

基于连续小波变换的地下天然气微泄漏点识别模型

李 辉¹, 蒋金豹^{1*}, 陈绪慧¹, 彭金英¹, 乔小军¹, 王思佳²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘 要 天然气作为一种清洁、高效的低碳能源, 消费占比日益增大。无论是地下输气管道还是储气库, 由于管道腐蚀、老化、自然灾害, 地下断层、注入井封存不好等因素, 都会导致天然气泄漏。从安全、经济、环境等方面考虑, 开展地下天然气管道和储气库微泄漏检测是十分必要的。利用高光谱遥感监测地表植被变化而间接探测天然气微泄漏点, 通过野外可控系统模拟地下储存天然气微泄漏实验, 以冬小麦为研究对象, 采集了9期小麦冠层光谱数据, 通过光谱分析探寻胁迫小麦光谱特征并构建指数识别模型。首先对小麦冠层光谱进行奇异值剔除和平滑处理, 对连续去除之后的冠层光谱进行连续小波变换, 选用 Mexihat 母小波, 在尺度参数为32时, 小波系数有较少的峰值和谷值, 能与原始光谱拟合较好, 且小麦多期数据其峰值和谷值位置都比较稳定。受胁迫和健康小麦的原始光谱可分性较差, 但小波系数在487, 550和770 nm处受胁迫与健康小麦样本可分性较优, 且具有明显的诊断性特征: (1)受胁迫和健康小麦的小波系数在487 nm处为“吸收谷”, 其小波系数值为负值, 健康小麦小波系数值大于受胁迫小麦的; (2)受胁迫和健康小麦的小波系数在550和770 nm处, 有明显的“反射峰”, 且受胁迫小麦的小波系数值较大。为更好突出差异性, 增强受胁迫和健康小麦的小波系数差异特征, 构建了 CWT_{mexh} ($CWT_{mexh} = CW_{770}^2 / (1 - CW_{487}) \cdot CW_{550}$) 指数用于胁迫与健康小麦的识别; 然后分别与 $NDVI_{705}$, $mNDVI_{705}$, $ARI1$, R_{140}/R_{740} , D_{725}/D_{702} 指数进行对比分析, 经J-M距离定量检验, 结果显示 CWT_{mexh} 指数对天然气微泄漏胁迫下的冬小麦具有较好的识别效果, 该指数在天然气胁迫发生20 d后可以稳定区分胁迫和健康两类小麦, 且在全生育期都保持相同的规律, 而 $NDVI_{705}$, $mNDVI_{705}$, $ARI1$ 等指数在整个生育期内无法准确识别健康与胁迫小麦。 CWT_{mexh} 指数在稳定性、普适性与可识别性方面优于其他5个指数。因此, 高光谱遥感监测地表植被间接识别天然气微泄漏点具有可行性, 研究结果可为星载高光谱遥感监测地下储存天然气泄漏点提供理论依据和技术支持。

关键词 天然气微泄漏; 冬小麦; 光谱特征; 指数模型

中图分类号: P237

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3743-06

引 言

天然气是一种无色无味、低碳环保的优质能源, 在我国能源结构中占据重要地位。2004年西气东输一线工程正式投产, 拉开了我国全面应用天然气的大幕^[1]。2016年我国天然气表观消费量为2 058亿 m^3 , 同比增长6.6%, 天然气在一次能源消费结构中占比6.4%^[2]。到2020年, 国内天然气综合保供能力将达到3 600亿 m^3 以上, 占一次能源消费比例8.3%~10%^[3]。天然气压缩性强、流动性好, 管道成为天然气从气源地运输到消费终端的主要方式^[4]。同时为确保天然

气稳定供应, 规划建设天然气地下储气库, 无论是地下管道还是地下储气库, 由于管道腐蚀、老化、自然灾害, 地下断层、注入井封存不好等因素, 都会导致泄漏发生。我国“十三五”规划中明确提出“加强天然气泄漏识别, 减少温室气体排放”的要求^[1], 天然气泄漏会带来环境污染, 温室效应, 爆炸事故, 严重威胁人类的财产、生命及环境健康^[5]。

常规检测天然气管线泄漏的方法大致可分为直接、间接检测法^[6]。直接检测法包括人工巡视、探测器等都要依靠人去检测, 不能够及时有效的检测到泄漏; 间接检测法包括传感器、负压波等, 此类方法灵敏度低、耗费高^[7]。而对地下储气库微泄漏点尚无有效方法进行监测。

收稿日期: 2018-10-23, 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571412), 宁夏农林科学院科技创新引导项目(NKYG-18-01)和宁夏农牧厅东西部合作项目资助

作者简介: 李 辉, 1994年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院硕士研究生 e-mail: 18303015502@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jjb@cumtb.edu.cn

地下输气管道、储气库天然气泄漏会进入土壤,从而对地表植被生长发育带来影响。考虑到高光谱遥感对地表植被的变化较为敏感,因此可通过其监测地表植被的轻微变化而间接探测天然气泄漏点信息。但需要研究天然气轻微泄漏胁迫下地表植被的光谱变化特征。国内外已经有一些学者进行了相关研究,Smith 等利用 725 与 702 nm 一阶微分比值指数识别天然气胁迫下的草地、小麦和大豆,可以区分出胁迫区域与非胁迫区域^[8];Noomen 等研究天然气、甲烷、乙烷胁迫下玉米光谱在叶绿素和水吸收波段范围内波段深度减小、PRI 指数增加,可以利用玉米光谱的变化识别出天然气及其混合物泄漏^[9];Noomen 等研究发现长期油气泄漏胁迫会导致土壤上边的植被死亡,构造 R_{440}/R_{740} 光谱指数可区分裸地和植被而检测出油气泄漏的位置^[10];蒋金豹等^[11]通过 HAAR 小波变换,用系数能量和来检测地下存储 CO_2 泄漏。天然气地下管道、储气库地表往往覆盖植被或农作物,本文拟利用冬小麦冠层高光谱数据,分析冬小麦受胁迫后的光谱响应变化规律,为利用高光谱遥感识别天然气泄漏点提供参考和技术支持。

1 实验部分

1.1 实验设计

实验区位于北京市大兴区长子营镇,实验田地长 40 m,宽 20 m,实验场地设计 8 个冬小麦实验小区,分别为 4 个天然气胁迫实验区和对照区,实验区与对照区间隔排列,每个测区大小为 $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$,测区之间的间隔均为 0.5 m。天然气泄漏点位于实验区的中心下方 60 cm 处,实验时间为 2016.10—2017.06。天然气泄漏速率为 $1\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,于 2017 年 4 月 11 日在小麦返青期前开始持续通气至 6 月 1 日实验结束。种植的冬小麦品种为京冬 14 号,该品种成穗率较高,抗倒伏、抗病性较好。

1.2 冠层光谱测量与预处理

本实验光谱测量采用 SVC HR-1024i 地物光谱仪,其光谱范围为 350~2 500 nm,共 1 024 个波段,光纤视场角为 25° ,测量光谱时将探头垂直离地面 1 m。选择天气晴朗无大风的日子进行野外实地数据采集,时间为北京时间 10:00—14:00,测量人员应着黑色或灰色等深色衣服。2017 年 4 月 11 日采集第一次数据,而后开始通气。在每个测区内中心轴线上采集 4 个点数据,每两点之间间隔 0.5 m,从 2017 年 4 月 11 日开始,到 2017 年 6 月 1 日实验结束,共采集 9 期实验数据。在每个小区测量光谱之前用标准板校正。采用 5 点平滑法对采集的冠层光谱数据进行平滑处理^[11],公式如式(1)

$$R_{\text{平滑}} = \frac{1}{2.5} \left(\frac{1}{4} R_{i-2} + \frac{1}{2} R_{i-1} + R_i + \frac{1}{2} R_{i+1} + \frac{1}{4} R_{i+2} \right) \quad (1)$$

式(1)中, R_i 为第 i 波段的反射率值, $R_{\text{平滑}}$ 为每个波段平滑后的反射率值。

1.3 光谱分析方法

1) 连续统去除



图 1 实验田与数据采集图

Fig. 1 Experimental field and data acquisition diagram

连续统去除(CCR)是一种常用的光谱分析方法又称包络线去除法^[12],通过去除背景吸收的影响突出表现物质的吸收特征^[13]。本文利用连续统去除以增强光谱的吸收特性。

2) 连续小波变换

在高光谱数据数理分析中,连续小波变换(CWT)处理可以提供更多光谱吸收特征的形状和位置信息^[14]。其公式如式(2)和式(3)

$$f(a, b) = \langle f, \varphi_{a, b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi_{a, b}(t) dt \quad (2)$$

$$\varphi_{a, b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, $f(t)$ 为光谱反射率数据; t 为光谱波段; $\varphi_{a, b}(t)$ 为小波基函数, a 为尺度因子, b 为平移因子。

本文利用连续小波变换对连续统去除后的光谱曲线进行转换,计算不同尺度的冠层光谱小波能量系数,确定对天然气泄漏较为敏感波段,构建指数模型识别遭受天然气胁迫的冬小麦,从而间接探测天然气微泄漏点信息。

1.4 选用的植被指数

由表 1 可知,选择了部分植被指数与本研究设计的指数进行了对比分析。

1.5 模型验证方法

本文使用 J-M 距离度量了胁迫区和健康冬小麦的可分性。因 J-M 距离数值范围在 $0-\sqrt{2}$ 内,本文用 J_{ij}^2 来表示,当 $0 < J_{ij}^2 \leq 1.0$ 时类别之间的特征不具备可分性,当 $1.0 < J_{ij}^2 \leq 1.8$ 时有一定可分性但具有一定的重叠度,当 $1.8 < J_{ij}^2 \leq 2.0$ 时可分性较优^[15]。其公式如式(4)和式(5)

$$J_{ij} = [2(1 - e^{-\alpha})]^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_i - \mu_j)^T \left(\frac{\sigma_i - \sigma_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{|\sigma_i + \sigma_j|/2}{(|\sigma_i| |\sigma_j|)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

式中, σ_i 和 σ_j 表示相应的矩阵样本协方差; μ_i 和 μ_j 分别表示 i 和 j 样本的平均向量。

2 结果与讨论

2.1 天然气泄漏胁迫下冬小麦冠层光谱响应特征

表 1 高光谱指数
Table 1 Hyperspectral indices

光谱指数	公式	定义	参考出处
NDVI ₇₀₅	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	R ₇₅₀ 表示 750 nm 处的光谱反射率值	Gitelson and Merzlyak, (1994)
mNDVI ₇₀₅	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$		Sims and Gamon, (2002)
ARI1	$(1/R_{550}) - (1/R_{700})$		Merzlyak, (1999)
R ₄₄₀ /R ₇₄₀	R_{440} / R_{740}		Noomen et al, (2006)
D ₇₂₅ /D ₇₀₂	D_{725} / D_{702}	D ₇₂₅ 表示 725 nm 处的一阶微分值	Smith et al ^[8] , (2004)
CWT _{mexh}	$CWT_{mexh} = CW_{770}^2 / (1 - CW_{487}) \cdot CW_{550}$	CW ₇₇₀ 表示 770 nm 处的小波能量系数值	

从图 2 可见, 冬小麦在受到天然气泄漏胁迫后, 小麦冠层光谱反射率在可见光(380~760 nm)范围内逐渐增大, 在近红外(760~900 nm)区域反射率逐渐降低。随着胁迫持续进行和小麦的逐渐成熟, 对照组小麦叶片发黄枯死, 胁迫组和对照组光谱反射率的差距在减小。天然气胁迫下小麦的可见症状包括小麦生长减缓和叶子变黄。天然气泄漏迫使小麦的冠层光谱曲线发生了变化, 且在可见光和近红外范围内变化具有差异性。

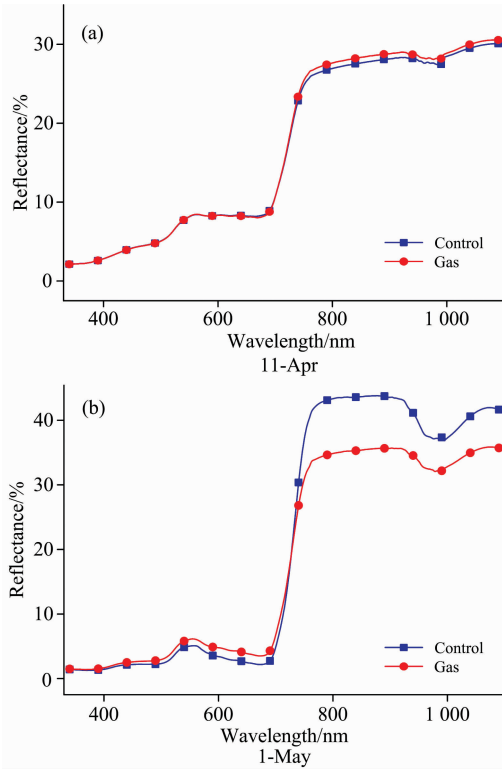


图 2 冬小麦在 4 月 11 日和 5 月 1 日的冠层光谱反射率
Fig. 2 Canopy spectral reflectance of winter wheat on April 11 and May 1

2.2 连续小波变换与光谱指数构建

利用连续小波变换对经过连续统去除后的光谱曲线进行了处理, 本文选用了墨西哥帽(Mexihat)母小波, 尺度参数为 32, 在 Matlab R2014a 软件中编程实现。尺度参数用 2¹, 2², 2³, 2⁴, 2⁵, 2⁶, 分解尺度较小时, 分解后数据包含的细微信息较多, 数据波动剧烈, 不利于敏感波段选择, 分解尺度较大时, 分解后数据包含的信息较少, 数据过于平滑, 信息量

损失较大。经试验, 在尺度参数为 2⁵ 时, 小波系数有较少的峰值和谷值, 能与原始光谱拟合较好, 且结合多期数据来看, 峰值和谷值位置比较稳定。受到天然气胁迫和健康小麦的原始光谱可分性较差, 但是由图 3 可见, 小波系数在 487, 550 和 770 nm 处胁迫与对照小麦样本没有重叠, 可分性较优, 且具有明显的诊断性特征。具体的诊断性特征为: (1) 受胁迫和健康小麦的小波系数在 487 nm 处为“吸收谷”, 其小波系数值为负值, 且健康小麦小波系数值大于受胁迫小麦的; (2) 受胁迫和健康小麦的小波系数在 550 nm 处, 有明显的“反射峰”, 且受胁迫小麦的小波系数值较大; (3) 受胁迫和健康小麦的小波系数在 770 nm 处, 也具有明显的“反射峰”, 健康小麦的小波系数值偏大。针对以上小波系数特征, 为更好的突出差异性, 并放大受胁迫和健康小麦的小波系数差异特征, 本文构建 CWT_{mexh} 指数如式(6)

$$CWT_{mexh} = \frac{CW_{770}^2}{(1 - CW_{487})CW_{550}} \quad (6)$$

式(6)中, CW 为连续小波能量系数值, 其下标为波长。

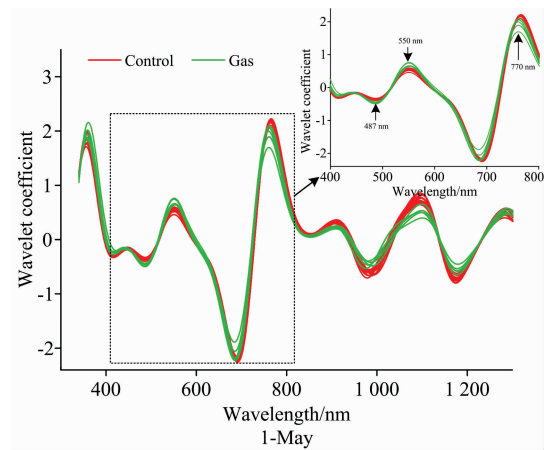


图 3 5 月 1 日冬小麦小波能量系数图
Fig. 3 Winter wheat wavelet energy coefficient map on May 1

2.3 光谱指数分析及可分性验证

为验证光谱指数的可分性和本文设计的 CWT_{mexh} 指数模型的优势性, 与 NDVI₇₀₅, mNDVI₇₀₅, ARI1, R₄₄₀/R₇₄₀ 等 5 个指数进行定性定量的比较分析, 并计算这 6 个指数模型的 JM 距离, 充分反应两类小麦的可分度。图 4 对比了本文构建的 CWT_{mexh} 指数与其他光谱指数对受胁迫、健康冬小麦的光谱指数值。由图 4 可知, NDVI₇₀₅, mNDVI₇₀₅, ARI1, R₄₄₀/R₇₄₀ 等指数都可以通过均值光谱曲线定性的识别天然气

泄漏胁迫下的冬小麦：4月11日未通气之前，健康和胁迫冬小麦的光谱指数值趋于一致，随着天然气胁迫的持续，健康和胁迫冬小麦指数值差距在扩大，5月25日直至6月1日冬小麦趋于成熟，健康和胁迫冬小麦的指数值差距在逐渐

减小。且从图4可以看出，健康和胁迫两类冬小麦的 CWT_{mexh} 光谱指数值差距比其他5个指数值较大，可以更好区分两类小麦。

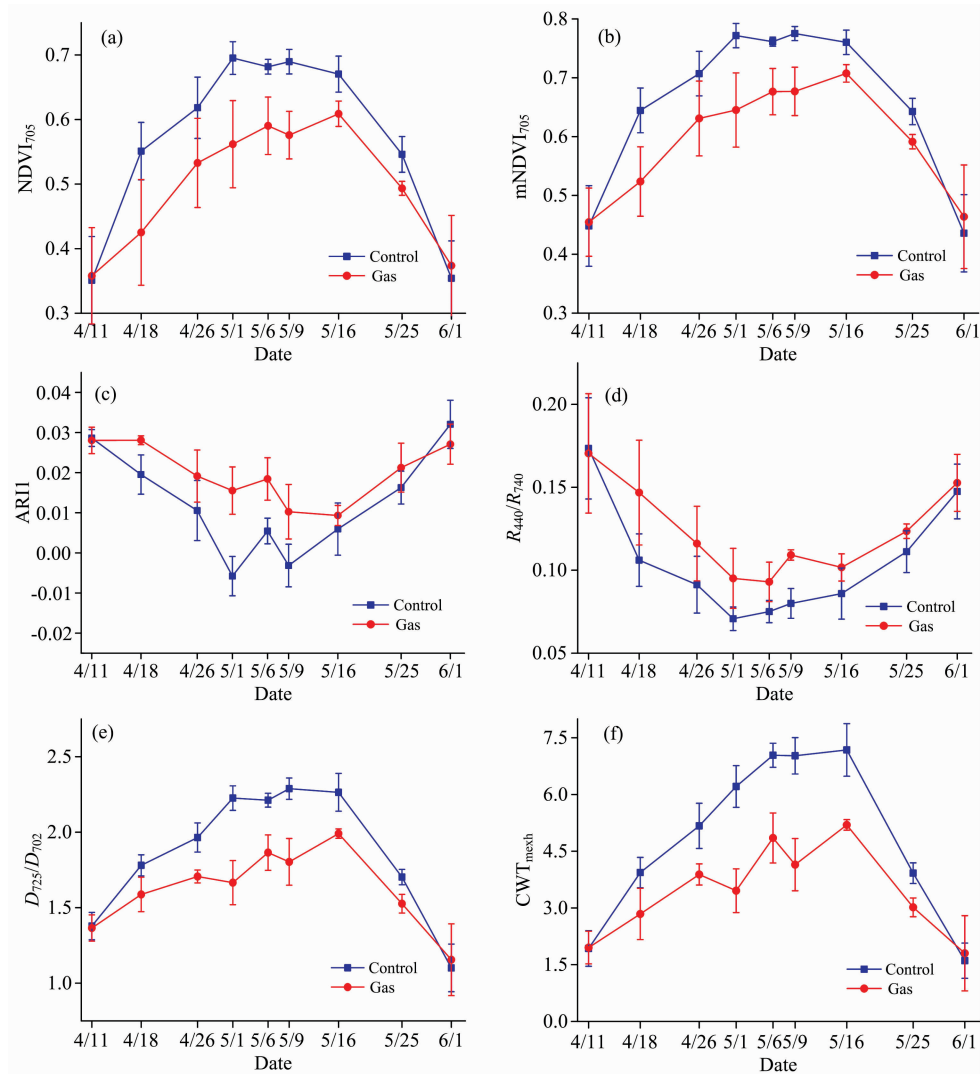


图 4 受胁迫冬小麦和健康小麦不同高光谱指数对比图

Fig. 4 Comparison of different hyperspectral indices of stressed winter wheat and healthy wheat

由表2可知， $NDVI_{705}$ ， $mNDVI_{705}$ 和 $ARI1$ 在小麦整个生育期内的 JM 距离均小于 1.8，均不能有效识别天然气胁迫下的冬小麦。 R_{440}/R_{740} 指数，在小麦受胁迫 29 d 时，JM 距

离为 1.85，可以很好区分健康和胁迫小麦，但是后期的 JM 距离均小于 1.8，稳定性不足。 D_{725}/D_{702} 在小麦受胁迫第 20 d 时，JM 距离为 1.88，健康和胁迫两类小麦区分度较好，

表 2 冬小麦不同指数模型下的类间 J-M 距离

Table 2 Inter class J-M distances under different index models of winter wheat

	11-Apr	18-Apr	26-Apr	1-May	6-May	9-May	16-May	25-May	1-Jun
$NDVI_{705}$	0.01	0.84	0.51	1.31	1.48	1.73	1.13	1.25	0.06
$mNDVI_{705}$	0.01	0.90	0.56	1.38	1.60	1.61	1.33	1.34	0.07
$ARI1$	0.12	0.38	0.27	0.61	1.36	0.93	0.46	0.28	0.20
R_{440}/R_{740}	0.02	0.72	0.38	0.89	0.80	1.85	0.51	0.73	0.02
D_{725}/D_{702}	0.01	0.88	1.61	1.88	1.75	1.77	1.55	1.45	0.10
CWT_{mexh}	0.01	0.84	1.32	1.90	1.86	1.88	1.91	1.55	0.27

但是 5 月 1 日之后, JM 距离均小于 1.8, 稳定性较差, D_{725}/D_{702} 指数并不具备在全生育期区分两类小麦的能力。

本文构建的 CWT_{mexh} 指数在小麦受天然气胁迫第 20 天开始, 就可以稳健区分天然气胁迫和健康两类小麦, 直至天然气胁迫第 35 天, JM 距离均大于 1.8, 都可以稳定的识别出天然气胁迫下的冬小麦。

5 月 16 日后, 随着小麦的成熟, 叶片发黄、发枯, 健康的和天然气胁迫下的小麦可见症状趋于一致, 两类小麦的光谱曲线高度一致, 高度相似, 重叠度较高, 可分性较小。

3 结 论

通过建立野外试验场, 模拟天然气地下管道和储气库微泄漏对地表冬小麦的胁迫实验, 采集冬小麦冠层光谱信息, 分析其光谱响应特征, 并利用连续小波变换增强光谱响应差

异, 最终构建指数模型识别受胁迫和健康两类冬小麦。主要结论如下:

(1) 天然气微泄漏胁迫下的冬小麦冠层光谱响应与健康小麦相比, 在可见光区域升高, 近红外区域降低;

(2) 提出的 CWT_{mexh} 指数, 通过 JM 距离检验, 结果表明在天然气胁迫发生 20 d 后可以稳定区分胁迫和健康两类小麦, 且在全生育期都保持相同的规律。在稳定性与可识别性方面优于其他指数。

(3) 在小麦处于成熟期, 叶片发黄、发枯, 健康的和天然气胁迫下的小麦可见症状趋于一致, 可分性较小。

本文主要应用冬小麦的高光谱遥感数据检测天然气微泄漏点, 在可见光和近红外内提取特征波段, 提出的 CWT_{mexh} 指数模型可以表现出较好的识别性能。由于本实验仅选取了一种植被进行分析, 该指数模型的普适性有待开展更多试验验证。

References

- [1] YAN Qun(燕 群). Natural Gas Industry(天然气工业), 2016, (10): 163.
- [2] China's Natural Gas Development Report(中国天然气发展报告). Beijing: Forum on Energy Transformation(北京: 能源大转型高层论坛), 2017.
- [3] Development and Reform Commission, Energy Bureau(发展改革委, 能源局). The 12th Five-Year Plan for Natural Gas Development(《天然气发展“十二五规划”》), 2016.
- [4] ZHANG Gang-xiong, LI Bin, ZHENG De-wen(张刚雄, 李 彬, 郑得文). Natural Gas Industry(天然气工业), 2017, (1): 153.
- [5] Asadzadeh S, Filho C R D S. Earth-Science Reviews, 2017, 168: 48.
- [6] GUO Yong-chao, GUO Nai-lian(郭永超, 郭乃连). Chemical Enterprise Management(化工管理), 2015, (3): 102.
- [7] LIU Hui(刘 辉). Public Communication of Science & Technology(科技传播), 2012, (1): 51.
- [8] Jiang J, Steven M D, He R, et al. Energy, 2016, 100: 73.
- [9] Noomen M F, Skidmore A K, Meer F D V D, et al. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 262.
- [10] Noomen M F, Werff H M A V D, Meer F D V D. Ecological Informatics, 2012, 8(2): 55.
- [11] JIANG Jin-bao, HE Ru-yan, Stevend Michael(蒋金豹, 何汝艳, Stevend Michael). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2015, (9): 2152.
- [12] LI Fen-ling, CHANG Qing-ru(李粉玲, 常庆瑞). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2017, 48(7): 174.
- [13] Youngentob K N, Renzullo L J, Held A A, et al. Methods in Ecology & Evolution, 2012, 3(2): 416.
- [14] QIAO Xiao-jun, JIANG Jin-bao, LI Hui, et al(乔小军, 蒋金豹, 李 辉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(2): 535.
- [15] JIANG Jin-bao, Michael D S, HE Ru-yan, et al(蒋金豹, Michael D S, 何汝艳, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(12): 163.

Model of Micro-Leakage Point Recognition of Underground Gas Based on Continuous Wavelet Transform

LI Hui¹, JIANG Jin-bao^{1*}, CHEN Xu-hui¹, PENG Jin-ying¹, QIAO Xiao-jun¹, WANG Si-jia²

1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract As a clean, efficient low-carbon energy source, natural gas accounts for an increasing proportion of consumption. For underground gas pipelines, gas storage, and the like, natural gas leakage will occur due to factors such as pipeline corrosion, aging, natural disasters, underground faults, and the bad sealing of injection-wells. In terms of security, economic, environmental and other considerations, micro-leak detection of underground natural gas pipeline and gas storage is essential. In this paper, we use hyperspectral remote sensing to monitor surface vegetation changes, thus indirectly detecting natural gas micro-leakage points. The field controllable system is used to simulate the underground micro-leakage experiment. Winter wheat is used in this study, and a time series of 9 experiments of canopy spectral collecting were conducted. Spectral analysis was used to identify and exploit the spectral characteristics of stress wheat and thereby constructing an index recognition model. Firstly, the wheat canopy spectrum is subjected to the processing of singular value culling and smoothing, and then the continuous spectrum wavelet transform is performed on the canopy spectrum after continuum removal. Specifically, mother wavelet of Mexihat is selected. When the scale parameter is 32, the wavelet coefficients have fewer peaks and valleys, which can fit well with the original spectrum, and the peak and valley positions of wheat multi-phase data are relatively stable. The original spectrum of stress and healthy wheat was poorly separable, but separability of proposed model using the wavelet coefficients at 487, 550 and 770 nm was better among wheat samples, and had obvious diagnostic characteristics: (1) The wavelet coefficient of stress and healthy wheat having “absorption valley” at 487 nm, the wavelet coefficient value being negative, and the wavelet coefficient of healthy wheat being larger than that of stressed wheat; (2) the wavelet coefficient of stress and healthy wheat is 550 nm at 770 nm, where clear “reflection peak” can be observed, and the wavelet coefficient of stressed wheat is larger. In order to better highlight the differences of wavelet coefficients of stressed and healthy wheat, the index CWT_{mexh} ($CWT_{mexh} = CW_{770}^2 / (1 - CW_{487}) \cdot CW_{550}$) was constructed for the identification of stress and healthy wheat. Compared with the index $NDVI_{705}$, $mNDVI_{705}$, $ARI1$, R_{440} / R_{740} , D_{725} / D_{702} and J-M distance quantitative test, the results show that the CWT_{mexh} has a better recognition performance on winter wheat under natural gas micro-leakage stress. The CWT_{mexh} can stably distinguish between stress and health after 20 days of natural gas stress, and maintain the same performance in the whole growth period, while the indexes of $NDVI_{705}$, $mNDVI_{705}$, $ARI1$ and so on, can not accurately identify throughout the growth period. The CWT_{mexh} index is superior to the other five indexes in terms of stability, universality and the ability to recognition. Therefore, it is feasible to indirectly identify natural gas micro-leakage points by monitoring surface vegetation using hyperspectral remote sensing. The results can provide theoretical basis and technical support for monitoring underground gas leakage points by satellite-borne hyperspectral remote sensing.

Keywords Natural gas microleakage; Winter wheat; Spectral characteristics; Exponential model

(Received Oct. 23, 2018; accepted Feb. 22, 2019)

* Corresponding author