

姜涛,胡亦潘,周从艳,等.海洋沉积物释光测年现状与展望[J].地质科技通报,2022,41(5):31-54.

Jiang Tao, Hu Yipan, Zhou Congyan, et al. A review of luminescence dating on marine sediments[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 31-54.

海洋沉积物释光测年现状与展望

姜涛, 胡亦潘, 周从艳, 陈康林, 梁晨, 宋霖

(中国地质大学(武汉)海洋地质资源湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要:自释光现象被用于沉积物测年的半个多世纪以来,释光测年技术已被广泛应用于各类海洋沉积物的年代测定,为古环境古气候和构造活动及地形地貌演变等研究提供了高精度年代学约束的同时,释光测年技术的精度和准确性也取得了长足发展。在系统回顾和总结海洋沉积物释光测年的发展历史基础上,详细讨论了释光测年技术在海洋沉积物测年中的研究现状,总结了全球海洋沉积物释光测年研究的特点。海洋沉积物的沉积埋藏过程相对复杂,部分晒退现象普遍存在,饱和含水的沉积环境导致环境剂量精确测定存在一定困难。因此在海洋沉积物年代测定和计算过程中需要根据实际情况对样品的释光性质进行分析,选择合适的等效剂量测试方法,并使用合适的环境剂量校正方法进行年代计算。释光测年方法在晚更新世以来海洋沉积物测年中表现出了独特的优势,释光测年目标矿物在海洋沉积物中普遍存在,并且随着近年来研究的不断深入,测年精度也得到了明显的提高,可以为晚更新世以来的海洋沉积物研究提供高精度的绝对年代地层格架。

关键词:海洋沉积物;释光测年;第四纪;现状与展望

中图分类号:P714⁺.6

文章编号:2096-8523(2022)05-0031-24

收稿日期:2022-06-27

doi:10.19509/j.cnki.dzkg.2022.0192

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A review of luminescence dating on marine sediments

Jiang Tao, Hu Yipan, Zhou Congyan, Chen Kanglin, Liang Chen, Song Lin

(Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources,
China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: During the past 50 years, luminescence dating has been widely applied to dating various marine sediments, which provides important chronological constraints for researches on climate, structure, and geomorphic activities. This paper summarizes articles related to luminescence dating on marine sediments and discusses the details of the development of luminescence dating methodology as well as its applications for marine sediments. The characteristics of luminescence dating on marine sediments in different regions around the world and their contributions to dating the marine sediments by luminescence dating have been summarized. The deposition and burial processes of marine sediments are relatively complex, and insufficient bleaching phenomena are ubiquitous. The saturated water-bearing sedimentary environment makes it difficult to accurately determine the annual dose. Therefore, in the process of dating and calculating the luminescence ages of marine sediments, it is necessary to analyze the luminescence properties of specific samples, select the appropriate equivalent dose test method, and adopt the appropriate annual dose correction method for age calculation. The luminescence dating method has shown unique advantages in various studies of marine sediments since the late Pleistocene. The targeted minerals for luminescence dating com-

基金项目:国家自然科学基金项目(41976073)

作者简介:姜涛(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事海洋地质与资源和海洋沉积物释光测年的教学和科研工作。E-mail: taojiang@cug.edu.cn

monly exist in marine sediments. With great developments in recent years, the age accuracy has also been significantly improved, which can provide a high-precision absolute chronostratigraphic framework for various studies of marine sediments since the late Pleistocene.

Key words: marine sediments; luminescence dating; Quaternary; research status and prospect

释光是指石英、长石等矿物晶体在受到高温或光照时晶格缺陷中捕获的电子逃逸,其部分能量以光子的形式释放的物理现象^[1]。沉积物在搬运过程中接受充分的自然光照射,或者经历高温加热,会导致陷阱中积累的电子全部清零。当沉积物再次埋藏后重新接受周围环境的放射性辐照(主要来自铀、钍、钾以及宇宙射线),在陷阱中重新累积电子,陷阱中储存的电子数量和埋藏时间呈正相关。在实验室中对石英或者长石矿物进行高温加热或者光照,可以激发出其晶格陷阱中的电子,并通过测量释光信号强度,计算出样品在埋藏期间吸收的放射性能量,该能量即为等效剂量^[2-3]。通过测量沉积物中放射性元素的含量和含水率等可以计算出矿物在埋藏过程中每年吸收的辐射能量,即为环境剂量(图 1),释光年代计算公式为:

$$\text{释光年代}(t) = \frac{\text{等效剂量}(D_e)}{\text{环境剂量}(D)}$$

基于释光测年原理及实验测试流程,沉积物释光测年需要满足 4 个基本条件:①用于测试的目标矿物在沉积搬运过程中经历充分的加热或光照,通常石英信号仅需数秒即可晒退至天然信号的 1% 以下,而长石信号则需要数小时^[4];②沉积物在埋藏环境中所接受的辐射剂量率恒定;③矿物晶体缺陷中的电子在埋藏过程中不发生逃逸而导致信号衰减;④沉积物在埋藏后沉积环境稳定,没有经历二次搬运。

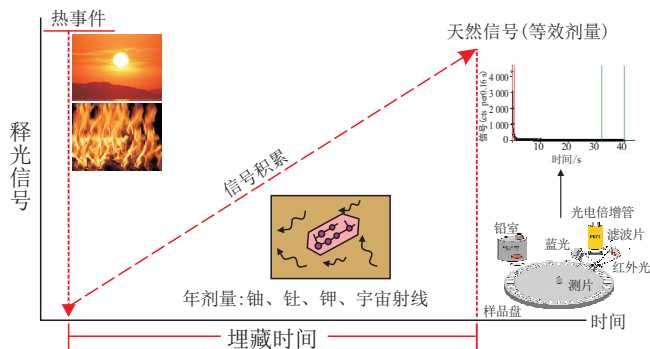


图 1 释光测年原理示意图

Fig. 1 Schematic of luminescence dating

1 第四纪海洋沉积物测年方法

第四纪海洋沉积物测年常用的方法有放射性核素、释光和电子自旋共振、古地磁和古生物等^[5],受测年材料、测年上限以及特定环境中的地质过程等

因素影响,每种测年方法都有其自身的适用性和局限性。例如在深海沉积环境中,由于极低的沉积速率和碳酸盐补偿深度的存在,¹⁴C 测年常常受限,通常只能对浅表层的样品进行年代测定,很难建立完整的高精度、长序列地层年代框架^[6]。

海洋沉积物释光测年的探索可追溯到 1976 年, Huntley 等^[7]首次对北太平洋 2 个深海钻孔沉积物中分离的硅质贝壳碎屑进行热释光测试。研究结果显示沉积物中的混合硅矿物在 240℃ 左右出现单峰,而且该峰值强度随着埋藏深度增加而增加,最终达到饱和。此外,该文还给出了钻孔样品环境剂量率测定的建议,为海洋沉积物释光测年提供了思路。此后大量研究表明,在海洋沉积物测年中,释光方法具有以下特点和优势:①测年的目标矿物普遍存在,包括但不限于石英和长石;②释光测年直接测定目标矿物最后一次曝光或者受热后埋藏至今的绝对年代;③测年范围较广,从几十年到数十万年^[8-11]。尽管如此,释光测年也有其局限性:①与¹⁴C 和铀系测年相比,其精度相对较低,误差约为 10%;②在海洋沉积环境中,由于地层一直处于饱和含水状态,铀系核素可能会由于水体流动而迁移,导致沉积物中存在放射性不平衡的现象^[12];③由于地层的压实作用,沉积物中的孔隙水含量会随埋藏深度增加而发生改变,导致沉积物历史含水率不恒定,影响环境剂量计算;④海洋沉积环境复杂,部分快速堆积沉积物(海啸、潮坪沉积物等)存在晒退不彻底,残余释光信号未归零等问题,导致释光年代被高估^[13-17]。因此,有必要系统回顾和总结海洋沉积物释光测年在方法和技术上的进展,探讨该方法的测试精度和准确性,指出存在的问题和注意事项,以期能提供高精度可靠的年代学约束,更好地应用于古环境、古气候等海洋科学研究。

2 海洋沉积物释光测年研究历史与现状

虽然释光测年已广泛应用于第四纪测年的各个领域,并取得了快速的发展,但由于海洋沉积物释光测年的局限性和深海大洋样品获取困难及光释光测年样品要求避光保存等条件限制,自释光应用于海洋沉积物测年以来,共有 236 篇海洋沉积物释光测年研究文献。从测试矿物和测量方法上看,有 152

项研究采用了石英光释光测年方法,34项研究采用了石英或长石热释光测年方法,21项研究采用了长石红外释光测年方法,另外有29项研究同时测量了沉积物中的2种矿物(图2)。从研究时间上看,2000年之前仅有30项研究,其中最具代表性的成果主要有:①1976年Huntley等^[7]首次对北太平洋深海沉积物钻孔中的硅质贝壳碎屑开展了热释光性质探索;②1979年Wintle等^[18]对南大洋深海钻孔沉积物中的4~11 μm 混合矿物进行热释光测试,建立了该钻孔的释光年代框架,研究还发现光照能将混合矿物的释光信号归零,并且热释光峰值信号强度和人工辐照剂量正相关;③1994年Wood^[19]对突尼斯东北部海岸的沙丘沉积物开展光释光测年研究,并使用绿光卤素灯激发测量了石英的等效剂量,发现沙丘的最老年龄可达MIS 5;④1997年Tanaka等^[20]对日本中部海岸的海蚀阶地上覆地层沉积物开展释光测年研究,结果显示孔隙水含量的变化对最终年代的准确性和精度至关重要,特别是在海岸带沉积环境中,样品的历史含水量不恒定,会极大地影响矿物对放射性能量的吸收。此外,对于快速堆积的沉积物,还需要考虑残余剂量对测年结果的影响。该时期释光测年方法尚不成熟,制约了其在海洋沉积物测年中的应用。2000年Murray等^[21]提出光释光单片再生剂量法(single-aliquot regenerative-dose protocol,简称SAR),该方法是通过在石英单片光释光测年步骤中加入一个小的检验剂量校正测量过程中的样品灵敏度变化,极大地提高了测量精度。随后该方法在英国锡利群岛^[22]和阿伯弗劳^[23]的海岸沙丘以及滨海沉积物测年中得到了验证,这些样品都是只有几百年的年轻沉积物,埋藏前

晒退良好,研究结果对重建现代海滩地貌的演化以及极端气候对海岸环境的影响提供了可靠的年代学支撑。此后石英光释光测年在海岸带及深海大洋沉积物定年中的应用呈爆发式增长,仅2000—2004年间就有20篇与海洋沉积物光释光测年相关的文献发表,而且呈逐年上升的趋势(图2)。

释光测年方法的改进对其在海洋沉积物测年应用上的发展起到了决定性的作用。早期热释光测年多采用多片法,样品的生长曲线采用多片法建立,测片之间的差异会导致曲线误差增大,影响等效剂量精度。之后提出的单片法能极大地减少等效剂量测试过程中的不确定性因素^[3],Murray等^[21]提出的单片再生剂量法通过对灵敏度变化进行校正,仅需一个测片就可以建立生长曲线,并通过对比检验剂量信号可以更好地识别样品是否存在外部污染和灵敏度异常等问题,有效提高了等效剂量测量的精确度。同时,前人^[24-34]通过对比海洋沉积物热释光和光释光的测年结果,提出用热释光监测样品在测试过程中发生的灵敏度变化,提高测年上限。通过光释光和红外释光的对比研究表明^[35-51],长石比石英具有更高的释光测年上限。例如,2015年Balescu等^[52]对突尼斯海岸带样品中的钾长石进行红外释光测年,其最大年代达到了MIS 7,并提出对于因石英释光信号饱和而达到光释光测年上限((138±9) ka)的海岸沙丘样品,也可以利用长石红外释光进行定年。

3 海洋沉积物释光测年研究案例

表1总结了各海洋沉积物释光测年研究的地理位置、沉积物类型、等效剂量测试方法、环境剂量测试方法等,其中沉积物类型根据沉积环境可分为海岸沙丘、海蚀阶地、三角洲、潮坪、海啸、浅海陆架、深海大洋沉积物等,等效剂量测试方法主要分为光释光(OSL)、热释光(TL)、红外释光(IRSIL),环境剂量测试主要方法有中子活化法、 α/β 计数器法、火焰光度计法、电感耦合等离子质谱法、电感耦合等离子光谱法、X射线荧光分析法、伽马能谱法等,很多研究案例中环境剂量率的测量使用了多种方法,并对比分析了不同测试方法的差异。

这些海洋沉积物释光测年研究中(图3),142项(60.2%)是关于海岸沙丘沉积物测年的,其主要成因类型是风成砂,沉积埋藏前晒退良好,是开展释光测年的理想材料。这些研究所关注的科学问题主要与海岸地貌演化、极端气候活动或海平面变化有关^[67,88,113,116,176,214]。其中海蚀阶地释光研究有20项(8.5%),主要关注海平面变化及海岸带地质构造

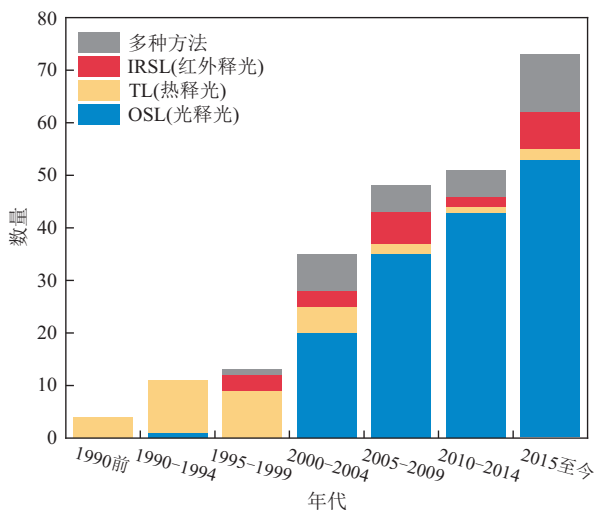


图2 近50年来海洋沉积物释光测年相关论文数量
Fig. 2 Numbers of papers about luminescence dating on marine sediments over the past 50 years

表 1 海洋沉积物释光测年研究实例

Table 1 Case studies on luminescence dating on marine sediments

序号	地理位置	沉积物类型	等效剂量测试方法	环境剂量测试方法	资料来源
亚洲					
1	渤海湾西岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	厚源 α 计数器、火焰光度计	文献[50]
2	渤海湾西岸	浅海沉积物	OSL/IRSL	电感耦合等离子质谱法	文献[51]
3	渤海湾南岸	三角洲沉积物	OSL		文献[53]
4	渤海湾南岸	三角洲沉积物	OSL	中子活化分析	文献[54]
5	渤海湾西岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[55]
6	渤海湾北岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	高分辨率伽马能谱	文献[39]
7	渤海湾辽河三角洲	三角洲沉积物	OSL		文献[56]
8	南黄海西岸	浅海沉积物	OSL		文献[57]
9	南黄海沿岸	潮坪沉积物	OSL	中子活化分析	文献[58]
10	江苏沿海平原	海岸沙丘	OSL/IRSL	中子活化分析	文献[37]
11	东海外陆架	浅海沉积物	OSL		文献[59]
12	东海内陆架	三角洲沉积物	OSL	中子活化分析	文献[60]
13	长江入海口	三角洲沉积物	OSL	中子活化分析	文献[61]
14	长江三角洲	潮坪沉积物	IRSL	中子活化分析	文献[62]
15	长江三角洲	三角洲沉积物	OSL	中子活化分析	文献[63]
16	台湾西南岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[64]
17	香港大澳湾	浅海沉积物	OSL	中子活化分析	文献[65]
18	海南岛西部海域	浅海沉积物	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[66]
19	海南岛东北岸、东南岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[67]
20	海南岛西南部海域	浅海沉积物	OSL	中子活化分析	文献[68]
21	海南岛东北岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[69]
22	韩国东南海岸	海蚀阶地	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[70]
23	韩国西部海岸	潮坪沉积物	IRSL	高纯锗伽马能谱法	文献[71]
24	韩国东南海岸	海蚀阶地	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[72]
25	韩国西南海岸	浅海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[73]
26	韩国东南海岸	三角洲沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[74]
27	韩国西南济州海峡	浅海沉积物	OSL		文献[75]
28	韩国西南海域	浅海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[76]
29	韩国东南海岸	三角洲沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[77]
30	冲绳海槽	深海沉积物	IRSL	高分辨率伽马能谱法	文献[78]
31	日本南海海槽	深海沉积物	TL		文献[79]
32	日本中部海岸	海蚀阶地	OSL/TL	中子活化分析	文献[20]
33	日本中部海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[80]
34	日本西部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	电感耦合等离子质谱法	文献[45]
35	日本东部海岸	海岸沙丘	OSL	α 计数器/ β 计数器	文献[81]
36	日本西北部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	高分辨率伽马光谱法	文献[47]
37	日本东北部海岸	潮坪沉积物	IRSL	电感耦合等离子质谱法	文献[82]
38	日本海北部	浅海沉积物	OSL/IRSL	中子活化分析	文献[49]
39	鄂霍茨克海中部	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马光谱法	文献[83]
40	鄂霍次克海西南部	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马光谱法	文献[84]
41	越南东南部海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[85]
42	越南湄公河三角洲	三角洲沉积物	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[86]
43	泰国弗拉通岛	海啸沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[17]
44	马来西亚西部海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[87]
45	安达曼群岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[88]
46	斯里兰卡东南海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、NaI 伽马能谱法	文献[89]
47	印度东南海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[90]
48	印度东部海岸	海啸沉积物	OSL	厚源 α 计数器、伽马能谱法	文献[16]
49	印度东部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	NaI 伽马能谱法	文献[42]
50	印度西北部海岸	海岸沙丘	OSL	X 射线荧光法	文献[91]
51	伊朗东南海岸	海蚀阶地	OSL	电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)	文献[92]
52	阿曼东部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	BEGe、NaI 伽马能谱法	文献[43]

续表 1

序号	地理位置	沉积物类型	等效剂量测试方法	环境剂量测试方法	资料来源
53	迪拜西部海岸	潮坪沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法/电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)文献[93]	
54	地中海东部海岸	海岸沙丘	TL/IRSL	电感耦合等离子质谱、光谱法(ICP-MS、OES)	文献[34]
55	以色列阿什凯隆西部海域	浅海沉积物	TL/IRSL	电感耦合等离子质谱、光谱法(ICP-MS、OES)	文献[27]
56	以色列西部海岸	浅海沉积物	OSL		文献[94]
57	黑海南部海岸	海蚀阶地	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法(ICP-MS、OES)	文献[95]
58	以色列西部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	伽马能谱	文献[35]
59	塞浦路斯东南海岸	海岸沙丘	IRSL	电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)	文献[96]
60	土耳其北部海岸	海蚀阶地	OSL		文献[97]
大洋洲					
61	澳大利亚西南海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[98]
62	澳大利亚西南海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[99]
63	澳大利亚南部诺曼威尔海岸	海岸沙丘	TL		文献[100]
64	澳大利亚南部海域	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[101]
65	澳大利亚南杨哈斯本半岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[102]
66	澳大利亚南部圭琴湾	海岸沙丘	OSL		文献[103]
67	澳大利亚南部圭琴湾/里沃利湾	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[104]
68	澳大利亚南圭琴湾	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[105]
69	澳大利亚东南海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[106]
70	澳大利亚塔斯马尼亚州东南海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[107]
71	澳大利亚东南利普特拉普海岸	海蚀阶地	OSL	中子活化分析、伽马能谱	文献[108]
72	澳大利亚东南吉普斯兰湖海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[109]
73	澳大利亚新南威尔士州海岸	海岸沙丘	TL		文献[110]
74	澳大利亚维多利亚州九十英里海滩	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[111]
75	澳大利亚东南双层湾	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[112]
76	澳大利亚新南威尔士州海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[113]
77	澳大利亚新南威尔士州海岸	海啸沉积物	TL		文献[14]
78	澳大利亚东南本杰洛海滩	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[114]
79	澳大利亚东南海岸	海啸沉积物	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[13]
80	澳大利亚新南威尔士州海岸	海啸沉积物	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[15]
81	澳大利亚新南威尔士州海岸	海啸沉积物	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[115]
82	澳大利亚东南杰维斯湾	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[116]
83	澳大利亚东南肖尔黑文海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[117]
84	澳大利亚新南威尔士州海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[118]
85	澳大利亚新南威尔士州海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[119]
86	澳大利亚东部伊鲁卡-伍迪湾	海岸沙丘	OSL		文献[120]
87	澳大利亚昆士兰州莫尔顿岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[121]
88	澳大利亚东部吉宝湾	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[122]
89	澳大利亚昆士兰州东南部海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[123]
90	澳大利亚东南弗雷泽岛	深海沉积物	OSL		文献[124]
91	澳大利亚东部菲茨罗伊河入海口	三角洲沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[125]
92	澳大利亚东部吉宝湾	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[126]
93	澳大利亚东北海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[127]
94	澳大利亚东北海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[128]
95	澳大利亚卡彭塔里亚湾	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子发射光谱法	文献[129]
96	澳大利亚卡彭塔里亚湾	三角洲沉积物	TL	伽马能谱法、X 射线荧光法	文献[130]
97	澳大利亚卡彭塔里亚湾	浅海沉积物	OSL/TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[25]
98	澳大利亚卡彭塔里亚湾	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[131]
99	澳大利亚北部海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[132]
100	澳大利亚东部莫顿湾	海岸沙丘	OSL/TL	高分辨率伽马能谱法	文献[31]
101	澳大利亚北部海岸	海岸沙丘	TL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[133]
102	澳大利亚北部海岸	海岸沙丘	TL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[134]
103	斐济西南海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法、X 射线荧光法	文献[135]

续表 1

序号	地理位置	沉积物类型	等效剂量测试方法	环境剂量测试方法	资料来源
104	新西兰沿岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	高分辨率伽马能谱法	文献[40]
105	新西兰大巴里尔岛	海啸沉积物	OSL	中子活化分析、电感耦合等离子光谱法	文献[136]
106	新西兰中部海岸	海岸沙丘	IRSL	厚源计数法、原子吸收光谱法	文献[137]
107	新西兰西部骑士岬	海蚀阶地	OSL	伽马能谱法	文献[138]
108	新西兰中部海岸	海岸沙丘	IRSL	伽马能谱法	文献[139]
109	新西兰东南海岸	海蚀阶地	OSL	中子活化分析	文献[140]
110	新西兰东南海岸	海蚀阶地	TL	中子活化分析、电感耦合等离子光谱法	文献[141]
非洲					
111	埃及北部海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[142]
112	突尼斯东北海岸	海蚀阶地	OSL/IRSL	伽马能谱	文献[46]
113	突尼斯东部海岸	海岸沙丘	IRSL	中子活化分析	文献[52]
114	突尼斯东部海岸	海岸沙丘	OSL	NaI 伽马能谱法	文献[19]
115	摩洛哥卡萨布兰卡海岸	海蚀阶地	OSL	野外原位伽马能谱	文献[143]
116	加纳沃尔特河海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[144]
117	南非南部海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[145]
118	南非南部海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[146]
119	南非南部海岸	浅海沉积物	OSL	厚源 α/β 计数器、野外原位伽马能谱	文献[147]
120	南非南部海岸	海岸沙丘	OSL	厚源 β 计数器、野外原位伽马能谱	文献[148]
121	南非东南海岸	海岸沙丘	TL/IRSL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[32]
122	南非东南海岸	海岸沙丘	OSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[149]
123	南非东部海岸	海岸沙丘	IRSL	电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[150]
124	莫桑比克东部海岸	海岸沙丘	OSL	厚源 α/β 计数器	文献[151]
欧洲					
125	葡萄牙西部海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[152]
126	葡萄牙西部海岸	海岸沙丘	IRSL	厚源 α/β 计数器	文献[153]
127	西班牙弗门特拉岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[154]
128	西班牙马略卡岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[155]
129	法国西南海岸	海岸沙丘	IRSL	厚源 α/β 计数器	文献[156]
130	法国西北海岸	海岸沙丘	TL	伽马能谱/厚源计数	文献[157]
131	法国西北海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析、野外原位伽马能谱	文献[158]
132	法国桑加特海岸	海岸沙丘	TL	伽马能谱法/中子活化分析	文献[159]
133	英国锡利群岛	潮坪沉积物	OSL	厚源 α/β 计数器	文献[160]
134	英国南部海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[22]
135	威尔士西北海岸	海岸沙丘	OSL	厚源 α/β 计数器	文献[23]
136	苏格兰北部海岸	海岸沙丘	OSL	厚源计数器、伽马能谱法	文献[161]
137	设得兰群岛西海岸	海岸沙丘	OSL		文献[162]
138	挪威东南海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	厚源 α 计数器、电感耦合等离子质谱、光谱法	文献[36]
139	丹麦斯卡根半岛	海岸沙丘	OSL	伽马能谱法	文献[163]
140	丹麦斯卡根半岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[164]
141	丹麦斯卡根半岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[165]
142	丹麦海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[166]
143	丹麦安霍尔特岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[167]
144	丹麦西兰岛海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[168]
145	丹麦南部海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[169]
146	丹麦西部海岸	潮坪沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[170]
147	丹麦西部海岸	海岸沙丘	OSL		文献[171]
148	丹麦西部海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[172]
149	丹麦西部瓦登海	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[173]
150	丹麦西部瓦登海	潮坪沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[174]
151	丹麦西部瓦登海	潮坪沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[175]
152	丹麦西南海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[176]
153	德国北部海域	浅海沉积物	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[177]

续表 1

序号	地理位置	沉积物类型	等效剂量测试方法	环境剂量测试方法	资料来源
154	德国北海海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[178]
155	德国北海海岸	潮坪沉积物	OSL	中子活化分析	文献[179]
156	德国北海海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[180]
157	德国北海海岸	海岸沙丘	IRSL	高分辨率伽马能谱法	文献[181]
158	德国亚斯蒙德半岛	海岸沙丘	OSL/IRSL	高分辨率伽马能谱法	文献[38]
159	荷兰西北海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[182]
160	荷兰北部泰瑟尔岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[183]
161	荷兰北部泰瑟尔岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[184]
162	比利时西海岸	潮坪沉积物	OSL	中子活化分析/高分辨率伽马能谱法	文献[185]
163	比利时西海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[186]
164	波罗的海西南海域	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[187]
165	波罗的海西南海域	浅海沉积物	OSL		文献[188]
166	波罗的海西南海域	浅海沉积物	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[189]
167	波罗的海西南海域	浅海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[190]
168	波罗的海南部海域	浅海沉积物	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[191]
169	立陶宛西部海岸	海岸沙丘	OSL	伽马能谱法	文献[192]
170	立陶宛西部海域	海岸沙丘	OSL/IRSL	伽马能谱法	文献[41]
171	拉脱维亚西部海岸	海岸沙丘	OSL/IRSL	中子活化分析	文献[44]
172	爱沙尼亚东北海岸	海岸沙丘	IRSL	伽马能谱法	文献[193]
173	意大利西北海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[194]
174	意大利撒丁岛西北海岸	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[195]
175	意大利西部海岸	海岸沙丘	IRSL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[196]
176	意大利南部海岸	海蚀阶地	TL		文献[197]
177	意大利西西里岛西北海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[198]
178	意大利南部海岸	海蚀阶地	TL	中子活化分析、X 射线荧光法	文献[199]
179	意大利南部海岸	海蚀阶地	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[200]
180	意大利南部海岸	海蚀阶地	IRSL	中子活化分析、厚源 α 计数器	文献[201]
181	意大利东南海岸	海蚀阶地	TL/IRSL	伽马能谱法	文献[24]
182	希腊南部海域	深海沉积物	OSL/TL	厚源 α 计数器、火焰光度计	文献[33]
183	希腊南部海域	深海沉积物	IRSL	厚源 α 计数器、火焰光度计	文献[202]
184	罗马尼亚多瑙河海岸	海岸沙丘	OSL	野外原位伽马能谱法	文献[203]
185	亚速海北部海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[204]
美洲					
186	加拿大西北海岸	海岸沙丘	OSL	野外原位伽马能谱法	文献[205]
187	加拿大卡尔弗特岛	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[206]
188	加拿大卡尔弗特岛	海岸沙丘	OSL		文献[207]
189	加拿大西部海岸	海嘯沉积物	IRSL	厚源 α 计数器	文献[208]
190	哈德逊湾南岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[209]
191	马格达伦岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[210]
192	阿拉斯加南部海岸	海岸沙丘	IRSL	厚源 α 计数器、火焰光度法	文献[211]
193	俄勒冈州西北海岸	海岸沙丘	OSL	β 计数器	文献[212]
194	俄勒冈州西部海岸	海岸沙丘	TL		文献[213]
195	俄勒冈州西南海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[214]
196	加利福尼亚西北海岸	海岸沙丘	TL	厚源 α 计数器	文献[215]
197	加利福尼亚西部海域	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[216]
198	墨西哥湾格兰德岛	三角洲沉积物	OSL	中子活化分析	文献[217]
199	墨西哥湾北部海岸	海岸沙丘	OSL		文献[218]
200	墨西哥湾东北海岸	海岸沙丘	OSL/TL	中子活化分析	文献[29]
201	墨西哥湾东北海岸	海嘯沉积物	TL		文献[219]
202	墨西哥湾圣文森特	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[220]
203	墨西哥湾圣文森特	海岸沙丘	OSL	中子活化分析	文献[221]
204	佐治亚海岸	海岸沙丘	OSL	NaI 伽马能谱法	文献[222]

续表 1

序号	地理位置	沉积物类型	等效剂量测试方法	环境剂量测试方法	资料来源
205	北卡罗来纳州海岸	海岸沙丘	OSL		文献[223]
206	北卡罗来纳州海岸	海岸沙丘	OSL		文献[224]
207	佛吉尼亚州海岸	海岸沙丘	OSL	BEGe 伽马能谱法	文献[225]
208	马萨诸塞州海岸	海岸沙丘	OSL	中子活化分析、原子吸收光谱法	文献[226]
209	缅甸州海岸	海岸沙丘	OSL		文献[227]
210	厄瓜多尔西部海岸	海蚀阶地	IRSL	中子活化分析、厚源 α 计数器	文献[228]
211	厄瓜多尔西部海岸	海蚀阶地	IRSL		文献[229]
212	巴西东部海岸	海蚀阶地	OSL/TL	中子活化分析	文献[26]
213	巴西东部海岸	海岸沙丘	OSL/TL	NaI 伽马能谱法	文献[28]
214	巴西东南海岸	海岸沙丘	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[230]
215	巴西东南海岸	海岸沙丘	OSL		文献[231]
216	巴西南部海岸	海岸沙丘	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[232]
217	巴西南部海岸	海岸沙丘	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[233]
218	巴西南部海岸	海岸沙丘	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[234]
南北极					
219	俄罗斯北部海岸	海岸沙丘	OSL	HPGe 伽马能谱法	文献[235]
220	泰米尔半岛	海岸沙丘	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[236]
221	南极洲乔治王岛	岸沙丘	OSL	伽马能谱法	文献[237]
222	南极洲玛格丽特湾北部海岸	海岸沙丘	OSL	伽马能谱法	文献[238]
223	南极洲玛格丽特湾东部海岸	海岸沙丘	OSL	伽马能谱法	文献[239]
224	南极半岛拉勒曼德峡湾	浅海沉积物	OSL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[240]
深海大洋					
225	北冰洋	深海沉积物	OSL/TL	厚源 α 计数器	文献[30]
226	北冰洋	深海沉积物	OSL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[241]
227	北冰洋	深海沉积物	OSL	厚源 α 计数器、原子吸收光谱法	文献[242]
228	北冰洋	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[243]
229	北冰洋	深海沉积物	OSL/IRSL	高分辨率伽马能谱法	文献[48]
230	太平洋	深海沉积物	TL	厚源 α 计数器、X 射线荧光法	文献[7]
231	大西洋	深海沉积物	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[244]
232	大西洋	深海沉积物	OSL	电感耦合等离子质谱法	文献[245]
233	孟加拉湾	深海沉积物	IRSL	—	文献[246]
234	阿拉伯海	深海沉积物	TL	厚源 α 光谱器、火焰光度计法	文献[247]
235	东印度洋	深海沉积物	OSL	高分辨率伽马能谱法	文献[248]
236	南大洋	深海沉积物	TL	厚源 α 计数器	文献[18]

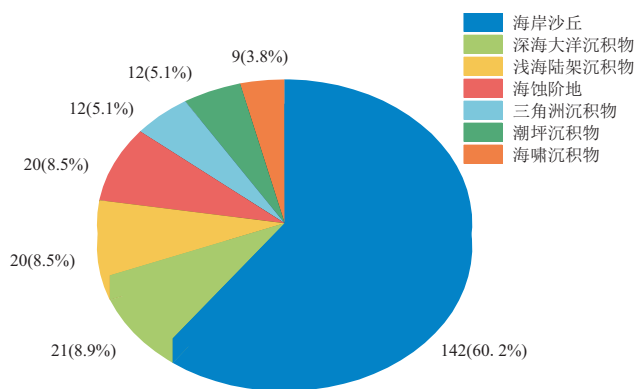


图 3 不同类型海洋沉积物释光测年研究实例

Fig. 3 Case studies of luminescence dating on various marine sediments

活动等。三角洲沉积物的研究有 12 项(5.1%),涉及河口演化^[86,130]、河流沉积通量^[125]、三角洲演化历史等^[63-64,144]。潮坪沉积物研究有 12 项(5.1%),该类型沉积环境主要受控于潮汐活动,这导致沉积物后期扰动频繁,研究案例中释光年代结果普遍较小。其中有 2 项研究对比了石英光释光与²¹⁰Pb 测年结果^[170,174],验证了石英光释光测年在海岸带年轻沉积物测年中的应用前景。有 9 项(3.8%)海啸沉积物释光测年研究,海啸是极端突发灾害事件,其沉积物在极短的时间内堆积,导致沉积物没有充分的时间曝光。研究中的释光年代普遍高于同层位¹⁴C 年代,表明沉积物普遍存在晒退不完全现象^[17,116]。基于释光年代结果,前人还重建了海啸发生频率等^[13-14,219],为海洋极端气候研究提供了年代学支

撑。浅海陆架沉积物的释光测年研究有 20 项 (8.5%), 该环境下陆缘碎屑供给充分, 同时易受气候的影响, 因此陆架浅海沉积物是研究海陆演化的重要载体。深海大洋沉积物释光测年的研究有 21 项 (8.9%), 且其中只有 4 项研究使用了 $90\ \mu\text{m}$ 以上的粗矿物颗粒进行释光测年^[48,79,101,216], 这主要是因为远离陆缘的深海大洋地区缺少粗碎屑沉积物, 而细颗粒沉积物则可以通过风搬运至深

海^[30,78]。

根据研究区地理位置对每一篇文献进行统计分析, 划分为亚洲、大洋洲、非洲、欧洲、美洲、南北极、深海大洋 7 个主要研究区域, 并将表 1 中的研究案例根据不同的等效剂量测试方法将其位置标在图 4 中, 可以看出大部分研究案例集中在亚洲东部海岸、大洋洲东部海岸、北美沿岸、欧洲及地中海沿岸、非洲南部海岸。

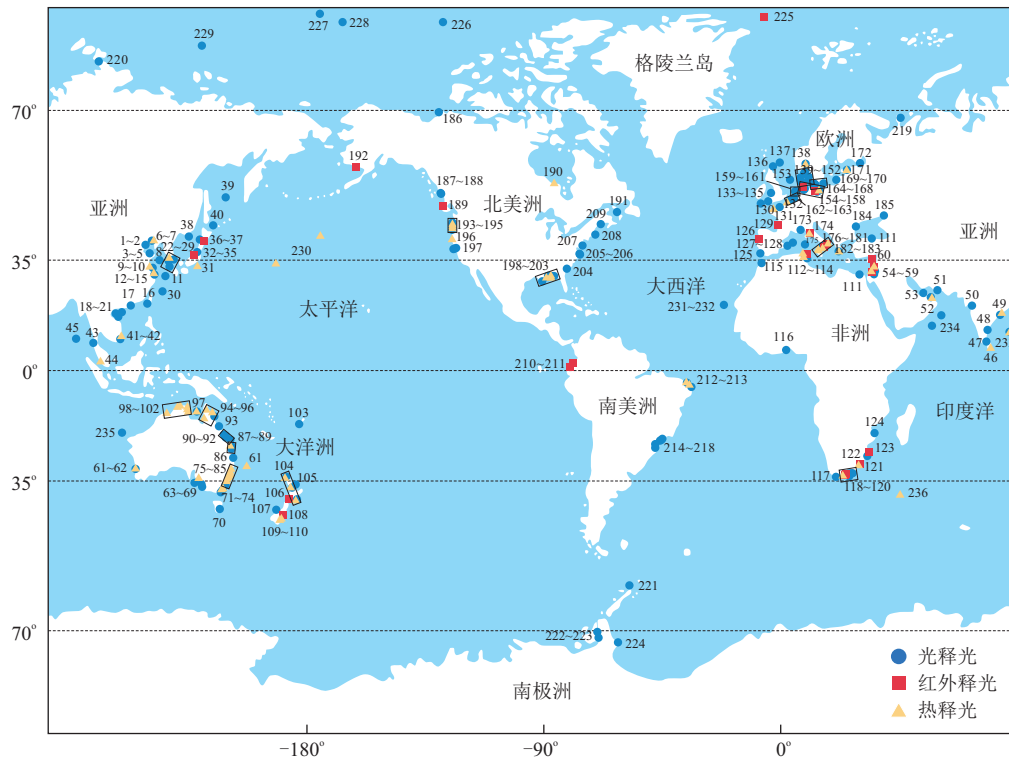


图 4 全球海洋沉积物释光测年研究实例分布图

Fig. 4 Distribution map of case studies on luminescence dating on marine sediment in the world

3.1 亚洲

亚洲幅员辽阔, 东部海岸线位于太平洋板块与欧亚板块碰撞的俯冲带, 释光测年主要用于构造抬升、海平面变化对海岸带影响的研究。韩国和日本在海洋沉积物释光测年方法和应用研究中的探索相对较早。Kim 等^[74,77] 分别在 2015 年和 2021 年对韩国东南海岸的三角洲沉积物进行过释光标准曲线 (SGC) 的探索, 结果显示释光标准曲线结合单片再生剂量法 (SGC-SAR) 对石英进行等效剂量的测试结果在低剂量区应用效果良好, 通过几个有代表性的单片再生剂量结果建立一条释光标准生长曲线, 可以极大地提高等效剂量测试效率。在样品释光性质探索方面, Choi 等^[70,72] 分别在 2003 年和 2009 年进行了线性激发光释光测试实验, 结果显示海蚀阶地样品中的不同组分释光信号热敏感度有所差异, 并建议在测试过程中采用相对较高的预热温度。同

一时期, 日本学者^[45,47] 做了几项海洋沉积物光释光和红外释光结果的对比研究, 提出光释光和红外释光之间的差异可能与不同测年矿物中的异常衰减有关。2015 年, Yang 等^[49] 在对日本海北部重力钻孔岩心样品进行光释光和红外释光结果对比研究中还发现, 低温红外释光 (IRSL_{50}) 比高温 ($\text{IRSL}_{225}/\text{IRSL}_{290}$) 信号更适合浅海沉积物释光等效剂量的测试。中国对海洋沉积物释光测年的研究相对较晚, 不过近些年来, 中国在这方面的研究发展迅速。2015 年以来, 发表了 15 篇海洋沉积物释光测年研究相关的文献, 占同时期全球发表文献的 20% 以上。这些研究涉及了长石红外释光和石英光释光方法的对比^[37,39], 提出了长石红外释光比石英光释光方法具有更高的测年上限。另外还有关于海洋沉积物不同粒径石英光释光测年的研究^[60-61], 研究表明粗颗粒 ($100\sim 200\ \mu\text{m}$) 或中颗粒 ($45\sim 63\ \mu\text{m}$) 石英

释光年代结果有不同程度的高估,其原因可能是在埋藏前的沉积搬运过程中,细颗粒在上层水体中接受光照时间较长有关,而中颗粒或者粗颗粒石英会快速沉降到水体下层,无法接受充分的自然光晒退过程,进而导致细颗粒($4\sim 11\ \mu\text{m}$)石英在埋藏前晒退比较好。这些文献中有很多将释光年代结果与 ^{14}C 测年结果进行了对比^[55-57,59,63,66],然而上层水成沉积环境中的 ^{14}C 测试同样也存在水体迁移、碳库校正等问题,能否采用 ^{14}C 结果去判断释光年代结果的准确性本身就是一个值得商榷的问题。未来可能需要结合多种测年方法结果相互验证来建立更可靠的年代框架。

亚洲西部地区海洋沉积物释光测年研究主要分布于地中海海岸、黑海海岸以及波斯湾沿岸,研究主要聚焦于区域地质构造抬升以及区域海岸沙丘的沉积演化。已有的研究实例表明,该地区受全球气候变化及全球海平面变化影响不大,主要受控于区域构造作用影响。2013年 Yildirim 等^[95]对土耳其北部黑海沿岸的海蚀阶地进行石英光释光年代测定,结果显示研究区的海蚀阶地主要发育于 570 ka, 400 ka, 190 ka, 125 ka 4 个阶段,阶地的发育主要受控于构造抬升运动,抬升速率约为 $0.26\ \text{mm/a}$ 。在地中海沿岸,释光测年主要应用于晚更新世以来海岸沙丘沉积期次的研究。Porat 等^[27]2003 年对以色列近海的钻孔样品研究表明,石英光释光年代结果大于长石红外释光年代,有高估的可能性。2018 年 López 等^[94]对附近海域的钻孔研究也发现了该现象,不过他们利用单颗粒测试了大量数据,将单颗粒结果离散值(SG-OD)作为一个判别样品陆架沉积物是否经历多期次改造的指标,认为研究区钻孔沉积物在地质历史时期经历了风暴、海啸等极端气候事件改造,而且研究区的水体较浑浊导致了石英颗粒晒退程度不同。该现象同样也在其他地区的水下沉积物中被报道:Tsakalos 等^[34,96]2016 年对塞浦路斯东南海岸的海岸沙丘释光测年研究以及 2020 年 Faershein 等对以色列海岸沙丘的释光测年结果都显示石英释光测年结果大于长石红外释光测年结果。这说明石英晒退不充分的现象不仅存在于近海水下沉积物中,而且在海岸沙丘沉积物中也有类似现象。2019 年 Normand 等^[92]对伊朗东南部海岸的样品进行了释光、 ^{14}C 、U/Th 测年结果的对比研究,结果显示在大于 20 ka 时 ^{14}C 结果与其他方法的结果存在明显差别,认为 ^{14}C 测年上限在不同的样品中需要详细论证。另外,对于年代大于 100 ka 的样品,石英颗粒释光信号也存在明显的异常衰减的情况。

2007 年 Zander 等^[93]利用高分辨率伽马谱仪和

电感耦合等离子质谱法进行阿联酋迪拜附近 2 处海岸考古遗址样品的剂量率测定,发现其中铀系子核素 ^{234}U 与其母核素存在明显的放射性不平衡,认为是因为海洋中某些碳酸盐矿物会吸收其中的 U 核素子体,于是他们模拟了地球化学过程,用样品中贝壳等碳酸盐矿物对 U 核素的吸收量来校正释光环境剂量率,计算了每个样品的最大和最小年代,校正后的释光年代结果与 ^{14}C 以及 U/Th 年代结果一致,并根据这一剂量率校正方法重建了阿联酋迪拜附近的全新世海岸演化。他们提供的年代结果表明研究区全新世最高海平面 7.1 ka,之后开始逐渐下降,形成沙洲、障壁岛等沉积体,并向海的方向进一步推进,导致海岸平原的延伸。距今约 4.2 ka,一次短暂的海侵创造了一个侵蚀平台,随后被后期沉积物覆盖。

另外,还有很多研究实例通过释光年代结果揭示由海平面变化或者河流演化引起的海陆演化过程^[39,55,57,59,61-62,67,69,75-76,82],在东南亚以及孟加拉海沿岸,有些实例与风暴潮海啸等极端气候有关^[16-17,88]。在对此类型沉积物释光性质研究基础上,对极端气候的发生频率和周期进行了预测。如 Niu 等^[63]通过对比历史沉船记录和沉船区样品释光年代,验证了释光测年可以精确测定百年尺度海洋沉积物的年龄。

3.2 大洋洲

澳大利亚、新西兰早期的海洋沉积物释光测年研究实例中大多使用热释光进行等效剂量的测试,本文统计的该区域 2000 年之前发表的文献有 15 篇,其中仅有 1 篇采用红外释光测年^[137],其他文献使用的都是热释光方法。2000 年之后,该地区只有 6 项研究实例涉及使用热释光进行等效剂量测定^[25,31,98,116,130,141],其中还有 2 项研究同时使用了光释光与热释光测试等效剂量,分别是 2001 年 Chivas 等^[125]对卡彭塔利亚湾进行的气候与海平面变化关系的研究以及 2008 年 Brooke 等^[31]对莫顿湾硬化砂层的研究。大洋洲海洋沉积物中长石红外释光测试研究极少,只有在新西兰中部和东南部海岸有 2 项相关研究。这一现象可能与大洋洲海岸带样品的独特释光性质有关,该地区除了与风暴海啸沉积物有关的样品外,其他样品中石英晒退良好,也极少出现信号异常衰退的情况,同时石英的饱和剂量也较其他地区的高很多^[106,140],特别适合石英释光年代测试。

这些研究基本解决了该地区晚更新世以来海岸沙丘形成及其与冰期一间冰期旋回关系的问题以及海啸等极端气候对海岸带影响的问题。其中某些研究涉及了多种测年方法,这也为海洋沉积物释光性

质的研究提供了极好的思路^[107,112-114,120,130-131,135]。值得一提的是,Huntley等^[249-251]在1993年和1994年,对澳大利亚东南部圭琴湾海滩的沙丘样品进行热释光年代测试,结果显示500 ka以来与 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录比对一致。另外在南澳大利亚州海岸沙丘沉积物中,也广泛存在饱和剂量大于500 Ga的石英颗粒,其测年上限可达800 ka^[106]。

澳大利亚东部海岸是受风暴潮、海啸等极端气候影响的重要区域,特别是在新南威尔士沿岸,保存有多个海啸沉积物地层,有4项研究实例使用热释光对该地区地质历史时期发生的海啸事件进行年代测定^[13-15,115],大致确定了全新世以来的6次重大海啸发生时间:0.25,0.5~0.8,1.6~1.9,3.6,5.8,7~9 ka。由于海啸发生时,沉积物会在短时间内快速堆积,所以样品中普遍存在晒退不充分的现象。同时由于海啸发生时会把不同期次的新老样品混合在一起,导致同一个样品的释光性质不同。

更多的研究是对东部海岸沙丘年代进行测定以确定海平面变化对海岸带演化产生的影响,或者是确定障壁岛形成的年代。Bryant等^[109]1997年对维多利亚州吉普斯兰湖地区障壁岛沉积物进行热释光测试,确定大多数障壁岛形成的时间为40~48 ka和59~72 ka,该结果比新南威尔士海岸的障壁岛形成年代要晚。2020年Kennedy等^[111]对维多利亚州的全新世障壁岛进行光释光年代测定,结果显示,该地区的障壁岛形成分为3个阶段:第一阶段是在约8 ka时发生岛屿复合体增生,形成障壁岛的雏形;第二阶段是在约6 ka,潮汐系统进入陆地方向的入口关闭,陆架沉积物供应减少;第三阶段约在3 ka形成障壁岛,并在陆缘沉积驱动下向前推进。同时提出,在对年轻样品进行年代测定时,光释光比热释光更有优势,热释光的误差普遍比光释光大10%以上。

在南澳大利亚州圭琴湾海滩,多位学者对该地的沙丘演化过程进行了详细研究。最早是Murray-Wallace等^[105]利用光释光方法对沙丘剖面连续取样进行定年,结果显示5 ka左右,在几百年内沙丘向前堆积了约1 600 m,并在此之后一直保持约0.39 m/a的进积速率。2006年Bristow等^[103]利用探地雷达结合光释光测年的方法对该地区的沙丘进积过程进行更精细的刻画,结果同样发现了距今5 ka左右的快速进积阶段,不过在此之后进积速率并不是一直保持不变的,而是在进积过程中不断减小,这与沙丘在向海进积的过程中可容纳空间增大有关。2020年Oliver等^[104]对全新世以来该地的海平面变化过程进行反演,石英释光年代结果显示,5 ka前快速进积阶段的停止与海平面上升有关,约3.5

ka海平面达到最大高度,比现今高约2 m,而后逐渐降低,并在约1 ka达到现今海平面高度。

澳大利亚东部海岸沙丘释光测年研究中,目标矿物以粗颗粒石英(90~125 μm /180~212 μm)为主,这与该地区的石英释光性质良好有关。这些研究基本阐明了澳大利亚东部海岸晚更新世以来海陆演化过程,以及受控于气候变化的海平面升降,并且利用释光方法对多期沉积体进行精确定年。值得一提的是,2009年Gardner等^[108]对利普特拉普海岸的海蚀阶地进行释光年代测定,结果显示该地发育六级海蚀阶地,海拔高度为1.5~170 m,并且推断该海蚀阶地的发育受控于局部构造运动,认为澳大利亚东南部海岸地貌环境演化整体受控于季风气候变化,局部受小构造运动的影响。

澳大利亚北部海岸沙丘沉积物在20世纪90年代进行过很多热释光测年研究。1990年Lees等^[133]对澳大利亚北部科博半岛、雪儿本湾、弗拉德利角的海岸沙丘沉积物进行了不同粒径石英热释光测年研究,并与 ^{14}C 测年结果进行比对,证实了热释光测年方法在海岸沙丘沉积物定年中的可行性。该方法也同样应用在了澳大利亚北部圣兰伯特角的海岸沙丘沉积物释光测年研究中,确定了研究区4个主要沉积单元的地质年代^[134],并在随后对约克角沙丘沉积物的研究中发现不同激发温度下的热释光结果存在差异,于是用3个不同激发温度的热释光进行年代确定,并用平均值法进行等效剂量的计算^[129]。同时期发表的热释光与U/Th测年以及 ^{14}C 结果的对比研究也进一步证实了释光测年在海洋沉积物年代学研究中的可行性^[130-131],而且对于一些缺乏有机质,或者超过 ^{14}C 测年上限的样品,释光测年可以发挥更大的作用。

新西兰沿岸的很多海洋沉积物释光测年研究实例都与极端气候以及整体或局部的构造活动有关。2003年Nichol等^[136]对新西兰大巴里尔岛巨厚砾石层进行石英光释光定年研究,结果显示该砾石层形成于4.7 ka,并且在该砾石层上覆地层中又发现了一次距今约1.4 ka的海啸沉积物,认为这次海啸由距离新西兰不远的海底火山活动引起。新西兰附近火山、地震活动频发,在新西兰周围广泛发育有不同期次形成的海蚀阶地,其中在西部骑士岬,最老的海蚀阶地形成于MIS 5e((123 $\pm$ 7) ka),此后一直处于构造抬升过程,抬升速率约为0.86 mm/ka^[138]。在新西兰东南部泰瑞海滩附近同样存在有MIS 5e时期形成的海蚀阶地^[141]。不过在泰瑞海滩附近,有学者发现在80~125 ka存在一次局部的构造沉降^[140]。

3.3 非洲

非洲的海洋沉积物释光测年研究主要集中在南

非东南沿海。其中有 2 项研究对热转移光释光在海洋沉积物测年中的应用进行了详细的论述。2011 年 Jacobs 等^[146]对南非莫塞尔湾的海岸沙丘样品进行详细的释光性质研究,提出热转移光释光只适合埋藏前晒退充分的样品,样品在测试过程中灵敏度变化显著,这也是限制热转移光释光方法应用的原因之一,因此建议在热转移光释光测试等效剂量过程中单独测量基本转移光释光信号(BT-OSL),用以检查样品在埋藏前的晒退情况。2012 年 Thiel 等^[46]对突尼斯东北部海岸的海蚀阶地样品进行热转移光释光测试过程中发现,对较年轻样品(<250 ka)热转移光释光与常规光释光测试结果一致,不过对于年龄较大的样品,热转移光释光的适用性需要进一步论述。

2006 年 Rhodes 等^[143]在对摩洛哥卡萨布兰卡附近的海蚀阶地进行释光年代研究过程中,发现常规光释光年代结果比预期年代要小很多,推测是由于石英颗粒的释光测年上限导致,于是他们利用石英中的慢组分释光信号进行等效剂量测试,该方法在 Singarayer 等^[253]2003 年的文献中有详细论述。最终用石英慢组分测得的释光年代为 (948 ± 599) ka,这个结果显然无法提供良好的地质年代框架,不过该方法也是对释光测年方法的一次成功探索。

在非洲西部海岸只有 1 项海洋沉积物释光测年研究实例,2021 年 Aagaard 等^[144]对加纳南部海岸的海岸沙丘进行释光年代测试,结果显示研究区的沙丘形成于 2.5 ka 左右,该处地貌的发育与沃特河口的向西迁移有关。非洲南部海岸的研究实例聚焦于冰期旋回引起的海平面变化对海岸带地貌的改造作用。Porat 等^[150]在 2008 年对南非马普塔兰海岸沙丘通过长石红外释光测年进行详细的年代研究,建立了从 MIS 11 以来的释光地层年代框架。由于石英释光测年的上限问题,他们用长石热释光测试较老的地层年代,又用长石红外释光对相对年轻(<100 ka)样品进行重复测量,其结果与 Armitage 等^[151]在 2006 年测试的结果一致,在 MIS 5 出现过 2 次较大规模的海侵事件。2018 年 Cawthra 等^[147]对南非东南海岸的沙丘沉积期次进行过更为详细的刻画,结果显示晚更新世以来,该地区发生过 5 次较大规模的事件性沉积,分别是 67~80, 88~90, 104~128, 160~189, 200 ka, 这些事件性沉积的发生与海平面变化有关^[145, 147-149]。

3.4 欧洲

欧洲的海洋沉积物释光测年的研究开展时间较早,自 20 世纪 90 年代至今共有 61 篇相关文献发表。这些研究主要集中在欧洲西北部、北海沿岸、波罗的海沿岸以及地中海西部海岸。

欧洲西北部的海洋沉积物释光测年研究具有以下特点:①几乎所有研究所使用的测年矿物粒径都是 $90\mu\text{m}$ 以上的粗颗粒。只有 2007 年 Mauz 等^[179]对德国北海海岸的潮坪沉积物进行释光测年研究中用到了细颗粒石英($4\sim 15\mu\text{m}$),该研究建立了德国北部海岸潮汐盆地全新世以来的沉积年代框架,并且对于特别年轻的沉积物,使用 ^{210}Pb 测年与释光方法进行相互验证。②欧洲西北部所有的文献都是 2000 年以后发表的,且几乎都是使用石英光释光方法进行等效剂量的测试,其中只有 2 篇文献利用长石红外释光测年,一篇是 Reimann 等^[181]在 2012 年对德国北海海岸沙丘以及波罗的海海岸沙丘的年轻样品(<500 a)进行长石红外释光性质研究^[181];另一篇是 Molodkov 等^[193]在 2007 年对爱沙尼亚东北部海岸的富铀矿床进行长石红外释光定年研究。还有 2 项研究对石英光释光和长石红外释光的方法进行了对比研究,2012 年 Fuchs 等^[36]对挪威东南部海岸的沙丘进行了 2 种等效剂量方法的对比研究,结果显示石英光释光方法和长石红外释光方法测得的年代总体上一致,不过钾长石的释光信号更好;2015 年 Kenzler 等^[38]对德国北部亚斯蒙德半岛的海岸沙丘进行不同方法等效剂量测试的比较,结果显示石英颗粒在 520 Ga 左右达到饱和,建议如果需要测试更大的等效剂量,可以利用长石红外释光的方法。也有学者^[41, 44]为了弥补石英释光信号的不足以及测年上限的限制,同时采用 2 种方法建立了地层年代框架。

欧洲西北部海岸带的演化受海平面变化和潮汐作用影响明显,特别是在一些河口潮坪地区,表层样品的等效剂量离散度很大。不过对比光释光年代和 ^{210}Pb 以及 ^{137}Cs 年代结果,具有良好的一致性^[170, 174]。河口海岸在受河流改造的同时也会受到海洋动力作用的改造,会导致沉积物经历反复的搬运埋藏过程,而且这些地区生物扰动频繁,表层样品等效剂量离散度大。更多的研究表明,此类沉积环境中的样品中石英埋藏前晒退不充分,同一个地点的不同样品可能会测出多期次的沉积年代^[160, 175, 185]。

波罗的海是典型的内陆海域,水深平均为 70~100 m,相关的释光测年研究都利用粗颗粒($>63\mu\text{m}$)石英进行光释光测年。2007 年 Kortekaas 等^[190]对来自波罗的海西部 10 m 长的沉积物岩心进行光释光测年建立年代地层格架。根据岩心沉积学观察描述结果,在缺乏有机质进行 ^{14}C 测年的层段,光释光测年是一种非常有效的测年方法。研究表明,全新世以来波罗的海的水体盐度和海平面高度跟连接欧洲北海的通道打开以及闭合有关。很多

波罗的海的沉积物岩心样品释光年代研究都表明,全新世以来的沉积速率较高,而且岩心沉积学观察描述也显示除了极为明显的事件性沉积间断,沉积速率与平均粒径呈正相关^[188-189,191]。

欧洲南部地区的海洋沉积物释光测年研究主要集中在地中海沿岸,早期有热释光测试等效剂量的研究。卡昂附近的海岸沙丘热释光年代结果要比其他方法的测年结果系统性低估40%左右^[157],而桑加特海滩的热释光年代结果与其他方法测年结果对比一致,作者认为导致这一现象的原因与卡昂附近海岸沙丘样品的热释光异常衰减有关。这一现象在北部的桑加特海滩样品中并不存在,桑加特海滩沙丘样品热释光年代结果达到了MIS 7阶段^[159]。另外3个关于热释光研究案例都在意大利的地中海海岸,在该地同样也发现了长石热释光测年结果的低估现象^[199]。不过在西西里岛上关于用热释光确定海蚀阶地年代的研究实例中,并未发现有该现象的存在,该研究还建立了意大利西西里岛东部快速抬升、北部缓慢抬升、西北地区相对稳定的区域构造演化模式^[197]。

该地区巴利阿里群岛以及意大利撒丁岛的海岸沙丘释光年代研究为末次冰期以来的海平面变化提供了年代学约束^[24,196]。意大利西南海岸附近的沙丘还存在不同程度的碳酸盐胶结问题^[194-195],不过光释光年代结果还是很好地诠释了晚更新世以来地中海的海平面变化幅度要比全球海平面变化幅度小很多。巴利阿里群岛的2个海岸沙丘实例都记录了MIS 5以来经历的4次风暴事件,根据光释光年代结果,这4次风暴发生在距今34~97 ka。另外在地中海最深处4 000 m,有学者分别用石英(30~60 μm)光释光和热释光进行过测试结果的对比研究工作,提出双单片再生剂量法(Double-SAR)能有效分离石英和长石信号,根据释光年代得出的沉积速率与已有的报道一致^[33,202]。

2017年Chen等^[204]对东欧亚速海沿岸的沉积物建立了释光生长曲线(SGC),结果表明在低剂量区($<100\text{ Ga}$)不同样品的生长曲线拟合一致,不过在剂量较高的区域,不同样品的释光生长曲线还是体现出不同程度的差异。利用该方法,建立了MIS 6以来的地层年代序列,且结果与古地磁年代以及 ^{14}C 年代一致。

3.5 美洲

北美的海洋沉积物释光测年研究大多围绕全新世以来的障壁岛沙丘形成年代,或者极端气候引起的事件性沉积展开。通过识别地层中的标志层或侵蚀边界结合释光年代可以重建海岸带沉积演化过程。1996年Huntley等^[208]对加拿大温哥华岛附近

的海啸沉积物标志层进行长石红外释光定年,确定了研究区三处海啸沉积物标志层形成于150~400 ka,其中温哥华岛沙丘体标志层的形成与300 ka卡斯卡迪亚俯冲带活动导致的海啸有关。另外Rink等^[219]在2001年还提出可以利用石英颗粒中天然残余热释光信号强弱指示不同的沉积过程,该方法在墨西哥湾圣约瑟夫半岛的风暴成因沉积物中应用良好,在不同沉积单元的边界,样品中的天然残余剂量信号出现明显的不同。

北美地区在东部海岸发育更多的障壁岛沉积体,对其进行年代学的研究是重建海陆相互作用过程的基础。2013年Markewich等^[222]对美国佐治亚洲障壁岛形成年代用光释光和 ^{10}Be 测年进行测定,恢复了MIS 11以来研究区障壁岛发育演化过程,并提出石英光释光测年和 ^{10}Be 测年能进行很好的互补。在弗吉尼亚州沿岸发育有规模很大的障壁岛沉积,2021年Shawler等^[225]对该地的障壁岛沉积体系进行了详细的光释光年代测定,表明该障壁岛沉积从6 ka开始发育,之后经历了数百年的向陆迁移过程,直到2.2 ka开始趋于稳定,并且在沙丘沉积中找到了近几百年间经历的多次极端风暴沉积标志层,风暴的发生间隔约为 80 ± 8 年。2007年Buynewich等^[227]对缅因州海岸沙丘记录的百年尺度海侵事件进行释光年代断定,并对障壁岛沙丘沉积体中保存的事件性侵蚀记录进行详细描述刻画,在过去500年间风暴发生频率约为100年,该结果与Shawler等的研究结果相近。

南美沿岸的海洋沉积物释光测年研究案例相对较少。2006年Pedoja等^[228-229]对南美厄瓜多尔曼塔附近的海蚀阶地进行长石红外释光定年,结果显示样品在埋藏前晒退良好,红外释光年代结果与U/Th测年结果一致。研究区最老的海蚀阶地形成于MIS 9阶段,距今330 ka,并且该区域一直保持约0.1~0.4 mm/a的构造抬升运动。在南美东部海岸巴西纳塔尔附近的最老的海蚀阶地形成时间较晚,2002年Barreto等^[26]的释光年代结果显示,纳塔尔附近的海蚀阶地形成于MIS 7高海平面时期,表明南美西部受构造抬升作用影响较大,而东部海岸带地貌受气候及海平面影响较大。在南美东部海岸发育有更多的障壁岛体系,2021年Bogo^[233]对巴西巴拉纳州梅尔岛附近的障壁岛沉积进行光释光年代测定,结果显示该障壁岛最后一次大规模改造事件发生在距今4.1~5.1 ka,主要受海侵事件影响,同时也使研究区的河流入海口向北迁移了约1 km。

3.6 南北极

南北两极的释光研究实例较少,其主要原因是受限于取样难度。2006年Bateman等^[205]对加拿大

北部图克托亚图克海岸冰盖下的海岸沉积物进行释光定年,结果显示距今约 4~6 ka,由于海平面下降导致研究区出现区域性干旱,开始出现大规模的海岸沙丘沉积体,随后在 1.4 ka,区域性干旱减弱,降雨和降雪量增加,沙丘体上方开始逐渐发育新的冰盖,随后发生的几次事件性沉积导致研究区的沉积层序表现为砂层与冰层互层的现象。这种现象在北极海岸普遍存在,例如俄罗斯的北地群岛以及泰米尔半岛附近的海岸沙丘沉积物中,在砂层与冰层的互层之间还埋藏有大量可供 ^{14}C 测年的有机质^[236]。有 2 篇文献详细描述了研究区 ^{14}C 、电子自旋共振(ESR)、释光等多种测年方法结果的对比,同时也对比了石英光释光测年以及长石红外释光测年的结果,Thomas 等^[235-236]建议高纬度地区的样品不能将较老样品释光等效剂量结果中的正偏态分布作为判断样品不完全晒退的证据,而是要根据长石或石英信号中不同测片间的分布形态来区别不同期次样品的晒退程度。

南极的海岸沙丘沉积物中的石英颗粒含量较少,同时石英颗粒的天然释光信号极低^[238-239]。2011 年 Simms 等^[237]在对乔治王岛海岸砾石层释光测年研究中提出可以用较大的砾石颗粒中包裹的石英颗粒进行释光测年,并与 ^{14}C 年代进行对比,重建了末次冰期以来南极洲玛格丽特湾海滩演化历史,该方法类似于冰川沉积物释光测年研究中涉及的利用砾石切片进行混合矿物的释光测年。另外,在南极半岛附近的拉勒曼德峡湾的穆勒冰架下方的海洋沉积物中也存在石英颗粒含量极低的情况。Berger 等^[240]在 2010 年利用该地的海洋沉积物进行热释光和红外释光测年结果的对比工作,除了常规的测试手段外,还进行了长石的多片法和单片法测试的对比,以及石英单颗粒的测试,研究结果表明,除石英含量低之外,其中测年矿物还存在不完全晒退现象。

3.7 深海大洋

已发表的最早的有关海洋沉积物释光测年研究的实例就是 1976 年 Huntley 等^[7]对北太平洋 2 个钻孔沉积物中的硅质贝壳碎屑进行的热释光性质研究。随后 1979 年 Wintle 等^[18]对南大洋一个 4 330 m 水深处的深海沉积物钻孔进行热释光年代测定,建立了 10 m 钻孔的热释光年代地层格架(9~140 ka),其结果与生物地层年代比对结果一致。但是这些研究中等效剂量的测试都没有考虑可能存在的部分晒退以及长石释光信号的异常衰减问题。在此后的 20 多年间再没有更多的深海沉积物释光测年相关的文献发表。直到石英单片再生剂量法被提出以后,2003 年 Stokes 等^[247]对阿拉伯海 2 个深海沉积

物钻孔利用该方法进行释光年代的建立,细颗粒(4~11 μm)石英在进行单片再生剂量法测试过程中释光性质表现良好,所有样品的年代误差都在 3%~6%之间,获得了 7~117 ka 之间的石英光释光年龄。不过他们也提出,个别样品等效剂量值分布离散度较大,推测是因为沉积物主要由风力搬运至此,矿物颗粒经历了不同沉积期次导致。2004 年 Olley 等^[248]对澳大利亚西北海岸外一个水深 1 093 m 左右的岩心钻孔样品进行了单颗粒石英测试,发现石英颗粒个体间释光信号差异较大,认为是由于不完全晒退导致。

无法确定样品埋藏前的晒退情况是深海沉积物释光测年面临的主要问题,人们^[30,48,241-243]在北冰洋进行的深海钻孔沉积物释光年代学研究发现,不论是石英还是长石颗粒,都存在埋藏前晒退不彻底的问题,最终导致年代被高估,并且提出北冰洋的沉积物在冰期和间冰期所经历的地质过程是有差别的,地球两极因为存在极昼极夜现象,沉积物的释光信号可能也会有周期性的变化规律。在北冰洋海域,有孔虫在地层中含量极少,而且保存环境不稳定,现有的有效年代学方法不多。虽然释光方法在该地区的应用上还存在一些问题,不过释光测年方法在深海沉积物年代框架的建立研究中具有良好的前景。

Armitage 等^[244-245]分别在 2015 年和 2017 年对大西洋东部水深 2 263 m 处的一个深海沉积物钻孔进行的释光测年研究时提出,深海沉积物钻孔在进行释光测年时必须要考虑不同粒径沉积物的来源问题,比如该钻孔中,细颗粒(4~11 μm)石英可能来自风力搬运,而更大的颗粒主要来自于重力流搬运。同一个样品中粒径 30 μm 以下的石英颗粒,等效剂量随着粒度的增大而减小。在进行深海沉积物年代测试时,一定要考虑沉积物经历的地质过程以及海底沉积物—水界面可能发生的后期改造。2019 年 Chang 等^[246]对孟加拉湾 IODP 1444A 钻孔沉积物进行释光定年研究时也提出石英释光敏感度受不同来源的沉积物的影响,而且沉积物源区性质的影响大于沉积物搬运过程中晒退过程的影响。根据红外释光信号以及红外后光释光信号(IRSL/Post-IR OSL)可以区分孟加拉湾深海沉积物的来源,并提出孟加拉湾的东经 85°海岭对喜马拉雅抬升导致的浊流沉积造成阻断作用,因此增加了来自印度半岛沉积物的贡献作用。

4 存在的问题

释光测年是一种绝对年代测定的技术手段,其原理本身就决定了测试结果的精确度与样品性质息

息相关。海洋沉积物的物源复杂,且可能经历了多次搬运—埋藏过程,埋藏后沉积环境的稳定性都会导致沉积物的释光性质差异。因此,对来自不同区域甚至同一区域不同地点的样品进行释光等效剂量测试前,需要对其释光性质开展充分的分析测试,选择恰当的测试条件是保障释光测年精度的重要前提。本文所涉及的几乎所有研究实例都做了释光性质检测工作,并对其可靠性进行了讨论,特别是2000年单片再生剂量法提出以后,使得这一类测试方法更简便易行。不过在实际释光测年过程中,仍然存在一些导致最终释光年代无法进行准确测定的因素,其主要原因归纳如下。

4.1 部分晒退现象普遍

部分晒退现象在海岸带沙丘沉积体以及海蚀阶地样品中情况较好,因为这类沉积物在被上覆地层覆盖埋藏前,会经历充分的自然光照,并且海岸带沙丘沉积物样品粒度较为均一,只有少部分年轻的海岸沉积物存在不完全晒退的情况^[23]。一般来说,可以通过对研究区的现代沉积物样品进行晒退程度的评估实验,来判断深部地层中的样品在埋藏前释光信号是否归零^[124]。不过,由极端气候带来的沉积物无法用沉积物的残余剂量来判断是否存在部分晒退情况,如海啸沉积物快速堆积引起的不完全晒退^[14,16,17,88,116]。另外也可以利用等效剂量统计结果的正偏态来判断此类样品的晒退情况。Thomas等^[235]提出,当样品年代较老时,也会存在等效剂量统计结果正偏态的情况。不过此类沉积物中的释光等效剂量统计结果分布特征也成为了快速堆积过程的标志性特点。

在滨浅海环境中,样品的晒退程度较海岸沙丘沉积物差,而且沉积物中不同粒径样品的晒退程度出现分化,细颗粒比粗颗粒晒退更好^[60,244],其原因是在滨浅海地区不同粒径的沉积物在沉降过程中的速度不同。同时,已有的研究实例表明,在滨浅海地区,石英的晒退程度比长石要更好^[62],所以在测试过程中需要判断研究区的实际沉积过程,来选择更优的测年目标矿物以及粒径。

深海沉积环境中,不同粒径的晒退程度分化更加明显,细颗粒石英的晒退程度比粗颗粒石英的晒退程度要好。研究实例中只有1项研究使用了90 μm 以上粒径的石英进行释光测年^[48],而粗颗粒石英释光结果显示,等效剂量结果离散度较大,存在不完全晒退的情况。也有研究实例提出,较老样品细颗粒等效剂量正偏态的结果^[248]与埋藏前是否晒退无关。

在等效剂量结果的计算过程中,为了更好地校正不完全晒退导致的问题,多数学者利用最小年代

模型进行结果统计^[170,248],该方法可以规避一部分不完全晒退带来的影响,但是也会引入新的问题,即统计结果对测片展示不充分的问题。

4.2 沉积过程复杂且对测年结果影响显著

所有的测年方法都与样品的沉积特点及其经历的地质过程有关,地质历史时期多期次沉积的情况普遍,或者埋藏后经历二次扰动,这些情况都会最终体现在释光等效剂量的结果上,表现为等效剂量结果离散度大、有多个峰值。减小一个测片上的矿物颗粒或者用单颗粒法进行测量是一个合适的选择,很多用单颗粒测试的研究实例都提出,单颗粒等效剂量结果的离散度可以作为一个新的沉积环境量化指标^[94],甚至可以区分出沉积物中晒退不彻底的测年矿物的百分比^[183,248]。这种方法的本质是增加测试数量,通过更大的样本量体现样品信息,这种方法特别适合多期次沉积的样品。

增大等效剂量的测试样本量可以获得更高精度,更加准确的年代结果,对于释光性质均一的样品,还可以采用释光标准曲线法(SGC)进行等效剂量的测试。通过单片再生剂量法(SAR)测试一组具有代表性且释光性质均一的释光生长曲线,之后只需要测试更多的天然校正信号值就可以获得大量等效剂量结果^[53,74,77,204]。

4.3 海洋沉积物环境剂量率难以准确测定

长期以来,大多数的研究都关注于如何提高等效剂量的测试精度,而忽视了环境剂量测量精度对释光年代准确性的影响。海洋沉积物释光测年中应用伽马能谱法的研究实例越来越多(图5),这种方法最直接的优势就是可以同时测试各种放射性核素的比活度。而电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)或者 α/β 计数器法则需要另外采用火焰光度计或者其

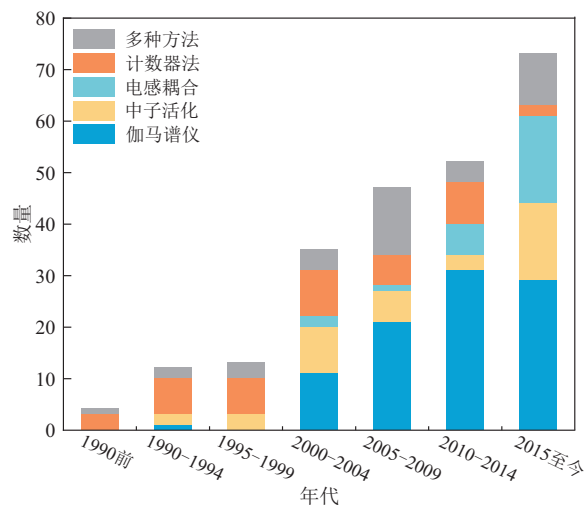


图5 海洋沉积物环境剂量率测试方法统计图

Fig. 5 Statistical diagram of test methods of environmental dose rate of marine sediments

他方法对 K 含量进行测试,这种情况就导致无法将不同测试方法带来的系统误差去除。中子活化法(NAA)直接测量铀系和钍系母体核素的浓度,而忽略了衰变系中某些子核素的贡献,会导致剂量率被低估或高估^[65]。尤其是在海洋沉积物中,由于²³⁴Th 的生物富集作用、自生铀的吸收^[244],水体的迁移等问题都是导致环境剂量率无法精确测量的原因。某些特殊沉积环境中,放射性核素甚至会随流体沿着风化剖面进行迁移^[85]。伽马能谱法的另一个优势就是可以监测放射性核素衰变系内是否存在放射性不平衡的情况,某些研究中还在进行伽马能谱法测定环境剂量之前密封保存一段时间,使样品中的放射性衰变系达到平衡,以恢复埋藏环境中样品所处的实际状态,进而避免氡逸散产生的一些影响^[200]。

另一个影响释光测年在海洋沉积物应用中的重要因素是沉积环境的含水率,沉积物孔隙水的含量会直接影响周围放射性核素的贡献率,海岸带环境沉积物中的含水率存在周期性变化,会随着潮汐涨落或者整体海平面升降影响沉积物中环境剂量率的贡献。深海沉积物随着埋深压实作用,沉积物中含水率也会随着地层深度产生变化。有学者提出过测试野外原位放射性核素浓度^[143,203,205],这种方法虽然避免了样品运输储存过程中产生的影响,但是无法反演样品埋藏过程中经历的地质环境变化,测得的结果只是现今环境剂量率,而在很多地质环境中,环境剂量率是一个变化的值。针对这个问题,2003 年 Stokes 等^[247]提出过用积分迭代的方法计算环境剂量率,这个方法在环境剂量率有固定变化趋势的沉积环境中有很好的适用前景,如水下沉积物中含水率随埋深具有规律性变化趋势,就可以用迭代的方法可以很好地重建地质历史时期环境剂量率的变化过程。

5 未来展望

近 50 年来,海洋沉积物释光测年研究取得了长足进展,在第四纪气候变化、古环境重建、区域构造运动、极端气候事件研究方面发挥了重大作用。由于释光测年方法测定的是绝对年代,它直接反映了沉积物的埋藏年代,可以较好地反映出如地层倒转、沉积速率突变等情况。其次,在测年材料的选择上,释光所用的测年矿物为石英、长石等陆源碎屑物质,广泛分布于海岸到滨浅海的广阔沉积环境,而且在深海大洋等缺乏陆源碎屑物质的区域,AMS ¹⁴C 由于测年有机质的缺乏以及碳酸盐补偿深度等问题无法很好的应用,而释光方法可以利用其他具有晶格陷阱的晶体进行年代测定。

但也应该看到,通过释光测年方法对海洋沉积物进行年代的准确测定还面临诸多问题和挑战,如释光年代测试上限、样品埋藏前的部分晒退、新的测年矿物的开发、环境剂量的准确测定等问题,相信这些问题都会随着越来越多的研究得以很好地解决,如随着高分辨率伽马谱仪的普及,某些放射性核素含量可以得到有效且准确的测定,利用积分迭代方法进行时空深度上含水率的校正^[246],人们也正在探索出不同矿物释光测年的适用性,不断完善释光测年方法的应用范围。特别是深海大洋中,陆源碎屑物质较少,具有释光信号的生物硅是一种极佳的释光测年目标矿物,这都彰显了释光测年方法在海洋沉积物中具有广阔的发展前景。

中国地震局地质研究所胡钢和中国科学院青海盐湖研究所刘向军对本文的修改提供了宝贵意见,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Aitken M J. Physics applied to archaeology: I. Dating[J]. Reports on Progress in Physics, 1970, 33(3): 941-1000.
- [2] Aitken M J. Thermoluminescence Dating[M]. London: Academic Press INC., 1985.
- [3] Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical dating of sediments[J]. Nature, 1985, 313: 105-107.
- [4] Wallinga J, Murray A S, Bøtter-Jensen L. Measurement of the dose in quartz in the presence of feldspar contamination[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2002, 101(1/4): 367-370.
- [5] Li W P, Li X X, Mei X, et al. A review of current and emerging approaches for Quaternary marine sediment dating[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146522.
- [6] Hughen K A. Radiocarbon dating of deep-sea sediments[J]. Developments in Marine Geology, 2007, 1: 185-210.
- [7] Huntley D J, Johnson H P. Thermoluminescence as a potential means of dating siliceous ocean sediments[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1976, 13(4): 593-596.
- [8] Jacobs Z. Luminescence chronologies for coastal and marine sediments[J]. Boreas, 2008, 37(4): 508-535.
- [9] Madsen A T, Murray A S. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review[J]. Geomorphology, 2009, 109(1/2): 3-16.
- [10] 谢丽, 张振克. 光释光测年在海岸风沙地貌研究中的新进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 93-100.
Xie L, Zhang Z K. Progress in optical stimulated luminescence dating for coastal aeolian geomorphology research: A review[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(1): 93-100(in Chinese with English abstract).
- [11] 余涛, 姜涛. 光释光测年技术在海洋沉积物研究中的应用现状与展望[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 38-44.
Yu T, Jiang T. Research progress and prospect of optical stimulated luminescence dating for marine sediments[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 38-44(in Chinese with English abstract).
- [12] Ku T L, Knauss K G, Mathieu G G. Uranium in open ocean: Concentration and isotopic composition[J]. Deep Sea Research, 1977, 24(11): 1005-1017.

- [13] Bryant E A, Yong R W, Price D M. Evidence of tsunami sedimentation on the southeastern coast of Australia[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(6): 753-765.
- [14] Young R W, Bryant E A, Price D M, et al. Chronology of Holocene tsunamis on the southeastern coast of Australia[J]. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, 1997, 18(1): 1-19.
- [15] 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(1): 123-128.
- [16] Murari M K, Achyuthan H, Singhvi A K. Luminescence studies on the sediments laid down by the December 2004 tsunami event; Prospects for the dating of palaeo tsunamis and for the estimation of sediment fluxes [J]. *Current Science*, 2007, 92(3): 367-371.
- [17] Brill D, Klasen N, Brückner H, et al. OSL dating of tsunami deposits from Phra Thong Island, Thailand[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 224-229.
- [18] Wintle A G, Huntley D J. Thermoluminescence dating of a deep-sea sediment core[J]. *Nature*, 1979, 279: 710-712.
- [19] Wood P B. Optically stimulated luminescence dating of a Late Quaternary shoreline deposit, Tunisia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13(5/7): 513-516.
- [20] Tanaka K, Hataya R, Spooner N A, et al. Dating of marine terrace sediments by ESR, TL and OSL methods and their applicabilities[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16(3): 257-264.
- [21] 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.
- [22] 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): 715-718.
- [23] 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.
- [24] Mauz B, Hassler U. Luminescence chronology of Late Pleistocene raised beaches in southern Italy: New data of relative sea-level changes[J]. *Marine Geology*, 2000, 170(1/2): 187-203.
- [25] Chivas A R, Garca A, van der Kaars S, et al. Sea-level and environmental changes since the last interglacial in the Gulf of Carpentaria, Australia: An overview[J]. *Quaternary International*, 2001, 83/85(11): 19-46.
- [26] Barreto A M F, Bezerra F H R, Suguio K, et al. Late Pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: Sea-level change and tectonic implications[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2002, 179(1/2): 57-69.
- [27] Porat N, Avital A, Frechen M, et al. Chronology of Upper Quaternary offshore successions from the southeastern Mediterranean Sea, Israel [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10): 1191-1199.
- [28] Tatumi S H, Kowata E A, Gozzi G, et al. Optical dating results of beachrock, eolic dunes and sediments applied to sea-level changes study [J]. *Journal of Luminescence*, 2003, 102/103(1): 562-565.
- [29] Otvos E G. Prospects for interregional correlations using Wisconsin and Holocene aridity episodes, northern Gulf of Mexico coastal plain[J]. *Quaternary Research*, 2004, 61(1): 105-118.
- [30] Berger G W. Trans-arctic-ocean tests of fine-silt luminescence sediment dating provide a basis for an additional geochronometer for this region[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(19/20): 2529-2551.
- [31] Brooke B P, Preda M, Lee R, et al. Development, composition and age of indurated sand layers in the Late Quaternary coastal deposits of northern Moreton Bay, Queensland[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 2008, 55(2): 141-157.
- [32] Jacobs Z, Roberts D L. Last Interglacial age for aeolian and marine deposits and the Nahoon fossil human footprints, South-east Coast of South Africa [J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(2): 160-169.
- [33] Polymeris G S, Kitis G, Liolios A K, et al. Luminescence dating of the top of a deep water core from the NESTOR site near the Hellenic Trench, east Mediterranean Sea[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(1): 68-81.
- [34] Faershtein G, Porat N, Matmon A. Extended range luminescence dating of quartz and alkali-feldspar from aeolian sediments in the eastern Mediterranean[J]. *Geochronology*, 2020, 2(1): 101-118.
- [35] Frechen M, Neber A, Tsatskin A, et al. Chronology of Pleistocene sedimentary cycles in the Carmel Coastal Plain of Israel [J]. *Quaternary International*, 2004, 121(1): 41-52.
- [36] Fuchs M, Kreutzer S, Fischer M, et al. OSL and IRSL dating of raised beach sand deposits along the southeastern coast of Norway[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 195-200.
- [37] Gao L, Long H, Tamura T, et al. A ~130 ka terrestrial-marine interaction sedimentary history of the northern Jiangsu coastal plain in China[J]. *Marine Geology*, 2021, 435(4): 106455.
- [38] Kenzler M, Tsukamoto S, Meng S, et al. Luminescence dating of Weichselian interstadial sediments from the German Baltic Sea coast[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 251-256.
- [39] Li Y, Tsukamoto S, Shang Z W, et al. Constraining the transgression history in the Bohai Coast China since the Middle Pleistocene by luminescence dating[J]. *Marine Geology*, 2019, 416: 105980.
- [40] Madsen A T, Buylaert J-P, Murray A S. Luminescence dating of young coastal deposits from New Zealand using feldspar[J]. *Geochronometria*, 2011, 38(4): 379-390.
- [41] Bitinas A, Molodkov A, Damušytė A, et al. Reconstruction of the geological history of the Lithuanian Maritime Region from MIS 6 to MIS 3[J]. *Quaternary International*, 2021.
- [42] Morthekai P, Rao K N, Nagakumar K C V, et al. Synthesized luminescence ages of palaeo-beach ridges in Krishna-Godavari twin delta plain, east coast of India[J]. *Quaternary Geochronology*, 2021, 62: 101145.
- [43] Richard M, Mercier N, Charpentier V, et al. OSL chronology of socio-ecological systems during the mid-Holocene in the eastern coast of the Sultanate of Oman (Arabian Peninsula) [J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020, 33: 102465.
- [44] Saks T, Kalvans A, Zeļcs V. OSL dating of Middle Weichselian age shallow basin sediments in Western Latvia, Eastern Baltic [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 44: 60-68.
- [45] Tamura T, Ito K, Inoue T, et al. Luminescence dating of Hol-

- ocene beach-ridge sands on the Yumigahama Peninsula, western Japan[J]. *Geochronometria*, 2017, 44(1): 331-340.
- [46] Thiel C, Buylaert J-P, Murray A S, et al. A comparison of TT-OSL and post-IR IRSL dating of coastal deposits on Cap Bon peninsula, north-eastern Tunisia[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 209-217.
- [47] Thiel C, Tsukamoto S, Tokuyasu K, et al. Testing the application of quartz and feldspar luminescence dating to MIS 5 Japanese marine deposits[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 29: 16-29.
- [48] West G, Alexanderson H, Jakobsson M, et al. Optically stimulated luminescence dating supports pre-Eemian age for glacial ice on the Lomonosov Ridge off the East Siberian continental shelf[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 267: 107082.
- [49] Yang L H, Long H, Yi L, et al. Luminescence dating of marine sediments from the Sea of Japan using quartz OSL and polycrystalline pIRIR signals of fine grains[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 257-263.
- [50] Zhang J F, Fan C F, Wang H, et al. Chronology of an oyster reef on the coast of Bohai Bay, China: Constraints from optical dating using different luminescence signals from fine quartz and polymineral fine grains of coastal sediments[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4): 71-76.
- [51] 陈永胜, 王宏, 裴艳东, 等. 渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(3): 747-759.
- Chen Y S, Wang H, Pei Y D, et al. Division and its geological significance of the Late Quaternary marine sedimentary beds in the West Coast of Bohai Bay, China[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(3): 747-759 (in Chinese with English abstract).
- [52] Balescu S, Huot S, Mejri H, et al. Luminescence dating of Middle Pleistocene (MIS 7) marine shoreline deposits along the eastern coast of Tunisia: A comparison of K-feldspar and Na-feldspar IRSL ages[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 288-293.
- [53] Chen G Q, Yi L, Xu X Y, et al. Testing the standardized growth curve (SGC) to OSL dating coastal sediments from the South Bohai Sea, China[J]. *Geochronometria*, 2013, 40(2): 101-112.
- [54] Yi L, Lai Z P, Yu H J, et al. Chronologies of sedimentary changes in the south Bohai Sea, China: Constraints from luminescence and radiocarbon dating[J]. *Boreas*, 2013, 42(2): 267-284.
- [55] Liu J, Wang H, Wang F F, et al. Sedimentary evolution during the last ~1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2016, 451: 84-96.
- [56] Zhao G M, Ye S Y, Laws E A, et al. Carbon burial records during the last 40,000 years in sediments of the Liaohe Delta wetland, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 226: 1-10.
- [57] Huang J, Wan S M, Zhang J, et al. Mineralogical and isotopic evidence for the sediment provenance of the western South Yellow Sea since MIS 3 and implications for paleoenvironmental evolution[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 103-117.
- [58] Gao L, Long H, Shen J, et al. High-resolution OSL dating of a coastal sediment sequence from the South Yellow Sea[J]. *Geochronometria*, 2016, 43(1): 143-154.
- [59] Xu T Y, Shi X F, Liu C G, et al. Stratigraphic framework and evolution of the mid-late Quaternary (since marine isotope stage 8) deposits on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2020, 419: 106047.
- [60] Wang Y, Long H, Yi L, et al. OSL chronology of a sedimentary sequence from the inner-shelf of the East China Sea and its implication on post-glacial deposition history[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 282-287.
- [61] Cheng Q Z, Wang F, Chen J, et al. Combined chronological and mineral magnetic approaches to reveal age variations and stratigraphic heterogeneity in the Yangtze River subaqueous delta - ScienceDirect[J]. *Geomorphology*, 2020, 359: 107-163.
- [62] Gao L, Long H, Tamura T, et al. Refined chronostratigraphy of a Late Quaternary sedimentary sequence from the Yangtze River delta based on K-feldspar luminescence dating[J]. *Marine Geology*, 2020, 427: 106271.
- [63] Niu W L, Zhao L, Switzer A D, et al. Sedimentary evidence for a period of rapid environmental change in the Yangtze Delta, China around 150 years ago[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 229(3/4): 104552.
- [64] Chen Y W, Chen Y G, Murray A S, et al. Luminescence dating of neotectonic activity on the southwestern coastal plain, Taiwan[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10): 1223-1229.
- [65] Yim W S, Hilgers A, Huang G, et al. Stratigraphy and optically stimulated luminescence dating of subaerially exposed Quaternary deposits from two shallow bays in Hong Kong, China[J]. *Quaternary International*, 2008, 183(1): 23-39.
- [66] Chen H J, Harff J, Qiu Y, et al. Last Glacial Cycle and seismic stratigraphic sequences offshore western Hainan Island, NW South China Sea[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2015, 429(1): 99-121.
- [67] Jiang T, Liu X J, Yu T, et al. OSL dating of late Holocene coastal sediments and its implication for sea-level eustasy in Hainan Island, Southern China[J]. *Quaternary International*, 2017, 468: 24-32.
- [68] Xiong P, Dudzinska-Nowak J, Harff J, et al. Modeling paleogeographic scenarios of the Last Glacial Cycle as a base for source-to-sink studies: An example from the northwestern shelf of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 203: 104542.
- [69] Zheng F, Li Z Z, Jin J H, et al. Luminescence geochronology and paleoenvironmental implications of coastal red dune sands of northeast Hainan Island, China[J]. *Aeolian Research*, 2021, 53(1): 100744.
- [70] Choi J H, Murray A S, Jain M, et al. Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(2): 407-421.
- [71] Hong D G, Choi M S, Han J H, et al. Determination of sedimentation rate of a recently deposited tidal flat, western coast of Korea, using IRSL dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10/13): 1185-1189.
- [72] 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*

- al, 2009, 199(1/2): 3-14.
- [73] Kim J C, Chang T S, Yi S H, et al. OSL dating of coastal sediments from the southwestern Korean Peninsula: A comparison of different size fractions of quartz[J]. *Quaternary International*, 2015, 384: 82-90.
- [74] Kim J C, Cheong D, Shin S W, et al. OSL chronology and accumulation rate of the Nakdong deltaic sediments, southeastern Korean Peninsula[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 245-250.
- [75] Hong S H, Chang T S, Lee G-S, et al. Late Pleistocene-Holocene sedimentary facies and evolution of the Jeju Strait shelf, Southwest Korea[J]. *Quaternary International*, 2019, 519: 156-169.
- [76] Kim J C, Chang T S, Yi S H. OSL chronology of the Huksan Mud Belt, south-eastern Yellow Sea, and its paleoenvironmental implications[J]. *Quaternary International*, 2019, 503 (Part A): 170-177.
- [77] Kim J C, Yoo D G, Hong S H, et al. Chronostratigraphic and palaeogeographic interpretation of Nakdong deltaic sequences in the south-eastern Korean Peninsula[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2021, 584: 110654.
- [78] Varma V, Toyoda S, Isono Y, et al. OSL dating of sea floor sediments at the Okinawa Trough[J]. *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*, 2015, 48: 617-620.
- [79] 孔秀, 李琦, 胡俊杰. 日本南海海槽 IODP C0004C 岩芯样品热释光信号特征及其对古气候变化的响应[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 34-40.
- Kong X, Li Q, Hu J J. Thermoluminescent signal of the core C0004C from Nankai Trough and its response to the paleoclimate change[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(1): 34-40 (in Chinese with English abstract).
- [80] Tamura T, Bateman M D, Kodama Y, et al. Building of shore-oblique transverse dune ridges revealed by ground-penetrating radar and optical dating over the last 500 years on Tottori coast, Japan Sea[J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3/4): 153-166.
- [81] Hataya R, Shirai M. Optically stimulated luminescence(OSL) dating of shallow marine sediments[J]. *Quaternary Research*, 2003, 42(5): 347-359.
- [82] Ito K, Tamura T, Tsukamoto S. Post-IR IRSL dating of K-feldspar from last interglacial marine terrace deposits on the Kamikita coastal plain, northeastern Japan[J]. *Geochronometria*, 2017, 44(1): 352-365.
- [83] Sugisaki S, Buylaert J P, Murray A S, et al. High resolution OSL dating back to MIS 5e in the central Sea of Okhotsk[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2/3): 293-298.
- [84] Sugisaki S, Buylaert J P, Murray A S, et al. High resolution optically stimulated luminescence dating of a sediment core from the southwestern Sea of Okhotsk[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2012, 13(5): 1-20.
- [85] Murray-Wallace C V, Jones B G, Nghi T, et al. Thermoluminescence ages for a reworked coastal barrier, southeastern Vietnam: A preliminary report[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(5): 535-548.
- [86] Tamura T, Saito Y, Bateman M D, et al. Luminescence dating of beach ridges for characterizing multi-decadal to centennial deltaic shoreline changes during Late Holocene, Mekong River delta[J]. *Marine Geology*, 2012, 326/328: 140-153.
- [87] Kamaludin B H, Nakamura T, Price D M, et al. Radiocarbon and thermoluminescence dating of the Old Alluvium from a coastal site in Perak, Malaysia[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 83(3/4): 199-210.
- [88] Kunz A, Frechen M, Ramesh R, et al. Revealing the coastal event-history of the Andaman Islands (Bay of Bengal) during the Holocene using radiocarbon and OSL dating[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2010, 99(8): 1741-1761.
- [89] Singhvi A K, Deraniyagala S U, Sengupta D. Thermoluminescence dating of Quaternary red-sand beds: A case study of coastal dunes in Sri Lanka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 80(1/2): 139-144.
- [90] Sathiyaseelan S, Panda D K, Banerjee D, et al. Chronology of coastal dune ridges in Vaigai prodelta region, southeastern Tamil Nadu, India[J]. *Current Science*, 2021, 120(2): 382-388.
- [91] Makwana N, Prizomwala S P, Chauhan G, et al. Late Holocene palaeo-environmental change in the Banni Plains, Kachchh, Western India[J]. *Quaternary International*, 2019, 507(25): 197-205.
- [92] Normand R, Simpson G, Herman F, et al. Dating and morphostratigraphy of uplifted marine terraces in the Makran subduction zone (Iran)[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2019, 7(1): 321-344.
- [93] Zander A, Degering D, Preusser F, et al. Optically stimulated luminescence dating of sublittoral and intertidal sediments from Dubai, UAE: Radioactive disequilibria in the uranium decay series[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4): 123-128.
- [94] López G I, Goodman-Tchernov B N, Porat N. OSL over-dispersion: A pilot study for the characterisation of extreme events in the shallow marine realm[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 378: 35-51.
- [95] Yildirim C, Melnick D, Ballato P, et al. Differential uplift along the northern margin of the Central Anatolian Plateau: inferences from marine terraces[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 81: 12-28.
- [96] Tsakalos E, Athanassas C, Tsipis P, et al. Luminescence geochronology and paleoenvironmental implications of coastal deposits of southeast Cyprus[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2016, 10(1): 41-60.
- [97] Berndt C, Yildirim C, Çiner A, et al. Quaternary uplift of the northern margin of the Central Anatolian Plateau: New OSL dates of fluvial and delta-terrace deposits of the Kızılırmak River, Black Sea coast, Turkey[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 201(1): 446-469.
- [98] Price D M, Brooke B P, Woodroffe C D. Thermoluminescence dating of aeolianites from Lord Howe Island and South-West Western Australian[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5): 841-846.
- [99] Brooke B P, Olley J M, Pietsch T J, et al. Chronology of Quaternary coastal aeolianite deposition and the drowned shorelines of southwestern Western Australia: A reappraisal[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 93(6): 106-124.
- [100] Bourman R P, Belperio A P, Murray-Wallace C V, et al. A last

- interglacial embayment fill at Normanville, South Australia, and its neotectonic implications[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1999, 123: 1-15.
- [101] Deckker P de, Arnold L J, van der Kaars S, et al. Marine isotope stage 4 in Australasia: A full glacial culminating 65,000 years ago - Global connections and implications for human dispersal[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 204: 187-207.
- [102] Dillenburg S R, Hesp P A, Keane R, et al. Geochronology and evolution of a complex barrier, Younghusband Peninsula, South Australia[J]. Geomorphology, 2020, 354: 107044.
- [103] Bristow C S, Pucillo K. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: The Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia[J]. Sedimentology, 2006, 53(4): 769-788.
- [104] Oliver T S N, Murray-Wallace C V, Woodroffe C D. Holocene shoreline progradation and coastal evolution at Guichen and Rivoli Bays, southern Australia[J]. The Holocene, 2020, 30(1): 106-124.
- [105] Murray-Wallace C V, Banerjee D, Bourman R P, et al. Optically stimulated luminescence dating of Holocene relict foredunes, Guichen Bay, South Australia[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(8/9): 1077-1086.
- [106] Banerjee D, Hildebrand A N, Murray-Wallace C V, et al. New quartz SAR-OSL ages from the stranded beach dune sequence in south-east South Australia[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(10/13): 1019-1025.
- [107] Oliver T S N, Donaldson P, Sharples C, et al. Punctuated progradation of the Seven Mile Beach Holocene barrier system, southeastern Tasmania[J]. Marine Geology, 2017, 386: 76-87.
- [108] Gardner T, Webb J, Pezzia C, et al. Episodic intraplate deformation of stable continental margins: Evidence from Late Neogene and Quaternary marine terraces, Cape Liptrap, Southeastern Australia[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(1/2): 39-53.
- [109] Bryant E A, Price D M. Late Pleistocene marine chronology of the Gippsland Lakes region, Australia[J]. Physical Geography, 1997, 18(4): 318-334.
- [110] Bryant E A, Young R W, Price D M. Late Pleistocene marine deposition and TL chronology of the New South Wales, Australian coastline[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997, 41(2): 205-227.
- [111] Kennedy D M, Oliver T S N, Tamura T, et al. Holocene evolution of the Ninety Mile Beach sand barrier, Victoria, Australia: The role of sea level, sediment supply and climate[J]. Marine Geology, 2020, 430: 106366.
- [112] Oliver T S N, Tamura T, Hudson J P, et al. Integrating millennial and interdecadal shoreline changes: Morpho-sedimentary investigation of two prograded barriers in southeastern Australia[J]. Geomorphology, 2017, 288: 129-147.
- [113] Young R W, Bryant E A, Price D M, et al. Theoretical constraints and chronological evidence of Holocene coastal development in central and southern New South Wales, Australia[J]. Geomorphology, 1993, 7(4): 317-329.
- [114] Tamura T, Cunningham A C, Oliver T S N. Two-dimensional chronostratigraphic modelling of OSL ages from recent beach-ridge deposits, SE Australia[J]. Quaternary Geochronology, 2018, 49: 39-44.
- [115] Young R W, Bryant E A, Price D M. Catastrophic wave (tsunami?) transport of boulders in southern New South Wales, Australia[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1996, 40(2): 191-207.
- [116] Bryant E A, Young R W, Price D M, et al. The impact of tsunami on the coastline of Jervis Bay, Southeastern Australia[J]. Physical Geography, 2013, 18(5): 440-459.
- [117] Carvalho R C, Oliver T S N, Woodroffe C D. Transition from marine to fluvial-dominated sediment supply at Shoalhaven prograded barrier, southeastern Australia[J]. Geomorphology, 2019, 341(15): 65-78.
- [118] Jankowski N R, Jacobs Z, Goldberg P. Optical dating and soil micromorphology at MacCauley's Beach, New South Wales, Australia[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(2): 229-242.
- [119] Thom B G, Hesp P A, Bryant E A. Last glacial "coastal" dunes in eastern Australia and implications for landscape stability during the Last Glacial Maximum[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1994, 111(3/4): 229-248.
- [120] 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(1/2): 127-144.
- [121] Brooke B P, Pietsch T J, Olley J M, et al. A preliminary OSL chronology for coastal dunes on Moreton Island, Queensland, Australia: Marginal deposits of A large-scale Quaternary shelf Sediment system[J]. Continental Shelf Research, 2015, 105: 79-94.
- [122] Brooke B P, Ryan D A, Pietsch T J, et al. Influence of climate fluctuations and changes in catchment land use on Late Holocene and modern beach-ridge sedimentation on a tropical macrotidal coast: Keppel Bay, Queensland, Australia[J]. [S. l.]: Marine Geology, 2008, 251(3/4): 195-208.
- [123] Brooke B P, Lee R, Cox M E, et al. Rates of shoreline progradation during the Last 1700 years at beachmere, Southeastern Queensland, Australia, Based on optically stimulated luminescence dating of beach ridges[J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24(3): 640-648.
- [124] Boyd R, Ruming K, Goodwin I D, et al. Highstand transport of coastal sand to the deep ocean: A case study from Fraser Island, southeast Australia[J]. Geology, 2008, 36(1): 15-18.
- [125] Bostock H C, Brooke B P, Ryan D A, et al. Holocene and modern sediment storage in the subtropical macrotidal Fitzroy River estuary, Southeast Queensland, Australia[J]. Sedimentary Geology, 2007, 201(3/4): 321-340.
- [126] Brooke B P, Ryan D A, Radke L, et al. A 1500 year record of coastal sediment accumulation preserved in beach deposits at Keppel Bay, Queensland, Australia [M]. [S. l.]: CRC for Coastal Zone, 2006.
- [127] Nott J, Forsyth A J, Rhodes E J, et al. The origin of centennial-to millennial-scale chronological gaps in storm emplaced beach ridge plains[J]. Marine Geology, 2015, 367: 83-93.
- [128] Forsyth A J, Nott J, Bateman M D, et al. Juxtaposed beach ridges and foredunes within a ridge plain: Wonga Beach, North-east Australia[J]. Marine Geology, 2012, 307: 111-116.
- [129] Lees B G, Hayne M, Price D. Marine transgression and dune initiation on western Cape York, northern Australia[J]. Ma-

- rine Geology, 1993, 114(1/2): 81-89.
- [130] Porritt E L, Jones B G, Price D M, et al. Holocene delta progradation into an epeiric sea in northeastern Australia[J]. Marine Geology, 2020, 422: 106114.
- [131] Shulmeister J, Short S A, Price D M, et al. Pedogenic uranium/thorium and thermoluminescence chronologies and evolutionary history of a coastal dunefield, Groote Eylandt, northern Australia[J]. Geomorphology, 1993, 8(1): 47-64.
- [132] Lees B G, Stanner J, Price D M, et al. Thermoluminescence dating of dune podzols at Cape Arnhem, northern Australia[J]. Marine Geology, 1995, 129(1/2): 63-75.
- [133] Lees B G, Lu Y C, Head J. Reconnaissance thermoluminescence dating of northern Australian coastal dune systems[J]. Quaternary Research, 1990, 34(2): 169-185.
- [134] Lees B G, Lu Y C, Price D M. Thermoluminescence dating of dunes at Cape St. Lambert, East Kimberleys, northwestern Australia[J]. Marine Geology, 1992, 106(1/2): 131-139.
- [135] Anderson A, Roberts R G, Dickinson W, et al. Times of sand: Sedimentary history and archaeology at the Sigatoka Dunes, Fiji[J]. Geoarchaeology, 2006, 21(2): 131-154.
- [136] Nichol S L, Lian O B, Carter C H. Sheet-gravel evidence for a Late Holocene tsunami run-up on beach dunes, Great Barrier Island, New Zealand[J]. Sedimentary Geology, 2003, 155(1/2): 129.
- [137] Duller G A T. The age of the Koputaroa dunes, southwest North Island, New Zealand[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1996, 121(1/2): 105-114.
- [138] Cooper A F, Kostro F. A tectonically uplifted marine shoreline deposit, Knights Point, Westland, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2006, 49(2): 203-216.
- [139] Kennedy D M, Tannock K L, Crozier M J, et al. Boulders of MIS 5 age deposited by a tsunami on the coast of Otago, New Zealand[J]. Sedimentary Geology, 2007, 200(3/4): 222-231.
- [140] Rees-Jones J, Rink W J, Norris R J, et al. Optical luminescence dating of uplifted marine terraces along the Akatore Fault near Dunedin, South Island, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2000, 43(3): 419-424.
- [141] Litchfield N J, Lian O B. Luminescence age estimates of Pleistocene marine terrace and alluvial fan sediments associated with tectonic activity along coastal Otago, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2004, 41(1): 29-37.
- [142] El-Asmar H M, Wood P. Quaternary shoreline development: the northwestern coast of Egypt[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(11): 1137-1149.
- [143] 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(19): 2569-2585.
- [144] Aagaard T, Anthony E, Gillies B, et al. Holocene development and coastal dynamics at the KETA sand spit, Volta river delta, Ghana[J]. Geomorphology, 2021, 387: 107766.
- [145] Bateman M D, Holmes P J, Carr A S, et al. Aeolianite and barrier dune construction spanning the last two glacial-interglacial cycles from the southern Cape coast, South Africa[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(14): 1681-1698.
- [146] Jacobs Z, Roberts R G, Lachlan T J, et al. Development of the SAR TT-OSL procedure for dating Middle Pleistocene dune and shallow marine deposits along the southern Cape coast of South Africa[J]. Quaternary Geochronology, 2011, 6(5): 491-513.
- [147] Cawthra H C, Jacobs Z, Compton J S, et al. Depositional and sea-level history from MIS 6(Termination II) to MIS 3 on the southern continental shelf of South Africa[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 181: 156-172.
- [148] Bateman M D, Carr A S, Dunajko A C, et al. The evolution of coastal barrier systems: A case study of the Middle-Late Pleistocene Wilderness barriers, South Africa[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(1/2): 63-81.
- [149] Botha G A, Porat N, Haldorsen S, et al. Beach ridge sets reflect the Late Holocene evolution of the St Lucia estuarine lake system, South Africa[J]. Geomorphology, 2018, 318: 112-127.
- [150] Porat N, Botha G A. The luminescence chronology of dune development on the Maputaland coastal plain, southeast Africa[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(9/10): 1024-1046.
- [151] Armitage S J, Botha G A, Duller G A T, et al. The formation and evolution of the barrier islands of Inhaca and Bazaruto, Mozambique[J]. Geomorphology, 2006, 82(3/4): 295-308.
- [152] Costa P J M, Leroy S A G, Dinis J L, et al. Recent high-energy marine events in the sediments of Lagoa de Óbidos and Martinhal(Portugal): Recognition, age and likely causes[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(5): 1367-1380.
- [153] 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]. Holocene, 2006, 16(3): 341-355.
- [154] Del Valle L, Timar-Gabor A, Pomar F, et al. Millennial-scale climate variability recorded in Late Pleistocene coastal deposits of Formentera Island(Balearic Archipelago, Western Mediterranean)[J]. Quaternary International, 2021(1): 1-17.
- [155] Fornós J J, Clemmensen L B, Gómez-Pujol L, et al. Late Pleistocene carbonate aeolianites on Mallorca, Western Mediterranean: A luminescence chronology[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(25/26): 2697-2709.
- [156] Clarke M L, Rendell H M, Tastet J-P, et al. Late-Holocene sand invasion and North Atlantic storminess along the Aquitaine Coast, southwest France[J]. Holocene, 2002, 12(2): 231-238.
- [157] Balescu S, Packman S C, Wintle A G. Chronological separation of interglacial raised beaches from Northwestern Europe using thermoluminescence[J]. Quaternary Research, 1991, 35(1): 91-102.
- [158] Coutard S, Lautridou J-P, Rhodes E J, et al. Tectonic, eustatic and climatic significance of raised beaches of Val de Saire, Contentin, Normandy, France[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(5/6): 595-611.
- [159] Balescu S, Packman S C, Wintle A G, et al. Thermoluminescence dating of the middle Pleistocene raised beach of Sangatte (Northern France)[J]. Quaternary Research, 1992, 37(3): 390-396.
- [160] Roberts H M, Marshall P. Isles of scilly, optically stimulated luminescence dating of coastal and intertidal sediments[R]. London: English Heritage, 2013.
- [161] McIlvenny J D, Muller F L L, Dawson A G. A 7600-year sedi-

- mentary record of climatic instability in Dunnet Bay, North Scotland[J]. *Marine Geology*, 2013, 335: 100-113.
- [162] Hansom J D, Hall A M. Magnitude and frequency of extra-tropical North Atlantic cyclones: A chronology from cliff-top storm deposits[J]. *Quaternary International*, 2009, 195: 42-52.
- [163] Murray A S, Buylaert J-P, Thiel C. A luminescence dating intercomparison based on a Danish beach-ridge sand[J]. *Radiation Measurements*, 2015, 81: 32-38.
- [164] Clemmensen L B, Murray A S. Luminescence dating of Holocene spit deposits: An example from Skagen Odde, Denmark[J]. *Boreas*, 2010, 39(1): 154-162.
- [165] 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.
- [166] Clemmensen L B, Murray A S. The termination of the last major phase of aeolian sand movement, coastal dunefields, Denmark[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 31(7): 795-808.
- [167] Bjørnsen M, Clemmensen L B, Murray A S, et al. New evidence of the Littorina transgressions in the Kattegat: Optically stimulated luminescence dating of a beach ridge system on Anholt, Denmark[J]. *Boreas*, 2010, 37(1): 157-168.
- [168] Clemmensen L B, Glad A C, Kroon A. Storm flood impacts along the shores of micro-tidal inland seas: A morphological and sedimentological study of the Vesterlyng beach, the Belt Sea, Denmark[J]. *Geomorphology*, 2012, 253: 251-261.
- [169] 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): 1177-1183.
- [170] Madsen A T, Murray A S, Anderson T J, et al. Optically stimulated luminescence dating of young estuarine sediments: A comparison with ^{210}Pb and ^{137}Cs dating[J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1): 251-268.
- [171] Clemmensen L B, Pedersen K, Murray A S, et al. A 7000-year record of coastal evolution, Vejers, SW Jutland, Denmark[J]. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 2006, 53(1): 1-22.
- [172] Aagaard T, Orford J, Murray A S. Environmental controls on coastal dune formation; Skallingen Spit, Denmark[J]. *Geomorphology*, 2007, 83(1/2): 29-47.
- [173] Madsen A T, Murray A S, Andersen T J, et al. Temporal changes of accretion rates on an estuarine salt marsh during the late Holocene-Reflection of local sea level changes? The Wadden Sea, Denmark[J]. *Marine Geology*, 2007, 242(4): 221-233.
- [174] Madsen A T, Murray A S, Andersen T J, et al. Optical dating of young tidal sediments in the Danish Wadden Sea[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4): 89-94.
- [175] Madsen A T, Murray A S, Andersen T J, et al. Spatial and temporal variability of sediment accumulation rates on two tidal flats in Lister Dyb tidal basin, Wadden Sea, Denmark[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(13): 1556-1572.
- [176] Fruergaard M, Andersen T J, Johannessen P N, et al. Major coastal impact induced by a 1000-year storm event[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1051-1057.
- [177] Alappat L, Vink A, Tsukamoto S, et al. Establishing the Late Pleistocene-Holocene sedimentation boundary in the southern North Sea using OSL dating of shallow continental shelf sediments[J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 2010, 121(1): 43-54.
- [178] Zhang J R, Tsukamoto S, Grube A, et al. OSL and ^{14}C chronologies of a Holocene sedimentary record (Garding-2 core) from the German North Sea coast[J]. *Boreas*, 2014, 43(4): 856-868.
- [179] Mauz B, Bungenstock F. How to reconstruct trends of late Holocene relative sea level: A new approach using tidal flat clastic sediments and optical dating[J]. *Marine Geology*, 2007, 237(3/4): 225-237.
- [180] Reimann T, Tsukamoto S, Harff J, et al. Reconstruction of Holocene coastal foredune progradation using luminescence dating: An example from the Wina barrier (southern Baltic Sea, NW Poland)[J]. *Geomorphology*, 2011, 132(1/2): 1-16.
- [181] Reimann T, Tsukamoto S. Dating the recent past (<500 years) by post-IR IRSL feldspar: Examples from the North Sea and Baltic Sea coast[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 180-187.
- [182] 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): 1011-1017.
- [183] 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(1): 77-82.
- [184] Van Heteren S, Oost A P, Spek A J F, et al. Island-terminus evolution related to changing ebb-tidal-delta configuration; Texel, The Netherlands[J]. *Marine Geology*, 2006, 235(1/4): 19-33.
- [185] Mauz B, Baeteman C, Bungenstock F, et al. Optical dating of tidal sediments: Potentials and limits inferred from the North Sea coast[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(6): 667-678.
- [186] Beerten K, Verbeeck K, Laloy E, et al. Electron spin resonance (ESR), optically stimulated luminescence (OSL) and terrestrial cosmogenic radionuclide (TCN) dating of quartz from a Pliocene-Pleistocene sandy formation in the Campine area, NE Belgium[J]. *Quaternary International*, 2020, 556: 144-158.
- [187] Reimann T, Naumann M, Tsukamoto S, et al. Luminescence dating of coastal sediments from the Baltic Sea coastal barrier-spit Darss-Zingst, NE Germany[J]. *Geomorphology*, 2010, 122(3): 264-273.
- [188] Anjar J, Adrielsson L, Bennike O, et al. Palaeoenvironments in the southern Baltic Sea Basin during Marine Isotope Stage 3: A multi-proxy reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 34: 81-92.
- [189] Kostecki R, Moska P. Baltic Sea Holocene evolution based on OSL and radiocarbon dating: Evidence from a sediment core from the Arkona Basin (the southwestern Baltic Sea)[J]. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2017, 46(3): 294-306.
- [190] Kortekaas M, Murray A S, Sandgren P, et al. OSL chronology for a sediment core from the southern Baltic Sea: A continuous sedimentation record since deglaciation[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4): 95-101.
- [191] Uścińowicz S, Adamiec G, Bluszcz A, et al. Chronology of the last ice sheet decay on the southern Baltic area based on dating

- of glaciofluvial and ice-dammed lake deposits[J]. *Geological Quarterly*, 2019, 63(1):192-207.
- [192] Bitinas A, Damušytė A, Hütt G, et al. Application of the OSL dating for stratigraphic correlation of Late Weichselian and Holocene sediments in the Lithuanian Maritime Region[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5/9):767-772.
- [193] Molodkov A. IR-OSL dating of uranium-rich deposits from the new late Pleistocene section at the Voka site, North-Eastern Estonia[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4):208-215.
- [194] Federici P R, Pappalardo M. Evidence of marine isotope stage 5.5 highstand in Liguria (Italy) and its tectonic significance[J]. *Quaternary International*, 2006, 145(3):68-77.
- [195] Andreucci S, Clemmensen L B, Murray A S, et al. Middle to Late Pleistocene coastal deposits of Alghero, Northwest Sardinia (Italy): Chronology and evolution[J]. *Quaternary International*, 2010, 222(1/2):3-16.
- [196] Mauz B. Late Pleistocene records of littoral processes at the Tyrrhenian Coast (Central Italy): Depositional environments and luminescence chronology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(10/11):1173-1184.
- [197] Antonioli F, Kershaw S, Renda P, et al. Elevation of the last interglacial highstand in Sicily (Italy): A benchmark of coastal tectonics[J]. *Quaternary International*, 2006, 145/146(3):3-18.
- [198] Mauz B, Bucchini G, Zöller L, et al. Middle to Upper Pleistocene morphostructural evolution of the NW-coast of Sicily: thermoluminescence dating and palaeontological-stratigraphical evaluations of littoral deposits[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 128(1/4):269-285.
- [199] Balescu S, Dumas B, Guérémy P, et al. Thermoluminescence dating tests of Pleistocene sediments from uplifted marine shorelines along the southwest coastline of the Calabrian Peninsula (southern Italy)[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 130(1/4):25-41.
- [200] Bianca M, Catalano S, Guidi G de, et al. Luminescence chronology of Pleistocene marine terraces of Capo Vaticano peninsula (Calabria, Southern Italy)[J]. *Quaternary International*, 2011, 232(1/2):114-121.
- [201] Nalin R, Lamothe M, Auclair M, et al. Chronology of the marine terraces of the Crotona Peninsula (Calabria, southern Italy) by means of infrared-stimulated luminescence (IRSL)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 122:104645.
- [202] Polymeris G S, Kitis G. IRSL dating of a deep water core from Pylos, Greece, comparison to post IR blue OSL and TL dating results[J]. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2011, 11(2):107-120.
- [203] Vespremeanu-Stroe A, Preoteasa L, Zăinescu F, et al. Formation of Danube delta beach ridge plains and signatures in morphology[J]. *Quaternary International*, 2016, 415:268-285.
- [204] Chen J, Yang T B, Matishov G G, et al. A luminescence dating study of loess deposits from the Beglitsa section in the Sea of Azov, Russia[J]. *Quaternary International*, 2017, 478(1):27-37.
- [205] Bateman M D, Murton J B. The chronostratigraphy of Late Pleistocene glacial and periglacial aeolian activity in the Tuktoyaktuk Coastlands, NWT, Canada[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(19):2552-2568.
- [206] Neudorf C M, Lian O B, Walker I J, et al. Toward a luminescence chronology for coastal dune and beach deposits on Calvert Island, British Columbia central coast, Canada[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30:275-281.
- [207] Eamer J B R, Shugar D H, Walker I J, et al. Late Quaternary landscape evolution in a region of stable postglacial relative sea levels, British Columbia central coast, Canada[J]. *Boreas*, 2017, 47(3):738-753.
- [208] Huntley D J, Clague J J. Optical dating of tsunami-laid sands[J]. *Quaternary Research*, 1996, 46(2):127-140.
- [209] Forman S L, Wintle A G, Thorleifson L H, et al. Thermoluminescence properties and age estimates for Quaternary raised marine sediments, Hudson Bay Lowland, Canada[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1987, 24(12):2405-2411.
- [210] Rémillard A M, Buylaert J-P, Murray A S, et al. Quartz OSL dating of late Holocene beach ridges from the Magdalen Islands (Quebec, Canada)[J]. *Quaternary Geochronology*, 2014, 30(Part B):264-269.
- [211] Kaufman D S, Manley W F, Wolfe A P, et al. The Last Interglacial to Glacial Transition, Togiak Bay, southwestern Alaska[J]. *Quaternary Research*, 2001, 55(2):190-202.
- [212] Jungner H, Korjonen K, Heikkinen O, et al. Luminescence and radiocarbon dating of a dune series at Cape Kiwanda, Oregon, USA[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5):811-814.
- [213] Peterson C D, Errol Stock E, Price D M, et al. Ages, distributions, and origins of upland coastal dune sheets in Oregon, USA[J]. *Geomorphology*, 2007, 91(1/2):80-102.
- [214] Ollerhead J, Huntley D J, Nelson A R, et al. Optical dating of tsunami-laid sand from an Oregon coastal lake[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(18):1915-1926.
- [215] Berger G W, Burke R M, Carver G A, et al. Test of thermoluminescence dating with coastal sediments from northern California[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1991, 87(1):21-37.
- [216] Stevens T, Paull C K, Ussler W, et al. The timing of sediment transport down Monterey Submarine Canyon, offshore California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2014, 126(1/2):103-121.
- [217] Torres J, Kulp M, Fitzgerald D M, et al. Geomorphic and temporal evolution of a Mississippi delta flanking barrier island: Grand Isle, LA[J]. *Marine Geology*, 2020, 430:106341.
- [218] Blum M D, Carter A E, Tracy Z, et al. Middle holocene sea-level and evolution of the Gulf of Mexico Coast (USA)[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 36(1):65-80.
- [219] Rink W J, Pieper K D. Quartz thermoluminescence in a storm deposit and a welded beach ridge[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5):815-820.
- [220] López G I, Rink W J. Characteristics of the burial environment related to quartz SAR-OSL dating at St. Vincent Island, NW Florida, USA[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1/4):65-70.
- [221] López 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(1A):49-62.
- [222] Markewich H W, Pavich M J, Schultz A P, et al. Geochronolog-

- ic evidence for a possible MIS-11 emergent barrier/beach-ridge in southeastern Georgia, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 60: 49-75.
- [223] Mallinson D, Burdette K, Mahan S A, et al. Optically stimulated luminescence age controls on Late Pleistocene and Holocene coastal Lithosomes, North Carolina, USA [J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(1): 97-109.
- [224] Havholm K G, Ames D V, Whittecar G R, et al. Stratigraphy of Back-Barrier Coastal Dunes, Northern North Carolina and Southern Virginia [J]. *Journal of Coastal Research*, 2004, 20(4): 980-999.
- [225] Shawler J L, Hein C J, Obara C A, et al. The effect of coastal landform development on decadal-to millennial-scale longshore sediment fluxes; Evidence from the Holocene evolution of the central mid-Atlantic coast, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 267: 107096.
- [226] Van Heteren S, Huntley D J, van Plassche O, et al. Optical dating of dune sand for the study of sea-level change [J]. *Geology*, 2000, 28(5): 411-414.
- [227] Buynevich I V, Fitzgerald D M, Goble R J. A 1500 yr record of North Atlantic storm activity based on optically dated relict beach scarps [J]. *Geology*, 2007, 35(6): 543-546.
- [228] Pedoja K, Dumont J F, Lamothe M, et al. Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, 22(1/2): 1-21.
- [229] Pedoja K, Ortlieb L, Dumont J F, et al. Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Peru) from new marine terrace data [J]. *Marine Geology*, 2006, 228(1/4): 73-91.
- [230] Guedes C C F, Giannini P C F, Sawakuchi A O, et al. Determination of controls on Holocene barrier progradation through application of OSL dating: The Ilha Comprida Barrier example, Southeastern Brazil [J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1/4): 1-16.
- [231] Souza A -O, Filho A P. Late Holocene coastal dynamics, climate pulses and low terraces in the coast of the state of So Paulo, southeast, Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2019, 92: 234-245.
- [232] Guedes C C F, Nascimento M G, Angulo R J, et al. Geological evidences as a guide to OSL dating interpretation and northern occurrence of MIS 7e barrier at southern Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2019, 98: 102478.
- [233] Bogó M, Nascimento M G, Souza M C, et al. Spit-Inlet migration and storm-driven stacking at Praia de Leste Holocene barrier, southern Brazil [J]. *Marine Geology*, 2021, 442: 106637.
- [234] Zular A, Sawakuchi A O, Guedes C C F, et al. Late Holocene intensification of colds fronts in southern Brazil as indicated by dune development and provenance changes in the São Francisco do Sul coastal barrier [J]. *Marine Geology*, 2013, 335: 64-77.
- [235] Thomas P J, Murray A S, Kjer K H, et al. Optically stimulated luminescence (OSL) dating of glacial sediments from Arctic Russia; Depositional bleaching and methodological aspects [J]. *Boreas*, 2010, 35(3): 587-599.
- [236] Möller P, Benediktsson Í Ö, Anjar J, et al. Data set on sedimentology, palaeoecology and chronology of Middle to Late Pleistocene deposits on the Taimyr Peninsula, Arctic Russia [J]. *Data in Brief*, 2019, 25: 104267.
- [237] Simms A R, Dewitt R, Kouremenos P, et al. A new approach to reconstructing sea levels in Antarctica using optically stimulated luminescence of cobble surfaces [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(1): 50-60.
- [238] Simkins L M, Simms A R, Dewitt R. Relative sea-level history of Marguerite Bay, Antarctic Peninsula derived from optically stimulated luminescence-dated beach cobbles [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 77: 141-155.
- [239] Simkins L M. Antarctic raised beaches; Insight on geochronology, relative sea level, and coastal processes [D]. California: University of California, 2014.
- [240] Berger G W, Murray A S, Thomsen K J, et al. Dating ice shelf edge marine sediments; A new approach using single-grain quartz luminescence [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(F3): F03003.
- [241] Berger G W. Surmounting luminescence age overestimation in Alaska-margin Arctic Ocean sediments by use of 'micro-hole' quartz dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(13/14): 1750-1769.
- [242] Berger G W, Polyak L. Testing the use of quartz 'micro-hole' photon-simulated luminescence for dating sediments from the central Lomonosov Ridge, Arctic Ocean [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 11: 42-51.
- [243] Jakobsson M, Backman J, Murray A S, et al. Optically stimulated luminescence dating supports central Arctic Ocean cm-scale sedimentation rates [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4(2): 10-16.
- [244] Armitage S J. Optically stimulated luminescence dating of Ocean Drilling Program core 658B: Complications arising from authigenic uranium uptake and lateral sediment movement [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 270-274.
- [245] Armitage S J, Pinder R C. Testing the applicability of optically stimulated luminescence dating to Ocean Drilling Program cores [J]. *Quaternary Geochronology*, 2017, 39(1): 124-130.
- [246] Chang Z H, Zhou L P. Evidence for provenance change in deep sea sediments of the Bengal Fan; A 7 million year record from IODP U1444A [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 186: 104008.
- [247] Stokes S, Ingram S, Aitken M J, et al. Alternative chronologies for late Quaternary (Last Interglacial-Holocene) deep sea sediments via optical dating of silt-sized quartz [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(8/9): 925-941.
- [248] Olley J M, Deckker P de, 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(3/4): 175-189.
- [249] Singarayer J S, Baily R M. Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(4/5): 451-458.