

文章编号: 1006-6616 (2015) 02-0142-09

植被覆盖地区的高光谱油气 勘探技术研究现状

李倩倩^{1,2}, 许 宁^{1,2,3}

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 高光谱遥感油气勘探技术利用油气微渗漏所致地表蚀变矿物异常和地植物异常在光谱上的异常表现提取油气微渗漏信息, 是油气勘探的辅助手段。针对高光谱遥感油气勘探技术在植被覆盖区应用中存在的植被遮挡地表真实情况的问题开展研究, 总结相关领域的国内外研究现状, 指出其存在的问题, 提出了与植被反射率相关的指数作为油气微渗漏的指示标志, 确定了适用于植被覆盖区的高光谱遥感油气微渗漏信息大面积普查的工作流程, 研究成果可为建立更加广泛、适用的高光谱遥感油气勘探模式提供新的参考依据。

关键词: 高光谱; 遥感; 油气微渗漏; 植被

中图分类号: TE19

文献标识码: A

0 引言

高光谱油气勘探技术主要基于油气微渗漏和反射光谱学两大理论。油气微渗漏理论可以建立油气藏与其上覆地表蚀变异常之间的关系; 反射光谱学则提供了一个可以对物质成分和结构进行鉴别的高效、低成本的方法。

地下油气藏普遍存在着油气微渗漏现象, 渗漏的烃类气体在上覆土壤中聚集, 造成土壤中气体含量和成分的相对变化, 通常表现为植被的色素含量、冠层反射率和生长形态发生变化。高光谱遥感油气勘探技术就是利用油气微渗漏所致地表蚀变矿物异常和地植物异常在光谱上的异常表现提取油气微渗漏信息, 进而对研究区的油气勘探进行辅助。

目前, 利用高光谱遥感技术进行油气勘探较成功的案例, 多是在地貌为盐碱滩、沙漠以及戈壁滩等没有植被覆盖的裸露地区进行的, 并已取得了较好的结果; 而对于植被覆盖区, 由于植被遮挡了地表的真实情况, 如何选择适当的与植被反射率相关的指数作为油气微渗漏的指示标志, 进而准确提取油气微渗漏信息成为了亟待解决的问题。本文将就该问题展开研究, 总结相关领域的国内外研究现状, 提出其存在的问题, 给出解决问题的建议, 并对该领

收稿日期: 2014-12-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质勘查遥感系统集成与综合应用示范”(1212011120226)

作者简介: 李倩倩, 助理研究员, 主要研究方向为遥感影像预处理与产品生产。

域的后续研究方向进行展望。

1 植被的主要光谱特性

植被叶片中叶绿素的类型及数量、叶子内部细胞结构和叶子水分是影响植被光谱特征的3个主要因素。健康植被的反射特征由叶色素的吸收峰与水吸收峰所组成。典型绿色植被的反射光谱如图1所示。

叶片在可见光和近红外波段反射率的主要影响因素有:①叶绿素和类胡萝卜素含量(见图2a);②叶绿素含量(见图2b);③叶绿素含量、叶绿素荧光及光合作用效率(见图2c)。

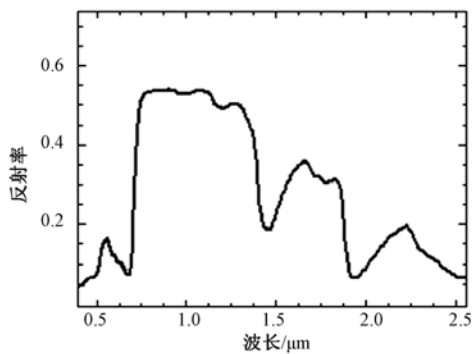


图1 绿色植被典型反射光谱曲线

Fig. 1 Typical spectral reflectance of green vegetation

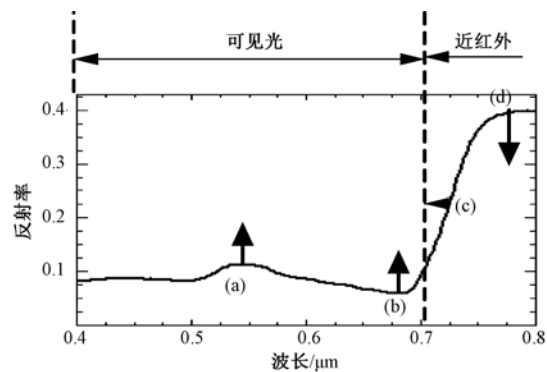


图2 可见光和近红外波段叶片反射率光谱影响因素

Fig. 2 The main factors affecting the reflectance spectroscopy of plants in the visible and near infrared bands

在利用植被异常信息进行烃类渗漏的研究中,主要关注的是植被反射光谱在650~750 nm区间的光谱特性。650~700 nm波段是叶绿素的强吸收带,其中,叶绿素a在680 nm和700 nm波长处的吸收峰作用最大,总的吸收率可达90%左右,因此,多数植物的反射率谷值在680 nm或670 nm波长处。而在700~750 nm区间,植物的反射率急剧上升,曲线陡而接近于直线形状,其斜率与植物单位叶面积所含叶绿素(a+b)的含量有关,但含量超过4~5 mg/dm²后则趋于稳定,相关关系表现不明显。单片叶子的波谱从以680 nm为中心的反射率极小值过渡到自800 nm开始的反射峰,其间存在一个拐点,该拐点所对应的波长被称为“红边”(如图2中c点所对应的波长)。

红边定义为680~750 nm波长范围内反射率光谱一阶导数最大值所对应的波长,又称为红边位置(REP)或 λ_p 。红边能够跟踪叶绿素、生物量和物候变化,被认为是绿色植物的可诊断性特征之一,是估算植被生物物理和生物化学参量的主要着眼点之一。其他衍生出来的红边特征参量还有红边幅值(又称红边斜率) $D\lambda_{red}$ (红边范围(680~750 nm)内一阶导数光谱最大值)、红边峰值(红边范围(680~750 nm)内一阶导数光谱值)、红边最小振幅 $D\lambda_{min}$ (红边范围(680~750 nm)内一阶导数光谱最小值)、红边峰值面积 S_{red} (红边范围(680~750 nm)内一阶导数光谱所包围的面积)、红边振幅与红边最小振幅的比值: $D\lambda_{red}/D\lambda_{min}$ 。

红边是植物光谱的最明显标志。红边左侧的反射率主要与叶绿素含量有关,红边右侧的反射率主要取决于叶内组织结构和植物体内的含水量。当植被叶片中叶绿素浓度增加时,植

物的光合作用增强,需要消耗更多的光子,这时植被的“红边”位置会向长波方向移动,即出现“红边红移”的现象;反之,当植被叶片叶绿素含量减少时,植物的光合作用减弱,所需消耗的光子数减少,植被的“红边”位置会向短波方向移动,即出现“红边蓝移”的现象。

以上关于植被“红边位置”的表述,其前提条件是假设在植被的红边区域内,植被一阶微分光谱上只存在一个最大值。但是,有些植物的红边区域内,其一阶微分光谱有2个峰值,前锋位于705 nm附近,后峰位于720 nm附近。当植被生长状况较好时,后峰为主峰;植被的生长状况较差时,前峰为主峰,即植被一阶微分光谱红边区域内的最大峰值所对应的波长位置反映了植物的生长状况。

植被微分光谱在红边区域内出现双峰与叶绿素荧光和叶绿素含量的增加相关。绿色植被对光合有效辐射过度响应时,会发射出红光(R)和远红光(FR),这时会产生叶绿素的荧光现象。一般来说,光合作用较强时,荧光作用较弱,但是当光合作用体系不能有效地对光照进行响应时,荧光作用增加。叶绿素的荧光作用会在690 nm和730 nm附近出现极大值。由于叶绿素功能的变化通常早于叶绿素含量的变化,荧光的变化可能会在叶片萎黄前被探测到,因此,荧光可被用来作为植被胁迫效应的无破坏性的检测方法。

2 遥感数据监测植被的分析方法

目前对植被进行检测常用的遥感方法是以植被指数为主的多种光谱指数的构建和导数光谱技术^[1~2],这两种技术的应用大大提高了植被信息反演的深度和广度,提高了植被监测的精度。

植被指数是利用遥感数据对地表植被的定性描述,通过对不同波段的信息进行线性或非线性组合构造植被指数,以达到最大化植被发射信息,最小化外部因素影响。植被指数是从遥感影像中获取大范围植被覆盖信息常用的经济、有效的方法。通常选用植被反射光谱中的红光波段和近红外波段构建植被指数,其中,红光波段反映的是植物体内叶绿素的强吸收作用,近红外波段反映的是植被的高反射和高透射特性,这2个波段均是绿色植物光合作用中的重要波段,对这2个波段进行比值、差分、线性组合等多种处理所得的植被指数可以用来增强或者解释隐含的植被信息。常用的植被指数可大致分为3类^[3],分别为基于波段简单线性组合的植被指数、消除影响因子的植被指数和针对高光谱遥感及热红外遥感的植被指数。

导数光谱技术可以减少低频背景噪声(土壤),消除光谱数据之间的系统误差,提高重叠光谱分辨率,削弱大气辐射、散射和吸收对目标光谱的影响,进而提取可识别地物的光谱波长位置、深度、宽度和吸收光谱指数等吸收峰参数。导数光谱技术已在研究植被的生物物理参数、矿物和有机质研究中得到了广泛的应用。其中,一阶导数光谱的一个最重要的应用是可以精确地得到“红边”参数信息,进而对叶片和冠层叶绿素浓度进行评价。

3 烃类渗漏对植被生长及反射率的影响

烃类渗漏改变上覆土壤空气及土壤矿物的组成和含量。渗透到地表的烃类会部分地取代土壤中的空气,包括氧气。氧气缺乏的土壤环境会迫使植被产生胁迫效应,导致植物的反射光谱发生变化。此外,土壤中残存的氧气会被细菌利用,产生二氧化碳和水。

厌氧环境改变了土壤的氧化还原电位和 Ph 值。油气渗漏的周边地区,土壤环境会恶化,从而导致土壤的矿物组分发生变化。宏观的和微量的营养元素溶解度的变化,会引起植被的营养缺乏或过剩。这是植被产生胁迫效应的第二个因素,这种现象也会在植被的反射光谱上有所体现。

生长在烃类渗漏周边地区的植被光谱发生改变的另一个因素可能来自渗漏气体本身。天然气本身对植被并没有毒害作用,但是微量气体,如二氧化碳,当其含量超过一定阈值的时候就会给植被带来毒害,可能造成植被的早期衰老或死亡。

产生胁迫效应的植被光谱通常在可见光区域具有较高的反射率,而在近红外区域反射率较低,即会出现“红边蓝移”。但是,受油气影响的植被并不是都遵循以上的规律。一些研究发现,在可见光和近红外区域,植被的反射率较高,而在其他波段反射率较低。虽然受油气渗漏影响的植被的红边位置通常出现“蓝移”现象,但是在 Yang 等^[4]的研究中却发现了植被的红边向较长波长方向移动的异常现象。

4 国内外关于烃类渗漏所致植被异常的研究

国内外已有学者对烃类渗漏给植被造成的影响展开了研究,但研究方法多是基于地面实验,即通过对生长在人工模拟的烃类渗漏环境中的实验作物的生长形态、反射率光谱等的监测,分析土壤成分或土壤中气体成分、浓度的变化与植被生物物理、生物化学参量之间的关系,且该类研究所采用的实验对象一般是小麦、玉米、大豆等农作物。

①1996 年,何在成等^[5]对桃金娘、雀梅及荷树 3 种植物在人为模拟的烃类微渗漏环境中所产生的生态及光谱变化进行了观察和研究,发现受根部烃类气体的毒害,植物叶子的叶绿素含量下降,提出可采用遥感生物地球化学方法,根据植物叶子可见—近红外范围的光谱异常,对油气藏烃类微渗漏引起的地植物异常进行探测。

②1997 年,曹文钟等^[6]在大庆地区研究了原油对草原植被的影响,对 4 种植物群落进行浇油实验,发现随着原油量的增加,植株所受的影响会逐渐增加,具体表现为:植株高度降低、株数减少;植物体在不同季节对原油的抗性也不同,影响由大到小的季节顺序是春、夏、秋季,分别对应于植物的幼苗期、旺盛生长期、成熟期;原油对不同种类植物的影响不同,一年生植物受到的影响最大。

③2004 年,Smith K L 等^[7]以小麦和大豆及草类作为实验对象,发现土壤中天然气含量的增加会使这些植被的生长受到抑制,且叶片叶绿素的含量会降低。对受油气影响的植被采用 ASD 手持光谱仪获得光谱数据,分析其在红边区域内的一阶微分光谱在 725 nm 和 702 nm 的比率,可以发现植被的胁迫效应。对于实验所使用的草类植被,利用比率法可在植被出现可视症状的至少 7 天前探测出胁迫效应,并发现比率法对植被覆盖率相对敏感,可以在植被的生长早期区分开含油气区和非含油气区的植被。该研究认为油气微渗漏引起的植被变化是一个缓慢的过程,高光谱遥感更适合于对长期油气渗漏的偏远地区的探测,而不是作为一个油气早期微渗漏的预警系统。

④2005 年,Smith K L 等^[8~9]为了验证能否通过航天遥感数据检测到管道油气渗漏给植被反射光谱带来的影响,通过 ASD 手持光谱仪,对受 3 种胁迫(油气、除草剂、阴影)的油菜光谱进行了测量,同时实验室测定了 3 种情况下油菜叶中的叶绿素含量。实验表明,利用遥感手段,借助于植被反射光谱的异常变化(反射率在可见光波段增加,在近红外波段

降低)、红边位置的移动(红边蓝移)及比值的增加(670~680/555~565 nm),可以对油气管道的泄露进行监测。但是其他因素(如除草剂的胁迫)也可能对植被反射光谱带来类似的影响,因此该研究建议在利用遥感数据对油气渗漏引起的胁迫效应进行监测时,需要其他信息(如输油管道信息)的辅助。

⑤2006—2009年, Noomen M F等^[10~11]通过实验室模拟烃类气体渗漏环境,以实验室种植的玉米和小麦作为研究对象,在作物的生长周期内,定时测量作物的植株高度及反射率等数据,并将这些数据和植物根部所通的烃类气体浓度、根部土壤中氧气浓度、二氧化碳浓度及重金属含量之间的关系进行相关分析,得出烃类气体渗漏带来的植物的胁迫效应为:烃类气体的渗漏会导致植物根部土壤中的氧气浓度降低、二氧化碳浓度升高、烃类气体浓度升高及重金属离子聚集,从而迫使植物的色素含量、冠层反射率、生长形态发生变化。

5 基于植被异常的遥感油气勘探技术国内外典型案例

目前利用高光谱遥感影像探测油气渗漏引起的植被异常,进而辅助圈定油气勘探远景区的研究,在国际上尚处于初级阶段,且开展的研究也多是探索利用植被异常能否探测出地下天然气管道渗漏,典型案例有:

①2003年, Li Lin等^[12]利用 AVIRIS 遥感影像对2000年6月1号发生的输油管道渗漏进行了研究。实验中采用了多项式拟合、拉格朗日插值和光谱混合分析(SMA)方法对 AVIRIS 数据进行分析,前两种方法主要用来监测植被反射光谱的“红边”位置的移动情况,第三种方法用来监测植被覆盖度的变化。实验结果表明,多项式拟合和拉格朗日插值法都可以检测到植被反射光谱的“红边”移动现象,但是光谱混合分析取决于所用的波段组合,且对噪声很敏感。采用的 SMA 方法检测出油气泄露导致植被覆盖度发生10%~30%的降低,同时也检测出了2000年的水分胁迫所引发的植被覆盖度超过40%的减少。因此该项研究认为结合研究区的生态和气候等辅助信息对实验结果进行分析是很重要的。

②2007年, van der Werff H M A等^[13]采用 Hymap 数据,根据受油气渗漏影响的植被具有“红边蓝移”的现象,成功地探测出油气管道周围的油气渗漏点。

③2012年, Noomen M F等^[14]选择了红边位置(REP)、Lichtenthaler 指数(LIC)等4个光谱指数探测油气渗漏对植被的长期影响,试验区选在美国 Ojai 附近的一个草甸区。研究发现,在距油气宏观渗漏源20 m范围内,出现了一圈裸地,其周围是茂密的植被。将该场景转变为一个3×3像素的卷积滤波模版,并应用在该区域的 Probe-1 遥感影像上,对于所有的光谱指数,滤波的结果都具有较少的假异常点。但是既能减少假异常点数量,又能增加检测精度的光谱指数是 Lichtenthaler 指数(R440/R740),该指数可以最好地对裸地和植被进行区分,且可以检测出该区域内的4个已知油气渗漏点。当油气渗漏发生在裸地和茂密植被处时, Lichtenthaler 指数可以为油气渗漏的监测提供较好的指示。

6 国内外研究现状总结

国内外对油气渗漏影响下植被反射光谱异常响应的研究具有以下特点:

①研究多以地面试验为工作重点。

②研究对象多是实验室种植的农作物,如小麦、玉米、大豆等。

③研究方法多是实验室模拟油气渗漏环境,对试验作物生长周期内的生长形态、反射光谱进行监测,分析作物根部土壤环境中气体成分及浓度的变化,以及由此带来的作物冠层反射率的变化。

④研究结果多是侧重于采用回归分析方法建立土壤成分或土壤中气体成分、浓度的变化与植被生物物理、生物化学参量之间的关系。

⑤利用遥感影像上植被反射光谱异常信息进行油气渗漏信息提取的研究较少,多是对地下油气管道的宏观油气渗漏进行监测。

尽管这些研究在图像上可以检测到油气管道渗漏的位置,但是若将这些方法直接应用到基于高光谱遥感影像的烃类微渗漏的检测上,则会面临以下问题:

①实验室模拟的油气渗漏模式及机理与实际的地下油气微渗漏不同:实验室模拟的油气渗漏(见图3)发生在一个相对较短的时间段内,对生长在其上的植被的影响也只是持续于植被的生长周期或生长周期中的一段时间;而地下油气微渗漏是一个漫长的过程,其在漫长的渗漏时间内已对植被生长的土壤环境进行了改变,对地表植被的影响不仅局限于植被生长周期内,可能在较长的时间内已对植被的形态、植被群落的分布产生了影响。



图3 实验室模拟烃类渗漏环境^[15]

Fig. 3 Laboratory simulation of hydrocarbon seepage environment

②地下油气管道渗漏的规模与油气微渗漏不同:油气管道的渗漏大多是宏观渗漏(见图4),其所引起的异常晕直径通常为几十米数量级,其量级分布多是肉眼可见,且会伴随明显的可视症状(见图5),如管道渗漏位置周围出现明显的植被发黄或稀少,甚至绝迹,但是远离渗漏点的地方植被则会正常生长;而对于油气微渗漏,其渗漏量级分布多是肉眼不可见,至仪器的最低检出限。

③实验室研究时所用的植被,在研究野外油气微渗漏对植被的影响时是不能使用的,这是由于实验室内的研究对象多是农作物,如玉米、大豆、小麦等,虽然这些农作物在野外也普遍种植,但是生长在不同农家土地上的农作物品种、施肥情况、施药情况均不同,因此不同田地上生长的农作物的物理形态、反射光谱也必然有差别;由于油气微渗漏发生的面积

图4 油气宏观渗漏^[16]

Fig. 4 Macro leakage of oil and gas

图5 油气渗漏点周围植被可视症状明显^[4]

Fig. 5 Visual symptoms of plants surrounding the location of oil and gas seepage

广，不可能仅用个别小面积地块的农作物的异常响应对地质构造上大区域油气微渗漏进行解译。

④国际上的研究所采用的高光谱多是光谱分辨率高达1 nm的ASD手持光谱仪，但是目前还没有分辨率如此之高的高光谱遥感传感器，因此，已有研究总结出的模式能否在航空/航天遥感影像上被观测到，以至被推广，仍是需要研究的问题。目前国际上关于此方面的研究尚处于初级阶段，而国内在此领域的研究尚属空白。

因而，研究利用高光谱遥感影像上植被反射光谱的异常信息对油气微渗漏信息进行提取的技术和方法，提出适用于植被覆盖区的高光谱遥感油气微渗漏信息大面积普查的工作流程，具有非常重要的意义，可为建立更加广泛、适用的高光谱遥感油气勘探模式提供新的参考依据。

参 考 文 献

- [1] Mouat D A, Lin Shudao. Vegetation response of geochemical status [J]. Remote Sensing Information, 1988, (4): 37 ~38.
- [2] Zhang Yongjiang. Studies on passive sensing of plant chlorophyll fluorescence and application of stress detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [3] Luo Ya, Xu Jianhua, Yue Wenzhe. Research on vegetation indices based on the remote sensing images [J]. Ecologic Science, 2005, 24 (1): 75 ~79.
- [4] Yang H, Zhang J, van der Meer F, et al. Geochemistry and field spectrometry for detecting hydrocarbon microseepage [J]. Terra Nova, 1998, 10 (5): 231 ~235.
- [5] He Zaicheng, Lv Huiping, Wang Yunpeng, et al. Simulating experiment on ecological and spectral changes of three kinds of plants caused by hydrocarbon microseepage [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1996, 15 (2): 94 ~96.
- [6] Cao Wengzhong, Zhang Fenglin, Li Ziping, et al. The effect of crude oil upon grasslands vegetation [J]. Journal of Environmental Protection for Oil and Gas Fields, 1997, 7 (3): 28 ~32.
- [7] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivatives ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92 (2): 207 ~217.
- [8] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Spectral responses of pot-grown plants to displacement of soil oxygen [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (20): 4395 ~4410.
- [9] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Plant spectral responses to gas leaks and other stresses [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26 (10): 4067 ~4081.
- [10] Noomen F M, Skidmore A K, van der Meer F D, et al. Continuum removed band depth analysis for detecting the effects of natural gas, methane and ethane on maize reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105 (3): 262 ~270.
- [11] Noomen F M, Smith K L, Colls J J, et al. Predicting soil oxygen concentrations using indices based on hyperspectral reflectance of maize and wheat canopies [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30 (2): 481 ~497.
- [12] Li Lin, Ustin S L, Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94 (1): 1 ~16.
- [13] van der Werff H M A, Noomen M F, van der Meijde M, et al. Use of hyperspectral remote sensing to detect hazardous gas leakage from pipelines [C] //Bochenek Z. New developments and challenges in remote sensing. Rotterdam: Millpress, 2007: 707 ~715.
- [14] Noomen M F, van der Werff H M A, van der Meer F D. Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage [J]. Ecological Informatics, 2012, (8): 55 ~64.
- [15] Hese S, Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, (11): 130 ~141.
- [16] Noomen M F, Skidmore A K, van der Meer F D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation, using hyperspectral remote sensing [C] // The 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, 2003: 252 ~256.

CURRENT STATUS OF HYPERSPECTRAL TECHNIQUES FOR OIL AND GAS EXPLORATION IN VEGETATION COVERING AREA

LI Qian-qian^{1,2}, XU Ning^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, IECAS, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The technology of oil-gas exploration using hyperspectral remote sensing is based on the spectrum anomalies of alteration minerals and plants to extract the information of hydrocarbon microseepage, which is an auxiliary means of oil and gas exploration. But in the study area covered by vegetation, the real situation of the surface is occluded by the existence of vegetation, which will affect the application efficiency to the technology of oil-gas exploration using hyperspectral remote sensing. In order to explore the solution of this block, the real situation of the related domestic and foreign researches is summarized and the existing problems are pointed out. The vegetation reflectance indices which can be used as the indication sign of hydrocarbon microseepage are summed up, and the work flow which can apply to the large area census of hydrocarbon microseepage using hyperspectral remote sensing is put forwarded. The research result of this paper provide a new reference for the establishment of the more extensive and applicable work model of oil and gas exploration using hyperspectral remote sensing.

Key words: hyperspectral; remote sensing; oil and gas microseepage; vegetation