

应用石英释光灵敏度溯源的研究现状和展望

吕同艳¹, 龚志军², 薛蕾³

LÜ Tongyan¹, GONG Zhijun², XUE Lei³

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013;

3. 中国地震局厦门地震勘测研究中心, 福建厦门 361021

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;*

3. *Earthquake Administration of Fujian Province, Xiamen 361021, Fujian, China*

摘要:应用石英释光灵敏度进行物源研究是释光技术发展的新方向。回顾了石英释光灵敏度在测年研究中的发展现状,对其产生的机制、实验中的影响因素及其在测年中对灵敏度的监测、矫正等进行了介绍,详细介绍了空间尺度上不同沉积物(冰碛物、风成沉积物、水成沉积物)石英释光灵敏度的差异和时间序列上风成沉积物释光灵敏度的变化特征。据现有的研究成果分析,沉积历史和母岩来源对沉积物中石英的释光灵敏度的高低有重要的影响,因此可用它来追溯石英的物源。探讨该技术在物源研究领域存在的问题,对其发展前景进行了展望。

关键词:释光;石英;灵敏度;物源;示踪

中图分类号:P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2016)08-1324-08

Lü T Y, Gong Z J, Xue L. Research on provenance using luminescence sensitivity of quartz grains: Progress and prospect. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(8):1324-1331

Abstract: The Thermoluminescence (TL) and Optically Stimulated Luminescence (OSL) sensitivity of quartz grains is a new indicator to trace the provenance of deposits. Many achievements have been obtained. This paper focuses on the development of the luminescence sensitivity of quartz grains, describing the production mechanism, the influencing factors for TL and OSL sensitivity changes in the laboratory, and the ways to monitor and to correct the luminescence sensitivity changes. Then various luminescence sensitivity characteristics of quartz grains from different deposits (glacigenic sediments, eolian deposits, and aqueous sediments) in different regions are recounted in detail. Meanwhile, various temporal luminescence sensitivity characteristics are also described for the eolian deposits. The parent rock and sedimentary history play important roles in the quartz luminescence sensitivity in nature, and hence luminescence sensitivity of quartz grains can be used to infer the origin and provenance of deposits. The challenges and chances in applying such a technique in tracing are also analyzed.

Key words: luminescence; quartz; sensitivity; provenance; trace

石英是常见的主要造岩矿物之一,在火成岩、沉积岩、变质岩中均有广泛的分布,同时其物理和化学性质相对稳定,因此很多研究把石英作为示踪物源的有效指示剂^[1-8]。鉴于石英晶体对辐射能量

的敏感度高,石英是释光测年技术的主要研究对象。自20世纪50年代以来,伴随着热释光(thermoluminescence, TL)和光释光(optically stimulated luminescence, OSL)在第四纪沉积物和考古学中的应

收稿日期:2015-12-11;修订日期:2016-06-03

资助项目:中国地质科学院基本科研业务费(2015-2016)(编号:YYWF201518)、地质力学研究所基本科研业务费项目(2013-2014)(编号: DZLXK201301)、国家自然科学基金项目(批准号:41302148)和中国地质调查局项目(编号:121201104000150002)

作者简介:吕同艳(1980-),女,博士,助理研究员,从事第四纪地质与年代学研究。E-mail: tongyan_2000@163.com

用和发展,石英的释光性质得到充分的研究^[9-14]。在研究者不断革新释光测年方法和提高释光年代精度的同时,石英的释光灵敏度特征也被尝试用于沉积物的物源示踪研究,并且取得了比较可信的成果^[15-21]。但是,释光技术能否进行物源示踪,仍然存在争议。本文在总结已有研究成果的基础上,进一步探讨该技术在物源示踪方面存在的问题,并对其发展前景进行展望。

1 石英释光灵敏度在测年应用中的研究现状

尽管石英的释光灵敏度被当作是物源示踪的一个指标,但是对它的研究主要是在测年应用领域。石英的释光灵敏度是指单位剂量的释光响应^[22]。在应用再生剂量法测定等效剂量(equivalent dose, D_e)时,若使再生信号和自然信号可对比,该方法必须满足 2 个条件:①这两种信号必须来自相同的陷阱电荷,并且在地质历史时期或考古时期非常稳定;②两者有相似的灵敏度^[22-23]。因此,石英的释光灵敏度变化机制、特征、监测和矫正成为释光测年中重要的研究内容。

1.1 石英释光灵敏度的机制研究

结晶固体的释光性质和晶体本身的缺陷密切相关^[10-11]。晶体在生长过程中各类原子所处的位置都是有规则排列的,在后期的生长过程中,杂质的介入会破坏原有的规则排列,造成晶体缺陷;或外力作用也会破坏原来的晶格次序,造成晶体缺陷。晶体中有了缺陷,直接的后果就是在离子化合物中出现电荷不平衡。当核辐射作用于结晶固体时,不仅造成晶体的损伤,而且在晶体中产生电离、可移动的电子(离位电子)和空穴。当这些离位电子受到热或光激发后,会迅速地与离位的空穴结合,同时放出光子,这便是热释光或光释光。

石英晶体是一种磷光体,其 OSL 和 TL 灵敏度变化的机制问题一直存在争议。石英的释光灵敏度变化最初是在测年过程中发现的。Aitken 等^[24]发现,沉积物中和人工加热后测年样品中石英的释光灵敏度差异很大。即使均是从天然沉积物样品中分离出来的石英颗粒,也可能表现出不同的释光灵敏度^[18-21,25]。110℃ TL 峰和 OSL 均被用来监测灵敏度的变化^[22-24,26-29]。许多研究者认为,110℃ TL 和 OSL 信号可能具有相同的陷阱或缺陷^[22,30]。但是,两

者在退火、辐照、晒退过程中也表现出很多差异^[29]。因此,进一步研究两者的产生机制,仍是值得学者们思索的问题。

关于 TL 和 OSL 的发光过程,前人^[10-11,13]一般用能带理论来解释,即主要包括辐射电离、贮藏能量和受热或光激发发光 3 个过程。对于 OSL 和 TL 灵敏度变化的机制问题,学者们仍有争议,但是主要是建立在能带理论之上。

Zimmerman^[31]探讨空穴在释光中心和非释光中心分布的模型(图 1),可以借此来解释 100℃ TL 灵敏度变化的机制,他认为,石英晶体中的空穴陷阱可以分为释光中心(L)和非释光中心(K)。在给定剂量前,以释光中心捕获的空穴为主(图 1-a);当进行辐照时,辐照电离产生离穴电子,这些电子被 L 中心捕获,从而使 L 中的空穴数减少(图 1-b);辐照新产生的空穴经过扩散,最终主要贮藏在 K 陷阱中(图 1-c);当对受到辐照后的样品进行加热后,价带中已有的电子与 K 中心中的空穴相结合,而价带中的空穴又被 L 中心捕获(图 1-d),从而提高了 L 中心的空穴数量,因此也提高了 TL 的灵敏度。

Bøtter-Jensen 等^[32]更加关注温度导致的 OSL 灵

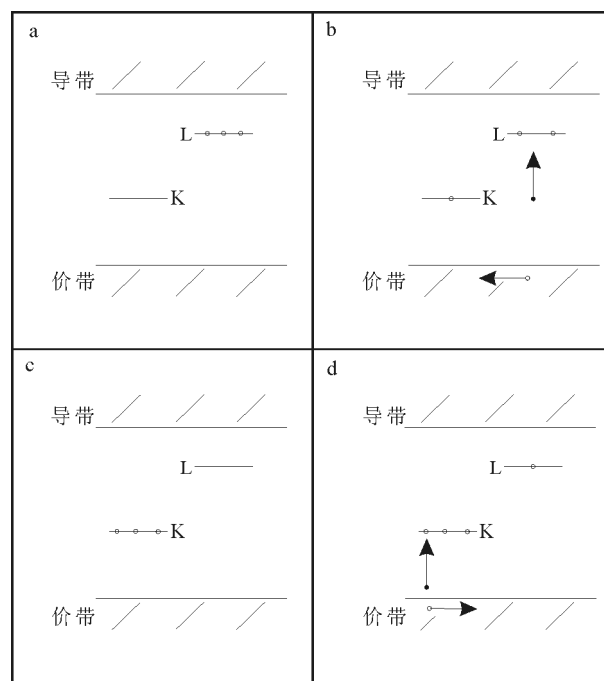


图 1 空穴“o”在释光中心(L)和非释光中心(K)的分布模型^[31]

Fig. 1 Schematic diagram of possible distribution of trapped holes (o) between luminescence centers L, and nonluminescence centers K

灵敏度的变化。加热会导致释光灵敏度大大提高,而这种提高与释光结合中心的“浓度”有很大关系。因此,他们建立了一个新的模型(图2),探讨在退火过程中OSL灵敏度是如何变化的。模型中设定了3种不同能级的电子陷阱,陷阱1是一种能量比较低的陷阱,在接受辐照时部分稳定,例如石英的110°C TL对应的陷阱;陷阱2代表在OSL测试过程中能被清空陷阱;陷阱3是能级较高的“深陷阱”,无论是在OSL测试还是TL测试中均无法被清空。回复中心(空穴陷阱)也被分为2类(图2中4和5)。假设其中的回复中心4可以产生释光,而回复中心5则无法产生释光,即前者是释光中心,后者则是非释光中心。在退火过程中,不同的退火温度可以清空不同“深度”陷阱中的电荷,温度越高,越多“深陷阱”中的电荷被转移出来,从而影响整个系统的剂量响应。经实验论证,加热会提高释光中心的浓度。释光中心浓度的提高将直接导致产生的光子增加,从而大大提高释光灵敏度。

Li^[29]集合前2种模型的见解,进一步健全和完善了OSL和TL灵敏度变化的机制,建立如下模型(图3)。他认为,OSL和TL灵敏度的变化是一个复杂的过程。石英晶体中存在许多电子陷阱(T)和空穴陷阱(R和L)。R根据“深度”(能量)的不同,又可分为不同的空穴中心:R_s、R_{T1}、R_{T2}。释光只是在电子从电子陷阱中逸出并与L空穴中心相结合过程中产生的,当与R空穴结合则不会产生或无法探测

到。因此,OSL和110°C TL的灵敏度变化主要受控于L空穴和R空穴的“浓度”比。当L空穴的浓度大时,两者的灵敏度高。但是,OSL和110°C TL的灵敏度在不同的退火温度下可能会产生差异,这种差异主要与R空穴陷阱有关。110°C TL的灵敏度变化与R_s、R_{T1}和R_{T2}都有关,而OSL灵敏度的变化只与能级较低的R_s有关。在不同的退火温度下,空穴在L和R空穴陷阱之间移动,从而表现出OSL和110°C TL的不同灵敏度变化。

这3种模型均强调了加热对释光灵敏度有增强的作用,也指出这种提高与释光中心浓度的提高有很大关系。较Zimmerman^[31]创立的模型,Bøtter-Jensen等^[32]更好地解释了不同退火温度是如何影响释光灵敏度变化的。Li^[29]则更好地解释了OSL和110°C TL灵敏度在不同的退火温度下产生差异的机制。然而,对辐照、晒退作用对释光灵敏度影响的机制研究尚需加强。

1.2 石英释光灵敏度实验中的影响因素

在实验测试过程中,引起灵敏度发生变化的因素主要包括辐照、加热和晒退。①辐照:Zimmerman^[31]曾指出辐射对结晶固体有损伤,该损伤使得晶体中陷阱的数目及发光中心的数目增多,从而引起石英110°C TL峰对辐射响应的灵敏度增加。李虎侯^[33]也曾利用辐射引起石英110°C TL峰对辐射响应的灵敏度增加进行年龄测定。Li^[29]对比了经α源和β源分别照射后石英灵敏度的变化情况,他发现,使用

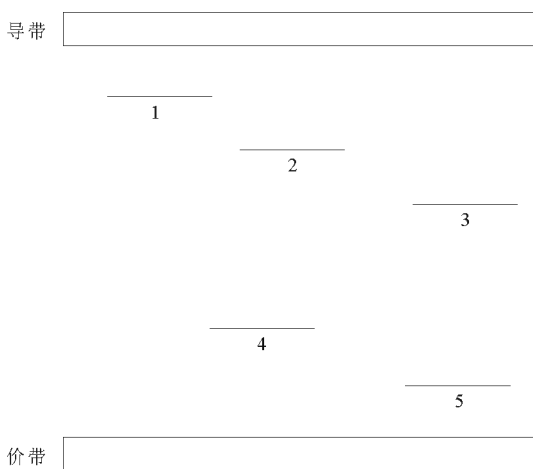


图2 石英的OSL灵敏度变化机制模型^[32]
(1~3代表不同能级的陷阱,4代表释光中心,5代表非释光中心)

Fig. 2 The schematic band model used to explain the OSL sensitivity change

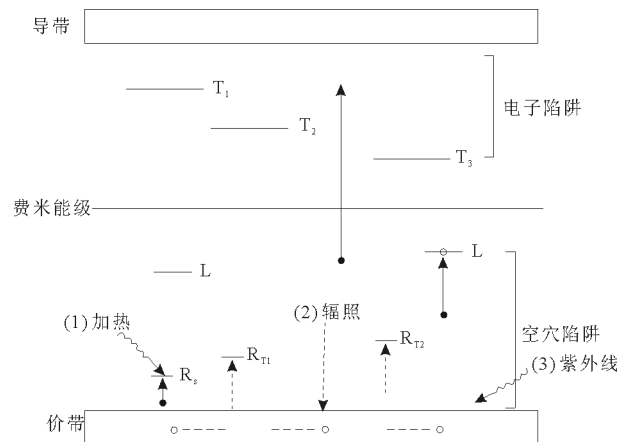


图3 OSL和110°C TL灵敏度变化模型
(“·”代表电子,“o”代表空穴,T代表电子陷阱,R代表不同能量的空穴陷阱^[29])

Fig. 3 Schematic diagram of multiple levels of R traps applied

α 源照射后的样品,即使对样品辐照一个很大的剂量,110℃ TL 灵敏度变化也很小,OSL 灵敏度降低了 36%;而用 β 源照射的样品,两者的灵敏度均大大增加^[29]。②加热:不同加热温度也是影响石英释光灵敏度的重要因素。前剂量效应即是这种现象的一种应用,即接受过一定剂量照射的样品,加热激活后灵敏度会大大增加^[34-35]。当然,这种现象与其之前接受的剂量和热激活有关。Li^[29]监测到退火温度从 160℃ 升至 1000℃ 时,110℃ TL 和 OSL 灵敏度均增加,当温度高于 600℃ 时,两者的灵敏度变化幅度差异增大;③晒退:实验室的晒退也会引起释光灵敏度的变化^[23-24,29]。不同的激发光源也会导致灵敏度的变化^[10,29,36]。例如,实验数据已证实紫外光(UV)可以降低 110℃ TL 和 OSL 的灵敏度^[10,29]。

1.3 石英释光灵敏度监测和矫正

目前,研究石英的释光灵敏度主要用来测定更精确的年龄。在运用再生剂量法的过程中,如果灵敏度的变化可以控制到最小或忽略,那么这种方法将可以在沉积物测年中得到广泛的应用^[14,27,30,37-40]。为了能够监测灵敏度的变化,研究者提出了一些有效的方法。Stoneham 等^[27]提出,用石英 110℃ TL 峰对实验剂量的响应变化监测灵敏度的变化。Murray 等^[30]运用石英的 OSL 和 110℃ 峰对相同实验剂量的成线性响应验证灵敏度矫正的可靠性。在应用释光技术对沉积物测年过程中,单片再生剂量法(Single Aliquot Regeneration, SAR)已得到广泛应用^[14,30,41]。该程序与以往的测试方法相比,成功引入了实验剂量,通过再生光释光信号对实验剂量的响应完成灵敏度的矫正。而 Singhvi 等^[42]认为,该程序忽略了测试天然释光信号过程中灵敏度的变化,应用 110℃ TL 峰对天然释光信号进行矫正,建立了更加完善的天然灵敏度矫正-单片再生剂量法(Natural Sensitivity Corrected-SAR, NSC-SAR)。一些学者还采用建立模型的方式来研究释光灵敏度。Wintle 等^[22]对光晒退和热退火样品的灵敏度和预热时间建立了函数关系。李盛华^[23]提出了 OSL 灵敏度变化模式并进行了验证。Rhodes^[43]提出用一个简单的数值模型模拟不同大小(颗粒数量)样片灵敏度的变化,从而得到 D_e 分布规律。总之,灵敏度的监测和矫正研究,已经成为测年过程中必须要考虑和涉及的问题。这些研究成果也为物源研究中灵敏度研究奠定了基础。

2 应用石英释光灵敏度特征溯源的研究现状

2.1 应用石英释光灵敏度溯源的依据

石英的化学成分是 SiO₂, 晶体属三方晶系的氧化物矿物,即低温石英(α -石英)。广义的石英还包括高温石英(β -石英)。石英因粒度、颜色、包裹体等的不同而有许多变种。不同类型的石英,因其晶体缺陷不同,释光特征也不同。这种晶体缺陷的产生主要与石英晶体结构、所含杂质离子的种类和含量,以及环境辐射剂量有关。而石英的晶体结构和晶体缺陷与其母质岩体、形成历史、周边环境状况均有密切的关系。石英在形成以后,经过复杂的搬运和沉积过程,可以简单地理解为是不同次数的辐照、晒退、加热过程。这些过程都会对石英释光灵敏度产生影响。由此推断,相同地质历史时期形成的石英经历了相似的搬运过程、埋藏时间及环境剂量率,这就决定了其灵敏度具有相似性。这是运用释光灵敏度溯源的依据。

2.2 不同沉积物中物源示踪的研究成果

2.2.1 空间尺度上的应用成果

在释光测年过程中,众多研究者已经注意到不同地域样品中石英的释光灵敏度是不同的^[18-20,44-45]。

释光灵敏度高的石英更适合测年,而较暗的石英则给释光测年带来更大的困难和挑战。冰川作用下的沉积物是典型的代表。尽管研究者已经应用光释光技术对冰碛物、高原上湖岸沉积物等建立了很多年代序列,但是冰川作用下沉积的石英的释光灵敏度普遍较低,是困扰释光定年的一个问题^[46-54]。

不同沙漠中石英的释光灵敏度存在差异。Li 等^[18]对采自中国北部沙漠的石英的释光灵敏度进行了研究,通过 OSL 和 110℃ TL 对相同实验剂量响应的比值,得出结论:采自呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地的石英颗粒的灵敏度比毛乌素沙地和库布其沙地的石英颗粒的灵敏度高,而且前两者和后两者分别比较接近,与其地域性分布的特征较一致。Zheng 等^[19]在中国北部 12 个沙漠采样,分析了各个区域石英释光灵敏度的不同特征,并根据它们的灵敏度特征划分为 3 组,其中东部沙漠(包括西部的古尔班通沙漠)石英的释光灵敏度高,西部和中部沙漠样品较低^[19]。Lü 等^[20]依据石英颗粒同一粒级(90~125 μm)的释光灵敏度不同,把 11 个沙漠样品划分

为4组,分别是东部沙区(浑善达克和呼伦贝尔沙地)、中部沙区(库布其沙地、毛乌素沙地、内蒙中部戈壁、巴丹吉林和腾格里沙漠)、西部沙漠(塔克拉玛干、库姆塔格和柴达木盆地沙漠)和西北部沙漠(准噶尔盆地中古尔班通古特沙漠)。为了进一步验证释光信号在物源研究中的适用性,郑辰鑫等^[21]对中国北方沙漠石英的恒源光释光信号和线性调制光释光信号进行了组分分解,进一步验证东西部释光组分存在差异。

河流不同流域的石英也表现出多样的释光灵敏度特征。Pietsch等^[44]从澳大利亚 Castlereagh River 的不同流域采样,发现河床上的石英释光灵敏度随搬运距离的增大而增大。下游石英释光灵敏度较上游的高,主要是因为下游的石英经受辐射、晒退、加热的次数比上游多。对不同沉积历史的水成沉积物、海岸沉积物中石英的释光灵敏度也有研究^[45,55-57]。

2.2.2 时间序列上的应用成果

与空间上对石英颗粒释光灵敏度的研究相比,研究者对时间序列上风成沉积物中石英颗粒释光信号的变化研究甚少。Lai等^[17]在对塬堡黄土剖面进行OSL测年时发现,OSL灵敏度发生有规律的变化,推测可能与黄土的物源有关,但没有进一步研究和探讨究竟是否与物源有关系,以及它们之间是如何关联的。Lu等^[20]发现第四纪黄土和古近纪—新近纪红粘土的释光灵敏度存在很大差异,推测这两者的物源发生了改变。并且,在进一步对洛川剖面末次间冰期以来的黄土—古土壤中石英释光灵敏度的研究中发现,释光灵敏度在冰期和间冰期发生有规律的变化,主要表现为间冰期时,释光灵敏度高;冰期时,释光灵敏度低。造成这种现象的原因主要在于,不同地质时期石英的来源和潜在源区的范围发生了较大变化^[58]。

2.3 影响释光灵敏度变化的自然因素

相同物质来源的石英颗粒因形成的温压条件、经历的搬运过程、沉积的历史相似,同时它们的释光性质受物理风化影响小,因此释光灵敏度值相似,为进行物源研究提供了依据。概括而言,释光灵敏度主要受2个因素影响,分别是经历的沉积历史和岩石类型。

2.3.1 沉积历史

在释光测年方法的研究中,实验室中的一些测试会改变石英释光灵敏度,包括加热、辐照和晒退。多次的辐照、加热和晒退会大大提高石英释光的灵敏度^[59-62]。起初人们只是希望把石英的释光灵敏度限制在一个合理的范围内,或是通过校正的办法使之对测年结果的影响最小化。但是,在物源研究中,自然界中的石英自形成后便不断经历天然的辐照、晒退、加热过程,并且这种过程不断循环,如图4所示。石英颗粒无论是被风还是被水搬运,运输的过程中晶体中已贮藏的能量会被阳光晒退,当石英被埋藏时,又接受周围环境中放射性物质(铀、钍、钾和氩)和宇宙射线的辐照,重新积聚能量。这个过程周而复始,不断循环。循环的次数越多,石英的释光灵敏度越高^[44]。

根据石英释光灵敏度受自然界沉积历史的影响,前人对石英的物质来源做出判断^[19-21,44,55,63-65]。Pietsch等^[44]通过对澳大利亚东南部 Castlereagh River 上、中、下游的石英释光灵敏度的研究,发现上游的石英较暗,即释光灵敏度较低,越往下游,石英的释光灵敏度越高。因此判断石英颗粒在自然界中经历的辐照、晒退、埋藏的循环次数越多,释光灵敏度越高。这一研究成果为本次研究提供参考和依据。

现有研究表明,石英形成条件若高于500℃,则其释光灵敏度会大大提高^[55]。因此,石英经历的热

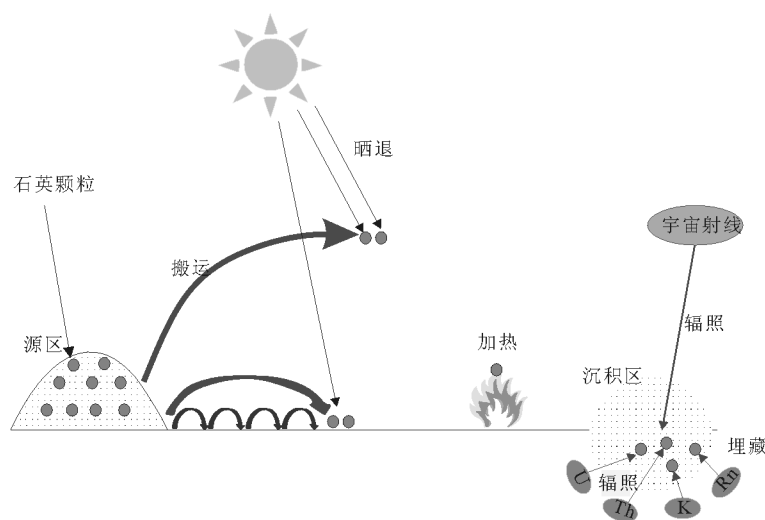


图4 石英颗粒的释光灵敏度受沉积历史的影响示意图

Fig. 4 Conceptual model showing the natural processes of quartz grain involved from its source area to the depositional region

历史,包括火山喷发、烘焙作用、自然灾害都是释光灵敏度的影响因素。石英释光灵敏度反映的热历史,也是判断石英物质来源的一个依据。

2.3.2 母岩类型

自然界中的石英来自于不同的岩石类型,而这些岩石又是在不同压力和温度下形成的。因此,不同母质来源的石英晶体中缺陷和杂质的类型和数量是不同,后者会引起不同的释光灵敏度。Preusser等^[64]对Westland的石英样品进行研究发现,该地的石英很暗,且释光灵敏度变化较大,这种现象很难用沉积历史来解释。同时,认为,这与石英来源的母岩类型有关。中国东北部沙地遍布的火山熔岩和熔岩台地可能是该地区石英灵敏度高的重要因素^[20]。Sawakuchi等^[55]利用单颗粒方法,对不同类型岩石中石英颗粒的释光灵敏度进行研究,发现石英在母岩中的结晶温度对释光灵敏度影响很大,来自高温结晶岩石中的石英释光灵敏度高,例如流纹岩。石英在母岩中的结晶温度可能反映了晶体形成之初内部缺陷的类型。Preusser等^[63]发现,随着结晶温度的升高,内部缺陷的浓度升高。并且,随着石英结晶温度的提高,一些杂质离子,如 Al^{3+} 和 Ti^{4+} 更容易取代 Si^{4+} ,从而提高释光灵敏度^[66-67]。当然,这方面的研究仍很薄弱,需要进一步开展相关研究。

3 存在问题及前景展望

尽管释光灵敏度的研究与释光年代学近乎同步发展,但是应用其进行物源研究仍处于起步阶段,存在很多问题,具有较大提升空间,主要包括以下几个方面。

(1)不同岩性的石英释光灵敏度特征。尽管从理论上研究者探讨了不同母岩中石英的释光灵敏度应该存在差异^[20,55,63],但是,实验数据仍较少。应通过选取相同区域、相近地质历史时期的不同岩性岩石中的石英颗粒,分析其释光灵敏度特征,完善基础数据。

(2)沉积历史与灵敏度高低的关系需要进一步探讨。尽管前人研究已经证实石英颗粒在自然界中经历的辐照、晒退和埋藏的循环次数越多,释光灵敏度越高^[44],但是,这种结论是定性的,应加强定量研究。可选取河流上、中、下游中的石英,或黄土高原中自北西向南东不同剖面、相同地质历史时期的石英,对它们的释光灵敏度进行探讨,可以更清

楚地了解沉积历史对其的影响,也可进一步探讨沉积物中石英的搬运距离与灵敏度高低变化的关系。

(3)母岩和沉积历史对沉积物中石英释光灵敏度影响的权重研究。母岩影响和控制了石英“先天”的释光信号,而沉积历史又进一步增强了石英颗粒的释光灵敏度。如何将“先天”的释光信号和后期的释光信号剥离,这个问题是限制释光在物源示踪应用中的瓶颈问题^[68]。要解决这个问题,就要探讨母岩和沉积历史对沉积物中石英释光灵敏度影响的权重。研究者可选择岩性较单一、源区较封闭的区域,对比研究母岩和不同搬运距离的石英释光灵敏度的差异,初步分析两者对石英释光灵敏度的影响因子。不同岩性、不同区域母岩对石英释光灵敏度影响因子的确定,将为释光技术在物源示踪方面的应用提供更多的数据支持。

(4)热历史的研究。在实验测试过程中,加热作用对释光灵敏度影响最明显;自然界中,石英的热历史同样对灵敏度影响较大,火山喷发作用和古火灾的影响不容小觑。应加强两者与释光灵敏度的关联研究。

(5)单颗粒石英释光灵敏度特征的研究。与单片法相比,单颗粒石英释光灵敏度对物源的指示意义更为明确,将是物源研究的重要方向。

虽然应用石英释光灵敏度进行物源研究存在很多问题,但是值得欣慰的是,这种新的物源示踪方法正在逐渐被人们所认识。若研究人员在获取释光年代序列的同时,可以通过石英的释光灵敏度特征进行物源区识别,可谓一举两得。再者,若该方法发展更为成熟,可以通过辐照一定剂量的石英,将其作为一种天然的有效示踪剂,为监测泥石流、河流淤积、水坝泄洪等工作服务。因此,该项研究虽处于起步阶段,但是前景非常广阔。

致谢:本次研究得到香港大学李盛华教授和中国地质大学(武汉)赖忠平研究员的悉心指导,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]孙有斌,安芷生.风尘堆积物中石英颗粒表面微结构特征及其沉积学指示[J].沉积学报,2000,18(4):506-509.
- [2]黄求获,徐文强.我国不同海区沉积物石英颗粒表面的微结构[J].海洋科学,1997,21(2):43-47.
- [3]李珍,张家武.西宁黄土石英颗粒表面结构与黄土物质来源探讨[J].沉积学报,1999,17(2):221-225.

- [4]乔淑卿,杨作升.石英物源示源研究进展[J].海洋科学进展,2006,24(2):266-274.
- [5]侯圣山,杨石岭,丁仲礼.风成沉积物4~16 μ m石英氧同位素记录及其物质来源意义[J].中国科学(D辑),2003,33(6):535-542.
- [6]Rink W J. Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in Quaternary science and archaeometry[J]. Radiation Measurements, 1997, 27(5/6):975-1025.
- [7]业渝光,和杰,刁少波.沉积物中石英的ESR测年研究[J].核技术,1993,16(4):222-224.
- [8]张绍平,顿铁军.阴极发光显微镜在岩矿鉴定方面的应用[J].西安地质学院学报,1989,11(1):40-49.
- [9]Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical dating of sediments[J]. Nature,1985, 313(5998):105-107.
- [10]Aitken M J. Thermoluminescence Dating[M]. Academic Press, 1985: 1-359.
- [11]Aitken M J. An Introduction to Optical Dating[M]. Oxford University Press, 1998:1-263.
- [12]Wintle A G, Catt J A. Thermoluminescence dating of soils developed in late devensian loess at pegwell bay, Kent[J]. Journal of Soil Science, 1985, 36(2):293-298.
- [13]Wintle A G. A review of current research on TL dating of loess[J]. Quaternary Science Reviews, 1990, 9(4):385-397.
- [14]Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. Radiation Measurements, 2000, 32(1):57-73.
- [15]Derbyshire E. Aeolian sediments in the Quaternary record: An introduction[J]. Quaternary Science Reviews, 1995, 14(7/8):641-643.
- [16]Chithambo M L, Preusser F, Ramseyer K, et al. Time-resolved luminescence of low sensitivity quartz from crystalline rocks[J]. Radiation Measurements, 2007, 42(2):205-212.
- [17]Lai Z P, Wintle A G. Locating the boundary between the Pleistocene and the Holocene in Chinese loess using luminescence[J]. Holocene, 2006, 16(6):893-899.
- [18]Li S H, Chen Y Y, Li B, et al. OSL dating of sediments from deserts in northern China[J]. Quaternary Geochronology, 2007, 2:23-28.
- [19]Zheng C X, Zhou L P, Qin J T. Difference in luminescence sensitivity of coarse-grained quartz from deserts of northern China[J]. Radiation Measurements, 2009, 44(5):534-537.
- [20]Lü T Y, Sun J M. Luminescence sensitivities of quartz grains from eolian deposits in northern China and their implications for provenance[J]. Quaternary Research, 2011, 76:181-189.
- [21]郑辰鑫,周力平.石英释光信号作为粉尘物源示踪手段的再研究[J].第四纪研究,2012,32(5):1036-1045.
- [22]Wintle A G, Murray A S. Luminescence sensitivity changes in quartz[J]. Radiation Measurements,1999, 30(1):107-118.
- [23]李盛华.光释光信号灵敏度变化的模式,验证和推论[J].核技术,1995,18(8):458-462.
- [24]Aitken M J, Smith B W. Optical dating-recuperation after bleaching[J]. Quaternary Science Reviews, 1988, 7:387-393.
- [25]Botter-Jensen L, Duller G A T. A new system for measuring optically stimulated luminescence from quartz samples[J]. International Journal of Radiation Applications & Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks & Radiation Measurements, 1992, 20(4):549-553.
- [26]Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Haskell E H. Light-induced emission-spectra from some quartz and feldspars[J]. Nuclear Tracks & Radiation Measurements, 1991, 18(1):127-131.
- [27]Stoneham D, Stokes S. An investigation of the relationship between the 110°C TL peak and optically stimulated luminescence in sedimentary quartz[J]. Nuclear Tracks & Radiation Measurements, 1991, 18(1/2):119-123.
- [28]Wintle A G, Murray A S. The relationship between quartz thermoluminescence, photo-transferred thermoluminescence, and optically stimulated luminescence[J]. Radiation Measurements, 1997, 27(4):611-624.
- [29]Li S H. Luminescence sensitivity changes of quartz by bleaching, annealing and UV exposure[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2002, 157(3):357-364.
- [30]Murray A S, Rorberts R G. Measurement of the equivalent dose in quartz using a regenerative-dose single-aliquot protocol[J]. Radiation Measurements, 1998, 29(5):503-515.
- [31]Zimmerman J. The radiation-induced increase of the 100°C thermoluminescence sensitivity of fired quartz[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1971, 4:3265-3275.
- [32]Botter-Jensen L, Agersnap L N, Mejdahl V, et al. Luminescence sensitivity changes in quartz as a result of annealing[J]. Radiation Measurements, 1995, 24:535-541.
- [33]李虎侯.用石英110°C热释光峰灵敏度增高法测定年龄[J].核电子学与探测技术,1984,4(1):11-18.
- [34]尹功明,李盛华.石英的热释光前剂量特征及其在地学上的初步应用[J].地震地质,2000,12,22(增刊):37-41
- [35]王晓聆,张慧军,孙森等.温度对细粒石英前剂量热释光响应的影响[J].中国医学物理学杂志,1998,15(2):116-117.
- [36]Roberts H M, Wintle A G. Luminescence sensitivity changes of polymineral fine grains during IRSL and [post-IR] OSL measurements[J]. Radiation Measurements, 2003, 37(6):661-671.
- [37]Wintle A G, Murray A S. Towards the development of a preheat procedure for OSL dating of quartz[J]. Radiation Measurements, 1998, 29(1):81-94.
- [38]Murray A S, Mejdahl V. Comparison of regenerative-dose single-aliquot and multiple-aliquot (SARA) protocols using heated quartz from archaeological sites[J]. Quaternary science reviews, 1999, 18(2): 223-229.
- [39]Murray A S, Wintle A G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability[J]. Radiation Measurements, 2003, 37(4):377-381.
- [40]Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000yr for the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Research, 2007, 67(1):152-160.

- [41]Murray A S, Roberts R G, Wintle A G. Equivalent dose measurement using a single aliquot of quartz[J]. *Radiation Measurements*, 1997, 27(2):171–184.
- [42]Singhvi A K, Stokes S C, Chauhan N, et al. Changes in natural OSL sensitivity during single aliquot regeneration procedure and their implications for equivalent dose determination[J]. *Geochronometria*, 2011, 38(3):231–241.
- [43]Rhodes E J. Quartz single grain OSL sensitivity distributions: Implications for multiple grain single aliquot dating[J]. *Geochronometria*, 2007, 26(1):19–29.
- [44]Pietsch T J, Olley J M, Nanson G C. Fluvial transport as a natural luminescence sensitizer of quartz[J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(4):365–376.
- [45]Tsukamoto S, Nagashima K, Murray A S, et al. Variations in OSL components from quartz from Japan sea sediments and the possibility of reconstructing provenance[J]. *Quaternary International*, 2011, 234(1):182–189.
- [46]Duller G A T. Single grain optical dating of glacial deposits[J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1(4):296–304.
- [47]Fuchs M, Owen L A. Luminescence dating of glacial and associated sediments: review, recommendations and future directions[J]. *Boreas*, 2008, 37(4):636–659.
- [48]Rhodes E J, Pownall L. Zeroing of the OSL signal in quartz from young glaciofluvial sediments[J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2):581–585.
- [49]Rhodes E J, Bailey R M. The effect of thermal transfer on the zeroing of the luminescence of quartz from recent glaciofluvial sediments[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16(3):291–298.
- [50]Rhodes E J. Observations of thermal transfer OSL signals in glacial quartz[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(5):595–602.
- [51]Richards B. Luminescence dating of Quaternary sediments in the Himalaya and High Asia: a practical guide to its use and limitations for constraining the timing of glaciation[J]. *Quaternary International*, 2000, 65(99):49–61.
- [52]Richthofen B F. II—On the Mode of Origin of the Loess[J]. *Geological Magazine (Decade II)*, 1882, 9(7):293–305.
- [53]Lukas S, Spencer J Q G, Robinson R A J, et al. Problems associated with luminescence dating of Late Quaternary glacial sediments in the NW Scottish Highlands[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1):243–248.
- [54]Thrasher I M, Mauz B, Chiverrell R C, et al. Luminescence dating of glaciofluvial deposits: A review[J]. *Earth–Science Reviews*, 2009, 97(1):133–146.
- [55]Sawakuchi A O, Blair M W, DeWitt R, et al. Thermal history versus sedimentary history: OSL sensitivity of quartz grains extracted from rocks and sediments[J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(2):261–272.
- [56]Sawakuchi A O, Dewitt R, Blair M W, et al. Quartz OSL sensitivity as a proxy for storm activity on the southern Brazilian coast during the Late Holocene[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 13(6):92–102.
- [57]Zular A, Sawakuchi A O, Guedes C C F, et al. Attaining provenance proxies from OSL and TL sensitivities: Coupling with grain size and heavy minerals data from southern Brazilian coastal sediments[J]. *Radiation Measurements*, 2015, 81:39–45.
- [58]Lü T Y, Sun J M, Li S H, et al. Vertical variations of luminescence sensitivity of quartz grains from loess/paleosol of Luochuan section in the central Chinese loess plateau since the last interglacial[J]. *Quaternary Geochronology*, 2014, 22(3):107–115.
- [59]Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single–aliquot regeneration dating protocols[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4):369–391.
- [60]McKeever S W S, Botterfjensen L, Larsen N A, et al. Optically stimulated luminescence sensitivity changes in quartz due to repeated use in single aliquot readout: Experiments and computer simulation[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 1996, 65:49–54.
- [61]Moska P, Murray A S. Stability of the quartz fast–component in insensitive samples[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(7):878–885.
- [62]Koul D K, Chougankar M P. The pre–dose phenomenon in the OSL signal of quartz[J]. *Radiation Measurements*, 2007, 42(8):1265–1272.
- [63]Preusser F, Chithambo M L, Gotte T, et al. Quartz as a natural luminescence dosimeter[J]. *Earth–Science Reviews*, 2009, 97(1):184–214.
- [64]Preusser F, Ramseyer K, Schluchter C. Characterisation of low OSL intensity quartz from the New Zealand Alps[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(7/8):871–877.
- [65]Fitzsimmons K E, Rhodes E J, Barrows T T. OSL dating of south-east Australian quartz: A preliminary assessment of luminescence characteristics and behavior[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5:91–95.
- [66]Dennen W H, Blackburn W H, Quesada A. Aluminum in quartz as a geothermometer[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1970, 27(4):332–342.
- [67]Wark D A, Watson E B. TitaniumQ: a titanium–in–quartz geothermometer[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(6):743–754.
- [68]Fitzsimmons K E. An assessment of the luminescence sensitivity of Australian quartz with respect to sediment history[J]. *Geochronometria*, 2011, 38(3):199–208.