

DOI:10.3724/SP.J.1140.2011.01093

光释光测年在海岸风沙地貌研究中的新进展

谢丽,张振克

(南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室,南京 210093)

摘要:20世纪80年代中期以来,光释光技术广泛应用于海岸风沙沉积物测年研究中,并取得了丰硕的成果。随着光释光测年激发光源和单片再生剂量方法的快速发展,海岸风沙光释光测年的时间范围不断扩大,测年的准确度逐渐提高,已测得最年轻的海岸风沙沉积物的年龄小于10年,最老的年龄达到90多万年。利用光释光年龄重建海岸风沙演化进程及其与全球气候变化关系的研究,正成为学术界关注的焦点,光释光测年方法在将来的砂质海岸演化、区域气候变化及海平面变化等全球变化问题的研究中具有广阔发展前景。

关键词:光释光测年;海岸风沙;过去气候变化

中图分类号:P533 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2011)01-0093-08

海岸带地处海洋与陆地之间,是海、陆、气交互作用最为剧烈的地带。海岸风沙是这一特殊动力环境的突出产物。海岸风沙地貌的研究不仅有助于阐明海岸带的动力特征、沙质海岸地貌的形成和演化,以及第四纪古气候、海平面变化和新构造运动的性质和历史;同时,能为港口选址设计、砂矿开采和海岸防沙等提供科学依据,具有重要的理论和实践意义^[1]。在研究海岸风沙形成与演化的过程中,十分迫切需要获得精确的年代学数据,准确可靠的海岸风沙沉积物年代,在研究海岸地质过程和解释现代海岸风沙迁移中发挥重要的作用。

海岸沙丘年代的测定过去主要是用¹⁴C测年方法,沙丘内部测年材料的匮乏成为海岸沙丘年代学研究的一个主要障碍,而光释光(Optical Stimulated Luminescence简称OSL)技术为解决这一问题提供了新的机遇。光释光技术是Huntley等1985年首次提出,并用于地质测年的一种新方法和新技术^[2],是近十几年在热释光基础上发展起来的一种绝对定年技术。与其他测年技术相比,它可以直接测量埋藏沉积物中的石英或长石碎屑颗粒最后一次见光到现在的埋藏时间,同时,它的测年时间上限也大于¹⁴C测年^[3]。目前已广泛应用于第四纪沉积物的年龄测定。海岸风沙在沉积埋藏之前已充分曝光,是理想的光释光测年物质^[4]。

Huntley等(1985)首次尝试利用光释光技术对

澳大利亚东南部的更新世海岸沙丘和加拿大太平洋海岸的现代海滩沙进行年代研究^[2]。此后,广泛开展了海岸风沙光释光测年研究。并在海岸风沙年代学、海岸风沙的演化进程以及海岸风沙记录的古气候变化等方面取得较大的研究进展。本文主要对光释光测年技术及其在国外海岸风沙中的应用研究进行综述,以期为我国海岸风沙光释光测年研究提供帮助。

1 光释光测年技术发展历程

近几十年来,光释光测年在激发光源方面取得了突破性的进展。最初的激发光源是利用氩离子激光器发射的绿光(514.5 nm)^[2]和宽蓝绿光光谱(420~550 nm)^[5]。接着Galloway等(1997)人提出了一种新型的较高能量的绿光发光二极管^[6]。后来发展的固态红外发光二极管(830±10 nm)^[7],但由于这种红外发光二极管需要复杂的聚光系统,逐步被另一种能量充足、价格低廉的大功率的红外发光二极管(875 nm)取代。几乎同时发展的高能量蓝光发光二极管(470±30 nm)价格低廉、光源较强、激发过程简洁,与已有的激发光源相比具有一定的优势^[8-9]。光释光测年的激发光源正在向价格低廉、激发过程简单、高能量、可产生高信噪比和低残留值等方向发展^[10]。

20世纪90年代中期光释光测年中等效剂量测定方法主要分为多片附加剂量(MAA)方法和多片再生剂量(MAR)方法。21世纪以来,等效剂量的测定方法主要发展为单片附加剂量(SAA)方法、单片再生剂量(SAR)方法,并以SAR方法为主。1991

基金项目:国家自然科学基金项目(40676052);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100091110011)

作者简介:谢丽(1978—),女,博士研究生,主要从事自然地理学研究。E-mail:xieli@smail.nju.edu.cn;xieli361@sina.com

收稿日期:2010-06-28;改回日期:2010-08-12。张光威编辑

年, Duller 首次提出单片附加剂量方法, 虽不属于严格意义上的单片测年方法, 但这种方法得到广泛的认同^[11]。Mejdahl 等(1994)提出单片再生—附加剂量(SARA)方法^[12]。1996年, Galloway 在 Duller 研究基础上, 研究提出一种真正意义上的单片测年方法^[13]。后来, Murray 等(1997)提出了石英 SAA 方法, 并首次将利用 SAA 方法对于澳大利亚海岸石英砂进行光释光测年^[14]。Wintle 等(1997)第一次尝试将 SAR 方法应用到澳大利亚西部的石英砂沉积物的年代学研究中^[15]。Folz 等(1999)对石英 SAR 方法进行了更为深入的研究^[16]。前人的研究结果表明, 与多片方法相比, SAR 方法可以更为准确地测定石英砂沉积物的等效剂量, 非常适用于完全晒退的海岸风沙测年^[17-18]。Murray 等(2000)又提出一种改进的 SAR 方法, 并将该方法应用到各种沉积物测年后认为, 改进的 SAR 方法对于测定石英沉积物的等效剂量是非常适用的, 该方法具有广阔的发展前景^[19]。目前, 海岸风沙 OSL 测年主要是利用石英 SAR-OSL 测年方法, 一部分是运用粗颗粒长石 IRSL 测年方法。近年来, 发展的单颗粒技术和 LM-OSL 测年方法仍处于探索阶段, 目前均没有得到广泛的应用, 但 LM-OSL 技术和单颗粒技术的优势相结合, 将会为未来光释光测年应用研究带来新的发展机遇^[20-22]。

2 海岸风沙光释光测年

随着光释光测年技术的不断进步, 不同地区海岸风沙光释光测年时间范围不断扩大, 其中测得最年轻的海岸沙丘砂年龄小于 10 年尺度^[23], 最老的海岸风沙沉积物年龄达到 90 多万年^[24-25]。近年来, 利用石英 SAR-OSL 方法测定年轻海岸风沙的光释光年代已经取得准确、可靠的测年结果^[4]。

欧洲是年轻海岸风沙光释光测年研究的热点区域, 不同学者纷纷对不同区域展开研究, 在过去 300 年年轻海岸风沙沉积物光释光测年研究方面取得较大的进展。其中测得最年轻的海岸沙丘的光释光年龄小于 10 年, 且测年的准确度较高。如荷兰北部海岸的特塞尔岛西南部最年轻的现代海岸沙丘石英 OSL 年龄小于 10 年, 大部分光释光年龄和已知年龄有较好的一致性^[23]。丹麦日德兰半岛北部全新世滩脊平原石英砂沉积物光释光年龄范围为 5 ± 1 年至 3480 ± 250 年^[26]。丹麦瓦登海障蔽岛 Rømø 地区沙丘脊的石英 OSL 年龄范围为 10 ± 3 年到 690 ± 50 年, 光释光年龄和该地区历史记载的年龄

相符^[27]。威尔士北部海岸沙丘最年轻的石英 OSL 年龄仅为 20 ± 10 年^[28]。葡萄牙西海岸沙丘石英光释光年龄范围是 95 至 230 年^[29]。丹麦瓦登海地区 Skallingen 障蔽岛海岸沙丘石英 OSL 年龄是 109 ± 7 到 658 ± 37 年, 与 ^{14}C 测得的年龄非常一致^[30]。北爱尔兰北部海岸沙丘石英 OSL 年龄范围是 115 ± 40 至 6240 ± 655 年, 光释光年龄和 ^{14}C 年龄的一致性进一步提高了光释光年代的可信度^[31]。利用粗颗粒长石 IRSL 测年测得法国西南部海岸沙丘的年龄范围是 275 ± 50 到 1285 ± 130 年, 和当地历史记录的年龄一致^[32]。英国锡利群岛 Bergecooth 沙丘石英 OSL 年龄为 290 ± 40 至 910 ± 110 年^[33]。研究者曾测得丹麦 Eemian 海岸沙丘的石英 OSL 年龄范围为 7.7 ± 0.5 到 14.1 ± 0.7 万年, 并通过对年龄准确性进行验证后认为, 石英 SAR-OSL 方法可以较为准确地测定 Eemian 地区老的海岸风沙年代, 为提高光释光测年的准确性, 光释光采样时, 在底层连接的地方可以多采集几个样品分析研究^[34]。进一步研究表明, SAR-OSL 方法测得的年轻海岸沙丘年龄误差比年老海岸沙丘小^[35], 利用 OSL 技术对过去 300 年海岸风沙测年可得到比 ^{14}C 测年更准确的年代^[36]。因此, 测年准确度渐高的光释光技术在年轻海岸风沙沉积物年代学研究中具有广阔的应用前景。

在美洲地区, Ollerhead 等(1994)对加拿大新伯伦瑞克省东北海岸沙丘砂进行粗颗粒长石 IRSL 测年, 得到的年龄范围是 5 ± 30 至 765 ± 45 年, 并通过实验方法的校正测得最年轻的年龄为 12 ± 2 年^[37]。Berger 等(2003)对美国北卡罗来纳州北部的障蔽岛海岸沙丘进行石英 SAR-OSL 测年, 测得的年龄范围是 108 ± 11 到 1232 ± 65 年, 总体上与 ^{14}C 一致, 石英 SAR-OSL 测年可以准确地揭示美国东部海岸沙丘的形成年代^[38]。Tsoar 等(2009)对巴西东北部 Ceará 州海岸沙丘进行石英 SAR-OSL 测年, 得到该地区 12 个稳定海岸沙丘样品的年龄范围是 80 ± 20 到 13.2 ± 1.1 万年^[39]。

在亚洲地区, Choi 等(2009)经过多年反复的实验和研究, 利用石英 SAR-OSL 测年得到韩国东南沿海地区北部的 3 个海成阶地风沙沉积物的年龄, 一级海成阶地风沙沉积物的年龄范围是 90 ± 10 到 110 ± 10 年; 二级海成阶地风沙沉积物年龄范围是 5.1 ± 0.2 到 5.3 ± 0.3 万年; 三级海成阶地风沙沉积物年龄范围是 6.4 ± 0.6 到 11.4 ± 0.7 万年^[40]。印度奥利萨 Chilika 湖地区障蔽岛的风沙沉积物石英光释光年龄范围为 37 ± 2 到 345 ± 20 年^[41]。

澳大利亚海岸风沙年代学研究在南澳洲地区较为典型, Murray-Wallace 等(2002)利用石英 SAR-OSL 方法测得南澳洲 Guichen 湾地区的海岸沙丘的年龄范围为 51 ± 5 到 $5\ 200 \pm 270$ 年^[42]。Banerjee 等(2003)将石英 SAR-OSL 方法应用到南澳洲东南部海滩沙丘测年,通过调整预热温度等方法得到的年龄范围在 6.1 ± 0.36 至 71 ± 6.2 万年之间,该地区较为年轻的海滩沙丘年龄准确度比年老海滩沙丘高^[35]。

非洲摩洛哥的卡萨布兰卡地区托马斯采石场的海岸沙丘形成年代较老, Singarayer 等(2003)利用 LM-OSL 方法测得托马斯采石场海岸石英砂沉积物的最老年龄是 94.8 ± 59.9 万年^[24]; Rhodes 等(2006)为得到海岸风沙光释光测年的上限年龄,对摩洛哥的卡萨布兰卡不同地区的样品进行石英 OSL 测年,得到海岸风沙年龄为 140 ± 70 到 98.9 ± 20.8 万年之间^[25], Singarayer 和 Rhodes 等测得的最老海岸风沙年龄误差均较大^[43],有待于通过改进实验方法对年龄误差进行校正。

3 在海岸风沙地貌研究中的应用

3.1 恢复海岸风沙地貌的动态演化

利用日渐成熟的光释光技术研究海岸风沙的演化进程成为学术界研究的焦点。研究区域主要集中在欧洲瓦登海沿岸、英国及爱尔兰海岸、北美洲海岸和韩国东南沿海等地,研究手段主要是利用石英 SAR-OSL 方法。

Murry 等(2001)利用石英 OSL 年龄将丹麦西部 Lodbjerg 附近海岸陡坎的风沙活动分为 3 个主要阶段:第 1 阶段风沙活动约在 4 200 年前开始,第 2 个阶段约在 2 700 年前,第 3 个阶段约在 900 年前,后两个阶段是海岸风沙活动最主要的时期。海岸陡坎顶部沙丘的最近一个形成阶段约在 19 世纪初,也许记录着现代海岸陡坎的侵蚀后退^[4]。石英 OSL 测年数据和 ¹⁴C 测年数据显示,约公元前 700 年,丹麦的日德兰半岛西海岸开始第一次大规模的风沙运动,海岸沙丘的建造持续了 700 年。该地区海岸风沙最后一阶段活化的时间是公元 1000—1200 年,公元 1800—1900 年间,海岸沙丘因沙丘的管理而处于固定状态^[44]。利用丹麦日德兰半岛北部全新世滩脊平原石英砂沉积物光释光年龄可推断,滩脊平均形成速度为 15 年/个,平均横向迁移速率约为 2 m/a ^[26]。丹麦 Skallingen 地区海岸沙丘石

英 OSL 光释光年龄显示,该地区海岸风沙沉积从海滨过渡到海岸的时间在公元 1760—1830 年,较老的海岸沙丘沉积约在公元 1800 年开始,公元 1900 年因修建堤坝而终止^[30]。前人石英 OSL 测年结果表明,丹麦日德兰半岛海岸沙丘的演化是断续的,砂粒运动和沙丘形成开始在公元前 2200 年,公元前 800 年、公元 100 年、公元 1050—1200 和公元 1550—1605 年^[45]。光释光测年对重建海岸演化和制定合理的海岸带管理策略等方面的研究具有较大的发展潜力^[23]。

爱尔兰西南丁格尔湾附近沙丘石英光释光年龄表明,该地区最早的沙丘约形成于 600 年前,而约 150 年前该地区沙丘的形成可能与 1839 年大风暴或土地出租时期人类活动对沙丘的影响有关^[46]。Bailey 等(2001)对威尔士北部安格尔西岛 Aberffraw 的西南和东北部的海岸沙丘进行石英 OSL 测年,获得了过去 700 年该地区海岸风沙沉积物的年代。在 Aberffraw 西南部沙丘的中间区域,风沙沉积约发生在公元 1320 年和 1760 年,厚度分别为 5 和 1 m。在 Aberffraw 东北部 Llyn Coron 地区,风沙堆积发生在公元 1480 年和 1680 年^[28]。

Berger 等(2003)利用石英 OSL 年龄揭示了美国东部海岸沙丘演化的主要阶段发生在 1999 年之前大约 150 年、800 年和 1 100 年^[38]。Lopez 和 Rink(2008)利用美国佛罗里达州 St. Vincent 岛连续滩脊上风沙沉积物的石英 OSL 年龄,将滩脊形成划分为两个阶段, 370 ± 49 到 $1\ 890 \pm 292$ 年间形成的是较年轻的滩脊,假设沉积物堆积是均匀的,每增加一个滩脊约需要 78~148 年;而 $2\ 733 \pm 404$ 到 $2\ 859 \pm 340$ 年间形成的是最老的滩脊,这个年龄与 3 000~4 000 年前考古资料估断的年龄是一致的。同时作者认为,光释光技术不仅可用于测定沉积物的年代,而且在海岸动力学评估研究中具有广阔的发展前景^[47]。

光释光测年方法对研究韩国半岛地质构造来说是一个重要突破。Choi 等(2009)利用石英 OSL 测年技术得到韩国东南沿海地区北部的 3 个海成阶地风沙沉积物年龄,结合该地区北部 3 个阶地底层的古海滩沉积物光释光年龄推断二级海成阶地和三级海成阶地分别形成于海洋同位素 MIS 5a 阶段和 MIS 5e 阶段。根据海成阶地的高度和阶地沉积物的光释光年龄推断,该地区北部自 MIS 5e 以来整体隆升的速率约为 0.228 m/ka 。虽然在该地区中部没有得到准确的海成阶地风沙沉积物光释光年龄,但北部地区 3 个海成阶地沉积物的光释光年龄暗

示,该地区在晚更新世期间地质构造不是一直处于稳定状态,这与韩国半岛地质构造处于静止状态的传统观点相矛盾^[40]。

3.2 重建海岸风沙记录的过去气候变化

海岸风沙光释光年代学数据可以为海岸带地区独有的环境特征事件和新构造事件甄别提供依据,从而推断海岸地区的风沙演化和构造升降事件;同时也可以为海岸带地区海平面变化研究和跨地区气候、环境演变等研究提供资料^[48]。海岸沙丘的动态变化主要与人类活动有关,但自然因素,尤其是气候和海平面变化对海岸沙丘演化的影响更为重要^[49]。

美洲东部海岸沙丘的形成和演化与气候变化,尤其是大西洋地区的气候变化息息相关。Berger等(2003)详细地论述了美国东部海岸石英 SAR-OSL 方法的古环境意义,作者利用光释光年龄和美国东部海岸全新世海岸沙丘演化时期的资料,并将这些时期与欧洲全新世海岸沙丘演化的时期进行对比研究,试图确定横跨大西洋气候突变的历史记录^[38]。Tsoar等(2009)利用海岸风沙石英 OSL 年龄研究巴西东北部 Ceara 州过去 13 万年海岸沙丘演化与气候变化的关系。研究结果表明,巴西东北部 Ceara 州海岸沙丘的固定和活化是第四纪晚期热带大西洋地区的气候波动引起的。海岸沙丘的堆积发生在风力强劲时期,而沙丘的稳定发生在风力较小时期,风力的变化致使 Ceara 州同一地区出现活动海岸沙丘与稳定海岸沙丘共存的现象。该地区 12 个稳定海岸沙丘样品的石英 SAR-OSL 测年结果表明,Ceara 州海岸自倒数第 2 个冰期末期就已存在稳定的沙丘,有些海岸沙丘在末次冰期被固定,但光释光年龄的误差大部分在 10% 以上,故排除了光释光年龄与特别短期的气候事件的相关性。巴西东北部海岸沙丘在过去 13 万年不同时期被固定,这些大部分与北半球的较寒冷事件有关;该地区最老的稳定海岸沙丘光释光年龄对应倒数第 2 个冰期末期,光释光年龄在 3.8 到 4.1 万年之间的 3 个稳定海岸沙丘也许与 Heinrich 事件有关,光释光年龄为 2.29 ± 0.2 万年的稳定海岸沙丘可能在末次冰盛期(LGM)被固定,全新世早期的稳定海岸沙丘与新仙女木事件有一定的关联性,全新世中期的海岸沙丘被固定也许暗示一个冰川前进时期,最近时期(80 年和 250 年)该地区海岸沙丘被固定可能是稳定沙丘的近期再活化或活动沙丘地区人工固沙所致^[39]。

欧洲海岸沙丘的演化主要是由北大西洋地区的气候突变和风暴增加等原因造成的。研究者利用粗

颗粒长石 IRSL 测年得到的年龄推知,法国西南部海岸的沙丘侵入和沙丘的演化受不断增加的北大西洋风暴以及小冰期最后一次(250—550 年前)沙丘侵入的影响^[32]。石英 OSL 测年数据和 ¹⁴C 测年数据显示,丹麦的日德兰半岛西海岸沙丘的形成与公元前 800 年北大西洋地区的气候突变和风暴的增加有关。气候的变化增加了该地区飓风的数量,不断增加的风暴不仅破坏了海岸前丘系统,而且加剧了海岸风沙运动,风力的增加加剧了海滩沙的向岸运动。大的沙丘一旦开始移动就很难停止,公元 0 年或罗马温暖期,风沙活动缓慢可能是多风天气减少造成的^[44]。Clarke 和 Rendell 等(2006)利用粗颗粒长石 IRSL 测年建立葡萄牙西海岸沙丘的形成年代,研究结果表明,该地区最近形成沙丘的时期为公元 1770—1905 年,沙丘的形成主要与北大西洋涛动指数有关^[29]。丹麦 Skallingen 地区沙丘石英 OSL 年龄显示,该地区海岸风沙移动发生在小冰期晚期、西欧北部海平面相对上升和丹麦西海岸风暴潮高发时期,这与其他关于小冰期时期北海沿岸海岸沙丘形成的论述有点不同^[30]。Sommerville 等(2007)利用石英光释光测年研究苏格兰奥克尼岛 Sanday 地区海岸沙丘形成年代,获得的光释光年龄范围是 265 ± 80 和 5255 ± 220 年,该地区海岸风沙沉积物已有的年龄较少,且和光释光年龄没有很好的一致性。虽然在文章刊出时作者仍然没有解决年代的差别问题,但他们认为该地区风沙的活动与新石器时代晚期、青铜器时代早期、青铜器时代晚期、铁器时代早期和小冰期时地区性气候恶化有关^[50]。Clemmensen 等(2009)利用石英 OSL 技术研究丹麦日德兰半岛全新世海岸风沙的演化与过去 5 000 年气候变化的关系,测年结果表明,丹麦日德兰半岛海岸沙丘的移动很可能是该地区多风暴的气候造成的,即在风暴增加期间海岸风沙由海岸向内陆演进^[45]。

4 结论

(1)随着激发光源和光释光测年技术的不断发展,海岸风沙光释光测年的范围和精度大大提高。近年来,国外将光释光测年应用到海岸风沙的研究已取得丰硕成果。利用高精度海岸风沙的光释光年龄,可以定量海岸风沙演化的速度^[51],分析海岸风沙地貌演化过程,为不同沉积区的沉积动力提供新的理解^[52]。同时,光释光测年可以重建海岸风沙记录的过去气候变化,为海岸风沙地貌环境演变研究提供新的信息,创造海岸地貌研究的革命。

(2)我国海岸风沙地貌分布广泛,除江苏省外,其他沿海各省区(包括台湾省的西海岸)差不多都有海岸沙丘分布^[53]。我国海岸风沙的研究主要集中在海岸风沙的类型与分布、海岸沙丘的成因与发育模式、海岸风沙沉积特征、海岸风沙的运动特征、海岸沙丘岩形成与环境变化的关系等方面^[54-59]。我国海岸风沙的形成时代一直是地貌与第四纪研究中十分关注而又尚未很好解决的问题之一,以往的测年方法主要是¹⁴C、热释光(TL)和电子自旋共振(ESR)等测年方法^[1,60-63]。将光释光技术应用到我国海岸风沙的研究尚处于起步阶段,相关的研究较少,张家富等(2007)利用光释光技术对福建晋江“老红砂”进行测年,得到晋江沿海地区海成台地的形成年代,一级台地为 3.5 ka,二级台地形成于 74 ka,三级台地形成年代可能早于 77 ka。他们认为,相对而言,老红砂剖面底部样品受风化作用影响最小,测得的光释光年龄有可能代表它的真实埋藏年龄^[64]。

(3)今后应注重利用光释光技术对我国不同区域海岸风沙进行年代学研究。准确的海岸风沙光释光年龄可以建立我国海岸风沙形成年代学框架,从而为进一步研究我国海岸风沙的演化进程及其与古气候的关系奠定基础。国际 OSL 领域的学者正在探究多种新方法以改进光释光测年方法中部分沉积物不完全光晒退、长石颗粒反常衰退和沉积环境中含水量变化等方面的潜在缺陷^[65]。钾长石光释光等时线测年方法可以克服外部环境剂量的变化,将钾长石等时线光释光年龄和石英光释光年龄相结合,应该可以估算出样品的风化年龄和风化速度,这对将来地表过程研究和环境工程研究均具有非常重要的指示意义^[64,66]。光释光测年技术具有广阔的应用发展前景,它将在第四纪科学研究和全球变化等方面的研究中发挥更加重要的作用,并有望在将来海岸演化、气候变化及海平面变化相关的全球性问题研究中取得突破性进展。

参考文献 (References)

- [1] 吴正,吴克刚,黄山,等. 华南沿海全新世海岸沙丘研究[J]. 中国科学(B辑),1995,25(2):211-218. [WU Zheng, WU Kegang, HUANG Shan, et al. The study on Holocene coastal dunes along the coast of south China[J]. Science in China(Series B), 1995,25(2):211-218.]
- [2] Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical dating of sediments[J]. Nature, 1985, 313: 105-107.
- [3] Lian O B, Roberts R G. Dating the Quaternary: Progress in luminescence dating of sediments[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(19-20): 2449-2468.
- [4] Murray A S, Clemmensen L B. Luminescence dating of Holocene sand movement, Thy, Denmark[J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(5-9): 751-754.
- [5] Botter-Jensen L, Jungner H, Mejdahl V. Recent developments in OSL techniques for dating quartz and feldspars[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1993, 47: 643-648.
- [6] Galloway R B, Hong D G, Napier H J. A substantially improved green-light-emitting diode system for luminescence stimulation[J]. Measurement Science Technology, 1997, 8: 267-271.
- [7] Botter-Jensen L, Bulur E, Duller G A T, et al. Advance in luminescence measurement systems[J]. Radiation Measurements, 2000, 32: 523-528.
- [8] Botter-Jensen L, Duller G A T, Murray A S, et al. Blue light emitting diodes for optical stimulation of quartz in retrospective dosimetry and dating[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1999, 84(1-4): 335-340.
- [9] Botter-Jensen L, Mejdahl V, Murray A S. New light on OSL[J]. Quaternary Geochronology, 1999, 18: 303-309.
- [10] 贾耀锋, 黄春长, 庞奖励, 等. 释光测年在应用研究方面的新进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 115-121. [JIA Yaofeng, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. New progresses of luminescence dating on application study[J]. Journal of Shanxi Normal University(Natural Science Edition), 2005, 33(4): 115-121.]
- [11] Duller G A T. Equivalent dose determination using single aliquots[J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1991, 18: 371-378.
- [12] Mejdahl V, Botter-Jensen L. Luminescence dating of archaeological materials using a new technique based on single aliquot measurements[J]. Quaternary Science Reviews, 1994, 13: 551-554.
- [13] Galloway R B. Equivalent dose determination using only one sample; alternative analysis of data obtained from infrared stimulation of feldspars[J]. Radiation Measurements, 1996, 26: 103-106.
- [14] Murray A S, Roberts R G, Wintle A G. Equivalent dose measurement using a single aliquot of quartz[J]. Radiation Measurements, 1997, 27: 171-184.
- [15] Wintle A G, Murray A S. The relationship between quartz thermoluminescence, photo-transferred thermoluminescence, and optically stimulated luminescence[J]. Radiation Measurements, 1997, 27: 611-624.
- [16] Folz E, Mercier N. A single-aliquot OSL protocol using bracketing regenerative doses to accurately determine equivalent doses in quartz[J]. Radiation Measurements, 1999, 30: 477-485.
- [17] Strickertsson K, Murray A S. Optically stimulated luminescence dates for Late Pleistocene and Holocene sediments from Nørre Lyngby, Northern Jutland, Denmark [J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18: 169-178.
- [18] Hilgers A, Murray A S, Schlaak N. Comparison of quartz OSL

- protocols using Late glacial and Holocene dune sands from Brandenburg, Germany [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 731-736.
- [19] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 57-73.
- [20] Bulur E, Duller G A T, Solongo S, et al. LM-OSL from single grains of quartz: a preliminary study[J]. *Radiation Measurements*, 2002, 35: 79-85.
- [21] Ballarini M, Wallinga J, Wintle A G, et al. Analysis of equivalent-dose distributions for single grains of quartz from modern deposits[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2: 77-82.
- [22] Ballarini M, Wallinga J, Wintle A G, et al. A modified SAR protocol for optical dating of individual grains from young quartz samples[J]. *Radiation Measurements*, 2007, 42: 360-369.
- [23] Ballarini M, Wallinga J, Murray A S, et al. Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10-13): 1011-1017.
- [24] Singarayer J S, Bailey R M. Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37: 451-458.
- [25] Rhodes E J, Singarayer J S, Raynal J P, et al. New age estimates for the Palaeolithic assemblages and Pleistocene succession of Casablanca, Morocco[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 2569-2585.
- [26] Nielsen A, Murray A S, Pejrup M, et al. Optically stimulated luminescence dating of a Holocene beach ridge plain in Northern Jutland, Denmark[J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1(4): 305-312.
- [27] Madsen A T, Murray A S, Andersen T J. Optical dating of dune ridges on R m, a barrier island in the Wadden Sea, Denmark[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23: 1259-1269.
- [28] Bailey S D, Wintle A G, Duller G A T, et al. Sand deposition during the last millennium at Aberffraw, Anglesey, North Wales as determined by OSL dating of quartz[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 701-704.
- [29] Clarke M L, Rendell H M. Effects of storminess, sand supply and the North Atlantic Oscillation on sand invasion and coastal dune accretion in western Portugal [J]. *The Holocene*, 2006, 16: 341-355.
- [30] Aagaard T, Ordford J, Murray A S. Environmental controls on coastal dune formation: Skallingen Spit, Denmark[J]. *Geomorphology*, 2007, 83: 29-47.
- [31] Wilson P, McGourty J, Bateman M D. Mid-to late-Holocene coastal dune event stratigraphy for the north coast of Northern Ireland[J]. *The Holocene*, 2004, 14: 406-416.
- [32] Clarke M, Rendell H, Tastet J P, et al. Late-Holocene sand invasion and North Atlantic storminess along the Aquitaine Coast, southwest France[J]. *The Holocene*, 2002, 12: 131-138.
- [33] Banerjee D, Murray A S, Foster I D L. Scilly Isles, UK: optical dating of a possible tsunami deposit from the 1755 Lisbon earthquake[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 715-718.
- [34] Murray A S, Funder S. Optically stimulated luminescence dating of a Danish Eemian coastal marine deposit: A test of accuracy[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10-13): 1177-1183.
- [35] Banerjee D, Hildebrand A N, Murray-Wallace C V. New quartz SAR-OSL ages from the stranded beach dune sequence in south-east South Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 1019-1025.
- [36] Duller G A T. Luminescence dating of Quaternary sediments: Recent advances[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2004, 19: 183-192.
- [37] Ollerhead J, Huntley D J, Berger G W. Luminescence dating of sediments from Buctouche Spit, New Brunswick. [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1994, 31: 523-531.
- [38] Berger W G, Murray A S, Havholm K G. Photonic dating of Holocene back-barrier coastal dunes, northern North Carolina, USA[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10-13): 1043-1050.
- [39] Tsaoar H, Levin N, Porat N, et al. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Cear State(NE Brazil) [J]. *Quaternary Research*, 2009, 71: 217-226.
- [40] Choi J H, Kim J W, Murray A S, et al. OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics [J]. *Quaternary International*, 2009, 199(1-2): 3-14.
- [41] Murray A S, Mohanti M. Luminescence dating of the barrier spit at Chilika Lake, Orissa, India [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, 119(1-4): 442-445.
- [42] Murray-Wallace C V, Banerjee D, Bourman R P, et al. Optically stimulated luminescence dating of Holocene relict fore-dunes, Guichen Bay, South Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21: 1077-1086.
- [43] Jacobs Z. Luminescence chronologies for coastal and marine sediments[J]. *Boreas*, 2008, 37(4): 508-535.
- [44] Clemmensen L B, Murray A S, Jens-henrik B, et al. Large-scale aeolian sand movement on the west coast of Jutland, Denmark in late Subboreal to early Subatlantic time a record of climate change or cultural impact? [J]. *GFF*, 2001, 123: 193-203.
- [45] Clemmensen L B, Murray A, Heinemeier J, et al. The evolution of Holocene coastal dunefields, Jutland, Denmark: A record of climate change over the past 5000 years[J]. *Geomorphology*, 2009, 105: 303-313.
- [46] Wintle A G, Clarke M L, Musson F M, et al. Luminescence dating of recent dunes on Inch Spit, Dingle Bay, southwest Ireland[J]. *The Holocene*, 1998, 8(3): 331-339.
- [47] Lopez G I, Rink W J. New quartz optical stimulated luminescence ages for beach ridges on the St. Vincent Island Holocene strandplain, Florida, United States[J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24: 49-62.

- [48] 龚革联. 陆地和海洋环境演变研究中的释光测年进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 133-138. [GONG Gelian. Luminescence dating for environmental evolution study in terrestrial land, deep sea and coastal belts: a review[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(2): 133-138.]
- [49] Clemmensen L B, Pye K, Murray A, et al. Sedimentology, stratigraphy and landscape evolution of a Holocene coastal dune system, Lodbjerg, NW Jutland, Denmark[J]. Sedimentology, 2001, 48: 3-27.
- [50] Sommerville A A, Hansom J D, Housley R A, et al. Optically stimulated luminescence(OSL) dating of coastal aeolian sand accumulation in Sanday, Orkney Islands, Scotland[J]. The Holocene, 2007, 17: 627-637.
- [51] Goodwin I D, Stables M A, Olley J M. Wave climate, sand budget and shoreline alignment evolution of the Iluka-Woody Bay sand barrier, northern New South Wales, Australia, since 3000 yr BP[J]. Marine Geology, 2006, 226: 127-144.
- [52] Madsen A T, Murray A S. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review[J]. Geomorphology, 2009, 109: 3-16.
- [53] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 316. [WU Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 316.]
- [54] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 99-104. [DONG Yuxiang. The coastal aeolian geomorphic types and their distribution pattern in China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(4): 99-104.]
- [55] 董玉祥. 中国海岸风沙研究: 进展与展望[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 26-35. [DONG Yuxiang. Coastal aeolian research in China: progress and prospect[J]. Progress in Geography, 2006, 25(2): 26-35.]
- [56] 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L, 等. 海岸横向沙脊表面风沙流结构粒度响应的野外观测研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1022-1028. [DONG Yuxiang, Hesp P A, Namikas S L, et al. Field measurements of vertical distribution of different sand grain sizes in structure of wind-sand flow on coastal transverse ridge[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1022-1028.]
- [57] 吴正, 王为. 华南海岸沙丘岩的特征及其形成发育模式[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 334-343. [WU Zheng, WANG Wei. The characteristics and the development model of dune rocks on south China coasts[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(4): 334-343.]
- [58] 吴正, 黄山, 胡守真, 等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 59-63. [WU Zheng, HUANG Shan, HU Shouzheng, et al. Research on the Landforms of the Wind Drift Sand in South China Coast[M]. Beijing: Science Press, 1995: 59-63.]
- [59] 王为, 吴正. 华南海岸沙丘岩形成与全新世环境变化的关系[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1126-1133. [WANG Wei, WU Zheng. Relationship between development of coastal dune rock and Holocene environmental changes in south China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(9): 1126-1133.]
- [60] 吴正, 黄山, 金志敏, 等. 华南沿海老红砂的成因与红化作用[J]. 地理学报, 1994, 49(4): 298-306. [WU Zheng, HUANG Shan, JIN Zhimin. Research on the formation and laterization of the old red sandy sediment along the coast of south China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(4): 298-306.]
- [61] 曾从盛, 陈居成, 吴幼恭. 闽东南沿海老红砂沉积地层与形成时代[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 338-342. [ZENG Congsheng, CHEN Jucheng, WU Yougong. Sedimentary stratum and forming age of the old red sand along the coast of southeastern Fujian[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 338-342.]
- [62] 吴正, 王为, 谭惠忠, 等. 闽南粤西沿海老红砂的沉积年代[J]. 科学通报, 2000, 45(5): 533-537. [WU Zheng, WANG Wei, TAN Huizhong, et al. Sediment age of the old red sand along the coasts of southern Fujian and western Guangdong[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(5): 533-537.]
- [63] 谭惠忠, 吴正. 闽粤沿海老红砂的热释光测年[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 393-396. [TAN Huizhong, WU Zheng. TL Dating of the old red sand on the coasts of Fujian and Guangdong[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 393-396.]
- [64] 张家富, 袁宝印, 周力平. 福建晋江“老红砂”的释光年代学及对南方第四纪沉积物释光测年的指示意义[J]. 科学通报, 2007, 52(22): 2646-2654. [ZHANG Jiafu, YUAN Baoyin, ZHOU Liping. The Stimulated luminescence chronology and its implications to the south luminescence dating of Quaternary sediments of the “old red sandy sediment” in Jinjiang, Fujian[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22): 2646-2654.]
- [65] Wintle A G. Luminescence dating: where it has been and where it is going[J]. Boreas, 2008, 37: 471-482.
- [66] Li B, Li S-H, Wintle A G, et al. Isochron measurements of naturally irradiated K-feldspar grains[J]. Radiation Measurements, 2007, 42: 1315-1327.

PROGRESS IN OPTICAL STIMULATED LUMINESCENCE DATING FOR COASTAL AEOLIAN GEOMORPHOLOGY RESEARCH: A REVIEW

XIE Li, ZHANG Zhenke

(Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Jiangsu, Nanjing, 210093)

Abstract: Since the mid-1980's much progress has been made in the use of optical stimulated luminescence (OSL) dating method into the studies of coastal aeolian sediments. OSL is one of the important dating methods used in Quaternary geology and archeology. In this paper the main achievements and advances in OSL dating of coastal aeolian sediments were summarized. With the development of the stimulating light source and OSL dating methods itself, more accurate dating results of the coastal aeolian sediments could be obtained. The improvement of OSL dating methods, such as the single aliquot additive dose protocol and the single aliquot regenerative dose protocol, has expanded the dating range and enhanced the precision of OSL dating. The youngest age of coastal aeolian sediments, which have been dated by OSL dating, is within 10 years, and the oldest one is over 900 thousands years. A great deal of researches in this field focus on the evolution of coastal aeolian dune and its relationship with global climate changes in the past. With the ongoing development of OSL dating technology, sandy coast evolution, regional climatic changes and sea level changes will be studied deeply and widely in the near future.

Key words: optical stimulated luminescence dating; coastal aeolian sediments; past climate changes