

大庆徐家围子火山岩热释光特征 与火山活动期次及岩性判别

谭文化^{1,2}, 李胜荣^{1,2}, 申俊峰^{1,2}, 吴敏^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 岩石圈构造与深部过程教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 热释光的用途很广,但在判断火山活动旋回(期次)以及火山岩类型鉴定方面,尚未涉及。本文通过对大庆徐家围子升深7和杨参1井岩石样品以及其他井部分火山岩样品的热释光特征的研究,发现:①升深7井中,顶部峰型和总积分强度近似,可指示为同期喷发产物;中下部热释光特征表现为“顶底韵律效应”,可能是较晚阶段的火山喷发物对前一阶段顶部有热改造而消耗了部分辐射积累。②杨参1井中根据热释光特征可划分2个旋回和4个期次。下部旋回发育双峰,主峰积分强度差别较大,可能指示底部为多源喷出产物(如多机构产物)混堆,小旋回产物之间叠加;主峰积分强度从下到上依次减小,反映了火山岩喷发强度的降低。上部旋回发育单峰,热释光积分强度相差不大,可能为一套同源产物。③升深7井中未发生明显蚀变作用的安山岩热释光特征相似而杨参1井中岩相均一、未蚀变的凝灰质岩热释光特征也很相似,这表明热释光特征技术应用于火山空落相岩石和火山熔岩岩性判别是有可能的。最后总结了火山岩热释光研究应注意的问题。

关键词: 热释光;火山活动旋回(期次);火山空落相岩石;火山熔岩岩性

中图分类号: P588.14; P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)03-0247-06

Thermoluminescence characteristics of volcanic rocks from Daqing and their significance in determination of volcanic cycles and lithology

TAN Wen-hua^{1,2}, LI Sheng-rong^{1,2}, SHEN Jun-feng^{1,2} and WU Min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobe Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The thermoluminescence (TL) technique has been widely used in various academic fields, but has not yet been involved in the determination of the volcanic cycle (stage) and the judgment of the type of volcanic rocks. Based on studying the TL features of all the volcanic rock samples from the boreholes Shengshen 7 and Yangcan 1, Xujiaweizi, Daqing City, as well as some samples from other boreholes, the authors have reached the following conclusions: (1) In the borehole Shengshen 7, the TL peak-types and total TL integral intensities of the rocks are similar to each other at the top, probably suggesting that the volcanic rocks are eruptive materials of the corresponding period; the TL parameters of the rocks vary rhythmically in the middle and at the bottom, and this may be the result of thermal alteration of the rocks at the top of each eruption by later eruptive materials which consumed part of the cumulated radiation. (2) In the borehole Yangcan 1, the volcanic cycles (stages) can be divided into two subcycles and four stages based on the TL feature variations. At the bottom of the cycle, the rocks show double TL peaks, and the intensities of the main TL peaks show remarkable differences, proba-

收稿日期: 2006-07-22; 修订日期: 2007-01-05

作者简介: 谭文化(1982-),男,硕士研究生,主要从事成因矿物学研究, E-mail: twhello@126.com; 通讯作者: 李胜荣, E-mail: liser@

bly indicating that the bottom rocks are multisource ejected products from different volcanic structures, and the products of the small cycles are superimposed upon each other; the intensity of the dominant TL peak decreases upward, reflecting the declining of the eruptive activity of the volcanics. The rocks at the top cycle show a single peak, and the TL intensities only show insignificant differences, implying that the rocks belong to a suite of cognate products. (3) In the borehole Shengshen 7, the TL features of the andesites without obvious alteration are similar to each other; and in the borehole Yangcan 1, the TL features of the tuffaceous rocks with homogeneous lithofacies and without alteration are very similar too. These phenomena show that the utilization of the TL technique to distinguish rocks of pyroclastic fallout facies and determine lithology of lava is feasible.

Key words: thermoluminescence; volcanic cycle (stage); rock of pyroclastic fallout facies; lithology of lava

热释光是结晶矿物特有的一种发光现象 早在中世纪就有记载 (Boyle, 1664), 但此后一直处于描述阶段。直到 20 世纪 50 年代 随着对热释光理论认识的深化, 加之热释光样品具有处理流程短, 分析价格较低, 剂量计读出方便、迅速, 计算简单, 可实现大规模自动化测量等优点 热释光的应用才逐渐受到重视。

热释光在个人和环境辐射防护监测 (朱云平等, 1994) 考古和艺术鉴定 (梁宝鏊等, 1997) 核工业 (万玉松等, 1999; 郑圻森等, 2000) 及陨石研究 (刘京发等, 1999, 2000) 等领域都有应用。在地质学领域, 热释光的主要研究对象是矿物, 包括石英、长石、方解石、磷灰石、锆石、萤石等, 利用它来进行矿床成因与找矿研究 (邵克忠等, 1989; 李胜荣, 1992; 崔天顺等, 1995; 谭凯旋等, 1999; 王可勇, 2000; 刘海生等, 2001; 英基丰等, 2001; 龚革联等, 2002) 以及地质年龄的测定 (龚革联等, 1999; 申英等, 2002), 也有人利用构造岩的热释光进行构造控矿研究 (李胜荣, 1992) 利用土壤天然热释光寻找油气藏 (王南萍等, 1996; 郑公望等, 1999) 厘定黄土年龄 (李秉成, 1998; 李虎侯, 1999; 王文远等, 2000; 李秉成等, 2001) 对火山岩的热释光研究, 主要用来测年 (Kennedy and Knopff, 1960; Hwang, 1970; Aitken and Fleming, 1971; Berry, 1973; May, 1979; 郑荣章等, 2000; 尹功明等, 2000; 计凤桔等, 2001)。迄今尚无利用热释光技术进行火山岩类型和活动期次判别的报道。

1 热释光应用于火山岩研究的理论基础

晶体在生长过程中不可避免地存在各种晶格缺陷, 形成所谓“陷阱”。核辐射作用于晶体, 能使晶体电离, 在晶格中产生可移动的电子。这些电子在晶格中经过一定的转移或扩散, 停留在导带附近的 H 能态 (陷阱) 相对稳定地保留在晶格中, 称为储能电子。与此相应产生的空穴陷阱停留在价带附近的 A

能态。当晶体中储能电子受热 (或光) 激发后, 它们将脱离“陷阱”, 重新与空穴结合, 晶格中的累积能量将以光子的形式释放出来, 这就是热释光 (申英等, 2002)。其光子发射强度 (指积分强度) 是温度的函数, 与累积的吸收剂量呈正比。热释光与固体所经历的 (地质) 过程有关。对地质样品而言, 如果物质成分有一定差异, 样品的热释光强度由辐射剂量和不同的矿物组合共同决定 (王南萍等, 1996)。

火山岩全岩的内部缺陷主要有 3 种: 热的或固有的缺陷、非固有的缺陷或杂质离子以及辐射引起的缺陷 (王寿山, 1999)。它的热释光特征参数变化除了与其矿物组成及其变化有关外, 区域性多期次火山岩产出所伴随的多期次热事件叠加改造也对该区域火山岩中积累的辐射能产生影响。研究区主要的岩石类型为全晶质偏碱性的中酸性火山岩, 矿物组成主要为石英和长石族矿物, 少数样品中含有一定量的萤石或碳酸盐矿物, 可以认为影响本区火山岩全岩热释光特征的主要因素为石英、长石等矿物的含量和特征以及成岩过程中的热事件。这就是利用热释光特征判断火山岩旋回和期次以及进行火山岩类型鉴别的理论基础。

2 测试条件及仪器稳定性分析

本次测试的样品制备流程为: 取岩心成分均匀的部分约 30~50 g 完全碎样, 然后筛出 40~60 目部分, 充分混合均匀后, 用精度为 0.001 g 的电子天平称取约 0.02 g 作测试样品。测试用仪器为北京核仪器厂生产的 FJ-427A1 型微机热释光剂量仪, 升温程序选择的是第 5 套 (解谱)。这套解谱预热温度为 40℃, 以 1℃/s 的速度升温到 400℃ 时开始退火。

采用同一产地成分纯净的方解石矿物进行 5 次等条件测量对该热释光剂量仪的稳定性进行标定, 结果显示方解石样品的 5 次测试曲线形态和位置基

本一致。进一步的误差分析结果表明,除发光强度的最大相对误差为11%以外,其余3个参数都在10%以内。本文分析主要用到的两个参数为峰点温度和积分强度,它们的最大相对误差都在5%以内。

按照仪器生产厂家的设计标准,标定仪器所用的热释光材料为人工合成的单晶矿物时,最大相对误差在5%以内视为仪器稳定。若所用热释光材料为天然矿物晶体,最大相对误差在10%以内即视为仪器稳定。本次采用天然纯净方解石矿物晶体进行仪器稳定性测定,符合仪器设计要求,所以认为该仪器的工作稳定性满足测试要求。

3 样品特征及测试结果

对大庆油田徐家围子达深1、徐深1、徐深5、芳深5、芳深9、肇深10、杨参1和升深7等8口钻井50件岩心样品(包括5个沉积岩和1个变质岩)做了热释光测试对比分析,其中杨参1井和升深7井做了系统取样测试,其岩性特征及热发光测试结果见表

1。与矿物晶体热释光测试一样,火山岩全岩样品的热释光测试同样能够获得其特征曲线的4个重要参数,即峰点温度、发光强度、积分强度和半高宽。因此,本次火山岩热释光特征仍基于上述参数的比较进行评价。

4 结果分析与讨论

4.1 升深7井系统测试结果分析与讨论

从表1中看到,升深7井除了两个样品的热释光曲线呈双峰外,其余都呈单峰,单峰的峰点温度与双峰的高温峰点温度很接近,基本上在335~342℃之间,双峰的低温峰点温度在280℃左右,且该峰另外3个参数都比高温峰的要小,表明高温峰是主峰。

该井主要岩性是上部含角砾晶屑熔结凝灰岩和下部熔结集块岩,而且两种岩性分别都是顶部有蚀变而底部无蚀变;另外从底部向上,熔结集块岩的颜色表现为浅绿色和暗红色(或褐色)交替分布,形成了“绿底红顶”的特征,反映了火山喷发的旋回或者

表1 升深7井和杨参1井火山岩岩性及热释光参数表

Table 1 Lithology and TL parameters of volcanic rocks from boreholes Shengshen 7 and Yangcan 1

样品编号	深度/m	样品名称	峰型	峰点温度 (t/℃)	发光强度 (I/μGy·s ⁻¹)	积分强度 (R/μGy)	半高宽 (M/℃)
升深7井							
ss7-1	3 702.14	蚀变流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩	单峰	338	165.7	15 953	90
ss7-2	3 705.04	流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩	单峰	338	155.9	11 211	65
ss7-3	3 714.35	灰绿色流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩	单峰	335	153.0	21 711	145
ss7-4	3 717.35	浅灰绿色蚀变粗安质熔结角砾岩	单峰	335	100.4	7 754	70
ss7-5	3 724.90	浅灰绿色蚀变安山质熔结集块岩	单峰	335	105.6	7 029	60
ss7-6	3 732.00	灰绿色蚀变安山质熔结集块岩	双峰	277/337	80.4/127.7	4 868/10 545	55/75
ss7-7	3 732.80	褐色蚀变安山质熔结集块岩	双峰	285/340	65.3/103.5	3 596/7 973	50/70
ss7-8	3 736.46	浅绿色强蚀变熔结集块岩	单峰	345	160.9	15 037	90
ss7-9	3 738.66	暗红色熔结集块岩	单峰	342	97.6	8 174	78
ss7-10	3 744.76	浅绿色熔结集块岩	单峰	315	134.6	14 822	100
ss7-11	3 747.40	暗红色熔结集块岩	单峰	342	102.6	9 236	85
ss7-12	3 749.70	浅绿色熔结集块岩	单峰	335	162.9	16 963	98
杨参1井							
yc1-1	436.50	浅褐色杏仁状安山岩	单峰	340	70.38	7 333	100
yc1-2	512.40	浅褐色杏仁状安山岩	单峰	340	56.34	5 870	100
yc1-3	522.07	萤石化含杏仁玄武质粗安岩	单峰	330	50.29	4 694	85
yc1-4	528.47	杏仁状安山岩	单峰	345	87.46	8 889	100
yc1-5	652.40	杏仁状安山岩	单峰	335	69.35	6 721	90
yc1-6	655.70	萤石化杏仁状安山岩	单峰	332	72.31	7 755	100
yc1-7	667.07	杏仁状粗面玄武岩	单峰	330	93.51	8 248	80
yc1-8	1133.65	强蚀变流纹质含角砾凝灰岩	双峰	280/335	47.22/83.40	2 567/8 161	50/90
yc1-10	1 484.22	黑色玄武岩	单峰	330	55.25	4 288	70
yc1-11	1 717.97	黑色玄武岩	双峰	260/330	21.62/58.34	811/5 152	34/80
yc1-12	2017.29	黑色玄武岩	双峰	260/335	49.25/90.44	2 062/1 0888	40/115
yc1-13	2 635.25	灰白色流纹岩	双峰	260/350	58.34/114.20	2 507/14 182	45/130
yc1-14	2 796.38	青灰色斑状粗安岩	双峰	258/335	62.24/101.42	2 159/11 940	33/112

期次。而这些在热释光的参数中是有反应的,特别是积分强度。总体上说,岩性相同时,蚀变的积分强度要比未蚀变的小。而对应熔结集块岩颜色的交替变化,积分强度表现为浅绿色所指示的堆积底层的积分强度较大,而暗红色(或褐色)所指示的顶层积分总强度较小,具有“顶底韵律效应”,究其原因可能是每个较晚阶段的火山喷发物对前一阶段顶部有热改造而消耗了部分辐射积累。

4.2 杨参1井系统测试结果分析与讨论

杨参1井的火山岩主要是不含集块和角砾的熔岩,它们的热释光特征曲线其中有5个火山岩样品是双峰,单峰的峰点温度与双峰高温峰点温度依然很接近,在330~350℃之间,双峰的低温峰点温度除了1个280℃的以外,主要在260℃左右,它们的高温峰依然是主峰。

yc1-12和yc1-13之间、yc1-10和yc1-11之间以及yc1-9所代表的深度范围内均有沉积岩存在,它们分别属于九峰山组中上部、龙江组上部和侏罗纪甘河组底部,厚度约为82.98~143.74 m、186.48~615.43 m和2.60~345.38 m。虽然它们的具体厚度未知,但至少可以通过这3层沉积岩将该井的火山岩喷发划分出4个期次,这在热释光特征上也相应有很明显的反映:

(1) 2635 m深度以下,从下到上由中性熔岩向酸性熔岩转变,热释光特征为发育双峰,主峰热释光积分强度14 182~11 940 μGy 之间,在该井中是最大的,2020~1710 m深度之间为一套发育双峰的基性熔岩,主峰热释光积分强度在5 152~10 888 μGy 之间,差别较大;1566~1481 m深度之间仍然是一套基性熔岩,但发育单峰型,热释光积分强度为4 288 μGy ,相对较小。可以推测1481 m深度以下的这3个期次为1个火山喷发旋回,因为热释光特征为发育双峰,主峰积分强度差别较大,可能指示底部为多源喷出产物(如多机构产物)混堆,小旋回产物之间叠加改造形成双峰,反映在岩性上为中、酸和基性熔岩混杂;主峰积分强度从下到上依次减小,反映了火山岩喷发强度的降低。

(2) 从1136 m深度往上,热释光特征主要为单峰,除了1个萤石化的岩石热释光积分强度为4 694 μGy 之外,其余都在5 870~8 248 μGy 之间,相差不大,可能为一套同源产物,推测为另一个火山喷发旋回;从岩性上看,依次为空落相火山岩、基性熔岩和中性熔岩,有很好的火山爆发旋回性。

(3) 另外,观察测试曲线发现,无论是上部或下部旋回,它们自底至顶的峰型都是由双峰渐变为单峰的。

5 讨论

5.1 热释光技术应用于火山活动旋回(期次)判别的可能性

对升深7井和杨参1井样品测试结果的分析表明,热释光技术应用于火山活动旋回(期次)判别是可能的。

上述升深7井中虽然含角砾晶屑熔结凝灰岩和火山集块岩两种岩性,成分均一性差,影响了解译效果,但是对比两种岩性的热释光积分强度仍不难发现,在两种岩性转变时热释光积分强度也对应有关,表现为两个不同期次喷发的结果。另外,火山集块岩热释光积分强度表现出明显的韵律性变化,也是不同火山喷发期次相互作用的结果。

杨参1井的火山岩主要为熔岩,其上、下两段成分变化显示了一定的规律性和旋回性,热释光曲线的峰型和积分强度变化与岩性变化有很好的对应关系。

5.2 热释光技术应用于火山熔岩岩性判别的可能性

因为对样品做热释光分析得到的4个参数与样品的矿物成分及其中的某些杂质元素有关,所以可以预见热释光测试对鉴定岩石类型有一定的作用。但是,从不同类型火山岩的热释光特征与岩性的对应关系可以看出,用热释光鉴定火山岩的难度很大。分析其原因,可能是火山岩定名考虑的主要是结构和主要矿物,对后期受热或蚀变的因素考虑较少;此外,对成分变化较大的火山角砾岩和火山集块岩等,同一件样品分几次测试时,其成分也不能保证严格相同。

对比未发生明显蚀变作用的安山岩的4个热释光参数(表1)可以发现,它们的热释光特征很相似(图1),这说明热释光技术应用于成分均一、未发生明显蚀变的火山熔岩岩性判别是可能的。

5.3 热释光技术应用于火山空落相岩石判别的可能性

如前所述,火山角砾岩和火山集块岩的热释光判别很难得出有意义的结果,但对火山空落相中凝灰质岩的判别却有一定的意义。例如,在表1中,岩相均一、未经蚀变的凝灰质岩的热释光各项参数就很相似。当然,因为其中含有一定量的岩石角砾,成分均一性不够,必然会对结果产生一些影响。如果是不含角砾而成分均一的凝灰岩,其岩性的热释光判别应更有意义。

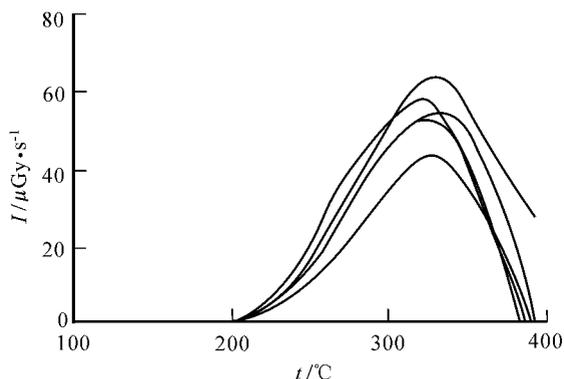


图1 杨参1井5个安山岩样品热释光去本底曲线

Fig. 1 TL curves for five andesite samples from borehole Yangcan 1

5.4 火山岩热释光研究应注意的问题

火山岩热释光测试有其特殊性。在对风成、水成沉积物以及火烧过的燧石进行热释光测试时,常会涉及到残余热释光的问题。在火山岩的热释光测试中,熔岩是原生高温产物,不存在残余热释光问题。在火山碎屑物质的热释光测试研究中,很少发现有关残余热释光的探讨。但在火山喷发时产生的碎屑中,既有喷发时岩浆带出的高温产物(如火山灰等),也有覆盖在火山口上的前期物质破裂散落的沉积物,后一部分产物如果未经岩浆热力退火,则测出的峰值和峰面积会比实际的偏大。此外,前期火山产物可能被后期喷发熔岩覆盖,从而使其退火,这样利用其测出的热释光峰值和峰面积显然就比实际的要小。这些特殊性的存在,提醒研究人员在进行火成岩热释光测试样品的采集时应注意热归零效应的影响,可利用其作为喷发旋回和期次的良好标志。进行岩类判别时要注意热归零的问题,如果是连续的火山岩柱就不需要了。

任何实验都不可避免存在误差,对固体的热释光而言,影响测试结果的除了统计误差外,可能还包括其他一些原因引起的误差,如样品采运和加工时的非避光操作和撞击(申英等,2002)及“异常衰退”(Visocekas *et al.*, 1976; Wintle, 1977)等不稳定释光。对火山岩的热释光研究,这些因素引起的误差应可忽略。

总之,热释光在火山岩研究方面的应用尚待深入。本次实验表明,热释光在鉴定火山岩类型、特别是在划分火山岩旋回或期次方面有一定的意义,是一个值得深入研究的新方向。

致谢 本文得到秦庆石油公司的资助,工作过程中,高合明、卓胜广两位博士给予大力支持,谨此表示衷心感谢!

References

- Aitken M J and Fleming S J. 1971. Preliminary application of the thermoluminescence dating to the eruptions of Thera [A]. Internat Sci Cong On the Volcano of Thera, 1st [C]. Athens, Greece, 293~320.
- Berry A L. 1973. Thermoluminescence of Hawaiian Basalts [J]. Journal Geophysical Research, 78: 6863~6867.
- Boyle R. 1664. Experiments and Considerations Upon Colours with Observations on a Diamond That Shines in the Dark [M]. Henry Herringham, London.
- Cui Tianshun and Chen Dake. 1995. Features of genetic and prospecting mineralogy of quartz in quartz type gold deposits [J]. Hunan Geology, 14(3): 163~166 (in Chinese).
- Gong Gelian and Liu Shunsheng. 2002. Preliminary study of characteristics of thermoluminescent spectra of feldspar [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 21(2): 117~120 (in Chinese).
- Gong Gelian and Tan Kaixuan. 1999. Thermoluminescence characteristic of the quartz and its application in Dating [J]. Hunan Geology, 18(2~3): 180~182 (in Chinese).
- Hwang F S W. 1970. Thermoluminescence dating applied to volcanic lava [J]. Nature, 227: 940~941.
- Ji Fengju, Li Jianping and Zheng Rongzhang. 2001. A Study on TL dating for recent eruptive volcanics [J]. Nuclear Techniques, 24(12): 980~983 (in Chinese).
- Kennedy G C and Knopff L. 1960. Dating by thermoluminescence [J]. Archaeology, 13: 147.
- Li Bingcheng. 1998. On thermoluminescence dating of loess [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 20(14): 41~44 (in Chinese).
- Li Bingcheng and Sun Guoliang. 2001. Thermoluminescence dating method of loess and paleosol [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 23(4): 58~60 (in Chinese).
- Li Huhou. 1999. Thermoluminescence Dating [M]. Beijing: Scientist Press International, Inc., 1~360 (in Chinese).
- Li Shengrong. 1992. Genetic Mineralogy and Prospecting of Rushan Gold Mines, Rushan County, Shandong Province [D]. Thesis of Doctor's Degree, China University of Geosciences (Beijing), 1~180 (in Chinese).
- Liang Baoliu, Stokes M J, Wang Weida *et al.* 1997. The TL dating of ancient porcelain [J]. Nuclear Techniques, 20(8): 478~484 (in Chinese).
- Liu Haisheng, Cheng Yexun, Wang Nanping *et al.* 2001. The application of thermoluminescence technique to the oil and gas exploration in oceanic surface sediments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 21(1): 107~112 (in Chinese).
- Liu Jingfa and Li Dahong. 1999. A study on shock effect and TL characteristics of chondrite [J]. Geotectonica et Metallogenia, 23(3): 262~266 (in Chinese).
- Liu Jingfa, Peng Jinlian, Yu Chiling *et al.* 2000. Study on the TL sensitivity, shocking phase and K content of ten H chondrites [J]. Chinese Journal of Space Science, 20(4): 328~332 (in Chinese).
- May R J. 1979. Thermoluminescence Dating of Luminescence of Solids [M]. New York: Dover, 569.

- Shao Kezhong and Li Shengrong. 1989. The thermoluminescence feature of quartz and its significance in studies of Qiyugou (model) gold deposit [J]. Journal of Hebei College of Geology, 12(2):127~133 (in Chinese).
- Shen Ying, Qin Tianjian, Gao Fengshui, et al. 2002. Method study of the thermoluminescence of calcite and its age measurement [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 24(5):15~17, 73 (in Chinese).
- Tan Kaixuan and Gong Gelian. 1999. Thermoluminescence characters of sand-shale copper deposits and their implications for ore genesis [J]. Acta Mineralogica Sinica, 19(2):183~188 (in Chinese).
- Visocekas R, Ceva T, Marti C I, et al. 1976. Tunneling progresses in afterglow of calcite [J]. Physica Solid (A), 35:315~327.
- Wan Yusong, Yang Lin, Feng Zhanglin, et al. 1999. Monitoring and studies of environmental cumulative dose of Guangdong Dayawan nuclear-power station by thermoluminescent dosimetry [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 19(2):118~122 (in Chinese).
- Wang Keyong. 2000. The applications of thermoluminescence of quartz to evaluate the auriferous feature of mineralized veins in Qiangma gold deposit [J]. Geology and Prospecting, 36(1):37~39 (in Chinese).
- Wang Nanping, Wang Ping, Cheng Yexun, et al. 1996. Principle of Quaternary sediment natural thermoluminescence survey for prospecting oil reservoir and its application [J]. Geoscience, 10(4):543~549 (in Chinese).
- Wang Shoushan. 1999. Progress and present status of thermoluminescence dosimeter [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 19(2):130~139 (in Chinese).
- Wang Wenyuan, Pan Mao, Liu Jiaqi, et al. 2000. Thermoluminescence dating of the late Quaternary loess sequence along the Huining section [J]. Acta Geoscientia Sinica, 21(4):417~422 (in Chinese).
- Wintle A G. 1977. Detailed study of thermoluminescence mineral exhibiting anomalous fading [J]. Journal of Luminescence, 15:385~393.
- Yin Gongming and Li Shenghua. 2000. Thermoluminescence dating of the last volcanic eruption in Changbai Mountain [J]. Acta Petrologica Sinica, 16(3):353~356 (in Chinese).
- Ying Jifeng, Li Shengrong, Sun Daisheng, et al. 2001. Genetic mineralogy of non-metallic minerals from Jindoushan gold deposit, Yantai, Shandong [J]. Geology-Geochemistry, 29(4):49~55 (in Chinese).
- Zheng Gongwang, Ren Xiusheng, Tian Zhaoyu, et al. 1999. A study of TL exception upon an oil/gas reservoir [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 19(2):81~89 (in Chinese).
- Zheng Qisen and Cao Jiamin. 2000. Application of the method of thermoluminescence detection to uranium-bearing sandstone deposit prospecting [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 22(1):86~89 (in Chinese).
- Zheng Rongzhang, Ji Fengju and Li Jianping. 2000. Review on thermoluminescence dating of volcanic rocks [J]. Seismology and Geology, 22 (Suppl.):42~50 (in Chinese).
- Zhu Yunping, Guo Yong, Wang Xingong, et al. 1994. Measurements and calculations of dose for lower half body exposed to 6 MVX-Rays [J]. Radiation Protection, 14(3):173~177 (in Chinese).
- 学特征 [J]. 湖南地质, 14(3):163~166.
- 龚革联, 刘顺生. 2002. 长石矿物的三维热释光谱图研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 21(2):117~120.
- 龚革联, 谭凯旋. 1999. 石英的热释光特征及其在测年中的应用 [J]. 湖南地质, 18(2,3):180~182.
- 计凤桔, 李建平, 郑荣章. 2001. 近代喷发火山岩热释光测年研究 [J]. 核技术, 24(12):980~983.
- 李秉成. 1998. 黄土热释光测年问题 [J]. 西安工程学院学报, 20(14):41~44.
- 李秉成, 孙国梁. 2001. 黄土和古土壤的热释光测年 [J]. 西安工程学院学报, 23(4):58~60.
- 李虎侯. 1999. 热释光断代 [M]. 北京: 地质出版社, 1~360.
- 李胜荣. 1992. 山东省乳山县乳山金矿成因矿物学与找矿 [D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文, 1~180.
- 梁宝鑫, Stokes M J, 王维达, 等. 1997. 古代瓷器热释光测定年代研究 [J]. 核技术, 20(8):478~484.
- 刘海生, 程业勋, 王南萍, 等. 2001. 天然热释光技术在海洋油气田勘查中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(1):107~112.
- 刘京发, 李大红. 1999. 球粒陨石的冲击作用与热释光特征研究 [J]. 大地构造与成矿学, 23(3):262~266.
- 刘京发, 彭金莲, 于赤灵, 等. 2000. H型球粒陨石 TL 灵敏度与冲击相和钾含量的研究 [J]. 空间科学学报, 20(4):328~332.
- 邵克忠, 李胜荣. 1989. 石英热发光性在祁雨沟(式)金矿床研究中的意义 [J]. 河北地质学院学报, 12(2):127~133.
- 申英, 秦天健, 高风水, 等. 2002. 方解石的热释光及测年方法研究 [J]. 西南石油学院学报, 24(5):15~17, 73.
- 谭凯旋, 龚革联. 1999. 砂页岩铜矿床的热释光特征及其铜矿成因意义 [J]. 矿物学报, 19(2):183~188.
- 万玉松, 杨琳, 封章林, 等. 1999. 广东大亚湾核电站环境辐射热释光累积剂量监测研究 [J]. 核电子学与探测技术, 19(2):118~122.
- 王可勇. 2000. 石英热发光在枪马金矿床矿脉含金性评价中的应用 [J]. 地质与勘探, 36(1):37~39.
- 王南萍, 王平, 程业勋, 等. 1996. 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, 10(4):543~549.
- 王寿山. 1999. 热释光剂量学的研究、现状及发展 [J]. 核电子学与探测技术, 19(2):130~139.
- 王文远, 潘懋, 刘嘉麒, 等. 2000. 末次间冰期以来会宁黄土剖面的热释光测年 [J]. 地球学报, 21(4):417~422.
- 尹功明, 李盛华. 2000. 长白山地区最近一次火山喷发的热释光年龄 [J]. 岩石学报, 16(3):353~356.
- 英基丰, 李胜荣, 孙岱生, 等. 2001. 山东烟台金斗山金矿非金属矿物成因矿物学研究 [J]. 地质地球化学, 29(4):49~55.
- 郑公望, 任秀生, 田昭舆, 等. 1999. 油气藏地表热释光异常的研究 [J]. 核电子学与探测技术, 19(2):81~89.
- 郑圻森, 曹家敏. 2000. 热释光测量方法在寻找砂岩型铀矿床中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 22(1):86~89.
- 郑荣章, 计凤桔, 李建平. 2000. 火山岩热释光测年述评 [J]. 地震地质, 22(增刊):42~50.
- 朱云平, 郭勇, 王兴功, 等. 1994. 6MVX 射线下半身照射人体剂量的测量和计算 [J]. 辐射防护, 14(3):173~177.

附中文参考文献

崔天顺, 陈大克. 1995. 石英脉型金矿的石英成因矿物学与找矿矿物