

天然热释光技术在海洋油气田勘查中的应用

刘海生¹, 程业勋¹, 王南萍¹, 余 慧², 朱炳球²

(¹中国地质大学, 北京 100083; ²中国地质科学院 物化探研究所, 廊坊 065000)

摘要:沉积物热释光能有效地反映海洋环境下深部油气田引起的微弱放射性异常。热释光在不同的测试粒级、不同的岩性中的丰度不同, 结果为粗粒级>细粒级、砂岩>粉砂质砂岩>泥质粉砂岩>泥岩。热释光也与部分金属元素含量有关, Ti、Ba、Zn、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 与热释光呈正相关关系。热释光与烃类也呈较强的正相关性。不同采样深度热释光测量结果表明, 热释光剂量随沉积物的沉积深度和沉积时间的增加而增加, 深层样的热释光对油气藏的指示效果更好。

关键词:天然热释光; 海洋沉积物; 油气

中图分类号: P599

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2001)01-0107-06

三百多年前, 人类就已科学地记录下所观察到的热释光现象, 但在此后漫长的时间内, 热释光一直处于描述阶段。直到 20 世纪 50 年代, 随着对热释光理论认识的深化, 热释光的应用日益兴旺起来。1953 年美国威斯康星大学的 Daniels 等人首次成功地将热释光应用于核武器爆炸后的辐射剂量测量^[1], 之后应用领域不断扩展, 陆续用于考古中的地质年龄测量、固体中的缺陷分析等。近年来在个人剂量学、环境监测、医学等领域的应用也逐渐增多。热释光在地质学领域的应用发展较快, 最初主要用于陨石、月球物质、矿物学研究和地质测年, 70 年代开始尝试寻找热液多金属和放射性矿床^[2]。80 年代中期开始尝试用热释光来探测陆地油气藏。最初采用的是固体剂量片来间接探测土壤表层介质的热释光效应。近几年随着工作的深入, 逐步发展到直接利用土壤的天然热释光剂量来寻找油气藏, 并在技术方法和影响因素等方面进行了一系列的尝试, 建立了一套完善的方法体系。近十几年来, 随着综合物化探油气勘查由陆地向浅海大陆架地区的拓展, 为沉积物天然热释光法的应用带来了新的机遇。本文根据在我国东海平湖地区的研究成果, 对浅海含油气区沉积物热释光的方法原理进行了描述, 并系统研究了它的影响因素。结合地质资料, 在已知地区完成了实际试验。本文是部分实验结果。虽然这方面的工作还较少, 但从取得的效果看, 沉积物热释光法探测海洋

油气藏有着光明的应用前景。

1 浅海沉积物的热释光

1.1 浅海沉积物的来源

与大陆剥蚀区相对应, 海洋是地球表面最广阔的沉积区。海洋沉积的物质来源不外乎有“外源”和“内源”两类, 前者主要指来自大陆的陆源碎屑, 大气尘埃及溶解组分, 而后者指产生自海洋内部的生物碎屑、海底基岩蚀变和冷水沉淀等物质。对浅海大陆架地区而言, 由于毗邻大陆, 因此河流搬运、海岸侵蚀等作用是海洋沉积物的主要补给源^[3]。通过显微镜下详细观测采自东海平湖地区的沉积物样品后发现, 样品成分的主要结晶矿物以石英、方解石、长石为主, 偶见少量绿帘石胶结物和暗色矿物, 未见火山碎屑等成分。结晶矿物分选性好, 说明以陆源成分为主。

1.2 热释光的形成

沉积物的沉积机制是十分复杂的, 沉积物经过搬运、分异或分散、沉积等过程后, 大部分结晶矿物中原来积存的热释光贮能已基本归一, 结晶矿物自沉积后又开始重新积累新的能量。油气藏上方热释光剂量的积累主要取决于油气藏引起的地表放射场的变化。若不考虑其它因素的影响, 沉积初期样品内的热释光水平用 I_0 来表示, 油气田引起的放射场变化所产生的热释光信号用 I_D 来表示。在一定地质

历史时期后,沉积物总的天然热释光强度 I_N 可表示为:

$$I_N=I_O+I_D$$

上式说明, I_N 的变化可直接通过 I_D 来反映,进而达到了探测油气藏的目的。

实践证明,油气化探是油气综合勘探和评价的手段之一,尽管对其异常形成的机理还未得到公认的科学解释,可是无论是通过室内油藏模拟还是通过实际的井中化探资料分析,均表明在油气藏的上方存在着烃类的垂向迁移机制^[4]。油气藏上方热释光异常的形成与烃类的垂向迁移有密切关系。一般认为,烃类垂向迁移的结果在地表基本上可归结为两种蚀变作用; CO_2 蚀变和 H_2S 蚀变。 CO_2 蚀变的产生是垂向渗漏的烃受细菌分解,烃被氧化生成 CO_2 ,在水的作用下形成各种生物碳酸岩,产生一部分结晶矿物。 H_2S 蚀变则指细菌在消耗微渗漏的过程中还原出硫酸岩,产生微量 H_2S 。 H_2S 的环境有利于铀的沉淀,同时 Fe、Mn、Co、Pb、Zn 等金属矿物也以硫化物的形式沉淀^[5]。

1.3 浅海沉积物热释光的发光特征

沉积物天然热释光的形成史就是样品所经历的自然放射性辐射史,它与 3 个参数有关,即辐射剂量、沉积时间与温度。随着时间的积累,接受辐射剂量的增加,被陷阱俘获的电子空穴也相应增加,所以在线性剂量范围内,热释光强度与辐射剂量成正比。热释光的光释放过程可用发光曲线来描述。发光曲线的形状与晶体能级及晶格中的缺陷有关,高温发光峰对应能量较高的深陷阱,低温发光峰对应能量较低的浅陷阱,而陷阱越深,热释光在常温下越稳定。发光强度即是曲线所包围的面积的分表达式,面积大小与被电子和空穴填充的陷阱数有关,即与样品接受的辐照量有关。面积越大,说明其接收到的辐照量越大。

2 影响因素

油气化探的工作经验告诉我们,化探指标的丰度受多种因素的影响,如岩性、分析粒度、采样深度(层位)等^[6]。海洋环境下,温度、湿度、气候的变化基本一致,影响指标丰度的因素以岩性、分析粒度为主。研究后发现,热释光除了与岩性和测试粒度等因素有关外,稀有和重金属离子含量的高低也是不可忽略的一个主要因素。

2.1 岩性

表 1 示出了东海平湖地区不同岩性的热释光测量结果,从表中看出,随着样品中结晶矿物的减少,热释光的剂量也在相应降低,测值由高到低依次为:砂岩、粉砂质砂岩、泥质粉砂岩、泥岩。说明结晶矿物是热释光的有效探测器,粘土矿物成分的增加不利于热释光剂量的积累。

表 1 东海平湖地区不同岩性的热释光剂量统计结果

Table 1. Statistics of thermoluminescence values of different lithologies in Pinghu area of the East China Sea

岩 性	样品数 (个)	平均值 (μGy)	离差 (μGy)
砂 岩	80	268. 8	132. 6
粉砂质砂岩	27	194. 5	66. 4
泥质粉砂岩	14	167. 1	70. 7
泥 岩	10	57. 8	12. 6

2.2 测试粒级

研究沉积物热释光剂量与测试粒级的关系,一方面为实际应用确定最佳测试粒级提供参考依据,另一方面也可了解其赋存规律。选择不同岩性的样品按粒级大小分别测量其热释光剂量(表 2),从测值大小看,被测样品粒度愈小,测量值也愈低,说明粒级愈细,样品中结晶矿物(磷光体)的比例减小,粘土矿物的比例增多,储存的能量减少导致发光强度减弱。

表 2 热释光剂量(μGy)与粒级的关系

Table 2. Relations between thermoluminescence values(μGy) and grain sizes

样 品 号	粒 级 (目)			
	<100	100~120	120~140	140~160
A19	259. 6	218. 6	136. 2	130. 3
A45	291. 8	215. 6	186. 5	166. 2
A46	440. 4	312. 2	281. 0	232. 3
A48	449. 3	341. 9	330. 3	282. 9
A51	65. 3	74. 7	68. 8	71. 4
A65	375. 6	269. 0	244. 0	190. 5
A67	342. 0	304. 2	257. 0	184. 9
A71	329. 7	282. 7	244. 9	185. 7
A100	373. 2	454. 4	344. 5	326. 7
A130	254. 3	262. 6	196. 7	154. 5
A215	224. 6	210. 9	192. 8	144. 6
A229	285. 5	379. 3	231. 9	202. 4
平均值	307. 6	277. 2	226. 2	189. 4

2.3 部分金属元素

热释光学研究结果表明,样品中部分稀土和重金属元素相对于发光晶体而言是热释光的猝灭剂。当含量较低时,以杂质猝灭为主;当含量较高时,以浓度猝灭为主。猝灭的结果是使样品的发光强度急剧降低。Medlin(1968)^[7]在一系列天然样品中列出了几种起猝灭作用的金属元素,并指出猝灭作用与离子的化合价有关,例如三价的铁离子可以非常有效地猝灭光放射,而二价铁离子则不能。Schmidt 等(1974)^[8]对比了不同含量的 Cu、Cr、Co、Fe 对热释光灵敏度的影响,发现 Cu 的猝灭效应大于 Cr、Co、Fe,但对其它金属元素的猝灭效果未给出说明。我们对东海平湖地区沉积物样品中的重金属元素含量与热释光剂量值的相关性研究后发现,并不是所有的金属元素或金属离子都能产生猝灭效应。Sr、Ni、V 的含量与热释光剂量呈较强的负相关性,说明它们对热释光的猝灭效果最为明显。其次是 Pb、Mn、Cu、Co、I;Hg、Sc 较弱,Ti、Ba、Zn、Fe³⁺/Fe²⁺的含量

或比值与热释光剂量呈正相关关系,说明它们不产生猝灭效应。图 1 给出了部分金属元素与热释光(TL)的散点图。图中可见,TL 与 Mn、Co、Ni 呈负相关,与 Zn、Ba、Ti 呈正相关。

3 热释光与烃类的关系

沉积物天然热释光与油气化探中的重要指标甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷呈现正相关关系。在不同的地区相关程度不同(图 2)。在东海平湖地区二者的相关系数为 0.2(n=149,r_{0.05}=0.17),在迎翠轩地区,二者的相关系数为 0.62(n=151,r_{0.05}=0.17)。从热释光与乙烷在沉积物中的富集情况看(表 3),热释光的积累趋势是:砂岩>粉砂质砂岩>泥质粉砂岩>泥岩。而乙烷的富集趋势是:泥岩>泥质粉砂岩>砂岩>粉砂岩。可见二者在相同岩性中的富集规律近于相反,而它们在空间上表现出较强的正相关性,这说明二者在形成机制上有同源性。

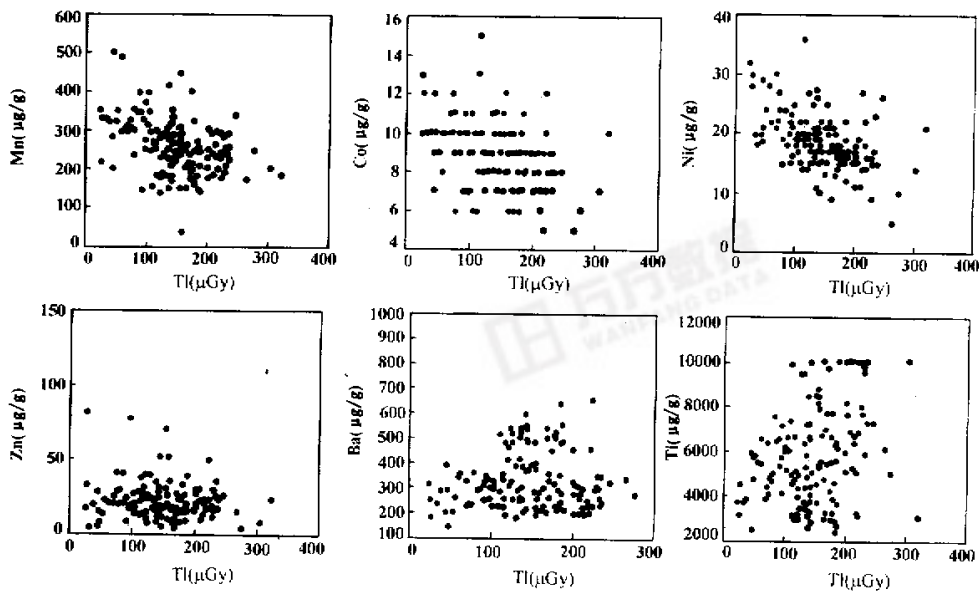


图 1 沉积物天然热释光(TL)与部分金属元素的相关散点图

Fig. 1 Relative scatter plots of natural thermoluminescence and some metallic elements

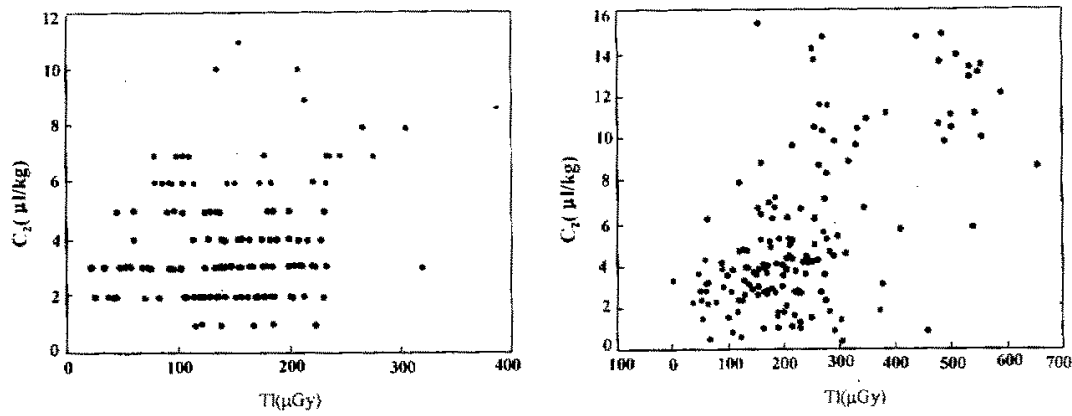


图 2 热释光(TL)剂量与乙烷浓度的相关散点图

Fig.2 Scatter plots of thermoluminescence values and ethane concentrations

表 3 热释光与乙烷在不同岩性中的富集规律
Table 3. Enrichment regularities of thermoluminescence and ethane in different lithologies

岩 性	样品数	C ₂ H ₄ (μl/kg)	TL(μGy)
泥 岩	10	5.57	57.8
泥质砂岩	12	4.30	167.1
砂 岩	16	2.65	268.8
粉 砂 岩	99	2.55	194.5

4 应用效果

工区位于上海市东南方向约 300~400 km,构造上属东海陆架盆地的西湖凹陷保 斜坡,为新生代沉积凹陷。平湖组是主要的生油岩系和储集层,花港组也是主要的储集层。海底地形由西北向东南倾斜,海水悬浮物含量低,透明度高,平均水深 86.4 m。沉积物堆积速率低,表层沉积物主要为晚更新世古滨海砂质沉积,在冰后期海进过程中,经强潮流改造而成。根据化探采样资料编绘的沉积物类型表明,3 m 左右深度的表层沉积物以细砂为主,偶有少量的粉砂质砂及泥质粉砂。

根据实测的热释光数据,剔除个别失真数据后,在计算机上成异常分布图(图 3),从原始数据(图 3a)看,已知油气井 PH-5 位于低异常区内,已知油气井 PH-2 位于低值异常附近,干井 PM-1 在高值区,异常呈不规则片状。考虑到工区面积较大,采样密度较稀和各种影响因素的存在,采用 4 次趋势面分析法求取区域异常分量,以 135 μGy 为异常上限,

全区集中为 I、II、III 3 个异常区(图 3b)。I 号区为已知区,已知油气井 PH-2、PH-5 均落在低值异常区内,且异常向南尚未封闭,与工区外的 PH-1、PH-3、PH-4 三口高产油气井的位置相吻合。II、III 号异常为远景区,是下步勘探的重点区,其中 III 号异常向东尚未封闭。已知干井 PM-1 仍然落在高值异常区。由图可见,本区与油气有关的热释光异常仍表现为低值模式,与陆地油藏上方的热释光异常模式一致。

5 结论

从上述结果来看,沉积物热释光是一种有效、廉价的油气资源评价指标,能有效地反映海洋环境下深部油气田引起的微弱放射性异常,进一步拓宽了放射性方法的应用领域,丰富了油气勘探的方法系列,为提高勘探的成功率提出了新的手段。通过系统试验得到如下结论:

(1) 热释光剂量在不同的测试粒级、不同的岩性中的丰度是不同的,表现为粗粒级(<100 目)>细粒级(>100 目);砂岩>粉砂质砂岩>泥质粉砂岩>泥岩。

(2) 对重金属元素与热释光的相关性研究后发现,Sr、Ni、V 对热释光的杂质猝灭效应最为明显,其次是 Pb、Mn、Cu、Co、I;Hg、Sc 较弱。Zn、Ba、Ti、Fe³⁺/Fe²⁺与热释光呈正相关关系,对热释光不产生杂质猝灭效应。

(3) 油气田上方浅表地层中放射性异常的形成是在微渗漏烃的作用下,地表环境发生变化,放射性

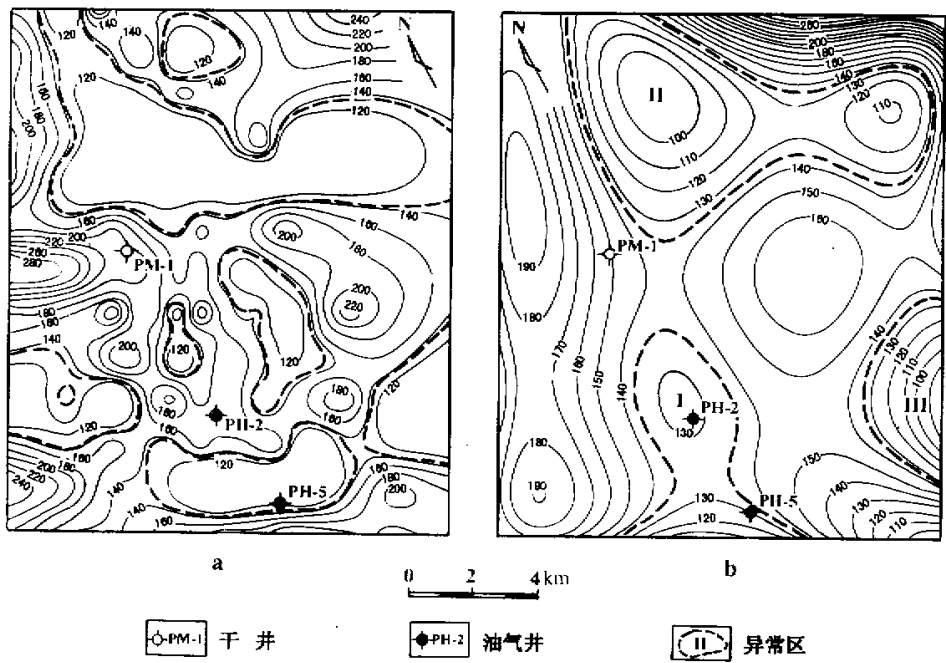


图 3 东海平湖地区热释光异常分布
a—原始数据等值图;b—4 次趋势面异常分布

Fig. 3 Distribution of thermoluminescence anomalies in Pinghu area
a—isogram of primary data;b—anomaly distribution on 4 trend surfaces

核素重新分配的结果,其中也包括了由“烟囱效应”上升来的部分 U、Ra、Th、K 等长寿核素的贡献。

(4) 热释光与烃类呈较强的正相关性,说明烃类物质上升到地表,经过一系列化学变化,土壤中有新的磷光体产生,在烃类渗漏强的地段,热释光异常相应地增强。

(5) 热释光指标具有经济、高效的优点,野外采样随化探采样一次完成,室内分析较其它指标而言,样品处理流程短,分析价格较低。

(6) 不同采样深度热释光测量结果表明,热释光剂量随沉积物的沉积深度和沉积时间的增加而增加,深层样的热释光对油气藏的指示效果更好。

(7) 海洋环境下的影响因素较陆地上少,有利于油气化探工作的开展。

我国有着 300 多万平方公里的蓝色国土和漫长的海岸线,在大陆架地区,石油资源丰富,选择高效、经济的方法对开发海洋石油资源意义重大,热释光

技术的应用有着光明的前景。

参 考 文 献

[1] Mckeever S W S 著,蔡干钢,吴 方,王所亭 译. 固体热释光 [M]. 原子能出版社, 1993. 9-13.
[2] 程业勋,章 晔,王南萍,等. 土壤天然热释光勘探油气藏的原理及应用[J]. 物探与化探,1996,20(4):288-294.
[3] 赵其渊. 海洋地球化学[M]. 北京:地质出版社,1989. 118.
[4] 李鹤庆. 油气垂向迁移的形迹[J]. 物探与化探,1994,18(6): 426-430.
[5] 王南萍. 核技术(放射性方法)探测油气田的机理与数据处理解释方法技术研究[D]. 北京:中国地质大学,1996.
[6] 朱炳球,孙忠军,余 慧. 浅海油气化探的应用效果及前景[J]. 物探与化探,1996,20(3):161-171.
[7] Medlin W L. In thermoluminescence of geological materials [M]. McDougall D J ed. London: Acad. Press, 1968. 193.
[8] Schmidt K, Linemann H, Giessing R. Proc. 4th Int. Conf. Lum. Dosim[C]. (Krakow). 1974.

THE APPLICATION OF THERMOLUMINESCENCE
TECHNIQUE TO THE OIL AND GAS EXPLORATION
IN OCEANIC SURFACE SEDIMENTS

LIU Hai-sheng¹,CHEN Ye-xun¹,WANG Nan-ping¹,YU Hui²,ZHU Bing-qiu²

(¹China University of Geosciences,Beijing 100083,China;

²Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS,Langfang 065000,China)

Abstract: In this paper,natural thermoluminescence(TL) is first applied to oil and gas exploration in surface sediments in East China Sea. Its mechanism has been described systematically. The results prove that TL is closely related to sediment grain sizes,composition and depth. Some metallic elements,such as Mn, Co and Ni have negative relationship,and Zn,Ba Ti have positive relationship with TL. Ethane(C₂H₄)also has positive relationship with TL. It has been proved that natural TL can be a useful index for petroleum exploration.

Key words: thermoluminescence;ocean;oil and gas

