

doi: 10.11720/wtyht.2024.1037

王惠艳,唐瑞玲,毕婧.天然热释光测量技术在多年冻土区天然气水合物勘查中的应用[J].物探与化探,2024,48(1):24-30. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1037>Wang H Y, Tang R L, Bi J. Application of natural thermoluminescence measurement technique in natural gas hydrate exploration in permafrost areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 24-30. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1037>

天然热释光测量技术在多年冻土区 天然气水合物勘查中的应用

王惠艳¹, 唐瑞玲¹, 毕婧²

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000; 2. 山东省地质测绘院, 山东济南 250014)

摘要: 冻土区天然气水合物形成机理复杂,成因多源,发展多种捕捉微渗漏信息技术,提高勘查成功率是亟需解决的难题。本文首次把天然热释光测量技术应用于冻土区天然气水合物勘查中,利用 RGD-6 型热释光剂量计测试了祁连山冻土区土壤样品热释光强度,总结出适用于木里冻土区天然气水合物勘查的加热程序,以及样品取样粒级。试验结果表明,祁连山冻土区土壤样品最佳取样粒级为-60~100 目,最佳升温速率应设置为 5 °C/s,最佳升温区间为 50~400 °C。根据祁连山冻土区土壤天然热释光强度异常特征,圈定了天然气水合物在地表的异常边界,天然热释光强度异常模式为顶部异常,与烃类异常模式存在良好的对应关系。土壤天然热释光不受微生物的影响,灵敏度高,是一种很有前景的寻找天然气水合物的方法,在今后的冻土区天然气水合物资源勘查过程中可以将这种技术加以推广。

关键词: 天然热释光; 粒级; 温度; 天然气水合物; 冻土区; 祁连山**中图分类号:** P632**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)01-0024-07

0 引言

热释光油气勘查技术经历了从热释光剂量测量(thermoluminescence radiometric survey)到天然热释光测量(natural thermoluminescence survey)的发展历程。前者是测量埋置在土壤中的热释光剂量片吸收的放射性剂量^[1-2],后者是测定土壤中天然矿物在一定地质年代内接受天然辐射而产生的累积热释光强度^[3]。热释光剂量测量虽然能够通过累积测量消除或降低一些环境因素的影响(如土壤温度、土壤湿度、取样时间、大气压、降雨情况、地下水位状态以及土壤的冻结和融化状况),但是该项技术需要进行二次测量(埋热释光剂量片和取热释光剂量片),无形中增加了勘探成本。中国油气勘查学家

们发展的天然热释光技术可以直接测定土壤中的石英、长石、方解石等结晶矿物及黏土矿物长期累积的热释光剂量,解决了需要进行二次测量的问题(埋热释光剂量片和取热释光剂量片),降低了热释光勘查成本^[4],在常规油气勘探中取得了良好的勘探结果,成功率高达 61.5%~85%^[5-8]。

天然热释光应用于油气勘探的理论基础源于气体垂向微渗漏原理,地下油气藏以及烃类的微渗漏垂向迁移引起近地表地球化学场的变化,使油气藏与外围环境的辐射场产生差异,进而引起近地表土壤天然热释光的强度异常,由于天然气水合物与常规油气在物源及运移机制上非常相似^[5-7],所以很多学者把热释光技术应用到天然气水合物领域:张志攀等^[9-10]在羌塘盆地天然气水合物勘探中,发现了热释光高值异常呈串珠状分布的特征,可以大致

收稿日期: 2023-01-30; **修回日期:** 2023-08-21**基金项目:** 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(AS2015J01, AS2016Y01)**第一作者:** 王惠艳(1988-),女,硕士,工程师,毕业于中国地质大学(北京),主要从事油气地球化学和环境地球化学研究工作。Email: wang-huiyan@mail.cgs.gov.cn**通讯作者:** 唐瑞玲(1985-),女,硕士,高级工程师,毕业于成都理工大学,主要从事分析测试研究工作。Email: truilu@mail.cgs.gov.cn

反映深部天然气水合物藏的位置。张富贵等^[11]在祁连山冻土区试验了天然热释光水合物勘查技术,认为祁连山天然气热释光异常与天然气水合物矿藏关系密切,源于深部水合物矿藏,天然热释光技术可以作为天然气水合物勘查的一种有效辅助手段。尽管众多结果显示天然热释光能有效预测天然气水合物远景区,但是目前土壤热释光测量方法技术仍借鉴在油气勘查中的方法,冻土区天然气水合物与常规油气相比,其成藏模式、成因机理和干扰因素有本质差别,其不同样品的发光曲线特征、最佳取样粒级、最佳升温速率以及最佳升温区间均未开展研究,开发适合冻土区天然气水合物的天然热释光技术尤为必要。因此,本研究的主要目的是:① 采用新型 RGD-6 型热释光剂量仪,试验出适用天然气水合物勘查的最佳土壤粒级、最佳升温速率和最佳升温区间;② 总结土壤天然热释光的异常模式,查明水合物与地表热释光异常间的相互关系;③ 建立天然热释光勘查模型。

1 工作原理

近地表土壤样品中的矿物在漫长的地质年代里接受天然辐射而产生的累积热释光强度,与升温速率、加热温度、辐射剂量、样品粒度有重要相关关

系^[12-13]。土壤样品在加热时,能将储存的辐射能以发光的形式释放出来,这种特性称之为热释光。热释光的强度随加热条件而变化,两者之间的函数关系称为发光曲线,某段区间内发光曲线的面积即总热释光量子数与样品吸收的辐射剂量成线性关系,地表热释光的强弱反应了该地区辐射水平的高低。油气藏上方由于气体垂向微渗漏原理会出现放射性元素局部富集或贫化现象,而对应的地表热释光就会形成局部异常区域^[14],因此可以依据地表热释光异常来探索地下深层油气藏存在。天然气水合物与常规油气在物源和运移机制上非常相似^[15],因此可以探索土壤热释光与深部水合物的响应关系。

2 实验参数及检测结果

2.1 样品来源

选择祁连山天然气水合物已知区进行方法技术试验,采样点布设见图 1,测区面积 4 km²,采样密度 16 点/km²,采样深度 40~60 cm,共采集土壤样品 84 件。样品尽可能在微生物活动层下部采集,样品用铝箔袋包装,在室内阴干,加工过筛。每个待测试样品制备 3 个平行样,每个平行样重 50 mg。样品分析测试工作使用 RGD-6 型热释光剂量仪完成,主要测量土壤 γ 累计辐射剂量,剂量单位为 μGy 。

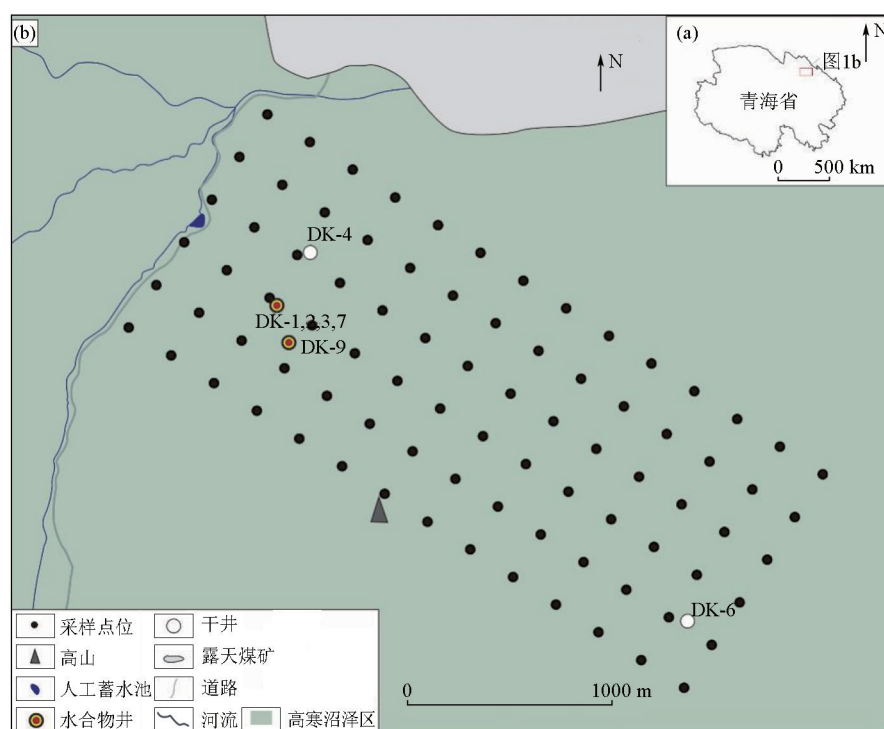


图 1 研究区位置示意 (a) 及采样点位分布 (b)

Fig. 1 Location of the study area (a) and sample point distribution (b) in Qilian Mountain

2.2 取样粒级试验

研究土壤热释光强度与粒度关系是为了实际应用时能选取最佳粒度范围,在实际测量过程中,粒级太大使颗粒间的支撑作用加强,会造成分样不准,直接后果就是测试数据一致性不好。相反,粒度太细会导致颗粒间的吸引力加大,造成分样、放样困难,工作效率降低;且粒度太细,样品受热容易飞扬,会污染仪器。粒级愈细,样品中的结晶矿物(磷光体)的比例减小,黏土矿物的比例增多,存储的能量减少导致发光强度减弱。选择3件土壤样(303、403、503)分别加工至-20~40目、-40~60目、-60~100目、-100~150目、-150~180目和-180目不同粒级,利用新型RGD-6型热释光剂量仪进行土壤天然热释光测量,其中,303样品位于水合物井上方,403样品和503样品位于水合物井周边位置。试验结果显示,3件土壤样品的热释光值随粒度变化的规律基本相似,-60~100目区间对应的热释光强度最大,

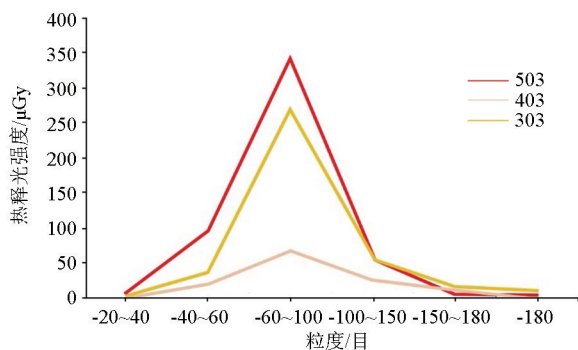


图2 不同粒级热释光强度变化曲线

Fig. 2 The changing curve of intensity of thermoluminescence with different particle size

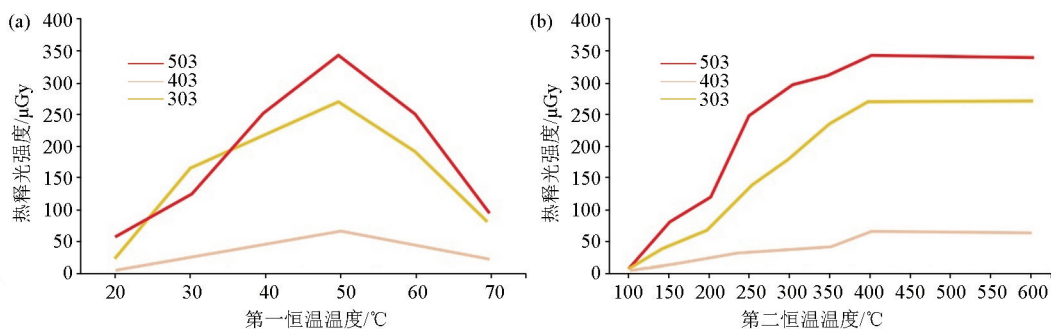


图3 不同升温区间热释光强度变化曲线

Fig. 3 The changing curve of intensity of thermoluminescence in different temperature intervals

2.4 升温速率试验

升温速率的确定也是热释光测量的一个必要条件。过低的升温速率会影响测量工作的效率,而升温速率过快又会降低发光峰的面积,同时也影响仪器的正确使用。为了确定最佳的升温速率,对升温

与天然气水合物井位置不相关,因此多年冻土区天然气水合物土壤热释光测量的土壤粒度应选择-60~100目为宜(图2)。

2.3 升温区间试验

RGD-6型热释光剂量仪在测量前要求设置3个恒温温度,即第一恒温、第二恒温 and 第三恒温,从热释光强度数学表达式可以看出,累积热释光强度是升温速率和加热温度区间的函数,因此,确定升温速率和加热温度区间等实验参数,研究最佳加热程序是至关重要的。

有效剂量取自第一恒温温度结束至第二恒温温度结束之间的光子计数累积值,并转换为对应的测量结果显示出来,第三恒温温度即退火结束后,降下加热盘,停止数据采集,关闭光子探头。首先固定第二和第三恒温温度为400℃,对同一个样品,第一恒温温度分别取0~600℃进行测量(间隔50℃),测量结果如图3a所示,当第一恒温温度分别取20℃、30℃、40℃、50℃、60℃、70℃进行测量时,50℃对应的热释光强度最大,随着温度的继续增加,同一样品的热释光强度急剧减少。由此可见,对于土壤样品热释光测量,50℃为最佳第一恒温温度。

为了确定第二恒温温度,利用已经取得的最佳第一恒温温度进行试验,即将第一恒温温度固定为50℃不变,第二恒温温度在0~600℃之间不断改变来测量同一样品的热释光强度,测量结果如图3b所示。由图可以看出,对于同一个样品,当第一恒温温度不变时,其热释光强度随第二恒温温度的增加而加大,当第二恒温温度设为400℃时热释光强度趋于平缓,因此应将第二恒温温度设置为400℃。

速率进行了试验研究。在实验过程中,将升温速率分别设置为3、4、5、6、7、8℃/s,其他条件一致,实验结果见图4,从图中可以看出,土壤样品的热释光强度随升温速率的增加先升高后下降,因此最佳升温速率为5℃/s。

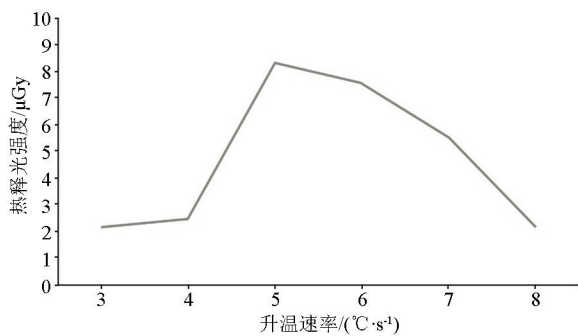


图4 不同升温速率热释光强度变化曲线

Fig. 4 The changing curve of intensity of thermoluminescence in different heating speed

3 应用实例

3.1 实验区概况

研究区选在青海木里冻土区聚乎更矿区,是中国目前唯一在冻土区取得天然气水合物实物样品的地区,属于高原大陆性气候,天气寒冷,无绝对无霜期,年平均气温 $0.7\sim 5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,这为冻土发育提供了有利的气候条件。大量实测资料证明,祁连山冻土区的年平均地表温度为 $0\sim -2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻土层厚 $60\sim 95\text{ m}$ ^[16],平均地温梯度为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。祝有海等^[17]根据木里煤田33号孔计算出水合物的顶底埋深分别为 171 m 和 574 m ,稳定带厚度为 403 m ;王超群等^[18]对DK-9井的长期地温监测结果表明,冻土层内的地温梯度为 $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,冻土层以下的地温梯度为 $4.85\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,天然气水合物稳定带深度为 $510\sim 617\text{ m}$ 。钻井资料显示,祁连山天然气水

合物分布在 $133\sim 396\text{ m}$ 多年冻土层以下的中侏罗统地层中,发育四层水合物^[19],甲烷含量为 $54\%\sim 76\%$,乙烷含量为 $8\%\sim 15\%$,丙烷含量为 $4\%\sim 21\%$,另有少量的丁烷、戊烷等, CO_2 含量通常为 $1\%\sim 7\%$,高的可达 $15\%\sim 17\%$,深度较极地冻土区浅。天然气水合物主要呈薄片状分布于泥岩、粉砂岩裂隙或中细砂岩孔隙中,粗砂岩中未发现水合物,也很少见到天然气水合物异常,天然气水合物矿藏的稳定带厚度受冻土厚度控制。祁连山天然气水合物气体来源主要为混合成因^[20],碳同位素研究表明,祁连山天然气水合物的气源主要在深部,气源岩生成的气体沿断裂运移至浅部,直接或间接由较晚形成的压性断裂带封堵形成浅部气体聚集,经晚更新世以来的冰期作用,形成水合物或仍以游离(吸附)气存在于地层中^[21]。

3.2 实验效果

按照本次试验的土壤热释光测量条件,测试了研究区土壤热释光强度,最小值为 $3.89\text{ }\mu\text{Gy}$,最大值为 $974.25\text{ }\mu\text{Gy}$,平均值为 $141.63\text{ }\mu\text{Gy}$ (表1)。每个土壤样品还测试了土壤酸解烃,分析指标为 $\text{C}_1\sim \text{C}_5$,由中国地质科学院物化探所分析测试中心完成。土壤酸解烃甲烷最小值为 $2.93\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$,最大值为 $52.38\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$,平均值为 $13.89\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$;酸解烃重烃最小值为 $12.56\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$,最大值为 $237.60\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$,平均值为 $35.91\text{ }\mu\text{L}/\text{kg}$ (表1),本文引用酸解烃甲烷数据进行原始分析,通过分组频率统计,运用克里金方法进行插值处理,形成相应的地球化学图,成图软件为地学信息处理研究应用系统(GeolPAS)。

表1 研究区土壤地球化学指标特征值

Table 1 Values of soil geochemical indications of the study area

指标	位置	最大值	最小值	平均值	异常衬值	异常面积/ km^2	NAP
酸解烃甲烷	全区	52.38	2.93	13.89			
酸解烃重烃	全区	237.60	12.56	35.91			
热释光	全区	974.25	3.89	141.63			
	水合物上方	974.25	49.96	351.46	2.45	0.84	2.06

注:酸解烃含量单位为 $\mu\text{L}/\text{kg}$,天然热释光含量单位为 μGy ;NAP值(规格化面金属量值)为异常衬值与异常面积的乘积。

土壤天然热释光在天然气水合物发现井上方出现明显的高值异常,异常最小值为 $49.96\text{ }\mu\text{Gy}$,最大值为 $974.25\text{ }\mu\text{Gy}$,平均值为 $351.46\text{ }\mu\text{Gy}$ (表1),异常衬值为2.45,异常面积为 0.84 km^2 ,NAP(规格化面金属量)值为2.51(表1),这个异常与天然气水合物密切相关,为典型的顶部异常模式,水合物样品发现DK-1、DK-2、DK-3、DK-7和DK-9井均位于这个异常范围内(图5),该异常区冻土厚度大于 65 m ^[11],冻土层内的地温梯度为 $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,冻土

层以下的地温梯度为 $4.85\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[18],满足天然气水合物形成的温压条件。钻井发现DK-4井、DK-6井均未发现天然气水合物或相关的异常,应为天然气水合物矿藏的边界,为土壤热释光的低值区。

土壤酸解烃作为中纬度冻土区天然气水合物地球化学勘查指标具有很好的稳定性和异常重现性,是可以作为天然气水合物矿藏的直接有效勘查指标^[22-23],为更好地验证土壤天然热释光在木里冻土区天然气水合物勘探中的指示效果,本文选择酸解

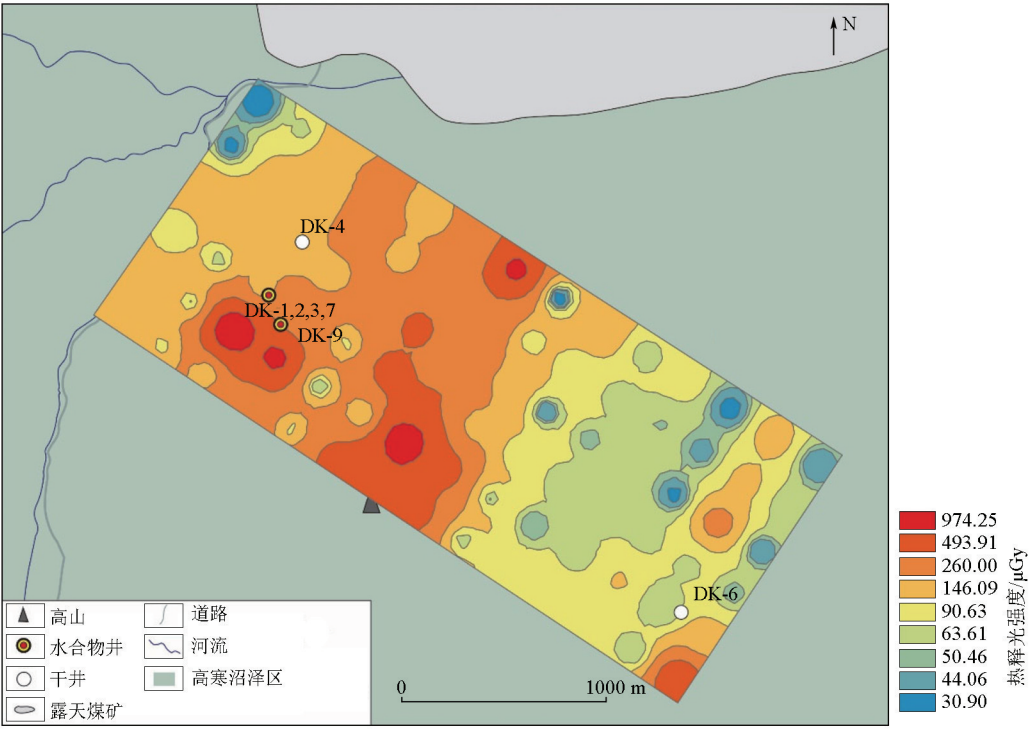


图 5 祁连山冻土区土壤热释光地球化学分布

Fig. 5 Contour map of thermoluminescence in the permafrost region of Qilian Mountain

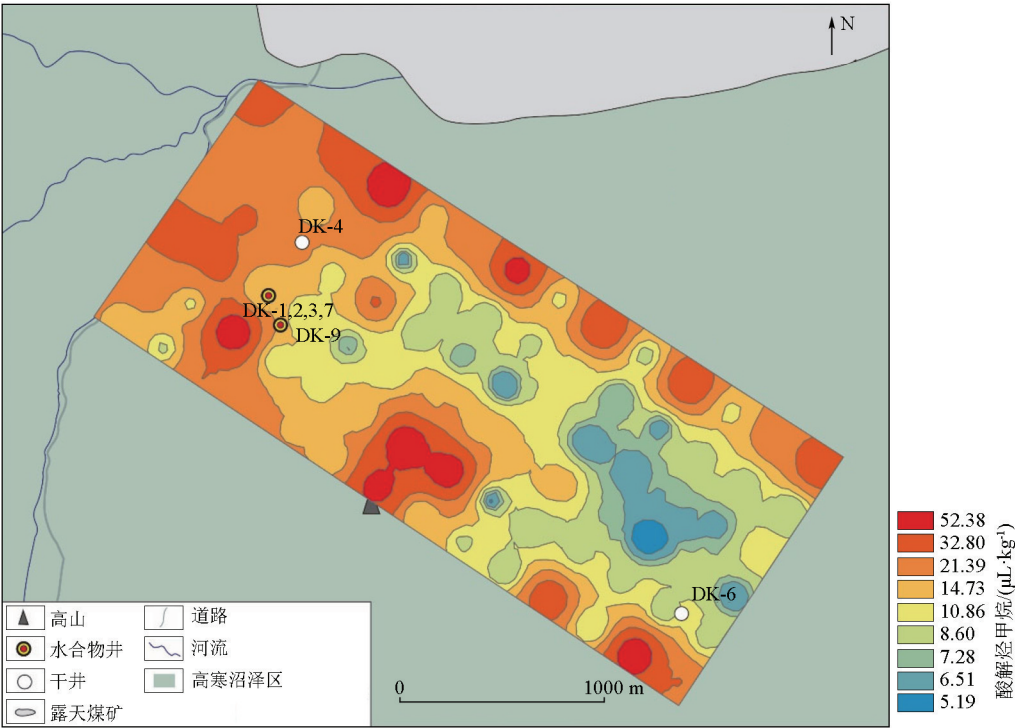


图 6 祁连山冻土区土壤酸解烃甲烷地球化学分布

Fig. 6 Contour map of acid extracted methane in the permafrost region of Qilian Mountain

烃甲烷进行对比研究。图 6 为研究区土壤酸解烃甲烷地球化学分布,从图中可以看出,土壤酸解烃甲烷也是顶部异常模式,在天然气水合物已知井上方也发育高值异常,异常分布与天然热释光异常对应关

系良好。同时酸解烃甲烷在研究区北部也发育大面积异常,整个异常面积为 1.36 km²,异常衬值 1.82,异常面积远远大于热释光异常。酸解烃甲烷与土壤热释光的异常分布也存在差异,主要表现在:一是研

究区既是水合物产区,也是祁连山著名的煤田分布区,受采煤活动影响,研究区西北部发育明显的酸解烃甲烷异常,异常强度较高,甲烷碳同位素结果也显示研究区西北部甲烷主要来源于煤成气^[11],说明研究区西北部异常应为煤层气引起的,与天然气水合物关系不大;二是天然热释光在水合物矿藏上方出现明显的高值异常,在研究区西北部为低值区,说明热释光异常不受煤田开采活动的影响,更能直接反映天然气水合物矿藏的位置,这是由于放射性元素在煤层气存量较低,加上煤层赋存层位孔隙度较大,放射性元素易迁移渗漏,不易在煤层气赋存;三是土壤热释光在该区能够排除煤层气的干扰,与直接指示烃类的酸解烃指标综合分析能大大提高勘探成果率。因此,土壤热释光是冻土区天然气水合物勘查的一种有效指标。

4 结论

1)对祁连山冻土区天然气水合物发现区土壤样品进行天然热释光分析实验研究,发现 RGD-6 型热释光剂量仪的最佳测试条件为:样品测试粒度应选择-60~100 目;升温速率应设置为 5 °C/s,升温区间为 50~400 °C,第一恒温温度 50 °C(停滞时间 0 s),第二恒温温度 400 °C(停滞时间 12 s)。

2)祁连山冻土区天然气水合物实例表明,土壤天然热释光是一种有效、快速勘查天然气水合物的新方法,与实测的酸解烃甲烷相比,异常范围、异常强度以及异常特征均有良好的一致性,在天然气水合物矿藏上方出现大面积的高值异常,异常范围外钻井均未发现天然气水合物样品。另外热释光地球化学信息多赋存于矿物晶格中,异常信息不受环境、气候、人为等外部因素影响,具有良好的重现性。

3)天然热释光测量信息反映了土壤中天然矿物在一定地质年代内接受天然辐射而产生的辐射剂量变化,还记录了矿藏形成过程中矿物组分的变化信息,异常稳定可靠。但是,天然热释光测量的迁移机理还未进行深入研究,异常形态形成机制还缺乏理论基础,天然辐射场影响因素尚未统一认识,系统的方法技术研究还未形成,值得深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Siegel F R, Hu D, Vaz J E, et al. Areal thermoluminescence radiometric survey of Shengping oil field using buried Dosimeters[J]. Oil and Gas Journal, 1989, 3(1): 53-57.
- [2] Siegel F R, Chen R, Vaz J E, et al. The integrated radiation environment at well sites-An adjunct to petroleum exploration[J]. Oil and Gas Journal, 1997, 10(6): 91-96.
- [3] Wang Z, Qin D, Zhuang G, et al. Application of thermoluminescence dosimetry in the exploration for oil and gas-using chinese gr-200 lif (mg, cu, p) tld[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1993, 47(1-4): 323-326.
- [4] Zheng G, Kang Y. Thermoluminescence dating of jinniushan archaeological site[J]. Acta Anthropologica Sinica, 1994, 13: 357-359.
- [5] 王平,熊盛青. 油气放射性勘查原理方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1997:3-10.
- Wang P, Xiong S Q. Principles and application of radio active exploration for oil and gas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997:3-10.
- [6] Xie X J. Local and regional surface geochemical exploration for oil and gas[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 42: 25-42.
- [7] 郑公望. 热释光及其在石油勘探中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(4): 49-51.
- Zheng G W. Thermoluminescence and its application in petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(4): 49-51.
- [8] McKeever S W S. 固体热释光[M]. 蔡干钢, 吴方, 王所亭, 译. 北京:原子能出版社,1993.
- McKeever S W S. Solid thermoluminescence [M]. Translated by Cai G G, Wu F, Wang S T. Beijing: The Atomic Energy Press, 1993.
- [9] 张志攀,祝有海,苏新. 羌塘盆地沉积物热释光特征及潜在意义[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 452-456.
- Zhang Z P, Zhu Y H, Su X. Characteristics of thermoluminescence from sediments and its implications in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geoscience, 2008, 22(3): 452-456.
- [10] 张志攀. 羌塘盆地天然气水合物勘察的酸解烃、热释光特征初探[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2006.
- Zhang Z P. A primary discussion in the character of acidolytical hydrocarbon and thermoluminescence related with gas hydrate in Qiangtang Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [11] 张富贵,王成文,张舜尧,等. 热释光:一种冻土区天然气水合物地球化学勘查新技术[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 1080-1088.
- Zhang F G, Wang C W, Zhang S Y, et al. Thermoluminescence: A new tool for natural gas hydrate exploration[J]. Geoscience, 2018, 32(5): 1080-1088.
- [12] 王南萍,王平,程业勋. 第四纪沉积物天然热释光测量勘查深部油气藏的方法原理及应用[J]. 现代地质, 1996, 10(4): 543-549.
- Wang N P, Wang P, Cheng Y X. Principle of quaternary sediment natural thermoluminescence survey for prospecting oil reservoir and its application[J]. Geoscience, 1996, 10(4): 543-549.
- [13] 王南萍,王平,侯胜利,等. 第四纪沉积物天然热释光测量方法技术研究—山东草桥油田研究实例[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 205-211.
- Wang N P, Wang P, Hou S L, et al. Measurement technique of nat-

- ural thermoluminescence of quaternary sediment and its application to prospecting of hydrocarbon reservoirs in Caoqiao oilfield, Shandong Province, East China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 205–211.
- [14] 郑公望, 朱忠礼, 任秀生, 等. 热释光在油气勘查中的应用研究与进展[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(9): 897–900.
Zheng G W, Zhu Z L, Ren X S, et al. The application research progress of thermoluminescence technique to the oil and gas exploration[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 897–900.
- [15] Zhang F, Yang Z, Zhou Y, et al. Accumulation mechanism of natural gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, China[J]. *Front. Energy Res.*, 2022, 10: 1006421.
- [16] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. *Frozen ground of China*[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [17] 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 58–63.
Zhu Y H, Liu Y L, Zhang Y Q. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1): 58–63.
- [18] 王超群, 丁莹莹, 胡道功, 等. 祁连山冻土区 DK-9 孔温度监测及天然气水合物稳定带厚度[J]. *现代地质*, 2017, 31(1): 158–166.
Wang C Q, Ding Y Y, Hu D G, et al. Temperature monitoring results for gas hydrate borehole DK-9 and thickness of gas hydrate stability zone in the Qilian Mountains permafrost[J]. *Geoscience*, 2017, 31(1): 158–166.
- [19] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程概况[J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1816–1822.
Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, et al. An overview of the scientific drilling project of gas hydrate in Qilian Mountain Permafrost, north-western China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12): 1816–1822.
- [20] 黄霞, 祝有海, 王平康, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因[J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1851–1856.
Huang X, Zhu Y H, Wang P K, et al. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian Mountain permafrost[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12): 1851–1856.
- [21] 张富贵, 秦爱华, 祝有海, 等. 祁连山冻土区天然气水合物地球化学迁移机理探讨[J]. *矿床地质*, 2020, 39(2): 326–336.
Zhang F G, Qin A H, Zhu Y H, et al. A discussion on geochemical migration mechanism of natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(2): 326–336.
- [22] 周亚龙, 杨志斌, 张富贵, 等. 祁连山天然气水合物地球化学勘查方法稳定性和异常重现性分析[J]. *现代地质*, 2019, 33(6): 1314–1324.
Zhou Y L, Yang Z B, Zhang F G, et al. The analysis of stability and abnormal reproducibility of geochemical exploration of natural gas hydrate in Qilian Mountain[J]. *Geoscience*, 2019, 33(6): 1314–1324.
- [23] 孙忠军, 方慧, 刘建勋, 等. 祁连山冻土区三露天天然气水合物矿藏勘查模型[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 998–1004.
Sun Z J, Fang H, Liu J X, et al. An exploration model of gas hydrate in Sanlutian permafrost region, Qilian Mountain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6): 998–1004.

Application of natural thermoluminescence measurement technique in natural gas hydrate exploration in permafrost areas

WANG Hui-Yan¹, TANG Rui-Ling¹, BI Jing²

(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*; 2. *Shandong GEO-Surveying & Mapping Institute, Jinan 250014, China*)

Abstract: Since natural gas hydrates (NGHs) in permafrost areas feature complex formation mechanisms and multiple sources, there is an urgent need to develop multiple techniques for micro-leakage information capture in order to increase the exploration success rate. This study applied the natural thermoluminescence measurement technique to NGH exploration in a permafrost area for the first time. Specifically, it tested the thermoluminescence intensity in soil samples from the Muli permafrost area of the Qilian Mountains using an RGD-6 thermoluminescent dosimeter. Then, it summarized the heating procedure for NGH exploration in the area, as well as size fractions for sampling. The results show that the soil samples from the Muli permafrost area demonstrated optimal size fractions for sampling ranging from -60~100 meshes, an optimal heating rate of 5 °C/s, and an optimal heating range of 50~400 °C. Based on the anomaly characteristics of the natural thermoluminescence intensity in soil samples, this study determined the anomaly boundary of NGHs on the surface of the permafrost area. It revealed that the natural thermoluminescence intensity displayed anomalies on the top, which correspond well to the hydrocarbon anomaly mode. The natural thermoluminescence measurements of soil, unaffected by microorganisms and boasting high sensitivity, can be popularized as a promising method for NGH explorations in permafrost areas.

Key words: natural thermoluminescence; size fraction; temperature; natural gas hydrate (NGH); permafrost area; Qilian Mountains

(本文编辑:蒋实)