

西藏措勤盆地油气遥感解译

刘辰生^{1,2}, 郭建华^{1,2}, 尹琼^{1,2}, 邓吉秋^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 西藏措勤盆地油气勘探潜力大, 利用遥感解译方法可以解决研究区高寒缺氧、交通不便以及常规油气勘探方法成本高等问题。利用比值法、遥感波段融合法、羟基/铁质异常提取法对措勤盆地异常信息进行提取和分析, 并与油气苗点和已知油气藏对比。结果表明, 羟基/铁质异常提取法(主要分析手段是主成分法)包含的非油气异常信息少, 异常信息与油气苗点吻合度高, 是最佳的解译方法。比值法提取的异常信息中包含较多的非油气异常信息, 因此油气解译结果不准确。遥感波段融合法解释准确性介于两者之间。通过遥感解译预测出措勤盆地4个有利油气勘探区域, 其中3个与该区石油地质分析结果非常吻合。

关键词: 措勤盆地; 沥青点; 油气遥感解译; 有利油气勘探区; 影响因素
中图分类号: P627 **文献标志码:** A

Petroleum interpretation with remote sensing in Cuoqin basin, Tibet

LIU Chen-sheng^{1,2}, GUO Jian-hua^{1,2}, YIN Qiong^{1,2}, DENG Ji-qiu^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: There is a great potential for petroleum exploration in Cuoqin basin, Tibet. The petroleum interpretation with remote sensing can solve such questions as cold, hypoxia, inconvenient traffic and high cost with conventional methods for petroleum exploration in study area. Surface anomalies are extracted and analyzed with comparative method, fuse method and hydroxyl and iron anomaly method in Cuoqin basin. Based on comparison, hydroxyl and iron anomaly method (main method is principal component method) is the best for remote sensing interpretation because there are few non-petroleum anomalies in interpretation result of principal component method. But there are lots of non-petroleum anomalies in interpretation result of comparative method, the interpretation result is inaccurate. The degree of interpretation accuracy with fuse method falls in between. Four favorable petroleum exploration areas can be put forward in Cuoqin basin through interpretation of remote sensing, and three areas of them coincide with petroleum geology data.

Key words: Cuoqin basin; pitch point; petroleum interpretation of remote sensing; favorable area for petroleum exploration; impact factors

由于研究区平均海拔4 500 m以上, 高寒缺氧, 地广人稀, 植被覆盖较差, 交通不便, 特殊的地理条件限制了人们对其研究, 成为中国陆上面积最大、勘

探程度最低、认识最差的一个含油气大区^[1], 因此, 对该区进行油气勘探必须寻找适宜于高寒地区且高效、廉价的新探测方法。遥感技术获得的遥感信息

基金项目: 国家重大科技专项子专题(2008ZX05002-005-007HZ)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-01-04

通信作者: 刘辰生, 讲师, 博士; 电话: 0731-88836235; E-mail: lcsjed@163.com

能够全面、真实地反映地面信息,并具有多层次性、多时相性、多波段性^[2],尤其在反映地球化学和地球物理特征、地球热信息、地壳深部隐伏信息等方面具有得天独厚的优势。油气资源遥感是遥感技术和油气地质相结合的一门边缘学科,是遥感技术应用的一个重要方面^[3]。它是以寻找油气为目的,利用遥感资料和其他地学相关资料,提取与油气密切相关的信息^[4-5],为油气勘探选择靶区提供勘探部署决策的依据。近年来,对油气遥感解译的方法研究较多,成果丰硕。袁崇谦和周建勋^[6]利用比值法对塔里木盆地塔北地区烃类微渗漏异常进行了分析,油气渗漏点与异常区吻合度高。新星石油公司根据烃类蚀变异常信息,预测了四川龙门山鸭子河勘探区块,并部署了MP100井,现该井为工业油气井^[7],从而验证了遥感技术进行靶区预测的有效性。

1 研究区概况

措勤盆地位于东经 81°~89°、北纬 30°~33°,为中生代盆地。盆地内发育中、上侏罗统接奴群,下白垩统则弄群、多尼组、郎山组,上白垩统竟柱山组,古近系典中组、丁青湖组,新近系布嘎寺组、喷呐湖组和洁居纳卓组。措勤盆地地表出露的地层多为白垩系多尼组、郎山组、竟柱山组以及第四纪冲积物。

多尼组主要分布于盆地雪上勒—可如勒一线以北,整合于下伏的则弄群和上覆的郎山组之间。岩性主要为灰绿色泥岩、粉砂质泥岩、含生物微晶灰岩、灰绿色页岩夹薄板状灰岩、深灰色泥晶灰岩、生物灰岩、灰黑色碳质泥页岩以及长石岩屑砂岩,沉积相类型包括浅海相和三角洲相。郎山组岩性主要包括生屑灰岩、泥晶灰岩以及炭质泥页岩,沉积相类型包括局限台地相和开阔台地相。竟柱山组仅在扎日南木错—拍龙—塔若错之间呈近东西向展布,岩性为一套浅紫红色、紫红色夹灰绿色、灰色岩屑石英砂岩、含砾砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,为冲积扇相沉积。

2 油气遥感解译

遥感技术直接找油方法是基于烃类微渗漏原理,利用遥感技术探测烃类微渗漏形成的地表标志(如红色褪色、碳酸盐矿化晕、黏土矿化、地植物病变和热惯量异常等),从遥感影像上直接提取油气信息,实现直接探测油气藏的目的。该项技术是通过对比已知沥

青点或油气藏遥感影像特征,确定其油气微渗漏信息提取参数,对比、提取措勤盆地烃类微渗漏信息,圈定烃类微渗漏非常区。其方法包括比值法、遥感波段融合法、羟基/铁质异常提取法。

2.1 比值法

比值法是指当波段间差值相近但斜率不同时利用反射波段与吸收波段的比值增强各种蚀变矿物的波谱差异,抑制地形的影响,从而突出蚀变信息的方法。其处理流程包括:首先整理已知油气点坐标,转换成GIS数据,再将油气点坐标数据与遥感图像叠加,获得对应位置的图像数据值(原值或统计值)。分析不同位置油气点的遥感数据值的特征,横向(不同图幅间)、纵向(不同波段间)对比,总结数值规律,并编写提取流程与算法。通过统计分析发现:措勤盆地的12个已知油气点中7个直接落在比值法异常区范围之内,吻合度比较高。

2.2 遥感波段融合法

根据烃类微渗漏的原理以及地表蚀变引起的光谱反射率异常特征,直接对ETM⁺图像波段进行运算,再进行融合、合成假彩色图像,由人工直观目视判断可能的异常区域。根据ETM⁺图像特征以及烃类微渗漏可能引起的各种异常的遥感图像波段差异,确定运用以下波段比值,提取不同的异常信息:1) TM5/TM4,提取含铁离子(包括Fe²⁺、Fe³⁺)土壤、盐类信息;2) TM3/TM2,提取土壤“褪红”蚀变信息;3) TM5/TM7,提取黏土矿物和碳酸盐矿物蚀变信息。将提取结果与已知油气点、油藏区进行叠加,分析空间相关性,发现措勤盆地的7个已知油气点多数落在融合法的异常区域内。将融合法油气微渗漏信息提取结果与伦坡拉盆地已知油藏区叠加,发现伦坡拉盆地8个油气藏及其周围3000m范围内无异常。

2.3 羟基/铁质异常提取法

渗漏到地表的微量油气可引起地表地植物异常、碳酸盐矿物蚀变、红层褪色异常、黏土矿物蚀变、热惯量异常等一系列异常。而碳酸盐矿物蚀变会引起地表的CO₃²⁻与OH⁻异常,红层褪色会引起地表Fe²⁺与Fe³⁺异常、黏土矿物蚀变也会引起地表CO₃²⁻与OH⁻异常。故提取遥感图像中的羟基(OH⁻)和铁质(Fe²⁺与Fe³⁺)异常,即间接提取油气微渗漏信息。Fe²⁺、Fe³⁺、OH⁻、CO₃²⁻等离子或离子基团的反射谱主要特征为:1) Fe²⁺在1.1~2.4 μm光谱范围内存在强吸收谷,而且Fe²⁺会使矿物在TM7波段反射率降低。2) Fe³⁺在

0.85~0.94 μm 光谱范围内存在较强吸收谷, 在 0.45 μm 和 0.55 μm 波长处反射率降低。Fe³⁺的存在会使岩石矿物在 TM3 图像上亮度值呈高值, 而使岩石矿物在 TM4、TM1 及 TM2 图像上亮度呈低值。3) OH⁻有 3 个非常特征的吸收谱, 较强的在 2.3~2.4 μm 光谱范围内, 较弱的两个分别位于 1.4 μm 波长处及 2.2~2.3 μm 波长范围内。由于其在 2.2~2.3 μm 光谱范围附近存在强吸收谷, 使 TM7 波段呈低值, 故 TM5 波段相对呈高值。4) CO₃²⁻的吸收谱带有 5 个: 2.35、2.55、1.9、2.0 和 2.16 μm 波长处。由于其在 2.35 和 2.55 μm 波长处存在强吸收谷, 因此, 含 CO₃²⁻的矿物岩石的反射光谱特征表现为在 TM7 波段呈低值, 而在 TM5 波段相对呈高值。

综上所述, 含有大量 OH⁻、CO₃²⁻、Fe²⁺、Fe³⁺离子基团或离子的蚀变岩石及其地表氧化物在 TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7 光谱曲线上表现为在 TM3 和 TM5 波段处具有相对高值的双峰波谱特性, 但是在未蚀变的矿物岩石中, OH⁻、CO₃²⁻、Fe²⁺、Fe³⁺离子含量很低, 不具有这种光谱曲特性。油气地表蚀变遥感信息提取就是建立在此基础之上。

羟基/铁质异常提取法最主要的分析手段是主成分法, 主成分法是指根据地物的波谱特征和主成分分析后产生的特征向量矩阵中各波段的载荷因子的大小来提取目标地物信息的方法。利用 4 个波段(TM1、TM3、TM4、TM5)进行主成分分析。判断铁染物主分量的准则是其主分量的特征向量 TM3 与 TM5 系数符号相同, TM3 的系数应与 TM1 及 TM4 的系数符号相反。根据相关地物的波谱特征, 判断符合这一标准的主分量包含铁染信息。利用 4 个波段(TM1、TM4、TM5、TM7)进行主成分分析, 判断羟基化物主分量的准则是其主分量的特征向量 TM1 系数与 TM5 系数符

号相同, TM5 的系数与 TM7 及 TM4 的系数符号相反。根据相关地物的波谱特征, 符合这一判断标准的主分量包含羟基信息。采用主成分分析的方法, 通过(TM1、TM3、TM4、TM5)和(TM1、TM4、TM5、TM7)两组 4 个波段, 提取措勤盆地的铁质和羟基的蚀变信息。

将主成分法油气微渗漏信息提取结果与已知油气点叠加(见图 1)。通过统计分析发现: 措勤盆地的 6 个已知油气点有 5 个直接落在主成分法异常区范围之内, 1 个落在异常区附近 3 000 m 范围之内, 吻合度高。另外, 将主成分法油气微渗漏信息提取结果与伦坡拉盆地油藏区叠加后发现: 1) 伦坡拉盆地内 8 个油藏中 6 个油藏在 3 000 m 范围内无异常, 只有塘奴陇果西油藏、伦坡日油藏 3 000 m 范围之内有少量零星异常出现。2) 伦坡拉盆地内部异常信息非常少见。通过分析可知, 主成分分析法提取的异常信息与伦坡拉盆地油气藏存在负相关, 即油藏区及附近的地表主成分分析法异常不明显。

2.4 油气非异常区预测

依据研究区烃类微渗漏信息提取结果, 按照光谱特征值进行分级处理, 得到蚀变异常分级提取图。求取反集, 可得到非异常区分级提取图。以地表高异常区作为油气渗漏异常区域, 以非异常区作为地下可能存在油气藏的区域, 将非异常区分为 3 个级别, 即: 一级非异常区、二级非异常区和三级非异常区。其中一级非异常区中面积大于 1 000 km²的区域作为重点研究对象。措勤盆地共有 4 个重点一级非异常区: 2 区、3 区、4 区、5 区(见图 2)。

据石油地质资料, 措勤盆地优质烃源岩、储层和盖层都集中发育在盆地北部麻米—中仓—阿索所圈定的区域, 该区域在侏罗纪到白垩纪为继承性沉积中

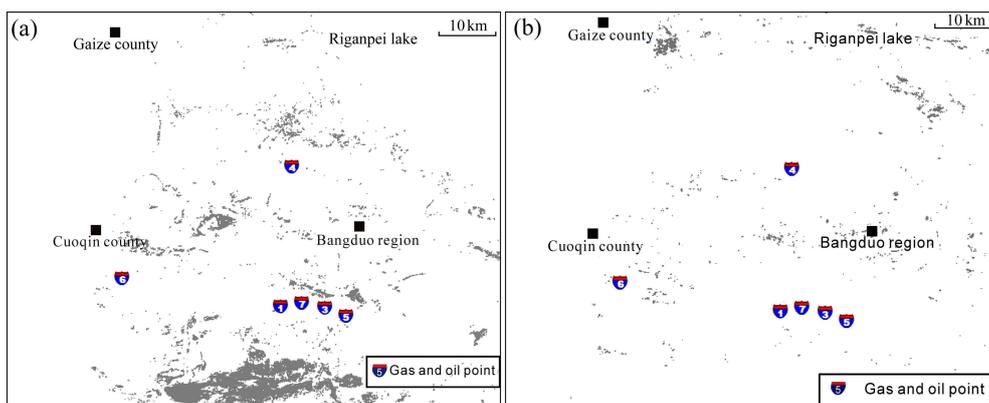


图 1 措勤盆地油气苗点附近的羟基/铁质异常(灰色区域为异常区): (a) 羟基异常; (b) 铁质异常

Fig. 1 Hydroxyl and iron anomaly close by asphalt point in Cuoqin basin (Grey in figure represents anomaly): (a) Hydroxyl anomaly; (b) Iron anomaly

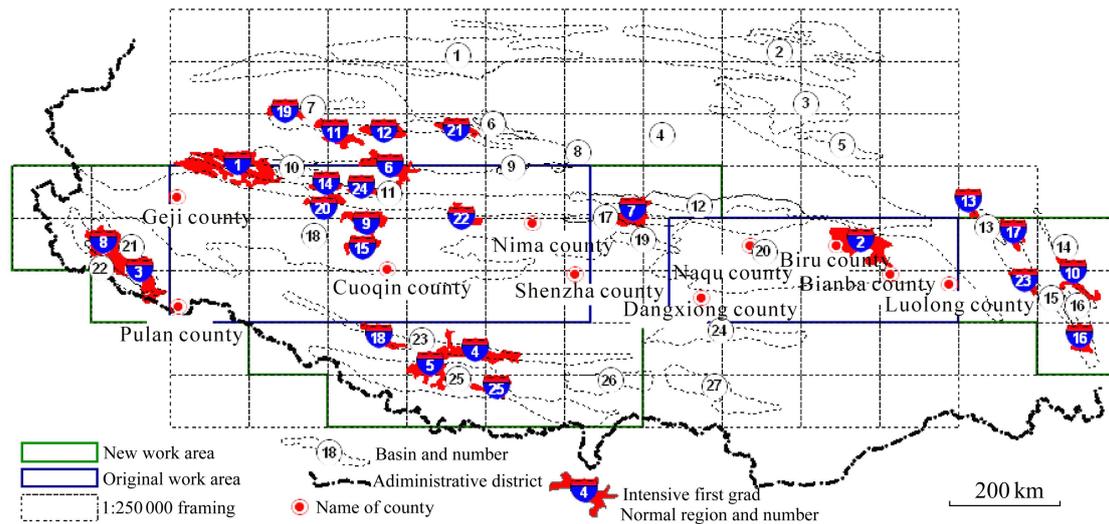


图2 重点油气微渗漏一级非异常区域: 1—羊湖盆地; 2—可可西里盆地; 3—沱沱河盆地; 4—羌塘盆地; 5—莫云盆地; 6—玛尔果茶卡盆地; 7—戈木错盆地; 8—双湖盆地; 9—帕度错盆地; 10—先遣盆地; 11—康托盆地; 12—伦北盆地; 13—囊谦盆地; 14—贡觉盆地; 15—昌都盆地; 16—前进盆地; 17—伦坡拉盆地; 18—措勤盆地; 19—班戈盆地; 20—比如盆地; 21—波林盆地; 22—扎达盆地; 23—日喀则盆地; 24—拉萨盆地; 25—岗巴—定日盆地; 26—江孜盆地; 27—羊卓雍错盆地

Fig. 2 First grade and target microleakage region of petroleum: 1—Yanghu basin; 2—Kekexili basin; 3—Tuotuohe basin; 4—Qiangtang basin; 5—Moyun basin; 6—Maerguochaka basin; 7—Gemu cuo basin; 8—Double basin; 9—Padu cuo basin; 10—Xianqian basin; 11—Kangtuo basin; 12—Lunbei basin; 13—Nangqian basin; 14—Gongjue basin; 15—Changdu basin; 16—Qianjin basin; 17—Lunpola basin; 18—Cuoqin basin; 19—Bange basin; 20—Biru basin; 21—Bolin basin; 22—Zhada basin; 23—Rikaze basin; 24—Lasa basin; 25—Gangba—Dingri basin; 26—Jiangzi basin; 27—Yangzhuoyong cuo basin

心^[8-10]。在该区域接奴群、多尼组、郎山组有多套厚层且处于成熟期的烃源岩、中孔—中低渗的优质储层以及有效盖层, 这些石油地质条件决定了该区为措勤盆地最有利油气勘探区^[11]。这与油气异常信息提取评价出的2区和3区一类有利区块极为吻合, 但遥感影像预测图中4区并不在有利区域内。

2.5 不同分析方法的解译效果对比

将提取油气点特征信息(比值法)、波段融合色调异常(融合法)、羟基/铁质异常(主成分分析法)的结果进行空间叠加, 得到综合的解译结果, 对比发现以下规律。

1) 对比已知油气苗点、油气藏位置, 不同方法所提取异常的吻合程度, 由高至低依次为: 主成分分析法→融合法→比值法。

2) 对比已知非油气异常区(水体、植被、花岗岩体等), 不同方法所提取的异常中包含非异常信息(即不是所需要的异常信息)的比例, 由高至低依次为: 比值法→融合法→主成分法。

导致不同分析方法解译效果优劣的原因分析。

1) 主成分分析法(羟基/铁质异常提取): 由于对各图像进行了相对校正, 使得图像之间的差异性降低;

剔除了水体、阴影、雪地、白泥地、植被后, 对所提取信息的干扰降低; 最终使得该方法具有较高的吻合度和较低的误判率。

2) 融合法(波段融合色调异常提取): 由于最终需人工识别异常区域, 使得准确性降低。

3) 比值法(油气点特征提取): 烃类信息在地表的含量极低、容易受到各种因素干扰, 且和其他信息很难区分, 使得该方法所得结果包含较多的其他非异常信息。

综合以上分析, 研究认为主成分分析法提取结果可靠性最高, 融合法次之。

另外, 通过比值法、波段融合法、主成分法(羟基/铁质)分别提取油气遥感异常信息, 将其结果与伦坡拉盆地进行叠加, 分析发现伦坡拉盆地8个油气藏及其附近区域根据3种方法所提取异常信息均很少, 非异常区与伦坡拉盆地内油气藏吻合。

3 油气遥感解译的影响因素

采用多种方法的提取烃类异常信息结果均能在一定程度上反映油气地表微渗漏, 且与已知油气渗漏区

域具有较高的吻合度,但其结果常受多种因素的影响,需要具体分析。

3.1 研究区本身因素的影响

目前,遥感技术主要从土壤及岩石地球化学异常、石油物质地表渗漏、地植物异常、地热异常等几个方面寻求遥感探测指示标志;而受到研究数据和技术因素的影响,某些途径的方法无法实施,具体如下:

1) 由于研究区属于高寒气候区,地表植被稀少,无法进行植被异常的对比分析,故植物异常信息未能提取。

2) 由于研究区油气苗点均是局部出露,其均一出露面积达不到遥感识别蚀变的面积(最小像元面积,ETM⁺多光谱为 $28.5 \times 28.5 = 812.25 \text{ m}^2$),一般地表均一沥青出露面积只有几十平方米,达不到遥感识别的尺寸,无法直接利用烃类物质的光谱特征提取地表微渗漏信息。

以上因素使得研究只能基于土壤及岩石地球化学异常和部分利用已知油气点附近的遥感数据特征提取油气地表微渗漏信息。

3.2 遥感数据可获得性的影响

地表油气渗漏及其引起的异常是非均一、小面积,这就使得解译过程中对遥感数据的要求非常高,然而遥感数据受到诸多方面的限制:

1) 空间分辨率:由于油气地表渗漏面积小,用高分辨率的遥感数据是合理的选择,但高分辨率遥感数据波段信息少,不具备高光谱特征,对地物识别能力差,如空间分辨率0.61 m的QuickBird数据,光谱波段少,对地表油气或异常信息根本无法识别。

2) 光谱分辨率:一般光谱和高光谱在分辨率方面都存在缺陷,没有合适的高分辨率、高光谱遥感数据,所以在选择数据时只能空间分辨率、光谱分辨率兼顾,从而使得地表微渗漏信息的光谱检出率和检出面积都受到限制。

3.3 遥感数据成像的影响

遥感数据成像特征、成像时的环境等均会影响遥感数据的质量,从而影响到由此提取出来的油气微渗漏信息。

1) 同物异谱:同类地物可能由于成分、外观等差异造成成像后色调存在差异,具有不同的光谱特征。

2) 同谱异物:具有同样光谱特征的信息,并不一定代表同一地物。可能由于成分、外观等差异使不同地物在成像后色调一致,不同的地物可能具有相似的

光谱特征。

3) 成像时间:不同时间成像的数据,由于太阳照射、大气参数等不同,不同图幅上的、同一地点或同一地物遥感数据会存在差异,导致不同图幅数据之间数据特征有差异,从而影响油气微渗漏信息提取的准确度。

遥感数据成像方面的各种影响因素削弱了利用光谱提取信息的基础,需采用多种方法剔除部分干扰因素、或采用多种方法对比分析,以此提高提取信息的准确度^[12]。

3.4 地面综合干扰因素

由于多波段遥感图像的光谱分辨率低,再受到干扰地物及背景光谱的影响,导致蚀变信息在遥感图像中一直表现“微弱”。因此,蚀变矿物的遥感信息提取依然难度很大^[13-14]。

研究区受多种干扰因素影响,主要包括阴影、戈壁荒漠、植被、土壤、水体、云团、积雪或雾等。这些因素对烃类信息提取的影响较大。

4 结论

1) 采用比值法提取油气点特征信息,采用融合法提取波段融合色调异常,采用主成分分析法提取羟基/铁质异常,在3种分析方法中,主成分分析法在异常信息分析方法中解译效果最佳,融合法次之。

2) 通过主成分法解译出措勤盆地面积大于1 000 km²的4个重点一级非异常区,同时这些区域也是措勤盆地有利的油气勘探区域,这个结果与石油地质资料分析结果相吻合。

3) 油气遥感解译方法具有成本低的特点,但其受到诸如地表植被、地热异常、天空云量、遥感数据分辨率和波段等因素的制约,需要根据研究区的实际情况选用最佳的分析方法。

REFERENCES

- [1] 张春贺. 推进西藏高原油气勘查与开发[J]. 中国矿业, 2008, 17(1): 13-15.
ZHANG Chun-he. Innovation on oil exploration expertise and integrated iogistics support boost Tibetan discoveries [J]. China Mining Magazine, 2008, 17(1): 13-15.
- [2] GRAHAM R H. Spectral signatures of particular minerals in the visible and near infrared [J]. Geophysics, 1977, 42(3): 501-503.
- [3] LAWRENCE C R, COLIN J S, JOHN C M. Hyperspectral

- analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Moror, NT, Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3): 419-431.
- [4] 李志忠, 杨日红, 党福星, 张显峰, 谭炳香, 赵慧洁. 高光谱遥感卫星技术及其地质应用[J]. *地质通报*, 2009, 28(2): 271-273.
LI Zhi-zhong, YANG Ri-hong, DANG Fu-xing, ZHANG Xian-feng, TAN Bing-xiang, ZHAO Hui-jie. The hyperspectral remote sensing technology and its application [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(2): 271-273.
- [5] 朱振海. 油气藏烃类微渗漏理论及遥感油气资源探测的机理研究[J]. *遥感技术与应用*, 1994, 9(1): 2-3.
ZHU Zhen-hai. Hydrocarbon microseepage theory and oil-gas reservoir detecting by remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1994, 9(1): 2-3.
- [6] 袁崇谦, 周建勋. 卫星遥感技术在油气勘探中的应用[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(2): 74-75.
YUAN Chong-qian, ZHOU Jian-xun. Application of satellite remote sensing technology in oil and gas exploration [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(2): 74-75.
- [7] 黄光玉, 王润生, 沈占锋, 赵欣梅. 遥感技术预测油气勘探靶区[J]. *地理空间信息*, 2007, 5(1): 28-29.
HUNAG Guang-yu, WANG Run-sheng, SHEN Zhan-feng, ZHAO Xin-mei. Predicting oil and gas exploration target areas by remote sensing technology [J]. *Geospatial Information*, 2007, 5(1): 28-29.
- [8] 王冠民. 西藏措勤盆地构造沉积演化及含油气远景[J]. *石油学报*, 2001, 22(1): 31-35.
WANG Guan-min. Tectonic-sedimentary evolution of the Cuoqin basin and its hydrocarbon potential [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(1): 31-35.
- [9] 程项胜, 李永铁, 刚文哲, 高岗. 藏北措勤盆地油气生成特征[J]. *新疆石油地质*, 2000, 21(3): 180-183.
CHENG Ding-sheng, LI Yong-tie, GANG Wen-zhe, GAO Gang. Features of hydrocarbon sources of Cuoqin basin in northern Tibet [J]. *Xingjiang Petroleum Geology*, 2000, 21(3): 180-183.
- [10] 王剑, 谭富文, 李亚林, 李永铁. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 53-55.
WANG Jian, TAN Fu-wen, LI Ya-lin, LI Yong-tie. Petroleum potential of key basin in Qinghai-Tibet plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 53-55.
- [11] 刘家铎, 周文, 李勇, 丘东洲. 青藏地区油气资源潜力分析与评价[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 147-151.
LIU Jia-duo, ZHOU Wen, LI Yong, QIU Dong-zhou. Petroleum potential analysis and evolution of Qinghai-Tibet plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 147-151.
- [12] 马超飞, 马建文, 韩秀珍, 孟宪刚, 王建平. 应用多源数据提取高植被覆盖地区岩性信息—以湖南黔阳地区为例[J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 365-371.
MA Chao-fei, MA Jian-wen, HAN Xiu-zhen, MENG Xian-gang, WANG Jian-ping. Extraction of lithological information using multi-data in densely vegetated area — An example from Qianyang, Hunan [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2002, 37(3): 365-371.
- [13] 杨自安, 彭省临, 朱谷昌, 张远飞, 石菲菲. 多光谱遥感图像中蚀变信息及干扰因素的分析研究[J]. *地质与勘探*, 2009, 45(1): 46-51.
YANG Zi-an, PENG Sheng-lin, ZHU Gu-chang, ZHANG Yuan-fei, SHI Fei-fei. Study on alteration information and disturbance factors in multi-spectrum remote sensing images [J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(1): 46-51.
- [14] 张远飞, 吴德文, 朱谷昌, 杨自安. 遥感蚀变信息检测中背景与干扰问题研究[J]. *国土资源遥感*, 2008, 76: 22-26.
ZHANG Yuan-fei, WU De-wen, ZHU Gu-chang, YANG Zi-an. The problems of background and interference in remote sensing alteration information detection [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2008, 76: 22-26.

(编辑 何学锋)