续性质如果再考虑表1中其他参数随机变化的影响,就可能对叶绿素低含量的判断出现误差。比较而言,RPVI与叶片叶绿素含量间关系反而更稳定。可见,在本文的烃微渗漏提取实验中,利用Sentinel-2数据构建的RPVI代替红边位置定义式是可行的。

5.3 时序光谱特征统计与优选

根据第4.2节的分析, 首先选取山林A区与农田B区的采集井点建立60 m半径缓冲区统计重要光谱特征, 并与对照区统计结果对比。因为植被状况随时间变化较大, 本文提取了2020年与2021年

5月1日至9月31日内植被光谱特征统计, 时序影像取各月份质量较好影像NDVI>0.4的交集为植被区, 并且为了过滤噪声以更好反映烃微渗漏聚集特性, 对影像做了7×7均值滤波处理。各光谱特征均值与标准差统计结果如图12和图13所示。

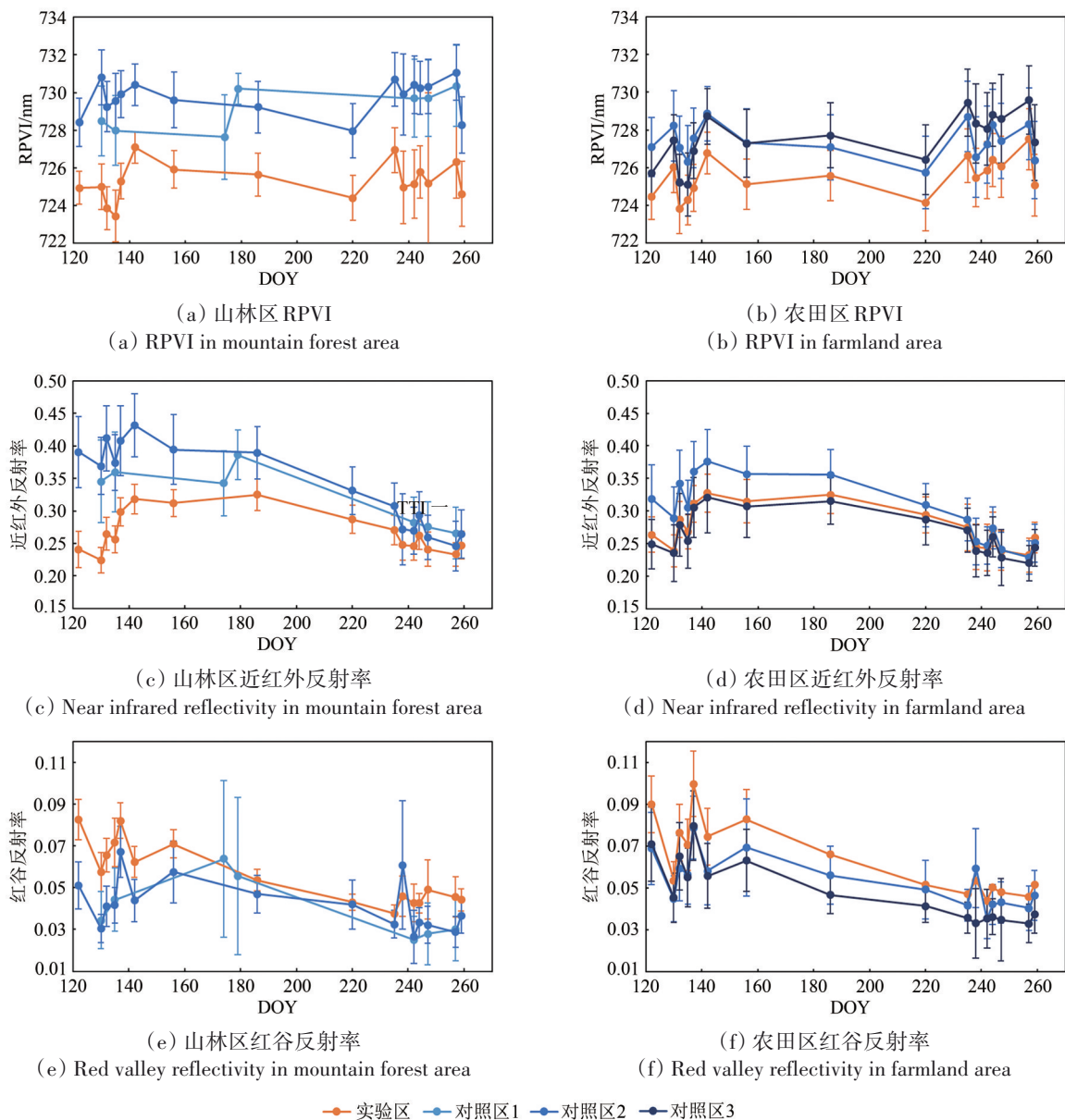


图12 2020年5月—9月实验区与对照区光谱特征时序统计

Fig. 12 Time series statistics of spectral characteristics between experimental area and control area from May to September, 2020

在山林区或农田区的采集井缓冲区内植被RPVI在各月份均比各对照区稳定偏低, 尤其如图12(a)、图13(a)的山林区基本各月份RPVI偏低2个标准差以上, 说明烃微渗漏对植被叶片叶绿素含量的确造成了稳定的影响。

山林采集井缓冲区内植被在夏季近红外反射率

相比对照区偏低且红谷反射率偏高, 说明植被的叶面积指数与植被覆盖度也的确受到烃微渗漏一定程度影响, 然而这种影响程度不如RPVI强, 规律也不够稳定, 且在入秋后逐渐消失。而农田区植被叶面积状况本身区别很大, 采集井缓冲区与对照区的近红外反射率没有体现烃微渗漏导致的有效差异。

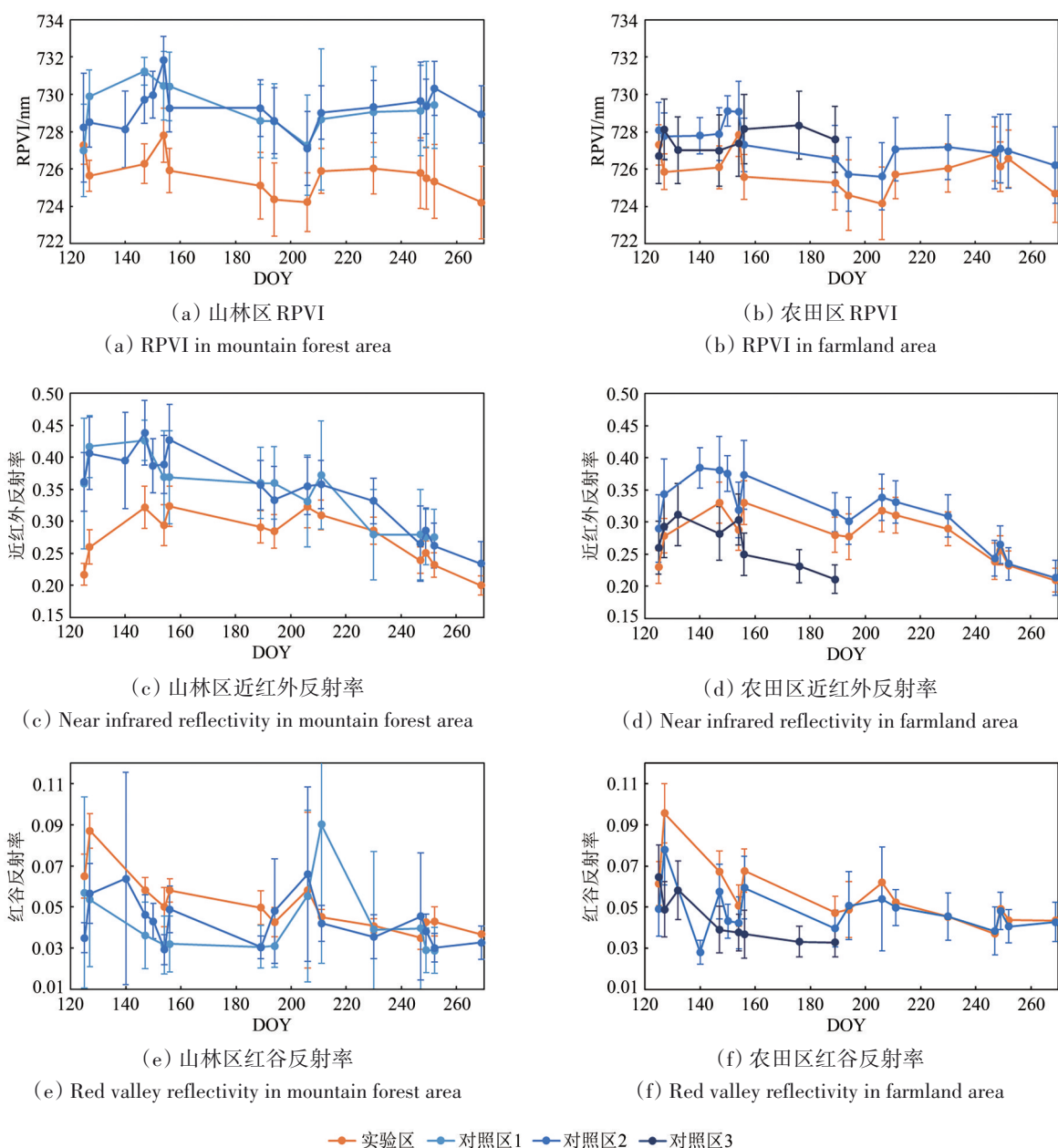


图 13 2021 年 5 月—9 月实验区与对照区光谱特征时序统计

Fig.13 Time series statistics of spectral characteristics between experimental area and control area from May to September, 2021

从上述实验区与对照区的光谱特征统计可以看出沁水县附近烃微渗漏对植被的实际影响与前人开展的烃气体处理植被的实验结论基本是一致的 (Pyšek 和 Pyšek, 1989; Smith 等, 2004; Noomen, 2007), 即主要使植被缺氧而降低叶片叶绿素含量, 其次也使植被在一定程度导致叶面积指数的降低。

从图 12 和图 13 中可以看出, 在夏季 6 月、7 月 (DOY=160—190) 实验区与对照区植被各光谱特征间关系比较稳定, 且在多个光谱特征上均体现出

差异, 利于进行实验。因此可在每年数据里选取 6、7 月份合适的影像, 并综合 RPVI、近红外反射率、红谷反射率进行烃微渗漏植被异常区提取。

5.4 光谱特征组合阈值选取

研究在 2021 年影像中选取对照区与实验区均有完整高质量影像的 7 月 9 日数据, 而在 2020 年选用 6 月 20 日—6 月 30 日中值合成获取实验区与对照区较为完整的影像。随机选取 70% 的采集井植被样本为训练集, 30% 的采集井植被样本为测试集, 则训练集阈值空间结果如图 14—16 所示。

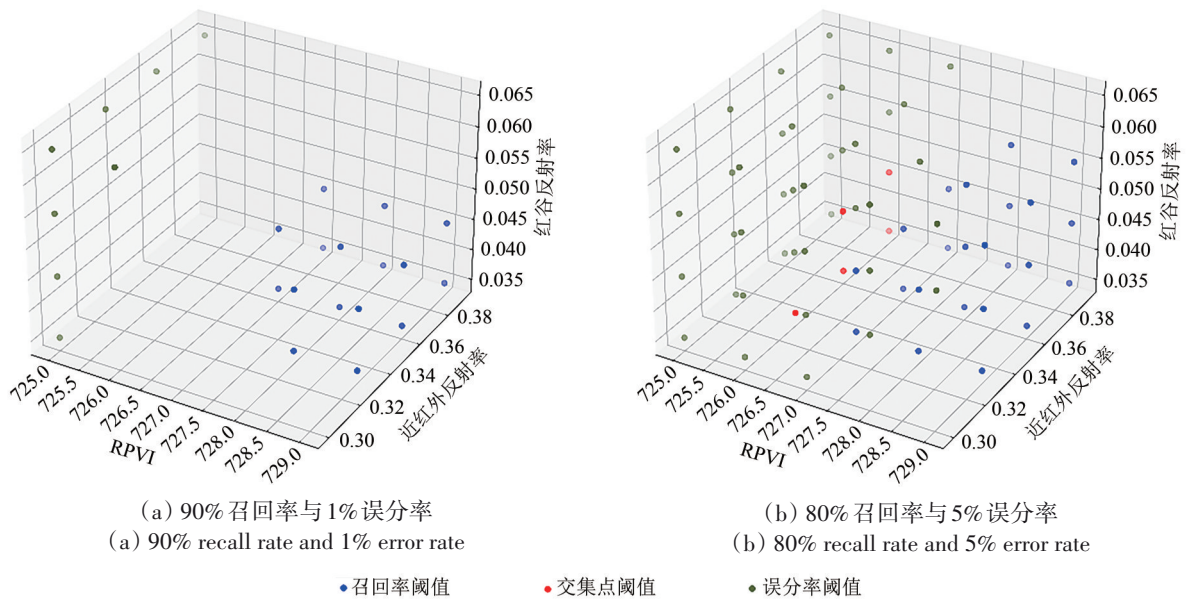


图 14 2020 年 6 月下旬山林区阈值空间图

Fig. 14 Threshold space map of mountain forest area in late June, 2020

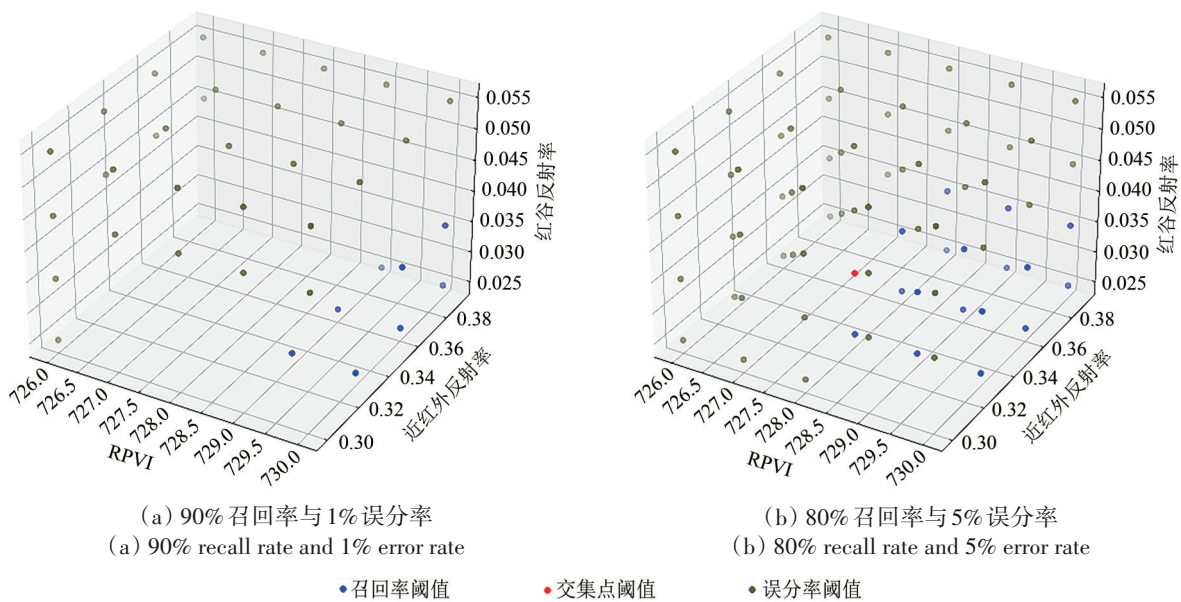


图 15 2021 年 7 月 9 日山林区阈值空间图

Fig. 15 Threshold space map of mountain forest area on July 9, 2021

从图 15 中可以看出, 满足高召回率和低误分率的阈值组合分别在阈值空间中占据一角, 而降低标准后二者逐渐相交, 最终在山林区这两年都能达到 80% 召回率、5% 误分率左右的平衡。

农田区的提取效果比山林区差很多 (图 16 所示), 要达到 70% 召回率将造成对照区 30% 以上的误分率, 基本上无法有效提取烃微渗漏区。经过测试, 农田区用阈值组合方式相比只用 RPVI 提取效果也几乎无改善。这是因为农田区涉及的不确定因素更多, 有作物类型、生长周期等问题。从

图 12—13 可以看出, 即便取各月份交集植被区, 实验区与对照区的植被光谱特征差异在农田区也不如山林区明显。实际上若不统一各月份交集植被区, 只研究每个月各自 $NDVI > 0.4$ 的植被区域, 山林区光谱特征规律几乎无变化, 而农田区光谱特征规律则起伏更大, 因此本文方法目前更适用于山林区。

根据图 14 和图 15 权衡召回率与误分率后, 对 2020 年 6 月下旬影像选取 RPVI 小于 726, 近红外反射率小于 0.33, 红谷反射率大于 0.035 的阈值组

合，训练样本山林区采集井缓冲区内植被像元召回率 82%，对照区山林区植被像元总误分率 4%。对 2021 年 7 月 9 日影像选取 RPVI 小于 728，近红外

反射率小于 0.33，红谷反射率大于 0.035 的阈值组合，训练样本山林区采集井缓冲区内植被像元召回率 80%，对照区山林区植被像元总误分率 3%。

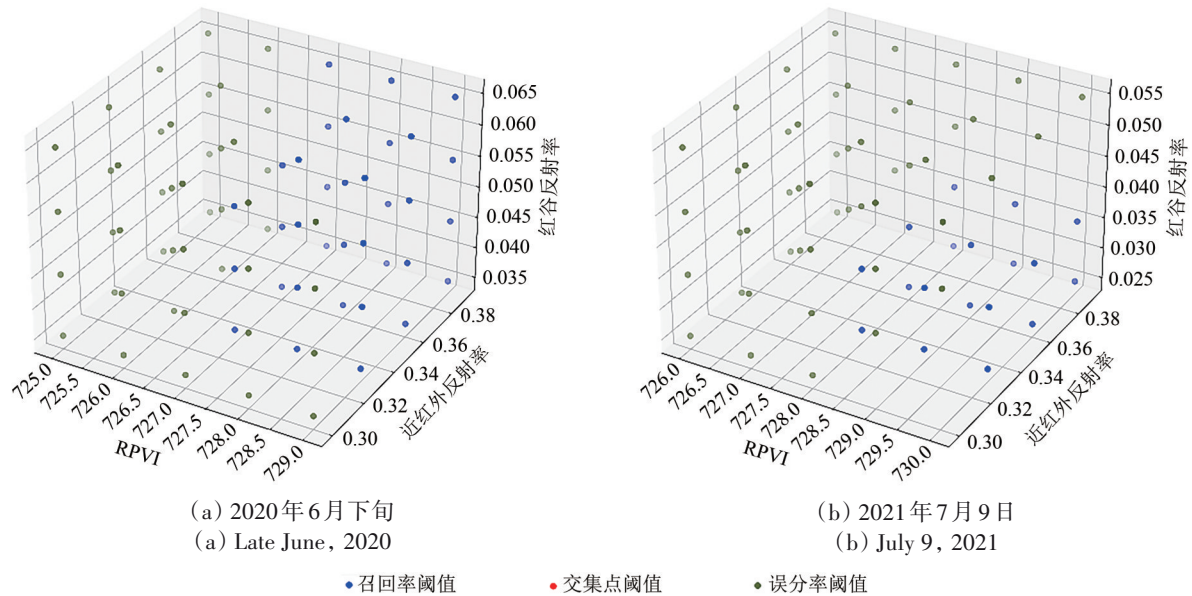


图 16 两年农田区 70% 召回率与 30% 误分率阈值空间图

Fig. 16 Threshold space diagram of 70% recall rate and 30% error rate in farmland area in two years

5.5 烃微渗漏植被异常区提取与验证结果

根据 5.4 小节选取的阈值，2020 年 6 月下旬实验区提取结果如图 17 (a)，在测试集上验证召回率也达到 81%；对 2021 年 7 月 9 日实验区提取结果如图 17 (b)，在测试集上验证召回率同样达到 80%。对照区只有 2021 年 7 月 9 日的影像完整且少云，结果如图 18 所示。

在同样的阈值组合下，实验区与对照区的山林区域提取的植被异常有显著差异，并且实验区采集井点位也全落在植被异常最密集的部位。这表明煤层气富集区烃微渗漏确实对植被光谱造成了明显影响，按本文的阈值组合方法提取烃微渗漏植被异常区是合理的。

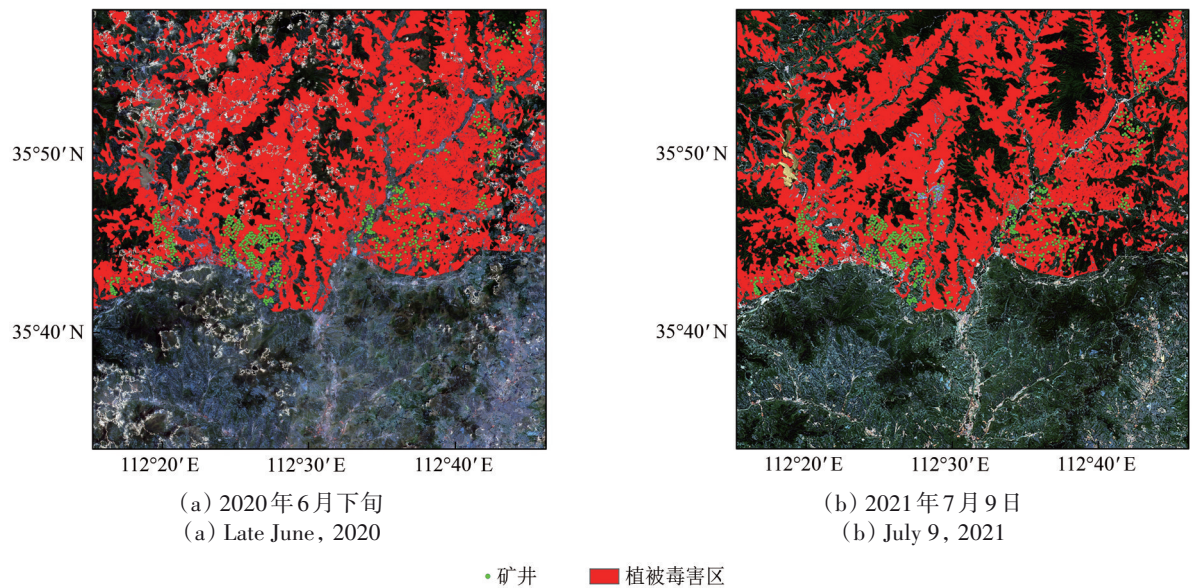


图 17 实验区山林区烃微渗漏植被异常提取结果

Fig. 17 Extraction results of hydrocarbon microleakage vegetation anomalies in the mountain forest area of the experimental area

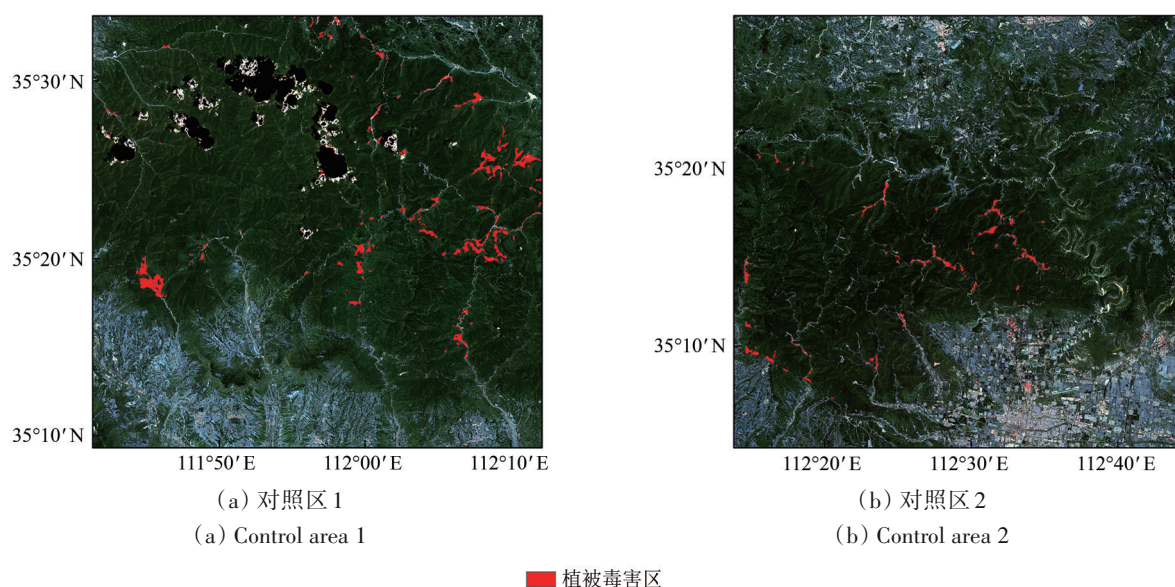


图 18 对照区 2021 年 7 月 9 日山林区烃微渗漏植被异常提取结果

Fig. 18 Extraction results of hydrocarbon microleakage vegetation anomalies in the mountain forest area on July 9, 2021 of the control area

6 结 论

本文基于前人开展的植被烃气体胁迫实验与烃微渗漏胁迫植被生长的作用机理 (Noomen, 2007; Jamaludin 等, 2015), 采用 PROSAIL 模型进行光谱模拟来优选光谱特征, 通过实地考察并利用研究区地物光谱特征统计, 初步揭示了烃微渗漏对植被胁迫影响导致光谱特征变化的情况, 研究表明在沁水县附近烃微渗漏主要影响植被红边位置的光谱特征变化, 其次对植被近红外反射平台与红谷深度也有一定程度的影响。在选取合适的光谱特征阈值组合后, 能得到山林区 70% 采集井点训练集 80% 召回率、对照区样本 5% 误分率左右的平衡。进一步, 在 30% 采集井点测试集上验证也达到 80% 以上召回率, 表明了本文实验方法的可靠性。本文实验中农田区植被异常提取, 未能在较低误分率的前期下得到较高召回率, 其原因与作物种类多、物候期差异大有关, 有待进一步研究。本文运用理论模拟与大量采集井样本统计分析相结合方法, 实现煤层气烃微渗漏植被异常区提取, 有望为勘查潜在煤层气富集区提供遥感应用新途径。

志 谢 实验设计与论文写作过程中, 吴自华、赵聪和许伟多次参与讨论, 并提出修改建议, 在此表示由衷感谢。本研究工作得到北京大学高

性能计算校级公共平台支持。

参考文献 (References)

- Adamu B, Tansey K and Bradshaw M J. 2013. Investigating vegetation spectral reflectance for detecting hydrocarbon pipeline leaks from multispectral data//Proceedings Volume 8892, Image and Signal Processing for Remote Sensing XIX. Dresden: SPIE [DOI: 10.1117/12.2028907]
- Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D, Crane F L and Baumgardner M F. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agronomy Journal*, 66(1): 16-20 [DOI: 10.2134/agronj1974.00021962006600010005x]
- Ben-Dor E and Kruse F A. 1995. Surface mineral mapping of Makhtesh Ramon Negev, Israel using GER 63 channel scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(18): 3529-3553 [DOI: 10.1080/01431169508954644]
- Chen L. 2015. Study on Hyperspectral Remote Sensing and Electromagnetic Exploration Technology for Coalbed Methane Enrichment Region. Beijing: Peking University: 19-86 (陈理. 2015. 煤层气富集区高光谱遥感和电磁探测技术与方法研究. 北京: 北京大学: 19-86)
- Clayton J L. 1998. Geochemistry of coalbed gas – A review. *International Journal of Coal Geology*, 35(1/4): 159-173 [DOI: 10.1016/S0166-5162(97)00017-7]
- Collins R J, McCown F P, Stonis L P, Petzel G J and Everett J R. 1974. An evaluation of the suitability of ERTS data for the purposes of petroleum exploration
- Crosta A P and Moore J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt ter-

- rain//Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan: 1173-1187
- Cui X, Zhao Y J, Tian F and Yang Y J. 2019. Hyperspectral hydrocarbon exploration and geological verification of the oil and gas micro-seepage in the northeastern margin of the Junggar Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 928-944 (崔鑫, 赵英俊, 田丰, 杨燕杰. 2019. 准噶尔盆地东北缘航空高光谱油气微渗漏探测及地质验证. *地质学报*, 93(4): 928-944) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2019.04.012]
- 戴金星, 戚厚发, 宋岩, 关德师. 1986. 我国煤层气组份、碳同位素类型及其成因和意义. *中国科学(B辑 化学 生物学 农学 医学 地学)*, (12): 1317-1326
- Drew M C. 1983. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: a review. *Plant and Soil*, 75(2): 179-199 [DOI: 10.1007/BF02375564]
- Everett J R, Jengo C and Staskowski R J. 2002. Remote sensing and GIS enable future exploration success. *World Oil*, 223(11): 59-65
- Gan G Y, Yu R J and Cui J. 2005. Micro percolation of hydrocarbons and formation of sumptomatic minerals in oil-gas pools. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(6): 707-710 (甘贵元, 余瑞娟, 崔俊. 2005. 油气藏中烃类微渗漏与特态矿物形成. *新疆石油地质*, 26(6): 707-710) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-3873.2005.06.032]
- Garain S, Mitra D and Das P. 2021. Detection of hydrocarbon micro-seepage prospects using Landsat 8-based vegetation stress analysis in part of Assam-Arakan Fold Belt, NE India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19): 1984 [DOI: 10.1007/s12517-021-08376-6]
- Hu P, Tian Q J and Yan B K. 2009. The application of hyperspectral remote sensing to the identification of hydrocarbon alteration minerals in Qaidam basin. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 54-61 (胡畔, 田庆久, 闫柏琨. 2009. 柴达木盆地烃蚀变矿物高光谱遥感识别研究. *国土资源遥感*, (2): 54-61)
- Huang B R, Johnson J W and Nesmith D S. 1997. Responses to root-zone CO₂ enrichment and hypoxia of wheat genotypes differing in waterlogging tolerance. *Crop Science*, 37(2): 464-468 [DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020026x]
- Huang S. 2015. Study on Spectral Model of Plants Stressed by Hydrocarbon Microseepage. Changchun: Jilin University: 16-38 (黄爽. 2015. 烃类微渗漏胁迫植被光谱模型研究. 长春: 吉林大学: 16-38)
- Huang S, Chen S B, Wang D M, Zhou C, Van Der Meer F and Zhang Y Z. 2019. Hydrocarbon micro-seepage detection from airborne hyper-spectral images by plant stress spectra based on the PROSPECT model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74: 180-190 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.012]
- Hunt G R and Ashley R P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7): 1613-1629 [DOI: 10.2113/gsecongeo.74.7.1613]
- Jacquemoud S and Baret F. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z]
- Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada P J, Asner G P, François C and Ustin S L. 2009. PROSPECT+SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113(S1): S56-S66 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.026]
- Jamaludin M I, Matori A N and Myint K C. 2015. Application of NIR to determine effects of hydrocarbon microseepage in oil palm vegetation stress//2015 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace). Langkawi: IEEE: 215-220 [DOI: 10.1109/IconSpace.2015.7283791]
- Jiang T, Zhao K B, Rong F Z and Zhang H Q. 2011. Vertical micro-migration of hydrocarbons from subsurface reservoirs and geological significance in near-surface geochemical exploration for oil and gas. *Natural Gas Geoscience*, 22(5): 901-908 (蒋涛, 赵克斌, 荣发准, 张恒启. 2011. 油气藏烃类垂向微渗漏及近地表化探异常的油气地质意义. *天然气地球科学*, 22(5): 901-908) [DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2011.05.901]
- Jia A L, He D B, Wei Y S and Li Y L. 2021. Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years. *Natural Gas Geoscience*, 32(1): 17-27 (贾爱林, 何东博, 位云生, 李易隆. 2021. 未来十五年中国天然气发展趋势预测. *天然气地球科学*, 32(1): 17-27) [DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.11.019]
- Khan S D and Jacobson S. 2008. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, 120(1/2): 96-105 [DOI: 10.1130/0016-7606(2008)120[96:RSAGFD]2.0.CO;2]
- Kuusk A. 1991. The hot spot effect in plant canopy reflectance//Myne-ni R B, Ross J, eds. *Photon-Vegetation Interactions*. Berlin: Springer: 139-159 [DOI: 10.1007/978-3-642-75389-3_5]
- Lammoglia T and De Souza Filho C R. 2013. Unraveling hydrocarbon microseepages in onshore basins using spectral-spatial processing of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Surveys in Geophysics*, 34(3): 349-373 [DOI: 10.1007/s10712-013-9225-3]
- Li Q Q, Chen X M, Lin X, Mao B J and Ni G Q. 2012. Study on oil and gas exploration in sparse vegetation areas by hyperspectral remote sensing data. *Chinese Optics Letters*, 10(S1): S11004 [DOI: 10.3788/COL201210.s11004]
- Lü Y M, Liu Y H, Chen G H, Wang C W, Zhu X S, Guo G S and Liu J. 2020. Analysis of factors affecting productivity of CBM in horizontal wells in southern Qinshui Basin. *Coal Science and Technology*, 48(10): 225-232 (吕玉民, 柳迎红, 陈桂华, 王存武, 朱学申, 郭广山, 刘佳. 2020. 沁水盆地南部煤层气水平井产能影响因素分析. *煤炭科学技术*, 48(10): 225-232)
- Molan Y E, Refahi D and Tarashti A H. 2014. Mineral mapping in the Maherabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27: 117-127 [DOI: 10.1016/j.jag.2013.09.014]
- Noomen M F. 2007. Hyperspectral Reflectance of Vegetation Affected by Underground Hydrocarbon Gas Seepage. Wageningen: Wageningen University
- Noomen M F, van der Werff H M A and Van Der Meer F D. 2012.

- Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. *Ecological Informatics*, 8: 55-64 [DOI: 10.1016/j.ecoinf.2012.01.001]
- Pirone P P. 1960. The response of shade trees to natural gas. *Garden Journal of the New York Botanical Garden*, 10: 25-29
- Prasad M. 2004. Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems. Berlin: Springer [DOI: 10.1007/978-3-662-07743-6]
- Pyšek P and Pyšek A. 1989. Veränderungen der Vegetation durch experimentelle Erdgasbehandlung. *Weed Research*, 29(3): 193-204 [DOI: 10.1111/j.1365-3180.1989.tb00859.x]
- Saunders D F, Burson K R and Thompson C K. 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bulletin*, 83(1): 170-185 [DOI: 10.1306/00AA9A34-1730-11D7-8645000102C1865D]
- Shabala S. 2017. Plant stress physiology. Cabi.
- Shen J L, Ding S B, Qi X P and Xing X W. 2010. The progress of remote sensing technology in the detection of hydrocarbon microseepage. *Remote Sensing for Land and Resources*, 5(3): 7-11 (申晋利, 丁树柏, 齐小平, 邢学文. 2010. 烃类微渗漏现象遥感检测研究进展. 国土资源遥感, (3): 7-11)
- Smith K L, Steven M D and Colls J J. 2004a. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment*, 92(2): 207-217 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.06.002]
- Smith K L, Steven M D and Colls J J. 2004b. Spectral responses of pot-grown plants to displacement of soil oxygen. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20): 4395-4410 [DOI: 10.1080/01431160410001729172]
- Su W, Wu J Y, Wang X S, Xie Z X, Zhang Y, Tao W C and Jin T. 2021. Retrieving corn canopy leaf area index based on Sentinel-2 image and PROSAIL model parameter calibration. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(6): 1891-1897 (苏伟, 郭佳昱, 王新盛, 谢花萱, 张颖, 陶万成, 金添. 2021. 基于 Sentinel-2 影像与 PROSAIL 模型参数标定的玉米冠层 LAI 反演. 光谱学与光谱分析, 41(6): 1891-1897) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)06-1891-07]
- Van Der Meer F, Van Dijk P, Van Der Werff H and Yang H. 2002. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study. *Terra Nova*, 14(1): 1-17 [DOI: 10.1046/j.1365-3121.2002.00390.x]
- Von Wettstein D, Gough S and Kannangara C G. 1995. Chlorophyll biosynthesis. *The Plant Cell*, 7(7): 1039-1057 [DOI: 10.1105/tpc.7.7.1039]
- Wang B. 2013. Coalbed Methane Enrichment and High-production rule and Prospective Area Prediction in Qinshui Basin. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 19-22 (王勃. 沁水盆地煤层气富集高产规律及有利区块预测评价. 徐州: 中国矿业大学: 19-22)
- Wang L J and Niu Z. 2014. Sensitivity analysis of vegetation parameters based on PROSAIL Model. *Remote Sensing Technology and Application*, 29(2): 219-223 (王李娟, 牛铮. 2014. PROSAIL 模型的参数敏感性研究. 遥感技术与应用, 29(2): 219-223) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.2.0219]
- Wang P R, Zhang F T, Gao J X, Sun X Q and Deng X J. 2009. An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 29(3): 629-636 (王平荣, 张帆涛, 高家旭, 孙小秋, 邓晓建. 2009. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展. 西北植物学报, 29(3): 629-636)
- Wei W. 2010. Qinshui Basin Coalbed Methane Well Production Prediction. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 2-6 (魏韦. 2010. 沁水盆地煤层气井产能预测研究. 青岛: 中国石油大学(华东): 2-6)
- Xie Q Y and Ding S B. 1994. Discussion of the some problems of the remote sensing technology for oil-gas resource. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 55-62 (谢青云, 丁树柏. 1994. 油气资源遥感技术若干问题的探讨. 国土资源遥感, (2): 55-62)
- Ye J P and Lu X X. 2016. Development status and technical progress of China coalbed methane industry. *Coal Science and Technology*, 44(1): 24-28, 46 (叶建平, 陆小霞. 2016. 我国煤层气产业发展现状和技术进展. 煤炭科学技术, 44(1): 24-28, 46) [DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.01.005]
- You J F. 2015. Research on Spectral Response Mechanisms of Oil Sands Components and Ore Prospecting by Remote Sensing Technology. Changchun: Jilin University: 19-78 (尤金凤. 2015. 油砂组分光谱响应机理及遥感找矿研究. 长春: 吉林大学: 19-78)
- You J F, Xing L X, Pan J, Shan X L, Fan R X and Cao H. 2016. Application of Hyperion hyperspectral image for studying on the distribution of oil sands. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(5): 1589-1597 (尤金凤, 邢立新, 潘军, 单玄龙, 樊瑞雪, 曹会. 2016. 基于 Hyperion 数据的油砂分布遥感研究. 吉林大学学报(地球科学版), 46(5): 1589-1597) [DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201605307]
- Zhang C Y, Qin Q M, Chen L, Wang N, Zhao S S and Hui J. 2015. Rapid determination of coalbed methane exploration target region utilizing hyperspectral remote sensing. *International Journal of Coal Geology*, 150-151: 19-34 [DOI: 10.1016/j.coal.2015.07.010]
- Zhang H L. 2014. Research on the New Energy Development in China. Changchun: Jilin University: 1-16 (张海龙. 2014. 中国新能源发展研究. 长春: 吉林大学: 1-16)
- Zhang H Z, Wang L P and Liu J. 2013. Present conditions and development trend of CBM technology. *Petroleum Science and Technology Forum*, 32(5): 17-21, 27 (张华珍, 王利鹏, 刘嘉. 2013. 煤层气开发技术现状及发展趋势. 石油科技论坛, 32(5): 17-21, 27) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2013.05.004]
- Zhang J C, Yuan L, Wang J H, Luo J H, Du S Z and Huang W J. 2012. Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(20): 1-11 (张竞成, 袁琳, 王纪华, 罗菊花, 杜世州, 黄文江. 2012. 作物病虫害遥感监测研究进展. 农业工程学报, 28(20): 1-11)
- Zhang Z. 2016. Coalbed Methane System and Drainage Optimization of Taiyuan Formation in Southern Qinshui Basin. Xuzhou: China University of Mining and Technology (张政. 2016. 沁水盆地南部太原组含煤层气系统及其排采优化. 徐州: 中国矿业大学)
- Zhao L Z, Wu L X and Guan S H. 2020. Influencing factors and countermeasures for the implementation of coalbed methane development and utilization planning. *Coal Economic Research*, 40(12):

- 65-69 (赵路正, 吴立新, 管世辉. 2020. 煤层气开发利用规划实施影响因素与对策建议. 煤炭经济研究, 40(12): 65-69) [DOI: 10.13202/j.cnki.cer.2020.12.010]
- Zheng X L, Wang R J, Zhao Q F, Liu Y P, Wang Y Y and Sun Z Q. 2017. Ecophysiological mechanisms of plant growth under the influence of rhizosphere oxygen concentration: A review. Chinese Journal of Plant Ecology, 41(7): 805-814 (郑小兰, 王瑞娇, 赵群法, 刘勇鹏, 王媛媛, 孙治强. 2017. 根际氧含量影响植物生长的生理生态机制研究进展. 植物生态学报, 41(7): 805-814) [DOI: 10.17521/cjpe.2017.0042]
- Zhou C. 2016. Research on Retrieval Method of Heavy Metal Content of Vegetation Using Hyperspectral Remote Sensing. Changchun: Jilin University (周超. 2016. 植被重金属含量高光谱遥感反演方法研究. 长春: 吉林大学)

Extraction of vegetation anomaly caused by coalbed methane hydrocarbon microseepage based on Sentinel-2/MSI

HAN Guhuai^{1,2}, SUN Yuanheng^{1,3}, QIN Qiming^{1,4}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Engineering Application, Beijing 100871, China;

3. Maritime College of Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

4. Geographic Information System Technology Innovation Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100034, China

Abstract: Hydrocarbon microleakage of oil and gas resources (including coalbed methane) may induce spectral changes in surface soil and vegetation. Detecting surface hydrocarbon microleakage using remote sensing technology, a new method for early exploration of coalbed methane, has a wide range of applications and low cost. At present, the studies of this kind of method mainly focus on bare soil minerals and seldom on widespread vegetated areas. The important reason is that the biophysical process of hydrocarbon microleakage toxicity to vegetation roots is complex, and the spectral characteristics that can be used to extract vegetation anomalies are vague. Moreover, the spectral features selected according to a small number of sampled spectra are accidental, leading to the low accuracy of the extraction results. Therefore, this work first discussed the mechanism of hydrocarbon microleakage poisoning to vegetation roots. Afterward, the vegetation spectral features that effectively reflect the effect of hydrocarbon microleakage were selected based on the PROSAIL model. Moreover, a red-edge position index based on Sentinel-2/MSI band configuration was proposed. Then, we marked the mine sites across our study area, the Qinshui basin, on Google Earth for long-term vegetation spectral characteristics statistics. We compared these mine sites with those of the control area to determine how these spectral features were affected by hydrocarbon microleakage. Finally, the marked samples were divided into training and test sets and then verified. These sets were used to find the optimal spectral feature threshold combination via the threshold space method. The statistical results show that, compared with the control area, the experimental area exhibited an obvious blue shift revealed by the red-edge position index of the mine samples. Moreover, the near-infrared reflectance decreased, and the red valley reflectance increased. These findings were consistent with the mechanism of hydrocarbon microleakage poisoning vegetation and the results of the spectral simulation. In the background mountain forest area, the 80% recall rate of vegetation samples in the mine buffer zone could be balanced with the 5% misclassification rate of vegetation samples, showing the rationality of this method. In this study, we analyzed and optimized the spectral characteristics of hydrocarbon microleakage affecting vegetation. We also used multispectral data to construct a spectral index and extract the hydrocarbon microleakage vegetation anomaly according to the spectral statistics of the mine buffer. This method combines theoretical simulation with large sample statistics, providing a reference for the research of extracting hydrocarbon microleakage vegetation anomaly by remote sensing.

Key words: coalbed methane, hydrocarbon microleakage, vegetation, remote sensing, PROSAIL model, Qinshui basin

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071314)