

陆地和海洋环境演变研究中的释光测年进展

龚革联

(中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要:晚全新世以来所发生的特征环境事件的年龄测定,由于研究地区复杂及独特的地质条件,能够充分适用的测年方法有限,而释光测年方法(包括热释光和光释光方法)独有的揭示砂粒级无机成分末次曝光年龄的特点,正好适合于复杂的海岸带沉积环境,并且没有或者较少受到宇宙成因核素年代学分析方法中核素污染等干扰因素的影响。评述了释光测年方法的进展情况,并通过国内外在陆地、海洋和海陆带环境演变响应研究中几个成功运用释光测年方法的案例,分析了这种放射性测年方法的特点,并指出今后释光年代学方法研究的方向。

关键词:热释光;光释光;海陆交互带;环境演变响应

中图分类号:P597.3

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2006)02-0133-06

1 测年方法

陆地、海洋和海岸带地区环境演变信息的提取离不开对所发生沉积事件和沉积产物时空信息的获取。其中,年代学资料的获取显得尤为重要。而适合于提取这些沉积事件和沉积产物的年龄信息的方法众多,常见的主要有:放射成因惰性气体方法(包括K-Ar法和U-He法),铀系方法(包括 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 法、 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 法、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 法、 ^{210}Pb 法、 ^{226}Rn 法、 $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Rn}$ 法等),宇宙核素方法(包括 ^3H 法、 ^3He 法、 ^{10}Be 法、 ^{14}C 法、 ^{26}Al 法、 ^{32}Si 法等),粒子径迹方法(包括裂变径迹法、 α 反冲径迹法),辐射剂量学方法(包括热释光法、光释光法、电子自旋共振法),地球轨道、气候和地层学方法(包括纹泥法、树轮法、米氏周期法、氧同位素法、冰心地层法、孢粉法等)和古地磁方法等。这些测年方法从沉积事件和沉积物中提取时间信息的原理、前提条件、适应对象和局限性互不相同。图1为这些常用的测年方法所适应的年龄范围以及被采用的情况。图中填充的灰度量级表征了各个测年方法在各个待测时间范围内被采用的频度高低,灰度大者表示采用的频度大,反之则小。从图1中看出如下趋势,首先,对全新世所发生的沉积事件的年龄测定,多数人采用 ^{14}C 法、热释光法、光释光法等,较少采用电子自旋共振、裂变径迹法、钾-氩法。其次,早更新世及更早时间发生的沉

积事件的年龄测定,则与全新世的情况正好相反。而从早更新世以来到全新世,可以运用的测年方法最多,图1中列出的每一种测年方法都可以适应于这一年龄范围。其中释光测年方法(包括热释光法和光释光法),因为分析测试对象是自然界中最为常见的石英和长石矿物,因而更多地受到了从事地质环境演变研究者的关注。

在全球变化与环境演变研究领域,人们关注更多的是陆内或者海洋,海陆相互作用及其环境演变的研究程度相对较弱。原因是多方面的,其中缺乏获取海岸带地区沉积物年龄信息的测年方法是一个重要原因。海岸带地区发生的沉积事件和沉积过程非常复杂,除了风成作用、河湖相沉积作用外,更多的是海平面涨落引起的海水进退、河流冲刷、高能量事件(诸如风暴潮、海啸等)等的作用。这些事件通常具有非周期性、不连续性、突发的特点。释光测年方法可以较少受到这些沉积环境的干扰,近年来对于释光测年方法的深入研究和在海岸带地区的应用也证实了这种趋势。由此,本文通过对近年来国内外在陆地、海洋和海岸带地区的沉积物年龄信息的释光年代提取方法的研究,并结合作者几年来对于热释光光谱特征的研究,对陆地、海洋和海岸带地区沉积事件和沉积物释光测年方法的发展和研究做一简单评述。

2 释光测年进展

辐射剂量学应用之测年方法中的释光方法包括热释光和光释光方法,两者在年龄估算的原理上是一致的,释光年龄信息的准确度至少取决于3个主要因素:自然等效剂量De、年剂量率Dr、释光归零程

基金项目:中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金(MS-GLCAS06-2)

作者简介:龚革联(1967—),男,高级工程师,博士生,从事释光年代学方面的研究工作, E-mail: gg11118@yahoo.com.cn

收稿日期:2005-10-24; **改回日期:**2006-01-09. 周立君编辑

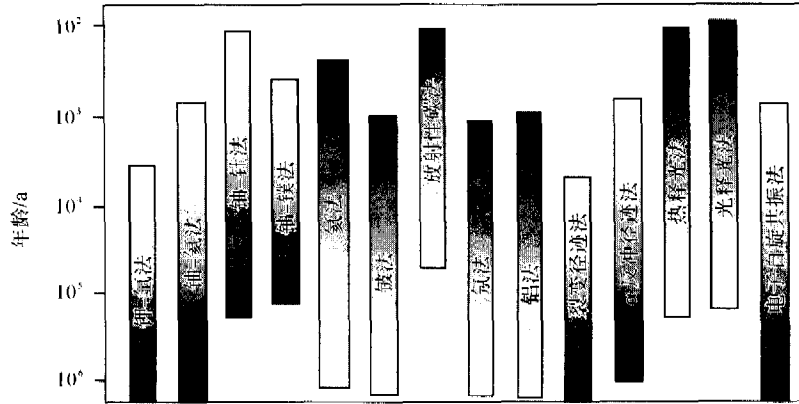


图 1 放射性年代学方法综合示意图(据 Wagner G A 改动)

Fig.1 A comparison of radiometry dating methods(modified from Wagner G A)

度。其中,每个因素又分别与诸多复杂的地质过程相联系,室内分析拟合总是在一定假设条件下进行,与实际自然条件不可能完全一致。因此,研究释光测年方法的优化,实质上就是研究如何在室内条件下,尽可能拟合出样品在所处地质条件下或者地质过程中的释光信号随时间而变化的增长特性,并进而从中提取出时间信息的过程。迄今为止的研究结果表明了如下几点:

(1) **释光年龄数据是可信的** 来自同一地点有机碳样品的¹⁴C年龄和无机沉积物的释光年龄的比较,至少在4万年来的时间范围内是具有说服力的。Smith等人比较了1997年以前所发表的释光年龄与¹⁴C年龄^[1],而后来Prescott等人对于这些比较加以补充^[2],结果表明,在测量误差范围内两种年龄数据是吻合的。Madsen A T则较成功地验证了释光年龄与²¹⁰Pb和¹³⁷Cs年龄的对比结果^[3]。释光年龄数据与更多的其他年龄方法分析结果比较也显示出这种趋势。Andrew S Murray等人^[4]列出近年来国

外研究者开展的各种沉积类型产物的释光年龄与其他方法年龄的对比情况,图2为这种比较结果的直观情况。图中风成沉积的释光年龄与其他方法年龄基本成对角线关系,即彼此吻合得较好,河流和深海沉积的释光年龄与其他方法年龄对比结果相对不如风成沉积过程产物的情形,并且当沉积物标本年龄相对越年轻和相对越老时,对比结果相差越大。

(2) **释光年龄可测范围已经得到扩充** 释光年龄方法已经可以测定年龄更老或者更新的样品。热释光光谱揭示,比起传统测年所采用的紫光和蓝光释光,火成岩中的长石、石英矿物的红光、近红外的热释光能量占据更大的份额^[5-7]。因此,将传统的探头改换成冷却式的对红光和近红外光灵敏的探头进行热释光信号的探测,实验证明这部分热释光能量对剂量的响应更好,响应范围更宽^[8-9]。测试结果证实,石英的红光、近红外热释光可测定超过一百万年的年龄^[10]。对于年龄更新的砂样,如晚全新世以来的河流洪水沉积沙、海滩沙等,在剔除或者校正光晒

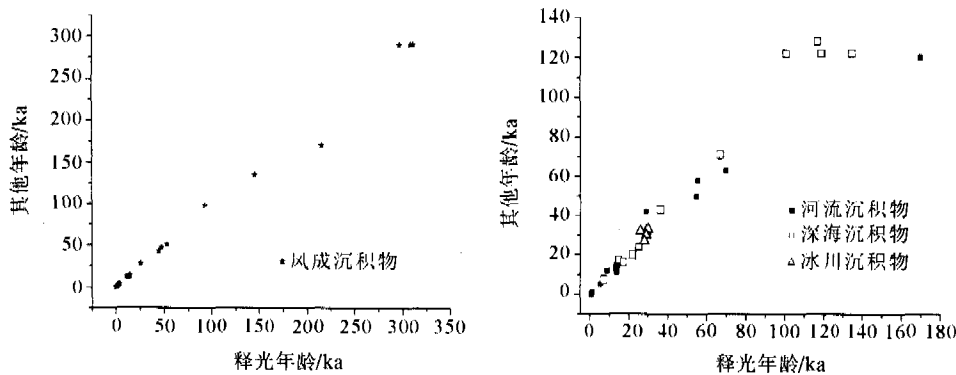


图 2 风成、河流和深海沉积物释光年龄与其他方法年龄的对比(数据引自文献[4])

Fig.2 Comparison of luminescence dating results with independent ages for aeolian, fluvial and deep sea sediments

退程度、室内释光复合(recuperation)以及所谓光转移释光(PTTL)现象的影响后,几百年以来的沉积事件或过程可由光释光年龄方法测定出来^[11-12]。

(3) 释光年龄的精度和准确性得到增强 欧洲、北美、澳洲^[4,13-14]等从事释光年代学研究的学者均证明释光年代学方法已经从原来作为其他年代学方法的一种补充,而成为一种值得信赖、广为采用的第四纪年代学方法,并且发展了各自估算年龄的计算方法,从而提高了释光年龄的精度和准确度。这一趋势的结果是提高了释光测年的分辨率,已经出现了能够分辨出十年时间尺度的光释光年龄分析方法。

(4) 新的释光测年分析方法不断出现 单颗粒释光法^[15]、光调制光释光法(LM-OSL)^[16]、红外辐射释光法、基于映像的微区释光法^[17]、激光热释光法(二氧化碳加热法)^[18]、选频光释光法^[19]等是其中主要代表。

3 释光测年案例分析

国内外环境演变和全球变化研究领域内,释光年代学方法所提供年龄资料的案例非常多,并在逐年递增,一一详述,既不可能也无必要。但是,某些代表性的研究事例却值得从事这一行研究的学者们加以关注,并展开讨论。

陆地沉积物的释光测年呈现两个趋势。一方面,陆地沉积物释光年龄资料佐证了传统上的一些有关陆地环境演变或者全球变化的认识或结论。例如,从南非沙漠钻孔中提取的风成沙的光释光年龄资料,证实了沙漠沙的堆积过程与干旱气候是同步的,并具有幕次关联特性^[20];另一方面,在某些缺乏传统年代学资料的局部敏感地区,陆地沉积物的释光年代学资料又对传统的环境演化模式提出了不同解释的要求。例如,对地中海周缘希腊某盆地,全新世以来土壤剥蚀速率的研究表明,该地区全新世以来的气候变化并不是决定土壤剥蚀的主要因素,人类活动成为土壤剥蚀的主因^[21]。因此,陆地沉积物释光测年资料在诠释陆地古环境演变的同时,逐渐涉及到全新世以来与人类活动密切相关的环境变化事件,反映传统释光测年方法在测年精度和置信度方面不断得到发展的趋势。

深海沉积物的释光年龄测定较多地采用单颗粒石英的光释光年龄方法。研究表明,深海沉积物释光信号存在不完全晒退现象,采用单颗粒等效剂量分析途径,获得样品众多颗粒等效剂量的一个分布,

并选取最小等效剂量数值为可信等效剂量值来估算年龄值,这样获得的年龄数据与同一层位的¹⁴C年龄吻合,被证实是一种值得信赖的释光估算年龄方法^[22]。但是,这种选择最小值的办法并不具有普遍性。研究发现,对于日晒退特性良好的颗粒,选择样品的等效剂量应该为所有颗粒剂量概率分布的中心值^[23]。因此,准确甄别深海沉积物的日晒退性质是获取深海沉积物可信释光年龄的前提条件。

海岸带因为地处陆地和海洋交界地区,是物质和能量交换的中心地带,所以一直是环境演变研究的热点地区之一。海岸带沉积物的释光测年呈现如下特点:其一,海岸带沉积过程复杂多变,确定这样一个具有复杂沉积过程的沉积物年龄,就不能沿用风成黄土释光年龄的方法,必须加以改进。因此,Roberts R G等、Olley J M等、Ollerhead J等分别采用了改进的释光测年方法,针对性地研究了风成沉积作用、水沉积作用、崩积作用、洪积作用的沉积物释光年龄^[24-26],并取得了有益的结果。其二,海岸带释光年代学资料可为海岸带地区独有的环境特征事件以及新构造事件甄别提供依据。海岸带地区多见高能量沉积事件发生,野外也可以见到对应的沉积物层位。采用改进的释光测年方法可以获取这一层位的沉积年龄,并由此可以找到某些危害性大的高能量事件发生的证据和发生的时间,并由此推断事件发生的时变特征^[27-29]。而对海岸阶地沉积物的高程和释光年龄,并结合野外露头新构造的地质证据,可以获得海岸带地区构造升降的年代学资料。例如,巴西学者 Alcina Magnolia等^[30]采用热释光和光释光年龄方法研究了南美大陆东部海岸带阶地沉积物的绝对年龄,对比空间分布上同一个高程沉积层年龄数据,发现了年龄的不一致,因此,作者间接推断研究地区事实上必然经过了更新世以来的构造升降事件,并由此可以推算海岸阶地抬升或者沉降的年代与速率。其三,释光测年方法还可以为海岸带地区更新世以来海平面变化研究以及跨地区气候、环境演变研究提供资料。海岸带沉积剖面的年龄信息获取传统上依赖于放射性碳的年龄方法,海平面随时间而变化的信息来自于富含有机成分的标本,然而,海岸带复杂的地质条件并不能保证这些有机成分标本的¹⁴C年龄能真正代表标本所处阶地的年龄。而以无机成分为研究对象的释光年龄方法获得了推广,并取得了很好的结果。Sytze van Heteren等^[31]采用光释光测年方法成功地从北美海岸带地区获取了海岸沙堤和潮间带合适地点风成沉积物的年龄信息,并依据测得的高程数据,获取了海平面

随时间而变化的轨迹。海岸带地区的海岸沙,也是研究海陆相互作用以及环境演变、环境事件关联方面的学者所重点关注的另一类沉积物。海岸沙的释光测年研究结果显示,光释光年龄方法特别适合于海滩沙沉积物的年龄分析。而对于海岸带风成沙丘沉积剖面的石英光释光年龄分析也被证明是成功的^[32]。对美国东海岸地区海岸沙采用石英单片方法(SAR)获取的释光年龄,确认了该地区沙丘形成与发展的幕次特性,与地质背景资料和其他年代资料吻合,并对比欧洲西海岸沙丘演化的幕次特性,获得了跨大西洋地区的古气候、古环境变化方面的信息资料^[33]。

总之,释光年龄方法应用经过了从陆地经深部海洋到海岸带的先后过程。方法本身也经历了从最初被人们认识,进而变成一种第四纪年代学方法的有益补充,至今发展成为一种可以信赖的年代学方法的发展历程。然而,地质背景的复杂性以及人们对释光现象认识的局限,依然影响着释光测年方法被使用的频度和释光测年结果的置信度。

4 释光测年待确定的问题

对于陆地上的风成沉积物,如黄土、沙漠沙等,成功的热释光和光释光测年应用,鼓舞着人们运用释光测年方法从深海沉积物和海岸带沉积剖面中提取地质事件或过程的时间信息。虽然也不乏成功的案例,但是揭示出来与测年有关的问题依然存在,相应解决问题的研究思路也在不断产生,主要表现在以下几个方面:

(1) 自然地质条件下的释光信号复位、置零机制存在不确定性。许多实验研究表明,石英释光信号复位的光晒退特性优于长石,体现在光晒退释光信号的程度和快慢方面。然而,通常实验室条件下的光晒退特性试验,不能完全模拟自然地质条件下的情况。实验室内的光源光照条件并不能代表野外的实际情况,特别是河流和海洋沉积过程中水下的光照显然与空气中光照条件是不同的。室内光晒退试验分析表明,采用不同波长的光进行试验,晒退的快慢是不同的。对这种光晒退特性了解不够,将使样品的残余释光信号产生干扰,导致释光测年出现偏差。采用光释光方法测定年轻标本,情形更是如此。因此,研究不同波长条件下热释光和光释光信号的光晒退特征,依光照后衰减快慢不同,来提取光释光信号中的不同成分,并用于光释光测年是一种好的选择。比如,采用激发光功率可调的光释光方

法,就可以获得光衰减最快的光释光成分,并将此成分应用于测年,可取得好的结果。

(2) 释光测年的核心之一就是通过对样品吸收剂量这一剂量学参数的间接测量,来获取与待测年龄相关的信息。样品吸收剂量的估算受很多因素影响,为了获得反映真实情况的数值,近十年来对于吸收剂量估算方法,先后推出多片法、单片法、增加法、再生法、单片再生法、单片增加法、滑移法、基于CCD映像法和单颗粒法等。各种吸收等效剂量估算方法都有成功的范例,但是没有一种能够适应所有地质情况的估算方法,并且每一种方法的推出都是有不同的针对性。因此,研究单片再生和单片增加法的估算可信度,重视开展基于CCD映像法和单颗粒法的吸收等效剂量估算方法非常必要。

(3) 释光年龄计算离不开年剂量率的准确测量,因此,样品所处环境的年剂量率是另一个影响释光测年的重要因素。环境辐射年剂量率受到标本所处辐射场的不均一性影响,将影响释光年龄的估算^[34]。进一步研究单颗粒矿物在辐照场下的Monte Carlo模拟,校正单颗粒年剂量率计算中的不均一性影响,是今后应该加强的研究之一。

参考文献(References)

- [1] Smith M A, Prescott J R, Head M J. Comparison of ¹⁴C and luminescence chronologies at Puritjarra Rock shelter, Central Australia[J]. Quaternary Science Review, 1997, 16: 299-320.
- [2] Prescott J R, Robertson G B. Sediment dating by luminescence, a review[J]. Radiation Measurements, 1997, 27(5/6): 893-922.
- [3] Madsen A T, Murray A S, Andersen T J, et al. Optically stimulated luminescence dating of young estuarine sediments: a comparison with ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating[J]. Marine Geology, 2005, 214: 251-268.
- [4] Murray A S, Olley J M. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz; a status review[J]. Geochronometria, 2002, 21: 1-16.
- [5] Fattahi M. Studies on red thermoluminescence and infrared stimulated red luminescence[D]. Unpublished D. Phil. thesis, Oxford University, Oxford, 2001.
- [6] Scholefield R B, Prescott J R. The red thermoluminescence of quartz, 3-D spectral measurements[J]. Radiation Measurements, 1999, 30: 83-95.
- [7] 龚革联, 刘顺生. 长石矿物的三维热释光谱图初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21: 117-120. [GONG Ge-lian, LIU Shun-sheng. Preliminary study of characteristics of thermoluminescent spectra of feldspar[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2002, 21(2): 117-120.]
- [8] Scholefield R B, Prescott J R. The red thermoluminescence of

- quartz; 3-D spectral measurements [J]. *Radiation Measurements*, 1999, 30: 83-95.
- [9] Pilleyre T, Montret M, Fain J, et al. Attempts at dating ancient volcanoes using the red TL of quartz[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11: 13-17.
- [10] Fattahi M, Stokes S. Extending the time range of luminescence dating using red TL (RTL) from volcanic quartz[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 479-485.
- [11] Murray A S. Developments in optically stimulated luminescence and photo transferred thermoluminescence dating of young sediments; Application to 200 years sequences of flood sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (4): 565-576.
- [12] Bailey S D, Wintle A G, Duller G A T, et al. Sand deposition during the last millennium at Aberraw, Anglesey, North Wales as determined by OSL dating of quartz[J]. *Quat. Geochronol. (Quat. Sci. Rev.)*, 2001, 20: 701-704.
- [13] Murray A S, Wintle A G. The single aliquot regenerative dose protocol; potential for improvements in reliability[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37: 377-381.
- [14] Wallinga J, Murray A S, Duller G A T, et al. Testing optically stimulated luminescence dating of sand-sized quartz and feldspar from fluvial deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193: 617-630.
- [15] McCoy D G, Prescott J R, Nation R J. Some aspects of single grain luminescence dating[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 859-864.
- [16] Bulur E, Bøtter-Jensen L, Murray A S. Optically stimulated luminescence from quartz measured using the linear modulation technique [J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 407-411.
- [17] Steffen Greilich, Ulrich A Glasmacher, Günther A Wagner. Spatially resolved detection of luminescence; a unique tool for archaeochronometry[J]. *Naturwissenschaften*, 2002, 89: 371-375.
- [18] Ohn L, Lawless, Lam S K, Lo D. Nondestructive in situ thermoluminescence using CO₂ laser heating[J]. *Optics Express*, 2002, 10(6): 291-296.
- [19] 李虎侯. 选频光释光——一种新的年龄测定技术[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 333-336. [LI Hu-hou. Selected frequency optical stimulated luminescence—A new dating technique [J]. *Nature Science Progress*, 2002, 12(3): 333-336.]
- [20] Stephen Stokes, David S G, Thomas Richard Washinton. Multiple episodes of aridity in southern Africa since the last interglacial period[J]. *Nature*, 1997, 388: 154-158.
- [21] Fuchs M, Lang A, Wagner G A. The history of Holocene soil erosion in the Phlious Basin, NE Peloponnese, Greece, based on optical dating[J]. *The Holocene*, 2004, 14(3): 334-345.
- [22] Stokes S, Ingram S, Aitken M J, et al. Alternative chronologies for late Quaternary (Last Interglacial Holocene) deep sea sediment via optical dating of silt-size quartz[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 925-941.
- [23] Olley J M, De Deckker P, Roberts R G, et al. Optical dating of deep-sea sediments using single grains of quartz; a comparison with radiocarbon[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 169: 175-189.
- [24] Roberts R G, Bird M, Olley J M, et al. Optical and radiocarbon dating at Jimmum rock shelter in northern Australia[J]. *Nature*, 1998, 393: 358-362.
- [25] Olley J M, Caitcheon G, Murray A S. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz; implications for dating young sediments [J]. *Quat. Geochronol.*, 1998, 17: 1 033-1 040.
- [26] Ollerhead J, Huntley D J, Berger G W. Luminescence dating of the Buctouche Spit, New Brunswick[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1994, 31: 523-531.
- [27] Huntley D J, Clague J J. Optical dating of tsunami-laid sands [J]. *Quaternary Research*, 1996, 46: 127-140.
- [28] Jeff Ollerhead, Huntley D J, Alan R Nelson, et al. Optical dating of tsunami-laid sand from an Oregon coastal lake[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 1 915-1 926.
- [29] Price D M, Bryant E A, Young R W. Thermoluminescence evidence for the deposition of coastal sediments by tsunami wave action[J]. *Quaternary International*, 1999, 56: 123-128.
- [30] Alcina Magnolia, Franca Barreto, Francisco Hila, et al. Late Pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: sea-level change and tectonic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 179: 57-69.
- [31] Sytze van Heteren, David J Huntley, Orson van de Plassche Ronald K Lubberts. Optical dating of dune sand for the study of sea-level change[J]. *Geology*, 2000, 28(5): 411-414.
- [32] Murray A S, Clemmensen L B. Luminescence dating of Holocene sand movement, Thy, Denmark[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 751-756.
- [33] Glenn W Berger, Andrew S Murray, Karen G Havholm. Photonic dating of Holocene back-barrier coastal dunes, northern North Carolina, USA[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 1 043-1 050.
- [34] 郑公望, 朱忠礼. 环境辐射场对热释光断代的影响[J]. *核技术*, 2001, 24(12): 1 030-1 032. [ZHENG Gong-wang, ZHU Zhong-li. Influence of the environmental radioactivities on TL dating[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(12): 1 030-1 032.]

LUMINESCENCE DATING FOR ENVIRONMENTAL EVOLUTION STUDY IN TERRESTRIAL LAND, DEEP SEA AND COASTAL BELTS; A REVIEW

GONG Ge-lian

(Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510064, China)

Abstract: Due to the complicated geological situation in coastal belts, very limited methods have ever been used for environmental study dealing with these zones, in particular the evidence of age concerning the typical environmental events within the Holocene period. Young ages mean their correlation with human activities, and the limitations of radionuclide dating methods, e. g. , ^{10}Be , radiocarbon and uranium/thorium, are normally used for coastal study. In contrast, luminescence dating method (both thermoluminescence and optical stimulated luminescence) can be successfully used for coastal belt study due to its exclusive feature of exploring age information of inorganic sand-size samples, whilst it is free of contamination resulting from radionuclide completely or partially. This paper discusses several cases and analyse the features of application of luminescence dating methods to studying environmental evolution in terrestrial land, deep sea and coastal belts as well as the future research work in this regard.

Key words: thermoluminescence; optical stimulated luminescence; coastal belts; environmental evolution response