

doi: 10.11720/wtyht.2022.1150

邹雨, 王国建, 杨帆, 等. 含油气盆地甲烷微渗漏及其油气勘探意义研究进展[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 1-11. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1150>

Zou Y, Wang G J, Yang F, et al. Research progress of methane microseepage in petroliferous basins and its significance for oil-gas exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 1-11. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1150>

含油气盆地甲烷微渗漏及其油气勘探意义研究进展

邹雨¹, 王国建¹, 杨帆², 陈媛¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 21 世纪以来, 地表微渗漏表现特征的形成机理研究已取得显著进展, 对油气勘探具有重要意义。含油气盆地微渗漏气体是以甲烷为主, 在地下从烃源岩或储层出发, 近于垂向微运移, 而在地表造成的化学、物理及生物变化特征是地下油气藏的近似映射, 它是客观存在的, 是“石油渗漏系统”中一个重要组成部分, 目前已替代宏观渗漏成为地表追踪地下油气藏最有效的“窗口”。甲烷微渗漏监测可以在地表、水体及大气中直接进行, 测试获得的含甲烷烃类气体组分浓度及同位素组成是地下油气评价的第一手重要资料。甲烷微渗漏间接监测数据主要来源于地表微生物、植被、矿物、放射性及磁性等, 与直接获得的化探数据相似, 这些不同的地表异常监测数据都可区别于远离油气藏地表的背景值, 其异常分布区将成为有利勘探区的靶向。进入综合勘探时代, 甲烷微渗漏机理的深入认识, 单一监测方法及其片面认识的避免, 地表综合监测方法的思路转变, 以及数理分析新体系的建立, 必将在未来油气勘探中发挥越来越重要的作用。

关键词: 甲烷; 微渗漏; 综合勘探; 研究进展

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0001-11

0 引言

起源于地壳自然脱气的不含放射性碳源(¹⁴C)的甲烷(即碳的年龄距今超过 50 000 年), 可以被称为地质甲烷^[1]。地质甲烷往往与石油地质及煤地质密切相关, 是通过含油气层或烃源岩中的有机质热裂解或微生物作用形成^[2-3], 少量可以源自地热系统, 从火成岩或变质岩地层中渗出, 与有机物降解无关^[4]。因此, 大部分地质甲烷应属于化石能源, 是不同于泥炭地、湿地、湖泊和海洋中近期及当代微生物活动产生的甲烷气体。得益于过去 20 年不间断的全球甲烷释放通量监测, 地质甲烷如今被认为是大气甲烷重要的自然来源, 仅次于湿地和淡水甲烷的贡献^[5]。

大量的地质甲烷释放在国内外引起了广泛的关

注, 一方面是因为甲烷是温室气体, 关系着全球气候变暖^[5]; 另一方面, 更是因为含油气盆地中的甲烷是地质甲烷中最主要的部分, 对油气勘探具有重大意义^[6-8], 其源和汇是石油渗漏系统的一部分, 即存在运移通道将烃源区和聚集区联系起来并造成地表物理、化学及生物变化, 这些是油气地表勘探的理论基础^[9-17]。含油气盆地内的地质甲烷释放是从地下深处迁移至地表的渗漏现象, 可与其他烃类或非烃物质混合, 大致分为宏观渗漏和微渗漏。

宏观渗漏是天然气的“通道化”流动的表现, 通常与断层系统有关, 如地表宏观可见的干渗漏、油气渗漏、水脱气及泥火山等^[1]。而微渗漏是肉眼不可见的, 指甲烷和轻烃(C₂-C₅)从含油气沉积盆地中缓慢、持续或间断地向地表垂向渗流, 断层可作为微渗漏的优势通道, 并常伴随有强烈的季节变化^[9, 11, 18]。特别是 21 世纪以来, 微渗漏替代宏观渗

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目“近地表轻烃来源判别模型及其油气勘探应用基础研究”(41872126)

第一作者: 邹雨(1992-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为油气地球化学勘探。Email: zouyu1992.syky@sinopec.com

漏监测,成为全球油气进一步勘探的重要推动力;在统计了全球约 2 700 口钻井数据之后, Schumacher^[19]指出 82%完成了商业开发的钻井与微渗漏异常相关;相比之下,在没有相关微渗漏异常的情况下,只有 11%的探井取得了油气田的发现。其中,甲烷是含油气盆地微渗漏气体的主要组成部分,是预测地下天然气和石油的重要变量^[20-22]。因此,了解甲烷微渗漏系统,有助于了解盆地的油气成藏动力学,是 21 世纪理解和使用近地表物理、化学及生物方法进行油气评估的关键。

1 微渗漏系统

1.1 石油渗漏与微渗漏

Abrams^[15]引入了一个重要概念是“石油渗漏系统(PSS, petroleum seepage system)”,该系统包含有沉积物特征(物质组成)、构造(运移路径)、生烃(烃源和成熟度)、区域流体流动(压力状态和流体力学)以及近地表过程(物理、化学及生物变化)等之间的相互关系。在含油气盆地中的石油渗漏分析可用来描述、绘制岩石圈整个油气流体系统,包括“油”和“气”聚集、运移、渗漏及后期改造等过程^[2-3]。这一概念表明,渗漏不是特殊存在的,而是含油气盆地的一个普遍、内在的组成部分,无论是现在还是过去,都存在运移通道将烃源区或储层与地球表面联系起来(图 1)^[23]。

另外,需要指出的是在永冻层、极地以及海底冰冻地区的烃类气体排放,也应归入渗漏系统(图

1)^[1]。这种冰冻地区的甲烷可由现代微生物在非常浅的沉积物或水生系统中产生,根据地质甲烷的定义来说不具有“地质”特征,这种排放不应称为渗漏。但是,在许多情况下,常年冻结、冰饱和的地面和海底覆盖层可能形成一个低渗透盖层,当冰盖融化,成藏的甲烷会泄漏至地表,可以看作是渗漏过程^[24]。例如海底的冷泉系统,深度可达海平面下约 3 000 m,是由天然气水合物、烃类气体和水等混合的海底排泄现象^[24]。因此,这些冰冻地区同样具有渗漏系统,甲烷渗漏被归因于冰融化、冰层解体和水合物分解^[1]。

油气在地表渗漏的两种形式,即上文所述的宏观渗漏和微渗漏,其中微渗漏是岩石、土壤中甲烷和轻烃(C₂-C₅)气体普遍垂向微运移的现象,与宏观渗漏的存在无关。为了更好地理解微渗漏,笔者对含油气盆地微渗漏和宏观渗漏不同特征进行了对比总结(表 1)。结果表明:含油气盆地的地表往往伴随有微渗漏(频率大于 80%^[19]),且因为其近于垂向运移的特征,地表微渗漏与地下油气藏具有很好的对应关系,所以在油气勘探方面具有很大的应用空间;微渗漏由于不可见、地表通量小、广泛分布,更易受地表岩石、土壤、植被及微生物等因素的干扰,勘探难度大,需要物理、化学甚至生物手段进行综合分析;虽然宏观渗漏是可见的、容易监测的,且不易受地表其他因素影响,但通过宏观渗漏探明的油气藏比例在 20 世纪末就已经骤降到只有 20%^[25],不再是有效油气勘探靶向。

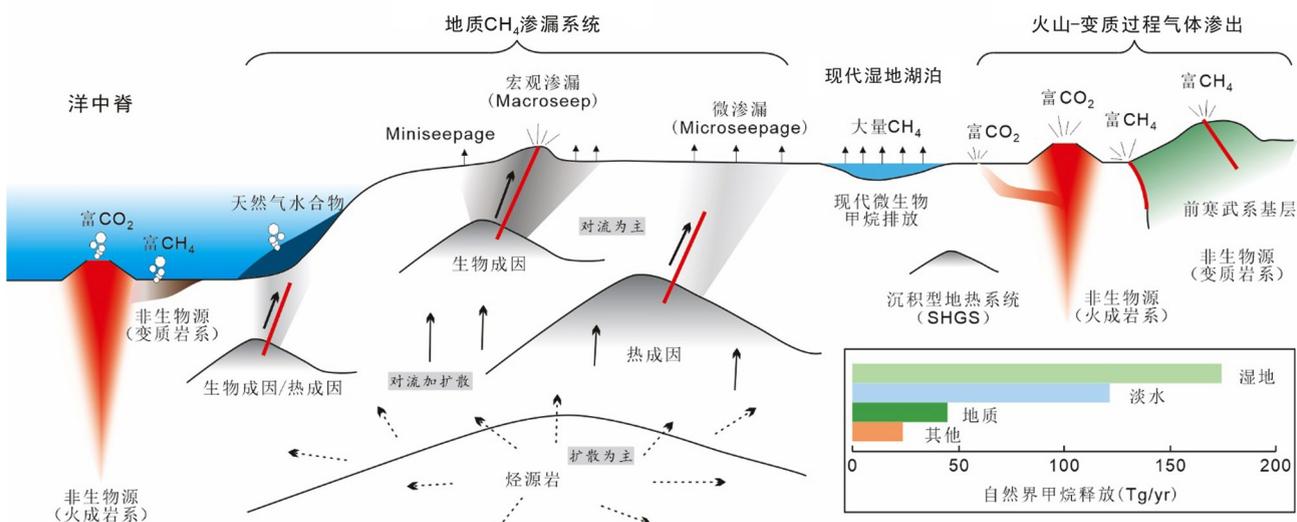


图 1 自然界甲烷生成与释放示意
Fig.1 Natural methane generation and release

表 1 含油气盆地微渗漏和宏观渗漏不同特征的对比

Table 1 Comparison between different aspects of micro-and macro-seepage in petroleum basins

	微渗漏	宏观渗漏
观察方法	物理、化学及生物手段	地表现象宏观可见(如泥火山)
烃类组成	轻烃(C ₁ -C ₅),可挥发芳烃	轻烃,可挥发的芳烃,重质/轻质原油
运移机制	微裂缝中的连续气相流动	沿构造间断处渗出
运移方向	以垂向为主	以横向、侧向为主
地表通量	约 10 mg/(m ² ·d) ^[12]	100~1 000 mg/(m ² ·d) ^[12]
地表分布特征	面源	点源
受地表因素干扰程度	易受影响	不受影响
全球含油气盆地出现频率	> 80% ^[19]	约 20% ^[25]
与油气藏空间关系	油气藏上方或上方附近	沿地表不整合面或断层分布
油气勘探前景	较大	较小(基本于 20 世纪完成)

1.2 微渗漏存在的证据

微渗漏能够连接地下油气藏与地表是客观存在的事实,主要由以下经验、理论及实验证据证明:地表微渗漏的烃类气体(C₁-C₅)与地下油气藏轻烃相对含量及其碳氢同位素组成特征能够相匹配,可追溯微渗漏气体的热成因或生物成因来源^[2-3];地表微渗漏轻烃的高通量响应了地下高质量油气储层或烃类补给特征,而低通量则对应着储层枯竭或盖层良好封堵特征,同时,通量的地表监测还受气候与气象的影响,是由地下深处的内因和地表环境的外因平衡作用下共同控制的^[2];地下油气储层在地表的投影与地表轻烃异常特征具有一致性,其物理、化学及生物监测手段都可应用于油气勘探实践中^[12-14,24];油井的高精度地球化学数据测量提供了直接证据,可绘制轻烃垂向变化特征^[2];高分辨率三维地震资料成像的气烟囱构造,证实了轻烃在地下近于垂向的运移特征^[26];微渗漏轻烃运移特征及其在地表赋存机理已通过实验室模拟得到证实^[10]。

1.3 甲烷微渗漏源与运移机制

含油气盆地中热成因和生物成因的地质甲烷都与有机质降解有关,可以是烃源岩或油气藏中的有机质。热成因甲烷主要是指由有机质热裂解形成的,由于裂解反应温度较高(可达 200 ℃),生气过程多发生在地下深部几千米;而微生物成因甲烷生成涉及 CO₂ 还原,甲基型发酵以及次生微生物作用,由于高温会抑制微生物的活性,此类甲烷生成主要发生在低于 80 ℃ 的湿润环境下,因此生气过程多发生在地下浅层^[3](图 1)。

含油气盆地内甲烷可进行长达几千米距离的运移,基于 Klusman 和 Saeed 研究理论^[27]可将运移模式分为扩散、水力搬运以及微气泡浮力 3 种方式:扩散,其速率是缓慢的,受浓度梯度趋势的气体分子向低浓度区运移,可以在各个方向上运移;水力搬运,轻烃作为水中的溶解组分随水一起垂直运移,在这

一机制中,油气运移与盆地的流体动力学有关,且常出现横向偏移;微气泡浮力,浮力驱动的运移是由于气态和液态烃相之间的密度差异造成的,倾向于在垂直方向上驱动气态物质,在该机制下,轻烃分子的大小通常能够穿过盖层的孔隙。通常认为,深部烃源岩生气的初次运移主要以扩散为主,在此之后微气泡浮力是甲烷微渗漏的主导机制,其速度和空间尺度要远远高于扩散(图 1)。气体分子运移速度由岩石渗透率和烃源岩(或二次聚集)处气体压力引起的压力梯度共同决定^[7]。因此,微渗漏也反映了地下岩层的渗透性,可以为构造地质学提供重要信息。实际上,甲烷微渗漏也会遵循优势路径(阻力较小的路径),这是由孔隙、节理、微裂隙、裂隙、断层等决定的^[9]。然而,优势路径和压力梯度不一定是近于垂向的,因此本文中所提到的“垂向运移”往往是理想情况下发生的。

2 直接监测方法

2.1 监测方法

本文中甲烷微渗漏直接监测方法是指在地表(含近地表)、水体(含水体底部沉积物),以及地表上方的大气中监测或采集各种赋存状态的甲烷分子的物理和化学方法,总结于表 2。

地表监测主要是对土壤和井口含甲烷气体(天然气)进行的测试方法(表 2)。一方面,甲烷微渗漏在地表土壤介质中主要有化学吸附态、物理吸附态、游离态和溶解态^[10];化学吸附态是指轻烃进入碳酸盐矿物晶格中或被硅酸盐矿物颗粒吸附包裹,采用盐酸进行碳酸盐溶解获得的气体称为酸解烃,而采用加热的方法释放硅酸盐颗粒中的气体称为热释烃;物理吸附态是指土壤沉积物颗粒表面物理吸附的轻烃;游离态是指游离于颗粒之间的气态烃,物理吸附态和游离态轻烃可采用特殊密封容器在土壤中

表 2 甲烷微渗漏直接监测方法

Table 2 Direct monitoring methods of methane microseepage

监测对象	地表监测		水体监测		大气监测
	土壤 (酸解烃、热释烃、顶空气)	钻井顶空气	水体 (溶解态烃、游离态烃)	水底沉积物	大气 (光谱特征)

收集,称为顶空气;溶解态是指溶解在各种水体中的轻烃,可通过真空或加热的方法收集。另一方面,探井、油气井、水井等可用于收集顶部空间的渗漏气体。

水体监测在本文中是指对海洋油气田或冷泉系统中的水体系测试,涉及溶解态、游离态以及水底沉积物中的天然气(表2)^[28];溶解态为溶解于水体的轻烃,可直接收集水样,然后采用顶空气方法提取溶解态含甲烷气体;游离态轻烃在水体中呈现气泡状,可使用漏斗状气泡捕集器收集含甲烷气体;水底沉积物可采用重力取芯器或机械旋转取芯器进行取样,并进行快速处理和储存,沉积物中的含甲烷气体提取方法可参照上文所述的地表土壤处理方法。

地表上方的大气监测可分为遥感分析和空气样品收集(表2),可基于地面、机载或者卫星平台。遥感光谱分析主要是基于渗漏气体的吸收光谱特征^[12],而空气样品收集可基于车载或机载的高分辨率光谱仪进行现场分析^[29],空气样品也可供实验室分析。但在实际应用中,不管是遥感分析还是空气样品收集,探测渗漏气体在很大程度上取决于气候和天气条件,且在大气中监测到的气态烃可能受到人为或其他自然来源(例如湿地)的干扰。通常,只有宏观渗漏的较高通量可用来“直接”测试,而微渗漏是通过蚀变矿物的光谱学特征进行“间接”测试^[12],因此遥感分析将在下文进行介绍。

以上所有地表、井口、水体及大气中收集的天然气都可以通过小型储存容器带入实验室进行分析,或者使用便携式仪器对游离态气体直接在现场进行测试。其中,含甲烷气体组成及其含量可通过气相色谱仪(例如 PE-AutoSystemXL FID-TCD^[10])进行测试,轻烃碳氢同位素组成可通过稳定同位素质谱仪(例如 FinniganDelta Plus MS 和 Thermo Scientific Delta V Plus MS^[2-3])。另外,在现场可采用密闭室法或静态箱法测定甲烷通量,是将仪器置于土壤至上并隔绝大气,通过装有甲烷传感器的通量计对土壤顶部界面的甲烷通量进行监测^[6]。

2.2 现场干扰因素及处理

除了上述所说的大气监测非常容易受到气候、天气条件的影响,不适用于微渗漏的直接检测,其他直接检测方法在实际应用中也需要谨慎使用。当天然气渗漏到地表时,近地表轻烃的浓度和组成会因

地质和生物过程发生变化,例如轻烃在地表的化学氧化消耗以及地表微生物过程生成或消耗甲烷,都可能会导致油气成因轻烃失去原始的指示意义^[3,14]。了解环境过程的影响以及样品收集,是正确解释地表地球化学数据的必要条件,特别是在低浓度渗漏区域。如果未能充分了解地表微渗漏相关的干扰因素,即土壤性质和地形地貌引起的轻烃保存条件不一,以及地质条件与地表微生物活动等,都可能会导致错误的解释^[3,14-15]。

目前,为了避免地表地球化学背景掩盖甲烷微渗漏信号,除保持一致的采样方法,还可以从以下几个方面进行实际处理:通过地表或海底不同深度的采样,以确定适宜的采样深度,从而减少表层上部最大扰动区的干扰^[30];尽量选取具有相同环境特征的地表或海底采集物化性质相似的土壤样品,以减少土壤性质、地形地貌环境特征等影响^[28];选取物质均一和化学背景相同的其他样品,如积雪或海底水体^[28,31];对同一研究区进行不同季节、不同年份进行多次采样,并对不同地化参数进行测试,以确保实验的稳定性与重现性^[32];现场采样过程中人为主观因素通常不能完全避免地表介质等影响,还需要对实验数据进行数理矫正(下文将叙及)^[33]。

3 间接监测方法

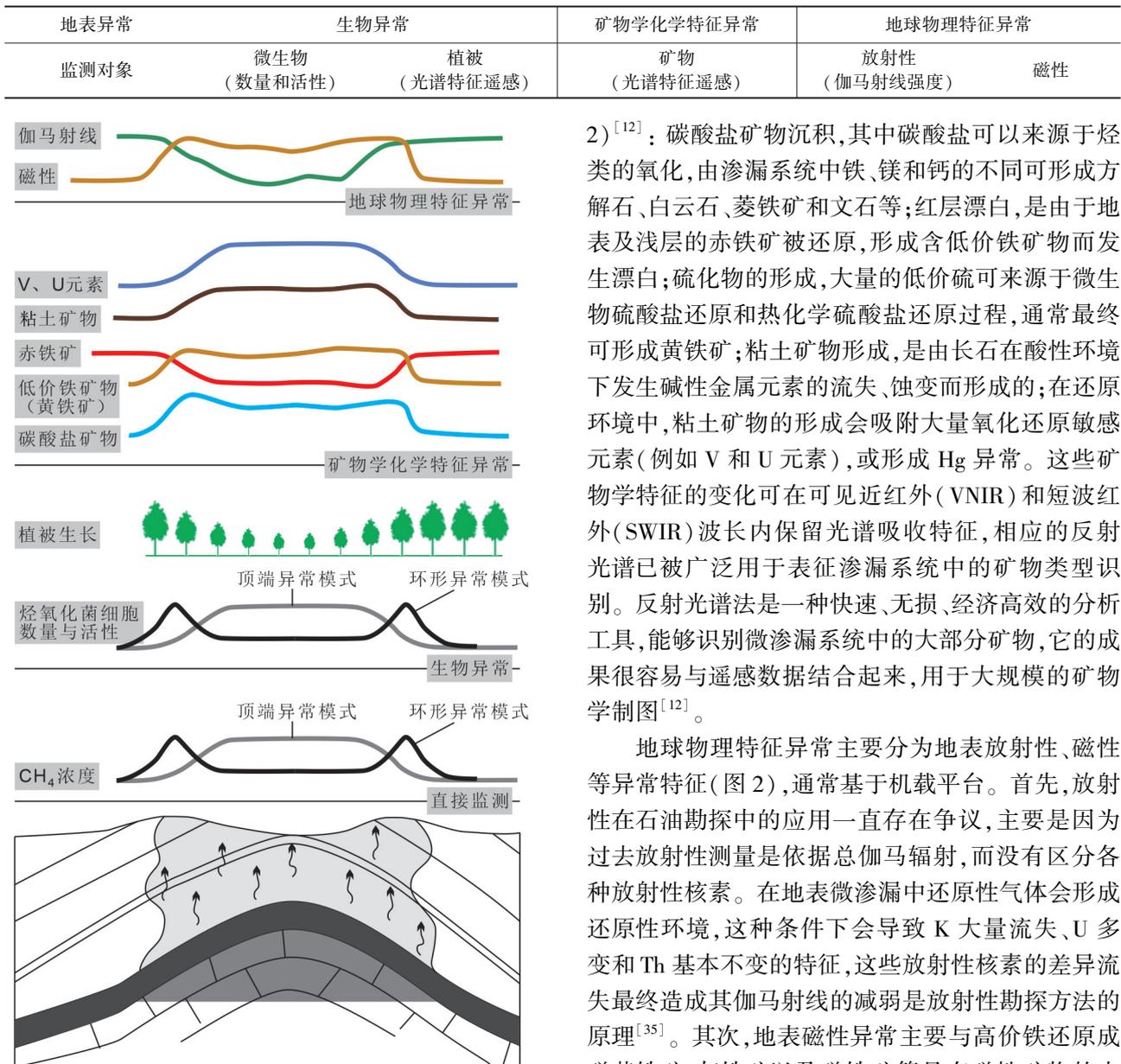
3.1 监测方法

含油气盆地甲烷微渗漏在一定程度上会改造地表物理、化学及生物特征,通过监测这些变化的方法为间接监测方法。引发的地表一系列变化主要包括生物(微生物和植被)异常、矿物学化学特征变化以及地球物理异常(图2),监测方法见表3。

生物异常主要包括两个方面,分别是微生物异常和植被异常。首先,油气藏上方含甲烷微渗漏会引起甲烷氧化菌和烃氧化菌细胞数量和活性的增加,是微生物勘探的理论基础,可响应地表甲烷浓度异常特征而呈现顶端异常和环形异常模式(图2)。采样过程需要保证土壤样品不受空气及其他微生物的影响,需要立即装入无菌样袋中低温保存,并移至生物实验室进行分析。针对烃氧化菌数量和活性的测试分析方法,主要有培养定量检测技术、活性检测

表 3 甲烷微渗漏间接监测方法

Table 3 Indirect monitoring methods of methane microseepage

图 2 甲烷微渗漏地表物理、化学及生物异常特征^[12]Fig.2 Surface physical, chemical and biological anomalies of methane microseepage^[12]

技术、免培养 DNA 检测技术以及原位微生物群落解析技术^[14,30]。其次,微渗漏也可能导致植被的细微变化,例如叶片叶肉结构、叶绿素含量、含水量和干物质含量的变化,最终可能会导致植被的生产潜力降低(图 2)^[34]。相对于微生物微观的变化,植被的变化更加直观,因此可以基于叶片反射率和透射比光谱特征,依托于遥感技术对地表植被生化和生物物理参数进行追踪分析,以到达油气勘探的目的^[34]。

矿物学及化学特征的变化常与地表微渗漏形成的酸性、还原环境有关,主要有以下几个方面(图

2)^[12]: 碳酸盐矿物沉积,其中碳酸盐可以来源于烃类的氧化,由渗漏系统中铁、镁和钙的不同可形成方解石、白云石、菱铁矿和文石等;红层漂白,是由于地表及浅层的赤铁矿被还原,形成含低价铁矿物而发生漂白;硫化物的形成,大量的低价硫可来源于微生物硫酸盐还原和热化学硫酸盐还原过程,通常最终可形成黄铁矿;粘土矿物形成,是由长石在酸性环境下发生碱性金属元素的流失、蚀变而形成的;在还原环境中,粘土矿物的形成会吸附大量氧化还原敏感元素(例如 V 和 U 元素),或形成 Hg 异常。这些矿物学特征的变化可在可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)波长内保留光谱吸收特征,相应的反射光谱已被广泛用于表征渗漏系统中的矿物类型识别。反射光谱法是一种快速、无损、经济高效的分析工具,能够识别微渗漏系统中的大部分矿物,它的成果很容易与遥感数据结合起来,用于大规模的矿物学制图^[12]。

地球物理特征异常主要分为地表放射性、磁性等异常特征(图 2),通常基于机载平台。首先,放射性在石油勘探中的应用一直存在争议,主要是因为过去放射性测量是依据总伽马辐射,而没有区分各种放射性核素。在地表微渗漏中还原性气体会形成还原性环境,这种条件下会导致 K 大量流失、U 多变和 Th 基本不变的特征,这些放射性核素的差异流失最终造成其伽马射线的减弱是放射性勘探方法的原理^[35]。其次,地表磁性异常主要与高价铁还原成磁黄铁矿、灰铁矿以及磁铁矿等具有磁性矿物的出现有关,而大多数地下油气藏是由磁异常和辐射异常属性同时存在而得到证实^[35]。另外,基于地震反射、重力、磁力、电—磁等地球物理方法是揭示地下渗漏构造(例如气烟囱)的有利工具^[17],因此不在本文中介绍。

3.2 现场干扰因素及处理

对于微生物勘探方法,现场主要存在两个干扰因素,一是土壤样品的存储,二是其他微生物的影响。前者是由于不管是自然风干还是冷冻保存都可能降低土壤样品中甲烷氧化菌数量和基因数,因此需要使用一致的保存方法以保证未改变原有的微生物变化趋势。后者是由于在取样或存储过程中,其他微生物的混入将以共存或竞争的方式影响土壤

甲烷氧化菌的丰度,因此会采用伽马射线辐射对密封样袋进行无菌处理^[14]。另外,为避免土壤其他微生物对甲烷来源判断的干扰,在微生物勘探中往往需要同时分析多种菌种,包括专性、兼性烃氧化菌以及产甲烷菌;因此微生物群落解析中的高通量测序技术更为适用,因为其具有免培养、原位、实时、高效以及大量 DNA 数据的特点,将是微生物勘探技术的核心^[14]。

目前,矿物学组合在 VNIR-SWIR 波长范围内显示的光谱特征是遥感勘探的基础,难以区分不是由天然气微渗漏引起的矿物变化;并且缺乏热红外(LWIR)数据对其他矿物变化的追踪,例如二氧化硅的富集和长石的蚀变^[12]。因此,为补充现场光谱特征的遥感分析,通常还需要对岩矿变化进行室内测试分析,除了必不可少的光谱学特征研究,还应该包括与之匹配的岩矿 XRD 分析、光学显微镜观察等。另外,遥感光谱技术只是测量地表最上面部分反射或发射的能量,无法穿透表面,所以这项技术在分析被稀疏植被覆盖(<30%)的地表时是有效的^[12]。当植被覆盖严重时,地表矿物的光谱特征研究则不再适用,这时应该考虑遥感的其他应用领域,包括植被的光谱特征^[34]。

4 油气评价与地表异常判识

4.1 油气地化数据分析

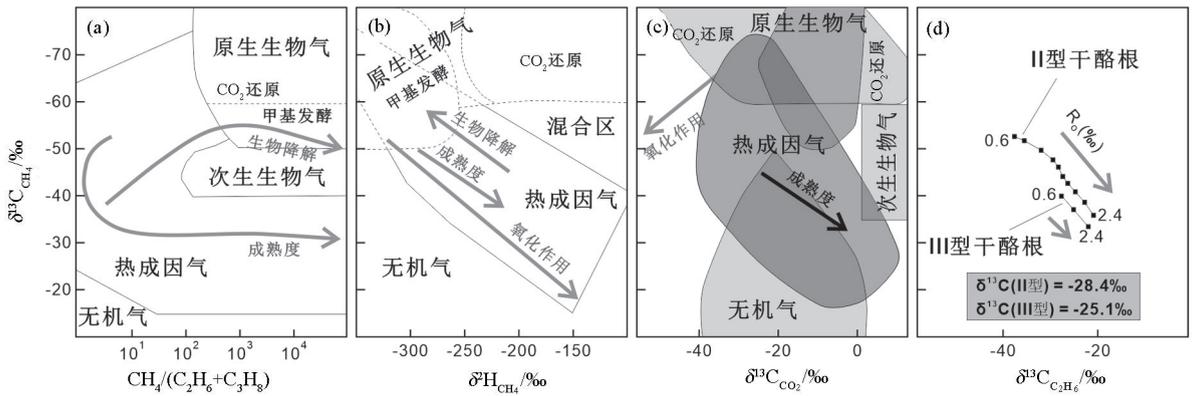
通过以上甲烷微渗漏直接监测方法及室内地化实验测试,可获得天然气的化学组成,包括各种气体组分、含量及同位素特征。对获得的地球化学数据进行分析探究天然气来源和次生变化,以及潜在的烃源岩类型和成熟度,这一直以来是理解油气藏演化的重要工具。

天然气来源分析:即主要对气体的热成因还是生物成因进行分析,前人分析总结为图 3a、b。微生物成因天然气几乎由甲烷组成,其 Bernard 比($C_1/(C_2+C_3)$)非常高(>500),是区别于热成因气的最基本特征^[36]。而在有机质热解的初始阶段(低成熟度),富含 C_2 至 C_5 的烷烃,随着温度的升高和成熟度的增加,由于重烷烃的热裂解,气体变得“干燥”,Bernard 比值会增高。当干燥的天然气垂直向上运移过程中,受到显著分子分馏(色层效应)或次生甲烷影响时,Bernard 比值会高,且地表或浅层储层的分析会将热成因天然气误认为是微生物成因^[36]。于是,还需要通过更可靠的同位素特征进行确认。值得注意的是,地表土壤中轻烃气体含量很低,并且

大气空气干扰和地表微生物的改造不能完全避免,需要采集地表深处的土壤来尽可能地减少表层环境及活跃生命的影响(如上文所述)。同时,还需要通过 PreCon 装置进行痕量气体预浓缩,与稳定同位素质谱仪结合进行测试分析,该方法甚至可以在气体样小于 100 mL 中精确测试约 10×10^{-6} 级别的气体分子同位素组成^[5]。生物过程会富集轻同位素,即 ^{12}C 和 ^1H 。地下微生物成因 CH_4 的特征是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值常低于 -50‰ ,而热成因 CH_4 具有更高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值,通常在 $-50\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 之间,高度成熟的气体可以达到 -20‰ (图 3a)^[20]。尽管微生物和热成因 CH_4 同位素特征在某些部分重叠,但随着成熟度增高,热成因 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 和 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 值越高,可区别于微生物成因(图 3b)^[20]。因此,结合地表微渗漏气体组成和含量,以及碳氢同位素特征可以有效地推断天然气来源。

次生变化分析:次生变化主要可以分为烃类氧化、色层效应以及油气生物降解和次生甲烷生成。首先,生物与非生物烃类氧化都会造成剩余甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 和 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 值升高,如图 3b、c。其次,色层效应是发生在天然气迁移到表面的过程中,与泥质固体颗粒上的差异吸附有关,碳数越小越容易通过,从而使渗出的气体比深层气藏更干燥(高 Bernard 比),造成天然气来源分析的困难^[36]。最后,油气微生物降解和次生甲烷的生成是最重要的次生变化,如果发生,深度将不会超过距离地表 2.5 km 深度,温度低于 80 °C ^[3]。次生甲烷是通过石油或天然气生物降解产生的 CO_2 ,并使生成的 CO_2 还原形成甲烷,整个过程会造成残余 CO_2 富集 ^{13}C ,是判断次生生物气的重要依据(图 3c)^[20]。另外,在油气生物降解和次生甲烷生成中,正构烷烃比其相应的异构烷烃更容易被降解,产物更富集轻同位素,以及低成熟度油气降解更倾向去除高碳数碳氢化合物等现象,都可为指示油气生物降解^[3]。

烃源岩类型及其成熟度分析:当甲烷微渗漏源为热成因时,烃源岩特征可通过 Berner-Faber 成熟度理论模型进行反演^[37]。随着成熟度增高,在单一烃源岩热解过程中,当不考虑次生变化及其他烃源气体的混入,生成的甲烷、乙烷、丙烷等 $\delta^{13}\text{C}$ 值越高,具有 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6} < \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3\text{H}_8}$ 的排序特点是采用成熟度模型的基础^[36]。以波兰的 Outer Carpathians 地区含油气盆地为例,前人绘制了 Berner-Faber 成熟度模型(图 3d)^[3],需注意的是图中省略了偏腐殖型烃源岩生油过程。图 3d 中每种干酪根类型和

图3 天然气地化分析投图^[3,20,37]Fig.3 Geochemical analyses of natural gas^[3,20,37]

$\delta^{13}\text{C}$ 值都有一条理论线,微渗漏气体最终会落到或接近给定的线上,这条线则代表了最有可能的烃源岩。

4.2 背景与异常

上述直接或间接的监测方法获得的甲烷微渗漏数据要应用于异常区的圈定,以便于确定有利勘探区。不管是哪种甲烷微渗漏数据指标,从地表背景信号中客观、准确地分离异常信号的数理基本方程和方法是地表油气勘探的关键要求。然而地表异常信号往往具有复杂性^[38-40],主要是因为:地表介质背景不是一个平面而是一个曲面,包括土壤性质、水文条件甚至气候温度等,其干扰会掩盖真实的异常信息;不同地区地表微渗漏具有不同的地下地质条件,包括盖层厚度、埋藏深度、油气藏地层压力以及断层裂隙特征等。这些复杂的背景信号问题在异常数据处理及识别中影响巨大,如果不能消除其干扰,地表甲烷微渗漏油气勘探将受到很大影响。因此,为提高地表微渗漏数据处理水平,需要建立一系列消除地表介质干和地质条件影响的数理方法,涉及统计学、分形理论、小波分析和人工神经网络等^[38-40]。

单变量异常识别:有助于检验是否存在干扰因素,是进行迭代处理的,计算方法见表4。当背景与异常满足多重正态分布时,阈值(即背景和异常之间的边界)由背景和异常总体的均值、标准差和先验概率确定;其中,如果背景和异常数据之间存在重叠,即过渡带,需要采用参数迭代法计算过渡带的上下限,以评估异常可靠性。当数据不满足多重正态分布时,应采用多重分形模型应用于单变量异常识别。需要注意的是,以往认为当数值大于背景均值+标准差时被视为异常,这种确定地表微渗漏异常的公式是不确切的。另外,对于地表介质及地质条件的影响需要进行对数归一化处理,以减少其影响,可采用小波分析的方法。

多变量异常识别:可利用传统的因子分析、聚类分析以及主成分分析等多种数据异常进行基本的划分归类。这种情况下,多变量重叠范围更小,参数迭代在多变量识别中会更加有效,计算方法见表4。当某一类数据满足多重正态分布时,采用后验概率对所有数据样本进行分类,并将分类结果作为初始已知样本,通过迭代处理直到样本分类准确率达到预期,然后计算多变量异常的综合参数。当某一类数据不满足正态分布时,可将逻辑乘法聚类分析结果作为初始已知样本,如果每一对地表渗漏参数之间执行这种逻辑乘法,则将是一种逻辑策略的表达,即采用人工神经网络对多变量异常进行识别^[40]。

在油气勘探实践中,从背景中识别出异常的数理方法还有许多,包括层次分析、特征值分析、多因素评价、点群分析、信息熵等^[33,40-41],在这里难以介绍全面。但不管采用哪种方法,其本质都是数理统计学的实际应用,即把总体数据进行归类或分解,并从曲面的背景中提取出异常信息。对于异常识别而言,思路可分为两种:仅从数据出发,对于显著的异常值进行简单的划分(可通过均值、方差、变异系数等),多应用于背景与异常差异显著的理想情况下;把多种背景干扰因素及其空间分布考虑进来,尽量消除曲面背景,客观提取信息,如本文介绍的方法。

5 综合勘探

在油气勘探中,渗漏可以作为地下石油系统的天然“窗口”。渗漏区的发育需要两个基本前提,分别是岩石渗透性(断层、微裂缝、节理等)以及气体起源(烃源岩或储层),而渗漏则是石油系统的地表呈现,为油气勘探提供了第一条线索。特别是在20世纪化石燃料工业时代中,至少一半的探明储量是通过在宏观渗漏区附近钻探发现的,包括中东的大

表 4 背景与异常数理分析及其计算方法^[38-39]Table 4 Mathematical analyses and calculation methods of backgrounds and anomalies^[38-39]

数理分析		计算模型及公式
单变量异常阈值计算	符合多重正态分布	$l_1 = \frac{U_{i-1}S_i^2 - U_iS_{i-1}^2 + S_iS_{i-1}\sqrt{(U_i - U_{i-1})^2 + (S_{i-1}^2 - S_i^2)\ln(N_iS_{i-1}/N_{i-1}S_i)}}{S_i^2 - S_{i-1}^2}, \text{当 } S_{i-1} \neq S_i, U_{i-1} < l_1 < U_i;$ $l_2 = 0.5(U_i + U_{i-1}) + \frac{S_i^2}{U_i - U_{i-1}} \ln\left(\frac{N_{i-1}}{N_i}\right), \text{当 } S_{i-1} = S_i;$ 式中 U_i 为均值, S_i 为标准差, N_i 为先验概率, l_1 为计算结果
	不符合正态分布	多重分形模型: $A(\geq \rho) \propto \rho^{-\beta}$; 式中 $A(\geq \rho)$ 代表等高线包围的区域(等高线值 $\geq \rho$), \propto 表示成正比, β 为一个指数, 对应于数据范围等高线集假定的值
小波分析 (对数归一化)		$Y_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\text{MAX-MIN}};$ 式中 X_i 为初始数据, Y_i 为计算结果 密度分布函数 $F_i(X) = (2\pi)^{-m/2} \Sigma_i ^{-1/2} \exp[-0.5(X - \bar{u}_i)\Sigma_i^{-1}(X - \bar{u}_i)]$; 后验概率 $P_i = \frac{N_i F_i(X)}{\sum_{j=0}^{i-1} N_j F_j(X)}$; 多变量异常识别综合参数 $G_i = \frac{P_i - P_{i\text{MAX}}}{P_i + P_{i\text{MAX}}}$; 式中 m 为变量数, \bar{u}_i 为期望向量, Σ_i 为协方差矩阵
多变量异常的综合参数	符合多重正态分布	
	不符合正态分布	逻辑乘法 $\gamma_{j,k} = 2 \frac{ S_j \cap S_k }{ S_j + S_k }, j \neq k$; 式中 S_j 为关联的每个单变量的总体; 人工神经网络可以基于逻辑乘法聚类分析结果作为初始已知样本

型油田,如科威特的 Burgan 油田^[24]。随着地球有限的宏观渗漏区被逐渐发现,目前难以发现新的宏观渗漏区。因此进入 21 世纪以来,微渗漏勘探是发现地下油气的重要推动力。不仅如此,通过微渗漏勘探表明,在 89% 的枯竭油气井周边还可以发现有利油气开发区^[19]。在国内,微渗漏监测的理论技术非常有利于预测远景区带和开发目标,已在松辽盆地、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地等地区实现了油气井商业开采^[17,42]。

如上文所述,微渗漏中的气体以甲烷和轻烃(C_2 - C_3)为主,气体的分子和同位素特征可供研究人员在钻探前评估地下油气潜力、相关烃源岩性质以及天然气成因和质量(例如浅层微生物气的存在、深层的热成因气聚集、石油生物的降解和非烃气体的混合),这些是油气评价的第一手重要资料。随后,不管采用直接监测方法还是间接监测方法,正确认识含甲烷气体微渗漏引起的地表异常特征与形态对追踪地下油气藏至关重要。通常情况,地表异常可以有各种形状,主要分为:环形异常模式,异常值大致围绕油气藏含油气面积分布;顶端异常模式,异常值处于油气藏正上方浓集分布,油气藏外围为背景值;线形异常模式,通常与断层面或不整合渗漏有关。

但在实际勘探中,直接和间接监测方法存在大量的现场干扰因素,通过对上文论述的总结,主要影响包括了地表地质与环境特征、气候与气象特征、人

为采样过程以及实验测试方法的局限性。针对这些干扰虽然有对应的现场处理方法,但是往往只是尽可能地减小影响,不能够做到完全消除,于是实践中某一微渗漏监测指标的异常分布模式有可能不是地下油气藏的响应,甚至失去了其有效性^[33]。不仅如此,地表异常分布模式形状不一定与下伏油气储层完全吻合,不同监测数据之间也会存在差异。前者是因为地质体结构特征,包括油气成藏模式、盖层渗透性、断层及裂隙分布特征等^[23];后者是因为不同的监测指标具有不同的形成机理和影响因素^[17]。例如,Sechman 等^[23]以波兰 Carpathians 地区含油气盆地作为研究对象时,发现微渗漏间接指标(碳酸盐矿异常)与地下油气藏不存在对应关系;但随着其他指标的配合与研究的深入,发现间接指标响应的是过去油气运移特征,为进一步认识复杂的油气运移及渗漏机理提供了一个积极的实例。因此,单一的甲烷微渗漏监测方法都有可能会导致片面的认识,通常需要综合其他的方法佐证,共同支撑起油气勘探项目。

为了客观准确地表征地表甲烷微渗漏并应用于油气勘探,21 世纪以来已进入综合勘探时代,这将是未来的发展趋势(图 4)。第一,地表微渗漏监测数据都应与地球物理勘探方法相结合,特别是反射地震法。地震数据可对地质体沉积及构造特征进行成像,描绘出有利成藏区域,渗漏的优势通道(断层

及裂隙),以及气烟囱等渗漏构造。基于这些地球物理数据,地表微渗漏异常的分布特征将有据可依。第二,要在以地表甲烷气体异常为特征的区域发现油气藏,需要将不同的微渗漏直接或间接监测方法结合起来,基于合理的数理分析方法,从不同角度解译出异常成因并绘制地表异常分布特征。只有通过不同监测方法之间的严格对比,以及方法之间的相互佐证,才能客观地描绘出微渗漏地表异常分布,降低勘探风险(图4)。

针对国内复杂的沉积构造、地形、环境以及气候等特征,通过微渗漏进行地表油气勘探较为困难,综合勘探的思路势在必行,只有这样才能促进地表油

气勘探的持续发展。在此基础上,现场的动态实时监测以及数据库的完善将是今后快速发展的方向。一方面,地下碳氢化合物的生成、迁移和聚集是动态的,地表甲烷微渗漏也会响应开采区储层枯竭或补给的动态特征,其动态监测可以用来表征剩余油气在成熟油田分布情况,以确定生产界限,并有助于油田开发和中后期的开发管理^[2,30]。另一方面,已建立的地表化探数据库收录了国内主要油气田地区的相关地球化学数据,是油气勘探的重要资源和基础^[43];而微生物基因数据和光谱遥感数据库亟待补充完善,多元数据的结合对于中国含油气盆地油气远景区和有利区带划分必将具有重大指导意义。

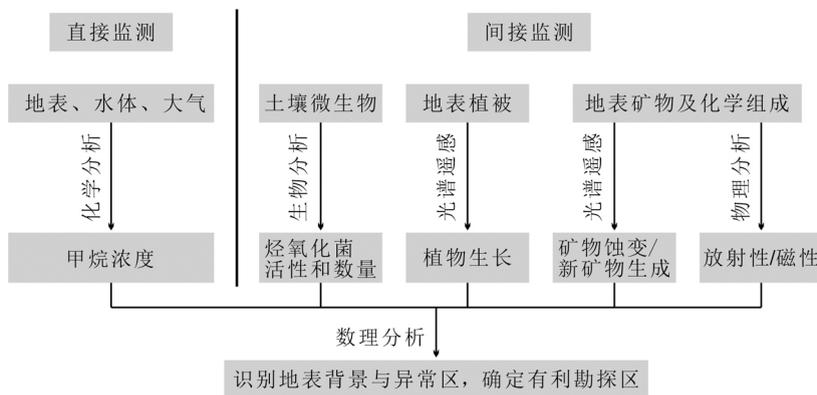


图4 有利油气远景区的甲烷微渗漏综合勘探流程

Fig.4 Flow chart of comprehensive exploration of methane microseepage for favorable oil-gas prospect areas

6 结论与认识

1) 含油气盆地微渗漏气体以甲烷为主,是石油渗漏系统中客观存在的。甲烷微渗漏以浮力气泡为主要运移方式,虽然在地表不可见,通量小且易受地表环境或地质因素干扰,但仍是现在以及将来地表油气勘探的重要研究对象。

2) 对含油气盆地甲烷微渗漏监测方法主要分为直接和间接两种方式。直接监测法是对地表、水体和大气进行直接取样分析,获得的气体分子和同位素组成特征可用于油气评价;间接监测法是以地表的微生物、植被、矿物(包括化学特征)以及物理性质(包括放射性及磁性)为分析对象。

3) 由直接和间接监测方法获得的地表数据要从背景中分离出异常,主要通过合理的数理分析方法,包括统计学、分形理论、小波分析和人工神经网络等。

4) 进入综合勘探时代,要充分重视甲烷微渗漏机理是基础,通过高精度的实验测试技术与恰当的数理分析等手段,结合多种测试数据相互验证来确

定背景与异常,才能最终应用于油气勘探,发挥其独特的重要作用。

参考文献 (References):

- [1] Etiope G. The Earth's hydrocarbon degassing [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [2] Sechman H, Kotarba M J, Kędzior S, et al. Fluctuations in methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization in abandoned and active coal mines in the SW part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland [J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 227: 103529.
- [3] Kotarba M J, Więclaw D, Bilkiewicz E, et al. Origin, secondary processes and migration of oil and natural gas in the central part of the Polish Outer Carpathians [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 121: 104617.
- [4] Etiope G, Ehlmann B L, Schoell M. Low temperature production and exhalation of methane from serpentinized rocks on Earth: A potential analog for methane production on Mars [J]. Icarus, 2013, 224(2): 276-285.
- [5] Etiope G, Schwietzke S. Global geological methane emissions: An update of top-down and bottom-up estimates [J]. Elementa-Science of the Anthropocene, 2019, 47(7):1-9.
- [6] 许跃,唐俊红,王国建,等.含油气盆地地质甲烷释放研究综述 [J].地质学报,2016,90(3):553-558.
Yu Y, Tang J H, Wang G J, et al. A comprehensive review of ge-

- ologic methane emission in hydrocarbon-prone areas [J]. *Acta Geological Sinica*, 2016, 90(3): 553–558.
- [7] 唐俊红, 高忆平, 施明才, 等. 含油气盆地微渗漏甲烷运移机制研究进展[J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2019, 39(2): 64–69.
- Tang J H, Gao Y P, Shi M C, et al. A preliminary review of gas migration mechanisms of methane microseepage in hydrocarbon-prone areas [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University: Natural Sciences*, 2019, 39(2): 64–69.
- [8] Ciotoli G, Procesi M, Etiopo G, et al. Influence of tectonics on global scale distribution of geological methane emissions [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2305.
- [9] 王国建, 汤玉平, 唐俊红, 等. 断层对烃类微渗漏主控作用及异常分布影响的实验模拟研究[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 21–27.
- Wang G J, Tang Y P, Tang J H, et al. Experimental simulation of the effect of faults on vertical hydrocarbon microseepage [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 21–27.
- [10] 王国建, 唐俊红, 汤玉平, 等. 油气藏上方地层中不同赋存态微渗漏轻烃特征初步模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 261–266.
- Wang G J, Tang J H, Tang Y P, et al. Simulation of microseepage of light hydrocarbon of different occurrence states in strata above reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(2): 261–266.
- [11] He J, Wang J, Milsch H, et al. The characteristics and formation mechanism of a regional fault in shale strata: Insights from the Middle-Upper Yangtze, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 121: 104592.
- [12] Asadzadeh S, de Souza Filho C R. Spectral remote sensing for on-shore seepage characterization: A critical overview [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 168: 48–72.
- [13] Allek K, Boubaya D, Bouguern A, et al. Spatial association analysis between hydrocarbon fields and sedimentary residual magnetic anomalies using Weights of Evidence: An example from the Triassic Province of Algeria [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 135: 100–110.
- [14] 顾磊, 许科伟, 汤玉平, 等. 基于高通量测序技术研究页岩气区上方微生物多样性[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 443–450, 458.
- Gu L, Xu K W, Tang Y P, et al. Microbial diversity above a shale gas field using high-throughput sequencing [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 443–450, 458.
- [15] Abrams M A. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(4): 457–477.
- [16] Sobolev I S, Bredikhin N P, Bratec T, et al. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 95: 33–44.
- [17] 齐小平, 张友焱, 杨辉, 等. 柴达木盆地三湖地区天然气有利勘探区带(目标)遥感物化探综合分析与评价[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(5): 17–26.
- Qi X P, Zhang Y Y, Yang H, et al. Analysis and evaluation of beneficial gas exploration zone based on remote sensing geophysical and geochemical methods in Sanhu area of Qaidam basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(5): 17–26.
- [18] 王国建, 杨帆, 卢丽, 等. 采样季节对油气化探中游离烃方法的影响讨论[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 166–170, 429.
- Wang G J, Yang F, Lu L, et al. Influence of sampling seasons on soil gas method in surface geochemical prospecting for oil and gas [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(4): 166–170, 429.
- [19] Schumacher D. Integrating hydrocarbon microseepage data with seismic data doubles exploration success [C]//Proceedings thirty-fourth annual conference and exhibition, Indonesian Petroleum Association, Indonesia, 2010.
- [20] Milkov A V, Etiopo G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples [J]. *Organic Geochemistry*, 2018, 125: 109–120.
- [21] Milkov A V. Worldwide distribution and significance of secondary microbial methane formed during petroleum biodegradation in conventional reservoirs [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(2): 184–207.
- [22] 赵静, 梁前勇, 张莉, 等. 基于酸解烃判别台湾海峡盆地西部坳陷含油气系统的油气藏属性[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 436–441.
- Zhao J, Liang Q Y, Zhang L, et al. Oil and gas reservoir attribute discrimination based on surface sediment acid-extraction hydrocarbon in the western depression of Taiwan Strait Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(3): 436–441.
- [23] Sechman H, Guzy P, Kaszuba P, et al. Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: A case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2020, 109(5): 1853–1867.
- [24] 冯俊熙, 杨胜雄, 孙晓明, 等. 琼东南盆地甲烷微渗漏活动地球化学示踪研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2018, 40(3): 63–75.
- Feng J X, Yang S X, Sun X M, et al. Geochemical tracers for methane microleakage activity in the Qiongdongnan basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2018, 40(3): 63–75.
- [25] Hunt J M. *Petroleum geochemistry and geology* [M]. New York: Freeman and Co., 1996.
- [26] 杨金秀, 宋朋霖, 王红亮, 等. 琼东南盆地天然气水合物成藏模式及主控因素分析[J/OL]. 石油与天然气地质. 2019: 1–17 [2021-02-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4820.te.20191126.1454.004.html>.
- Yang J X, Song P L, Wang H L, et al. Gas hydrate accumulation model and major controlling factors in Qiongdongnan Basin [J/OL]. *Oil & Gas Geology*, 2019: 1–17 [2021-02-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4820.te.20191126.1454.004.html>.
- [27] Klusman R W, Saaed M A. Comparison of light hydrocarbon microseepage mechanisms [G]//Schumacher D, Abrams M A. Hydrocarbon migration and its near-surface expression. Oklahoma: AAPG Memoir. 1996: 157–168.
- [28] Abrams M A. Marine seepage variability and its impact on evaluating the surface migrated hydrocarbon seep signal [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 121: 104600.
- [29] Hirst B, Gibson G, Gillespie S, et al. Oil and gas prospecting by ultra-sensitive optical gas detection with inverse gas dispersion modelling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): 1–4.
- [30] Zhou Q, Xu X, Xu H, et al. Surface microbial geochemistry of the Beihanzhuang Oilfield, northern Jiangsu, China [J]. *Journal of*

- Petroleum Science and Engineering, 2020, 191: 107140.
- [31] 汤玉平, 宁丽荣, 蒋涛, 等. 积雪油气化探方法试验研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 287-291.
Tang Y P, Ning L R, Jiang T, et al. Experimental research on the oil and gas geochemical exploration method of snow cover [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 287-291.
- [32] 赵克斌, 陈银节, 孙长青. 油气化探异常的稳定性及油气地质意义[J]. 地质通报, 2009, 28(11): 1620-1627.
Zhao K B, Chen Y J, Sun C Q. Stability and petroleum geological significance of hydrocarbon geochemical Anomaly [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(11): 1620-1627.
- [33] 杨俊, 沈忠民, 王国建, 等. 油气化探异常双因素评价方法——以渤海湾盆地济阳拗陷临南—钱官屯地区为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 295-302.
Yang J, Shen Z M, Wang G J, et al. Double-factor evaluation for oil and gas geochemical anomalies: A case study of Linnan-Qiantun areas, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 295-302.
- [34] Huang S, Chen S, Wang D, et al. Hydrocarbon micro-seepage detection from airborne hyper-spectral images by plant stress spectra based on the PROSPECT model [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 74: 180-190.
- [35] Senouci M, Allek K. Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon micro-seepages [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 181: 104145.
- [36] Baciuc C, Ionescu A, Etiope G. Hydrocarbon seeps in Romania: Gas origin and release to the atmosphere [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89: 130-143.
- [37] Berner U, Faber E. Empirical carbon isotope/maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous organic matter, based on dry, open-system pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(10): 947-955.
- [38] Zhang L, Bai G, Zhao K, et al. Restudy of acid-extractable hydrocarbon data from surface geochemical survey in the Yimeng Uplift of the Ordos Basin, China: Improvement of geochemical prospecting for hydrocarbons [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(5): 529-542.
- [39] Zhang L, Bai G, Zhao Y. Data-processing and recognition of seepage and microseepage anomalies of acid-extractable hydrocarbons in the south slope of the Dongying depression, eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 385-402.
- [40] 荣发准, 陈昕华, 孙长青, 等. 近地表油气化探异常的确定与解释评价[J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 212-217, 24.
Rong F Z, Chen X H, Sun C Q, et al. The determination and interpretation of near-surface geochemical oil-gas anomaly [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 212-217, 24.
- [41] 王珺璐, 贺永红, 王萌, 等. 层次分析和特征值分析相结合的物化探综合油气评价[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 762-767.
Wang J L, He Y H, Wang M, et al. The comprehensive evaluation of oil and gas exploration combining hierarchy analysis and eigenvalue analysis [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 762-767.
- [42] 孙忠军. 中国油气化探的成功案例[J]. 地质通报, 2009, 28(11): 1562-1571.
Sun Z J. Case histories of hydrocarbon survey success in China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(11): 1562-1571.
- [43] 汤玉平, 赵克斌, 吴传芝, 等. 中国油气化探的近期进展和发展方向[J]. 地质通报, 2009, 28(11): 1614-1619.
Tang Y P, Zhao K B, Wu C Z, et al. Recent advances and developing trend of hydrocarbon geochemical exploration in China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(11): 1614-1619.

Research progress of methane microseepage in petroliferous basins and its significance for oil-gas exploration

ZOU Yu¹, WANG Guo-Jian¹, YANG Fan², CHEN Yuan¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, China; 2. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Great progress has been made in the formation mechanisms of surface characteristics of gas microseepage since the start of the 21st century, which is significant for oil-gas exploration. The microseepage in petroliferous basins is dominated by methane, which migrates nearly vertically from source rocks or reservoirs toward ground surface. The chemical, physical, and biological variation characteristics produced on the ground surface approximately reflect the oil reservoirs underground. Therefore, the methane microseepage is an objective and important part of the petroleum seepage system and has replaced microseepage as the most effective window for the tracing of underground reservoirs on the ground surface at present. Methane microseepage can be directly monitored on ground surface and in water and atmosphere, and the component concentrations and isotopic composition of methane-bearing hydrocarbon gases serve as the first-hand important data for the assessment of underground oil and gas. The data indirectly monitored mainly source from microorganisms, vegetation, minerals, radioactivity, and magnetism on the ground surface. Similar to the geochemical exploration data directly obtained, these abnormal data can be distinguished from the background values of the ground surface far away from the oil reservoirs, and the distribution areas of the anomalies will become important targets of favorable exploration areas. It will play an increasingly important role in the future integrated oil and gas exploration to gain in-depth understanding of methane microseepage mechanisms, avoid single monitoring method and one-sided understanding, transform ideas to adopt surface integrated monitoring methods, and establish new mathematical analysis systems.

Key words: methane; microseepage; integrated exploration; research progress

(本文编辑: 蒋实)