

The Research of Compaction Measure of Littoral Sediment and Vestiges of the Ancient Submarine Forest and Ancient Oyster Belt in Late Pleistocene of Shenhuan Bay

Qihao Xu

Seismological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou Guangdong
Email: xuqihao2005@163.com

Received: Apr. 9th, 2020; accepted: Apr. 23rd, 2020; published: Apr. 30th, 2020

Abstract

The paper is a comprehensive discussion on the course of that the research cause of the formation of the paleo-*keteleeria* forest about 7500 a.BP and the paleo-oyster belt of 25,000~15,000 a.BP exist in the tide belt of Shenhuan Bay at the same time today, which led to the research of compaction measure of littoral sediment and new knowledge are acquired of the writer for many years. The author had studied the palaeo-climate and palaeo-sea-level change of the south-east coast of China. The results show that the climate in 8000~7200 a.BP is cooler than that today and led to that the *keteleeria* forests of growth in hills of 500 to 1200 m above sea level today can grow in the area of lower sea level land of Shenhuan Bay. The research of paleo-sea-level shows that the sediments of littoral facies have been almost continuous and the "eustatic" sea level was raised with gradual advance since 45,000 a.BP. "Guangdong Zhongshan Shiqi related curve of 'eustatic' sea level changes with gradual advance since 45,000 a.BP" has been built, which supposes that the deposits of littoral facies are not compacted and the crust at the site has been stable since 45,000 a.BP that has been proved. The curve shows that the sea levels were roughly -8.2 m to -4.7 m for 21,000 a.BP to 15,000 a.BP. The research reveals that today landform of Shenhuan Bay and along the coast is created because three times great earthquakes occurred since 12,000 a.BP in the location and the process was undergone of land changes to the sea of three times and the sea changes to the land of two times in Shenhuan Bay since 47,500 a.BP in samples of littoral facies deposits and linked the curve and some methods of the research. The original ancient rivers occurred and stopped up later and 4 earthquake-faulted-dammed lakes of Long Hu Lake, Qian Gang Lake *et al.* were formed due to two earthquakes occurring before and later in Holocene of Shenhuan Bay. The result of these researches presses the writer for the study of compaction measure of littoral sediment of the Middle and Late Pleistocene. The paper discusses the cause, route, method and process of the research, and new knowledge of sediment compaction. The result of the research shows that the littoral deposits generally have poor permeability and drainage environment within 40 m near the surface or since the middle and late Pleistocene. The compaction subsidence of littoral deposits is not obvious. Therefore, when you conduct the study on the Paleo-Sea level, coastal crustal movement and paleo-earthquake in littoral deposits, it is not necessary to take into

account the impact of sediment compaction. The paper also shows that the sinking with the slow and big extent of the modern Huanghe Delta is not the result of compaction subsidence but can be caused by seismotectonics.

Keywords

Paleo-Forest of the Seabed, Paleo-Oyster Belt of the Seabed, Intertidal Seabed Coexistence, Paleo-Sea Level Change and Paleo-Earthquake, Press for the Study, Deposit of Littoral Facies, Without Obvious Compaction, Modern Huanghe Delta

滨海相沉积压实量研究与深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩遗迹

徐起浩

广东省地震局, 广东 广州
Email: xuqihao2005@163.com

收稿日期: 2020年4月9日; 录用日期: 2020年4月23日; 发布日期: 2020年4月30日

摘要

本文是笔者多年来对福建深沪湾距今7500 a左右海底古油杉森林和距今25,000~15,000 a晚更新世古牡蛎滩遗迹在今天潮间带浅滩同存成因研究导致滨海相沉积压实量研究的过程及所获最新认识的综合论述。笔者对东南沿海古气候和古海平面进行了研究, 结果指出距今8000~7200 a古气候比今天凉, 今天生长在福建500 m以上至1200 m丘陵山上的古油杉森林当年在相对低海拔的深沪湾陆地也能生长。古海平面研究结果表明距今45,000年以来滨海相沉积是连续的, 水动型海平面是渐进上升的。设定滨海相沉积无压实, 论证场址距今45,000 a以来地壳稳定, 提出了《广东中山石岐距今45,000 a以来的渐进上升水动型海平面变化曲线》。根据该曲线, 距今21,000~15,000年的海平面相应在今天海拔约-8.2~-4.7 m之间。利用滨海相沉积, 结合该曲线, 通过多手段研究揭示: 深沪湾及沿岸今天地貌景观主要是由大约距今12,000 a以来当地3次大古地震造成。距今47,500 a以来深沪湾经历了三次陆变海和二次海变陆的过程。沿岸地堑边缘古河流的生成及后来被堵塞, 形成龙湖前港湖等地震断塞湖也可能是由深沪湾全新世距今大约7000 a和距今2400 a两次大古地震先后造成的。这些研究结果催生了晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实量研究。本文介绍了笔者沉积压实研究的起因, 与研究相关的经验及研究的路径。研究结果显示滨海相沉积渗水不好, 地表下40 m以浅或晚更新世中晚期以来滨海相沉积无明显压实作用。在用滨海相沉积研究古海平面研究海岸带地壳运动和古地震时一般可不考虑沉积压实影响。本文还指出现代黄河三角洲的大速率缓慢下沉不是由沉积压实造成, 而可能主要是由地震构造作用造成。

关键词

海底古森林, 海底古牡蛎礁, 潮间带海底共存, 古海平面变化与古地震, 催生研究, 滨海相沉积, 无明显沉积压实, 现代黄河三角洲



1. 引言

早在 1930 年 Athy [1] [2] 首先提出自重作用下的连续沉积物孔隙度剖面随深度呈指数下降, 被称为 Athy 定律。其后的长时期内无论是研究深部还是浅部的沉积学家们大都是以这样的 Athy 定律为思维指导研究沉积压实问题。2001 年 Bahr *et al.* [3] 运用三种近似法——解释法, 实验法和数值法以证明简单的、频繁发生的指数关系, 认为下伏沉积的压实是根本上的指数形式, 但近地表是线性的。

随着海岸带国家对海平面上升引发的海岸带灾害的重视, 全球很多学者开始了广泛的沉积压实研究工作。特别是对晚更新世中晚期以来的沉积, 或是海岸带近地表数十米以内的沉积压实研究开展得更蓬勃。很多研究者认为压实减小了滨海相沉积物体积, 导致地面下沉, 海平面上升。研究者主要通过土工技术模拟、数学模拟、实验法和仪器监测了解近地表的沉积压实。Brain *et al.* (2017) [4] 利用 Era 相对海平面的再现探索盐沼沉积压实机理。比较了美国康涅狄格州东部河流沼泽两个相对海平面 RSL 的重现以评价物理压实和生物递降分解作用对晚全新世盐沼沉积压实的贡献及其后对相对海平面(RSL)重现的影响。Brain *et al.* (2015) [5] 还应用土工技术模拟对美国北卡罗利纳盐湖沼泽沉积的岩芯进行研究以确定由压实诱发的影响造成过去的沉积下沉的幅度。但他们强调, 这一研究结果的认识还是不成熟的。Cahoon *et al.* (1995) [6] 对美国东南部微潮盐湖沼泽区的浅沉陷进行了评估, 认为地表下的不同深度存在有不同的压实, 地表下 ≤ 10 m 的不同深度也有不同的压实造成的浅沉降。Tornqvist (2008) [7] [8] 等对密西西比三角洲的地层研究计算了一百至一千年尺度的由压实引起的下沉, 认为密西西比三角洲的下沉主要是由全新世沉积压实引起。Teatini *et al.* (2011) [8] [9] 报道过 8 年间(1992~2000 年)由干涉仪监测数据得出的意大利北部波河三角洲深度在地表以下 30~40 m 的全新世沉积的高速率(≤ 15 mm/a)下沉。认为是由全新世沉积压实驱动的现代陆地下沉的定量证据。Galvin (2001) [10] 报道了在美国大西洋城市后面的沼泽地区对沉积压实进行监测, 在海岸沙滩具代表性的碎屑沉积物和海岸河口的泥层上, 在被压实沉积物的上面埋设了潮汐夹持器(tide gages), 其显示的海平面上升高度就等于潮汐夹持器下沉的高度。Horton 和 Shennan (2009) [8] [11] 编制了英国东部海岸线全新世海岸沉积的海平面高程点的数据库, 他们观察到年龄与高程相对应的区域海平面曲线, 海平面高程点具很大的离散, 认为其离散程度的评估及这种离散本身可能由沉积压实程度和速率得到解释。由此 Horton 和 Shennan 利用了 Lambeck K 和 Johnston P (1995) 做出的一个基底海平面高程点综合冰川-地壳均衡调制模式[8] [12], 导出改正了的区域性的, 专门的去压实的晚全新世相应海平面(RSL)数据档案。Higgins *et al.* (2014) [8] [13] 利用雷达(无线电探测)合成孔径干涉仪(In SAR), 在孟加拉国恒河布拉马普特拉三角洲测得压实诱发的下沉, 四年期间(公元 2007~2011 年)平均达 18 mm/year。InSAR 还被用于评价由于大面积(达 10^3 Km^2)抽取地下水导致疏松沉积层压实而下沉的空间模式, 报道越南湄公河三角洲在公元 2006~2010 年期间下沉速率达 10~40 mm/year。这些速率与根据在地下水监测井中测出的水文落差变化计算得到的由压实诱发的下沉相关性好。表明(压实)预测模式的有效性。认为在这样的模式中压实作用是足够独立和被充分理解。Brain 还指出中国苏州(2012) [8] [14] 和黄河三角洲(2013) [8] [15] 的陆地下沉和用 InSAR 持续扩散器观察墨西哥城(2011) [8] [16] 的下沉, 印度尼西亚下沉城市(2013) [8] [17], 类似的这方面研究也值得参考。但是 Brain (2016) 明确指出, 把这个(下沉)原因归于探测到的(压实)下沉, 并不总是可靠的, 需要经常仔细的鉴定并和监测手段、数据存在及模拟研究比较[8]。

Brain 于 2016 年 9 月在美国《当代气候变化报告》中, 著文“对过去, 现在由沉积压实驱动的相对海平面及海岸变化的认识和对未来的预测”。该文大量, 系统地收集, 总结美国东西海岸带和英国, 意大利, 加拿大, 澳大利亚, 荷兰, 墨西哥, 冰岛, 西班牙, 新西兰, 印度, 埃及, 西班牙, 孟加拉, 法国, 越南, 中国, 印度尼西亚等全球多个国家很多学者专家多年来对于沉积压实监测, 模拟和研究的资料及认识。这篇文章对沉积压实研究从理论到方法的使用是肯定的。Brain 认为他的文章总结了对压实的起因和效应的理解, 对古环境和重要的地层, 海平面, 及最新的观察资料得出了一些结论性的认识。认为这些结论和认识使有可能对于由压实诱发的未来相对海平面变化及与之相联系的海岸变化作出相应的对策。文章结论提及: 沉积压实是海岸沉积过程的一个重要作用, 压实减小了海岸沉积物沉积的体积, 导致地面下沉, 引起区域相对海平面上升。并且认为, 在一些地区报告压实诱发的下沉可能等于或甚至大大超过预测的全球海平面最大上升速率。认为预测未来由压实引起的下沉速率不是不重要的工作。但是 Brain 也指出把沉积压实这个原因归于探测到的压实下沉, 不总是肯定的。认为由压实引起的下沉速率可以因为测量方法的应用, 原因机制, 空间分布区域, 覆盖层及其分辨, 观察期间的持续时间和资料报告的性质, 准确度等方面而有重要的变化[8]。

在国内对珠江三角洲, 黄河三角洲及东南沿海等多地开展有压实研究[18]-[24]。张文英, 刘尚仁(1996) 设定不同土类, 不同年代范围内具不同孔隙度并假定同一土层随着深度增加或年代愈老该孔隙度大致呈线性规律减少, 并推导出公式计算[18]。杨建明(1988)提出根据沉积物平均孔隙度—厚度关系曲线计算埋藏沉积物压实量[19]。黄镇国等(1982)设定珠江三角洲黏土或淤泥在各地质时期的压实率分别为 0.436 (40~10.1 KaB.P), 0.381 (10~2.6 KaB.P), 0.115 (<2.49 KaB.P) [23]并据此利用滨海相沉积研究华南海岸带海岸地壳活动特征[24]。陈发景等(1989)通过模拟实验研究压实变化过程[25], 许红昆等鉴于前人采用的压实校正方法有时不收敛, 提出一种从压实作用基本的数学模型和物理模型出发, 提出新的稳定收敛的压实校正方法[26]。有的提及通过数据统计等研究孔隙度演化特征[27]。

综上所述, 国内外研究沉积压实的基本现状是, 对沉积压实研究在时间和精力上持续投入了巨大的热情, 采用了各种尽可能使用的方法和途径, 但在研究中碰到不小这样那样难以解决的问题, 研究方式还是处在模拟, 实验和探索阶段。一个明显的共同的思想特点是, 都认为地表下一定存在沉积压实, 沉积愈深压实量一定愈大。至于压实后的孔隙水能否排出, 排到哪里去? 不知道。因为没有确实的物理证据或实验证据。沉积学研究的这一基本问题在这以前并没有解决。还认为相同沉积物孔隙度愈小, 压实量一定愈大。高国瑞(2013)指出, 地表下土的密度随深度是呈跳跃式渐增的[28], 这一认识比笼统地认为孔隙度随深度呈指数下降或近地表呈线性更接近实际些。但为什么跳跃式渐增? 它说明了什么? 不知道。在此以前没有人去追索。在工程钻探和实验中大量存在上部土柱沉积孔隙度小于下部土柱的事实, 其原因没有人去解释, Brain 在他的文章中提到: “实际上, 确实是在顺序沉积地层中, 沉积在低密度具较大压缩性的有机生成沉积物顶部的密度较大的成矿沉积物被发现压实效应更大些[8]”。至于为什么上部沉积压实效应比下部沉积的大, 下部沉积的压实效应反而小? 也不知道, 因为没有人去追索和解释。这一普遍存在的问题也没有解决。沉积学研究中这样的一个问题, 一个普遍问题没有解决造成了沉积压实认识的关键盲点。带着这样的认识盲点去研究沉积压实量, 去研究沉积压实对于海平面变化, 海岸变迁, 海岸地壳运动的影响, 就必然产生这样那样难以解决的问题, 就像 Greensmith 和 Tucher (1986) [29]那样发出计算沉积压实很难的感叹, 认为: 至今几乎没有其他什么知识领域中存在如此困难的数量估算问题。这些问题影响着沉积压实研究的进展和对沉积学更深度的认识。

笔者曾多年在东南沿海海岸带从事地震地质和第四纪地质的调查和和研究, 曾对福建深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩和深沪湾沿岸的龙湖, 前港湖等湖泊的古地震成因进行研究。深深体会到正确认识沉积压实对于利用滨海相沉积研究海岸带的古海平面变化, 构造和地壳活动性, 对研究海岸带古地

震等具有重要意义。本文就笔者对沉积压实研究的起因, 思路, 方法, 及研究径迹, 过程和研究获得的最新认识几方面论述。

2. 对深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩的古地震成因研究催生了沉积压实研究

华南地区海岸带因湿润多雨天气, 地壳活动遗迹, 古地震遗迹易被侵蚀而不易保留, 活动断层多是沟谷, 易积水, 像干旱地区那样通过开挖探槽揭示地层错位研究古地震较困难。为研究海岸地壳活动性, 很多研究者通过钻孔等多手段形式采取滨海相沉积样品, 通过对压实量的估算及对古海平面遗迹年龄及位置的比较[18] [19] [20] [23] [24], 从一个方面了解海岸地壳的活动程度[30]。笔者在多年来海岸带的地震地质调查, 历史地震调查和海岸带第四纪研究中的经验使笔者总是感觉前人对滨海相沉积压实研究得出的结论存在问题, 深感解决认识晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实量的重要性和必要性。

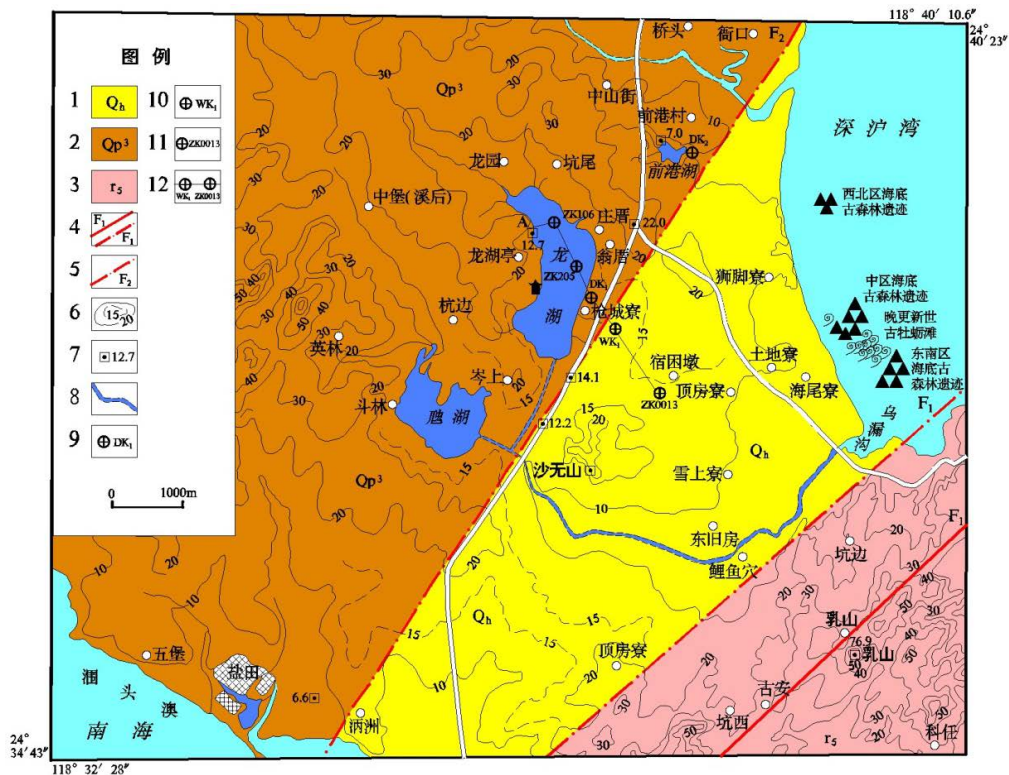
1986年笔者在执行国家地震局批准并由国家地震局联合科学基金资助的基金研究课题:《闽南粤东沿海地壳长趋势形变及其与地震关系的调查研究——以民间广泛传说的沉东京为例》(批准号 J86-II-013)的海岸调查中, 通过对“沉东京”的追索调查[31], 徐起浩(1986)首次发现了距今 7500 a 左右的福建深沪湾(N24°38', E118°39')以古福建油杉为主的大片的海底古森林遗迹[31] [32] [33] [34] (图 1)。其中一棵为直径粗达 1 m 被海浪搬运到土地寮村岸边的, 植物学鉴定为金缕梅科枫香属(*Liquidambar L.*), 表面炭化了的古树根, ^{14}C 测年为距今 8320 ± 150 a [35] [36] [37]。除此外其他海底古森林树桩在潮间带和潮下带浅滩呈三个区大片分布。已发现 65 颗古森林树桩[34]-[39]。海底三个区多棵古油杉树木测得的年龄(aBP)有: 中区, 7620 ± 130 , 7550 ± 120 [32] [33]; 7139 ± 156 , 6761 ± 193 [40]; 8090 ± 85 , 7600 ± 75 , 7440 ± 75 [39]; 西北区, 7380 ± 110 , 7440 ± 120 [35] [36] [37]; 东南区, 7170 ± 120 , 6900 ± 130 [35] [36] [37]; 9420 ± 160 [39]。福建油杉森林今天主要生长在福建沿海海拔 1000~1200 m 的丘陵山上, 最低有分布海拔 500 m 左右的山地。同一潮间带, 在海底古森林中区与东南区之间浅滩, 徐起浩等于 1986 年又首次发现大片的厚层状的原生, 连续生长的晚更新世古牡蛎礁[41]。这些礁体大多连成一片, 构成宽广的古牡蛎滩[41] [42] [43]。很多牡蛎礁体胶结坚硬, 成块状, 板状, 形成大片的古牡蛎贝壳海滩岩[43]。国内多个实验室对深沪湾古牡蛎的测定年龄(a.BP)是: $17,330 \pm 470$, $17,480 \pm 490$, $20,760 \pm 470$, $15,790 \pm 410$, $15,460 \pm 420$, $15,520 \pm 380$, $17,230 \pm 410$, $23,820 \pm 520$, $24,110 \pm 530$, $20,980 \pm 200$, $25,800 \pm 2490$ [33] [42] [43], $23,810 \pm 290$ [44], 9355 ± 199^1 [40]。深沪湾牡蛎测得 13 个样品年龄, 其年龄在约 20,980~15,520 a.BP 之间的有 8 个, 占所测样品总数 61.5%。可以明显看出深沪湾的牡蛎主要生长在距今 21,000~15,000 a 的时期内。牡蛎通常在河口带的海岸低潮线附近及邻近深度的潮下带海域生长。距今 21,000~15,000 a 左右是多年来被国内外地学界很多学者认为是全球最低海平面时期, 认为当时的海平面比今天低 130~150 m, 一些学者如美国的 J 肯尼特等认为这种-100 m 以下最低海平面观点已属不容置辩的基本概念的认识[45]。深沪湾的发现对这些被认为是基本概念的认识提出了一系列有待解答, 有待重新认识的问题。显然, 深沪湾这两项发现是极其罕见的珍贵的自然遗迹[46] [47] [48] [49] [50], 它们在今天深沪湾退潮后的潮间带

¹笔者指出上述 9355 ± 199 a.BP 的牡蛎测年, 可能误差较大而偏年轻, 理由是: 1) 钻孔揭示深沪湾生长古森林的全新世凹陷底部含 20~30 cm 厚的碳化, 半碳化木和未碳化木碎片夹有少量砾石[76]。碳化, 半碳化木 ^{14}C 测年为距今 $10,670 \pm 280$ a, 说明距今 10,670 a 左右深沪湾内的陆地凹陷就已生成, 已是陆相环境[35] [36] [43]; 2) 深沪湾沿岸地堑内闽东南地质队 1986 年在沿岸海尾寮村西侧 608 号钻孔[72]孔深 10.5~12.2 m (海拔-2.5~-4.2 m)含砂粘土, 见少量横滨盒形藻(*Bidduiphia grandieri Schmidt*), 为潮间带硅藻。该层孔深 11.5~11.6 m (海拔-3.5~-3.6 m)样品 ^{14}C 测年为 $20,200 \pm 510$ a, 说明这时期海水已到达深沪湾。这与深沪湾当时大量生长古牡蛎[43]相合。但是该孔孔深 5.0~7.0 m 为灰黑色黏土及细粒次棱角状石英砂, 所含硅藻全为淡水类, 含松粉。孔深 5.50~5.70 m (海拔 2.5~2.3 m)灰黑色含砂粘土, 为淡水沼泽沉积, ^{14}C 测年为 $11,480 \pm 400$ a.BP [72], 这个年龄时间是当时深沪湾已经历第一次大地震导致快速大幅度抬升, 但还未经受深沪湾后来的全新世的两次大地震下沉(两次地震下沉幅度总共超过 6 m [76] [78]), 现在的状况是深沪湾已经受了全新世两次大地震造成的快速下沉后的状况, 也就是说距今 $11,480 \pm 400$ a 这个时间深沪湾地平面至小比现在海拔高 6 m 以上, 即至小在今天海拔以上 8.5~8.3 m。距今 11,480 a 水动型海平面在今天海拔约-3 m, 就是说当时 608 号孔该层沉积高出当时海面至小 11.5~11.3 m。说明这时期海水已经离开深沪湾有一定距离, 当地已完全处陆地环境。已知距今 8000~7000 a 深沪湾凹陷槽地内生长茂盛古森林, 所以深沪湾牡蛎 9355 ± 199 a 测年误差偏大。

海滩同时出露更是世界奇观。1992 年我国国务院批准福建深沪湾海底古森林(含晚更新世古牡蛎滩)为国家级自然保护区², 2004 年国土资源部批准深沪湾为国家地质公园³, 2009 年深沪湾海底古森林国家级自然保护区被中国科协批准为国家级科普教育基地。

深沪湾的奇异地貌景观吸引了多学科的很多学者, 专家参加了对深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩及古环境的调查, 探讨和研究[51]-[65]。也开始形成当地结合地学科普和历史古迹旅游的新景象。

为揭开深沪湾海底古森林与晚更新世古牡蛎滩同时存在今天深沪湾潮间带海底共存出露的成因奥秘, 笔者认为必须了解东南沿海晚更新世以来的水动力型海平面究竟是怎样变化的? 晚更新世以来东南沿海存在怎样的海岸地壳运动? 1991 年国家地震局批准, 地震联合科学基金资助笔者的第二个研究课题: 《海平面变化, 海岸升降与地震关系研究》(批准号 91161)。在这个课题的研究中笔者收集了东南沿海分布在潮间带及其附近上下数 m 至数 10 m 的晚更新世中晚期距今 45,700 a 以来的 491 个滨海相沉积样品 4-2 (徐起浩 1996 课题研究最终成果报告), 显示了距今年龄愈老滨海相沉积样品愈少, 年龄愈小, 滨海相沉积样品愈多的特点。其中距今 21,000~15,000 a 滨海相样品(不含深沪湾样品) 40 个。根据大量看得见摸得着的晚更新世中晚期滨海相沉积样品和测年资料, 笔者在多种刊物发表文章指出应该不存在最末盛冰期(距今



1.深沪湾地堑及全新世地层; 2.主要为晚更新世沉积构成的台地, 局部为混合岩低丘, 近 F_2 断裂处多为全新世风成砂沉积; 3.混合花岗岩隆起区, 表层局部上覆老红砂; 4.深沪 - 金井断裂(F_1); 5.衙口 - 炳洲断裂(F_2); 6.地形等高线及高程(m); 7.海拔高程点及高程(m); 8.季节性溪流; 9.龙湖, 前港湖地震调查钻孔及孔号; 10.民用水井钻孔及孔号; 11.闽东南地区地质钻孔及孔号; 12.钻孔地质剖面(地形资料据中国人民解放军总参谋部测绘局 1960 年出版的 1/5 万地形图)

Figure 1. Vestiges of submerged paleo-forest and ancient oyster belt of Epipleistocene, Layer, main structure, and lakes are in west of graben, that are distributed in Shenhuwan Bay and along the coast [84]

图 1. 深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩, 沿岸地层、断裂及地堑西侧湖泊分布图[84]

² 国务院关于同意天津古海岸与湿地等十六处自然保护区为国家级自然保护区的批复: 九、福建深沪湾海底古森林遗迹自然保护区。中华人民共和国国务院国函[1992] 166 号, 一九九二年十月二十七日(说明: 保护区范围和对象含晚更新世古牡蛎礁遗迹)。

³ 国土资源部关于批准河南王屋山等 41 处国家地质公园的通知。附件第三批国家地质公园名单: 14, 福建晋江深沪湾国家地质公园。国土资源部文件, 国土资发[2004] 16 号, 中华人民共和国国土资源部, 二〇〇四年一月十九日。

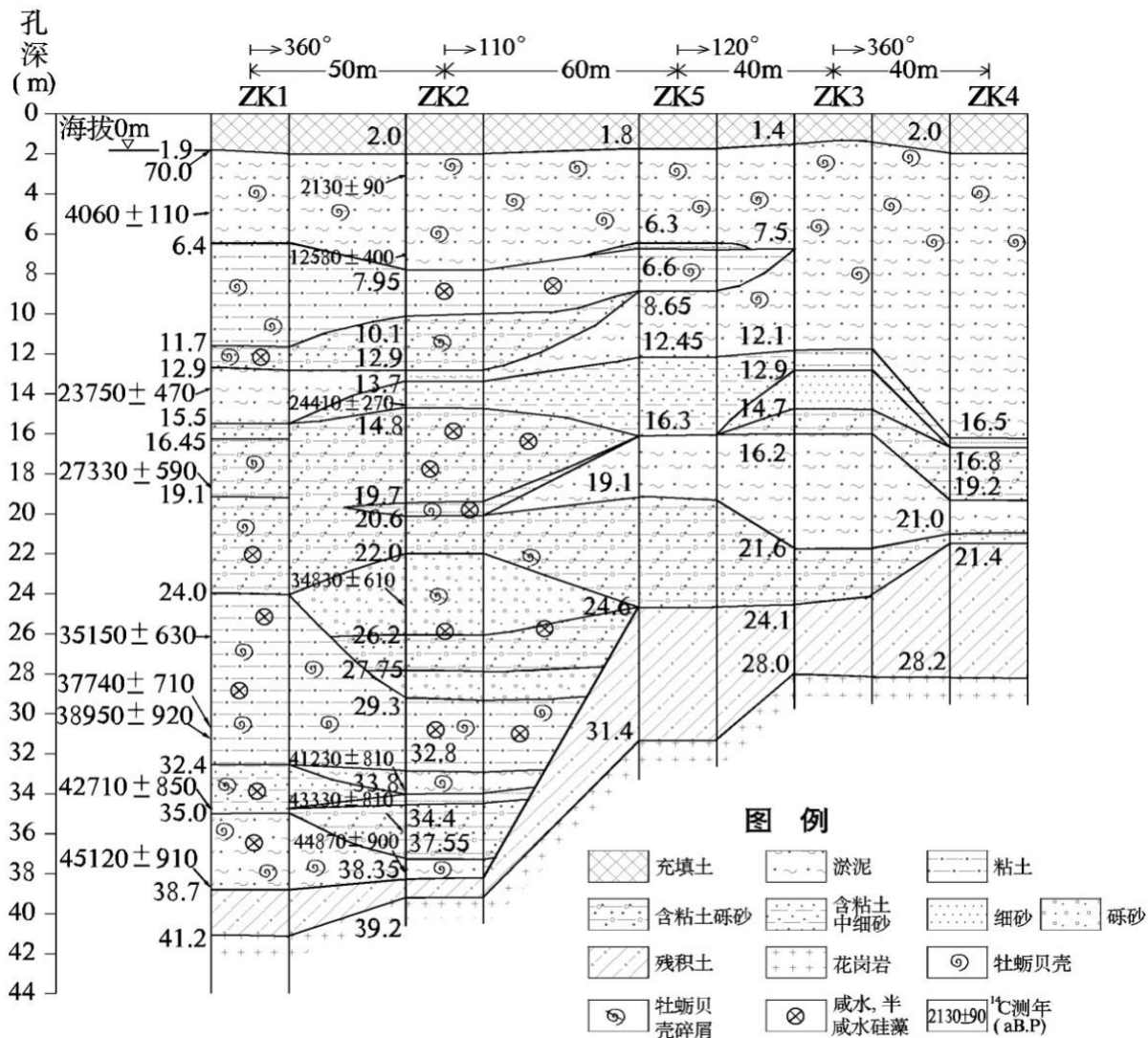


Figure 2. The geological section of hores of the site of Zhuhai Geli Commerce Large Building in North of Fuhualou path of Shiqi of Zhongshan City, Guangdong Province. This section shows that the littoral facies sediments of the site have been almost continuous since 45,000 aBP. The crust at the site has been stable since 45,000 a.BP, which has been proved, and littoral facies deposit is not compacted is supposed. For the above reasons the “The related curve of ‘eustatic’ sea level changes with gradual advance rising since 45,000 a.BP in Shiqi of Zhongshan city, Guangdong province” has been built [71] [99]⁴

图 2. 广东中山石岐富华路北珠海格力商业大厦场址钻孔地质剖面图[71] [99]⁴。场区钻孔 ZK1, ZK2 孔深 38.7 m 以上沉积几乎都不同程度地含牡蛎贝壳或其碎片, 或含咸水, 半咸水硅藻。ZK1 孔深 6.46~11.70 m, 24.0~32.40 m, ZK2 孔深 7.95~10.10 m, 都为花斑状粉质粘土或粘土, 以往有研究者认为, 花斑粘土为暴露氧化沉积, 属间断沉积风化面。但本场址钻孔显示花斑粘土含牡蛎贝壳, 含大量咸水硅藻。5 个钻孔剖面图显示, ZK1, ZK2 花斑粘土与其他钻孔相同高度的淤泥等沉积为同时异相沉积, 距今 21,000~15,000 a, 场址 ZK3, ZK4 钻孔沉积滨海相淤泥, 清楚显示距今 45,000 a 以来场区滨海相沉积是连续的。资料显示该场区为稳定小岛, 并设定滨海相沉积无压实, 根据该场地滨海相沉积层建立了《广东中山石岐距今 45,000 年以来渐进上升水动型海平面变化曲线》

21,000~15,000 a) -100 m 以下最低海平面(徐起浩, 1993, 1995, 1996_a, 1996_b, 1996_c) [66] [67] [68] [69] [70]。

笔者还亲自进行较多的海岸地震工程场地钻孔地质编录, 详细观察钻孔岩芯, 1992 年在广东中山石岐富华路北珠海格力商业大厦场址的地震工程中, 对钻孔岩芯进行了仔细观察, 密集采样, 详细微体古生物

⁴资料据: 1) 广东省中山市石岐格力商业大厦场址地震安全性评价报告场址地质部分(徐起浩编写)。广东省地震局, 1993 年; 2) 国家地震局联合科学基金资助课题: 海平面变化, 海岸升降与地震关系研究(课题批准号 91161)课题研究最终成果报告。徐起浩。广东省地震局, 1996 年 4 月。

鉴定和年代学测定,发现距今 45,000 a 以来滨海相沉积是连续的[71] (图 2)。该场地 ZK1 钻孔孔深 38.5~38.6 m 淤泥含牡蛎贝壳 ^{14}C 测年为 $45,120 \pm 910$ a.B.P (钻孔中从上到下顺序连续多个小距离间隔密集样品,顺序连续多个密集测年,现有同位素 ^{14}C 测年技术可以测出这个年龄)。并且与珠江三角洲内其他地区共 27 个钻孔,韩江三角洲 11 个钻孔的滨海相沉积进行时空位相比较,论证了该地震工程场地在广东沿海晚更新世中晚期以来抬升最小,下沉也最小,是难得的稳定小岛(这部分论证资料图因用于比较的钻孔较多,图幅较大,该论文发表时文献[71]编辑部提议论文中只要指出这点就行,可以让读者自己去比较而被提议删去 38 个钻孔剖面 82 个滨海相样品时相比较图)。根据这些资料,结合笔者本人野外调查经验,设定晚更新世以来滨海相沉积无压实,并据此建立了广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线⁴(徐起浩,1997) [71]。依据该曲线,距今 21,000~15,000 年的海平面相应在今天海拔约-8.2~-4.7 m 之间。并且根据深沪湾沿岸 ZK608 号钻孔岩芯测年及孢粉分析,距今(20200 \pm 510) a 当时深沪湾地区不是盛冰期寒冷气候,而是湿热气候,气温可能比今天还更温暖些[43] [72]。其后依据该水动型海平面变化曲线对东南沿海海岸带地壳运动展开了进一步的研究(徐起浩,2001) [30]。期间福建省地震局的科技人员对海岸带晚更新世中晚期以来包括被人们认为的距今 21,000~15,000 a 最末冰期的海平面遗迹也收集了大量的资料并做了相当的研究工作(丁祥焕等,1998) [73]。

深沪湾海底古森林发现后,笔者在上世纪七十年代的卫星象片中很快发现深沪湾地区具清晰的全新世活动地堑,深沪湾海底古森林和晚更新世古牡蛎滩正处在全新世下沉的地堑内[32] [72]。笔者具有 1976 年和 1984 年两次在海南岛东寨港等地调查 1605 年琼州 71/2 级大地震导致陆陷成海的震害经验。这些都使笔者很快联想到福建深沪湾海底古森林很可能与全新世强古地震相关。



Figure 3. “Guangdong Zhongshan Shiqi related curve of ‘eustatic’ sea level changes with gradual advance since 45,000 a.B.P” is used to study earthquake and crustal movement of Shenhuwan Bay [43] [71] [76] [78]

图 3. 根据钻孔中的连续滨海相沉积及论证钻孔所在场区晚更新世中晚期以来地壳相对稳定及设定该时段滨海相沉积无明显压实得出的《广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线》用于研究福建深沪湾晚更新世中晚期以来地壳运动与古地震展示(据文献[43] [71] [76] [78])

但笔者又想到, 现今福建大片的古油杉森林只能生长在今天海拔 500 m 至 1200 m 的丘陵山上, 为何距今 7500 a 左右在深沪湾距海岸不远的低海拔处也能生长? 笔者通过对深沪湾岸边 ZK0013 等钻孔内土样所含的植物孢粉分析, 发现距今 8000~7200 a 左右深沪湾地区的古气候比今天温度低, 为凉干气候(徐起浩等, 1991), 使得当时古油杉生长线下移, 在比今天生长地区海拔更低的地方生长[72]。这与 Dennon *et al.* (1973) [74]曾推测 7800 aBP 可能是全新世含的小冰期冰川复增长的其中一个峰值时期, 及施少华 (1993) [75]研究认为全新世早期存在距今 8200~7000 年的冷期认识是比较一致的。

初步研究认为深沪湾海底古森林与晚更新世古牡蛎滩在今天深沪湾潮间带共存, 可能是由距今 4 万年以来的古气候, 古海平面变化及地壳运动综合造成的(徐起浩等, 1991) [72]。

带着以上这些经验和认识, 通过上述研究, 笔者认为具备了深沪湾古地震研究的一定的理论基础和条件。1997 年中国地震局批准, 地震联合科学基金资助笔者的第三个研究课题《福建深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩成因的古地震研究》(批准号 197096)。通过多手段的研究表明, 深沪湾曾发生过大约距今 12,000 a, 7000 a 和距今 2400 a 的 3 次大古地震(徐起浩等, 2001, 2002, 2002_b, 2002_c, 2006) [43] [76] [77] [78] [79], 其震级都在 7 级以上(有的可能达 8 级[80])。使得深沪湾距今 $47,500 \text{ a} \pm 3700 \text{ a}$ [76] (深沪湾 ZK2 孔生长古森林凹陷表层的含砾砂粘土年龄)以来依次经历下列环境变化过程: 1) 陆地, 约距今 47,500 a 深沪湾晚更新世以来的最早陆地; 2) 海洋, 由于海进, 约距今 30,000 至 12,000 a, 深沪湾晚更新世以来第一次形成海洋, 其间约距今 25,000 a 至 15,000 a 深沪湾地壳与水动型海平面同步上升, 环境相对较稳定, 深沪湾河口带大面积持续生长古牡蛎, 形成宽广的深沪湾古牡蛎滩; 3) 大古地震海洋变成陆地, 约距今 12,000 a 左右深沪湾发生晚更新世晚期以来的第一次大古地震, 深沪湾快速上升, 牡蛎滩快速脱离海面, 避开了高能海浪的侵蚀, 能得以长时间较多保留, 深沪湾第二次成为陆地。4) 持续抬升地表形成凹陷槽地, 约距今 12,000 a 至 10,000 a 左右深沪湾陆地因持续抬升被切割, 形成多个凹陷槽地(徐起浩等 2000, 2002) [35] [36], 部分牡蛎滩也被侵蚀切割。1998 年 5 月笔者考察时在中区海底古森林的北西侧也发现有小片表面被搅乱了晚更新世古牡蛎及牡蛎滩(徐起浩, 1998) [34], 推测这小片牡蛎滩原来和中区海底古森林东南侧的大片牡蛎滩是连成一片的。后来地壳抬升, 表层被切割形成凹陷槽地才被分开。5) 地壳较稳定, 凹陷槽地内生长古森林。距今 10,000~7000 a 深沪湾地壳较稳定。因距今 7800~7200 a 深沪湾的古气候温度较今天低[39] [72] [74] [75], 在深沪湾沿岸低海拔的水分和阳光充足的多呈 NEE 走向的凹陷槽地内生长以古油杉为主夹有南亚松, 桑树, 皂夹, 枫香属植物的混交森林[35] [36] [37] [39] [81]; 6) 大古地震陆地变成海洋, 约距今 7000 a 深沪湾发生晚更新世晚期以来的第二次大古地震, 深沪湾快速下沉, 古凹陷, 古槽地内的古油杉等森林首次沉没于海, 深沪湾晚更新世中晚期以来第二次形成海洋(含泻湖)环境。但凹陷槽地外高地上的古牡蛎滩尚未沉没于海。7) 地壳较稳定, 深沪湾海洋泻湖环境。约距今 7000 a 至距今 2800 a 深沪湾为海洋泻湖环境, 深沪湾地壳较为稳定; 8) 缓慢抬升海洋泻湖变成陆地与沼泽, 约距今 2800 至 2400 a, 深沪湾微弱抬升, 晚更新世晚期以来第三次形成陆地与沼泽环境(时间较短); 9) 大古地震陆地沼泽变成海洋, 约距今 2400 a 深沪湾发生晚更新世晚期以来的第三次大古地震, 深沪湾快速下沉, 变成茫茫海洋, 古森林沉没更深海底, 凹陷槽地外陆地上的残留牡蛎滩也沉没于潮间带海底, 深沪湾第三次变成海洋环境, 海底古森林与晚更新世古牡蛎滩都出露在今天深沪湾潮间带海底。由于快速下沉, 且沉入潮间带海底时间不长, 使得残留古牡蛎滩能保留至今。距今约 47,000 a 以来深沪湾经历过 3 次成陆, 3 次成海的变化, 使得深沪湾逐渐形成今天面貌[42] [43] [76] [77] [78] [79]。这是我国首次在海岸带地区发现全新世强古地震。福建深沪湾古地震和地壳运动研究不仅对福建沿海, 而且对同处东南沿海地震带的广东, 广西, 海南海岸带地区的地震研究及可能的震害预测都有一定意义。上述成果的得出在研究中都没有离开前述的广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线(图 3)。上已述及, 这条曲线是在设定滨海相沉积无压实的前提下使用的, 虽然在深沪湾结合该水动型

海平面变化曲线得出的研究结果具相当好的合理性，但是至今以前无论国内还是国外研究沉积学的学者们都几乎都毫无例外的认为晚更新世中晚期以来的滨海相沉积不是无压实而是存在很重要的压实作用。显然不真正识别晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实量，将会影响人们对上述的广东中山石岐距今 45,000 年以来的渐进上升水动型海平面变化曲线的适用性的认识，对笔者多年来福建深沪湾古地震和地壳运动等研究成果的确认也会产生影响。这也就更进一步的激发了笔者对沉积压实量研究的责任感，使命感和紧迫感。

综上所述，滨海相沉积压实研究是笔者在海岸带长期从事地震地质理论和实践中，在对深沪湾海底古森林及晚更新世古牡蛎滩今天在深沪湾潮间带和潮下带海滩共存成因的一环扣一环研究中被催生出来的。

3. 与滨海相沉积压实研究相关的经验，研究思路与径迹

研究思路及过程有如下序次流程(括号内数字为年份):

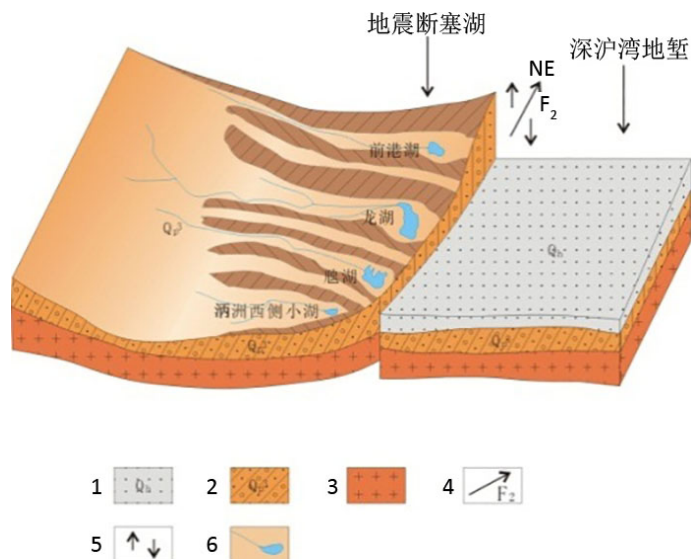
1 沉东京调查(1985, 1986)——2 发现深沪湾距今 7500 a 左右的海底古森林及距今 25,000~15,000 a 的晚更新世古牡蛎滩遗迹(1986)——3 为研究古森林与古牡蛎滩在深沪湾潮间带同存成因，申请古海平面研究课题(1992)——4 研究古气候，得出现今生长在 500 m 以上至 1200 m 丘陵山上的福建油杉森林，距今 7500 a 左右在近海岸低海拔地区生长与当时深沪湾地区气温比今天凉有关的认识(1993)——5 收集资料，亲自参加钻孔编录，获得无沉积压实的野外经验，观察岩芯发现距今 45,000 a 以来滨海相沉积连续，认为不存在距今 21,000~15,000 a 的-100 m 以下最低海平面。论证钻孔所在场址地壳稳定，设定无沉积压实，提出广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线(1997)——6 申请深沪湾古地震研究课题(1997)——7 利用中山石岐渐进上升水动型海平面变化曲线结合多手段研究，揭示了造成深沪湾距今 7500 a 左右全新世古森林与距今 15,000~25,000 a 晚更新世古牡蛎滩遗迹在今天深沪湾潮间带和潮下带浅滩同存，晚更新世晚期以来的 3 次大古地震(2001, 2002)——8 在全国地震学术会议上宣讲滨海相沉积无压实的初步认识(2002)——9 继续古地震研究，揭示了沿深沪湾地堑北侧边缘线状展布的龙湖，前港湖等湖泊的古地震断塞成因(2012)——10 比较古地震研究的合理性，根据经验，进一步认为晚更新世中晚期以来滨海相沉积无明显压实，中山石岐距今 45,000 a 以来渐进上升水动型海平面变化曲线是比较符合实际的，用于研究，实践应该是可行的——11 资料，信息表明国内外研究沉积学，研究地学的学者专家们以往几乎都认为滨海相沉积具重要的压实作用——12 申请老专家研究课题：“滨海相沉积压实量研究”(2017)。以求得野外经验和深沪湾古地震研究成果获得这方面的理论支撑——13 研究得出最新认识：滨海相沉积无明显压实作用，在用滨海相沉积研究古海平面，研究地壳运动和古地震时一般地可不考虑沉积压实作用影响(2018)。

上述流程本文前面已部分有阐述，下面补充述之：

3.1. 经验

笔者曾亲手进行过多个场地的数百个钻孔的岩芯编录，亲眼见过数米，十余米下的粗砂，细砂含水饱和，有呈松散状，亲眼见过孔深达 38.6 m 的深处含牡蛎贝壳淤泥含水饱和，呈软塑状，与地表下数米淤泥沉积几无区别，现场的感觉是，哪里来的沉积压实？笔者还获得多个钻孔沉积岩芯实验室土工试验物理指标的测定，发现相同命名土深处的孔隙度，孔隙比，比浅处的高，甚至高出许多，而且这种现象相当普遍。如果真像很多人认为的，在几十米深度内，沉积愈深，压实量愈大，孔隙度愈小压实量愈大，怎麼可能大量出现这种实验测定结果呢？这些告诉了笔者，过去人们对沉积压实的认识很可能存在问题。笔者带着上述经验，徐起浩等于 2002 年在中国地震学会第九次学术大会上宣讲了对沉积压实研究的初期学术观点：《晚更新世中晚期以来的滨海相沉积不存在沉积压实作用》，阐述了自己的这一初步认识[82]。

笔者利用多手段, 结合设定滨海相沉积无压实的, 距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线, 在福建深沪湾研究古地震与地壳运动及通过对深沪湾地堑边缘呈线状排列的前港湖, 龙湖等湖泊成因的研究也表现了好的合理性。2001 年在福建省晋江市人民政府和广东省地震局的联合资助下笔者对深沪湾沿岸的龙湖, 前港湖的成因进行了多手段调查与研究[83]。这是与深沪湾海底古森林研究有关的第四个研究课题。2008 年又获得了晋江水利部门在龙湖湖内及湖岸共进行的 77 个对龙湖进行水环境调查的钻孔资料, 通过对这些资料的详细分析进一步证实龙湖是在距今 2400 a 左右由强地震导致龙湖内原古河流被断裂堵塞形成的, 龙湖是地震断塞湖(徐起浩, 2012) [80] [84] (图 4)。调查表明形成时间与龙湖很接近的前港湖, 及与龙湖前港湖都沿深沪湾地堑边缘呈线状排列的魮湖也应是相同成因的地震断塞湖。前港湖, 龙湖被断塞的这个时间真好大致落在早先推断的深沪湾古森林第二次沉没于海的晚全新世强古地震的可能时间(距今 2800~1500 a) 的范围内。并且根据对深沪湾地堑宿困墩村附近 ZK0013 钻孔内, 与龙湖古河流相连的古河流最底层沉积砾砂层下的古河床的表层薄层粘土(厚 15 cm, 含大量油杉植物孢粉, 下伏混合岩)年龄测定, 为距今 7220 ± 140 a.BP [72], 表明龙湖内被断塞的原先古河流的生成时间也可能接近距今 $7220 \text{ a} \pm 140 \text{ a}$ 左右, 与距今 7000 a 左右深沪湾导致古森林第一次沉没于海的古地震时间也接近, 可能该古河流是距今 7000 a 左右深沪湾大古地震导致沿岸地壳破裂, 裂隙贯通, 沿岸水系改变而形成的(徐起浩, 2012) [80]。所有这些“巧合”不是偶然, 是两次大地震分别在地表造成各种强烈形变的可能反映。在相当程度上表明上述研究结果是具有的可信度的。使笔者再次相信原先设定晚更新世中晚期以来滨海相沉积无压实也是合理的。如果没有上述这些经验认识, 对滨海相沉积可能很难有研究的信心, 退休十几年来要坚持对晚更新世以来滨海相沉积的压实量的进一步理论上的探索可能也是困难的。因为人一辈子要做的事情很多, 但时间有限, 特别是已退休多年的年长者, 谁还会愿意把时间化在难度很大, 又看不到希望的研究呢?



1 全新世沉积; 2 晚更新统含砾砂粘土, 局部为残积、坡积层; 3 风化花岗岩; 4 断裂及走向; 5 段裂两盘错动方向; 6 断塞湖泊

Figure 4. The hint picture of Qiangang Lake, Longhu Lake, Huihu Lake were formed that was due to paleo-rivers of the coast were dammed by fault activity owing to the great earthquake in area of Shenhuwan Bay about 2400 a.BP [84]

图 4. 深沪湾距今 2400 年左右大地震使得沿岸古河流被断裂堵塞, 前港湖、龙湖、魮湖等地震断塞湖形成示意图[84]

3.2. 研究径迹

在研究中笔者还注意到国内外有一些研究者很关注黄河三角洲的下沉,有认为现代黄河三角洲不同时间段,不同地区沉降速率达 32~68 mm/a,较多研究者对其成因进行了认真的探索和研究,并将这大幅度沉降相当部份归因于沉积压实造成[8] [15] [21] [22] [85] [86]。笔者认为该地区较大下沉主要可能是地震构造下沉造成的。理由是:

1) 现代黄河三角洲新近系及第四系沉积厚达 1200~2400 余米,正处在渤海湾新近纪以来拗陷强烈活动,现代地震也强烈活动的构造带上。有认为该地区存在有新构造带[87],也是一条穿越现代黄河三角洲的强烈的现代地震活动带,新构造运动十分强烈,认为黄河入海的多次改道,很可能与构造活动有关[88]。1969年7月18日在渤海湾发生7.4级地震,震中(N38.2°, E119.4°)距黄河口海岸约45 km。据调查,这次地震实际烈度达Ⅷ度地区主要分布在山东省境内黄河入海处,包括垦利县大部和利津,沾化县部分地区,是渤海沿岸陆地烈度最高地区,地表多处发生地裂缝,其中垦利县左家庄地裂缝长达2.2 km,最宽处2.4 m [89] [90]。这次地震在沿岸造成的≥Ⅶ度的高烈度区其范围与后人研究得出的现代黄河三角洲近期大速率下沉地区较好吻合(图5)。主震后数天内发生多次震中距现代黄河口海岸更近的,震级 $5.5 \geq M_L \geq 5.0$ 级余震。此外渤海湾还分别发生过1597年7级和1888年7.5级地震,其震中位置也都集中在现代黄河三角洲往北东延伸的渤海湾新生代拗陷内,后者震中位置大致在与现代黄河口海岸相距约45 km的北北东侧海域内[91]。

2) 在海岸带发生强地震,地震时和震后相当长时间内极震区和高烈度区有的海岸会发生速率较大的快速下沉和缓慢下沉,1605年海南岛北部发生7.5级琼州大地震,这是我国唯一有史料记载的导致较大面积陆陷成海的大地震[92]。多方面实地调查表明极震区东寨港震后继续以较大速率下沉[93] [94],海岸大幅度后退,至笔者调查年(1984年)的近40年,下沉速率每年达1 cm左右(徐起浩,1986) [95]。该数据主要据当地海岸大块玄武岩基岩面40年来海蚝生长线垂直上升及海水在防潮堤上升幅度实测得到的。又如1918年在广东南澳发生7.4级大地震,笔者1985年在距震中约30公里的南澳岛东部的云澳,青澳,老圆,羊屿尾村等村进行海岸调查,在当地多个海边居民及老渔民的帮助下,调查发现海岸大幅度后退,海水直逼村舍,大量房屋民居,海边坟墓被海水冲毁淹没,40~50年前人们经常行走的花岗岩基岩面道路现今已在海面以下,海水在当地花岗岩基岩面上相对升高约2 m,反映这些地方海岸地壳以平均每年约4 cm或更大些的速率下沉(徐起浩,1986) [96]。其后刘以宣(1994)在他的专著中对该地海岸的这种高速率(4 cm/a)下沉也进行了报导[97]。在我国海岸带已知发生7级以上地震有4个地方,除了上述两处外,另2处分别是1604年福建莆田海外乌丘屿附近的7.5级大地震,和现代黄河三角洲岸边附近的渤海湾3次7级以上大地震,莆田海外大地震震中位处台湾政权范围内,不方便调查,未能获得这次地震的海岸变化资料,其它三处海岸带大地震几乎都反映海岸具较大速率缓慢下沉。这种震后在极震区及附近海岸大速率持续缓慢下沉,由于现代形变测量在震区外围其他地方没有测到这样的高速率地壳形变,于是引起一些地理学家对这样的高速率地形变是否真实存在的怀疑,有的把这归因于其他各种原因造成。现代黄河三角洲的大速率形变也碰到相似的问题。实际上强地震后极震区及附近较长时间的高速率下沉,国外也曾有报导,如1862年在俄罗斯贝加尔湖色楞格河三角洲由于地震一大片三角洲平原三天内沉没到贝加尔湖水水面下,形成一个塌陷湾。地震后该地区还以较大幅度继续缓慢大幅度下沉,100年后湖湾水深达7.8 m,其深度比原来增大二倍(约增加4~5 m),并形成了一个被称为普罗瓦尔的大片新的塌陷湾[98]。

结合本文上面所述,认为现代黄河三角洲地表较大幅度沉降很可能主要是强地震构造活动的结果而不是主要沉积压实结果。

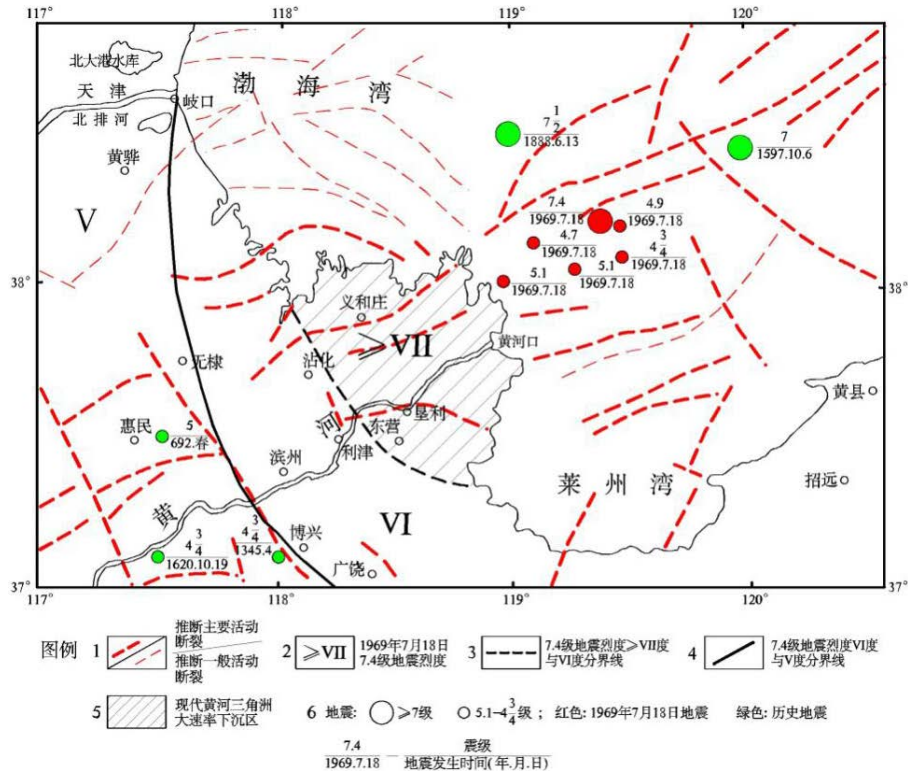


Figure 5. The faults, earthquakes and intensity of the earthquake in 1969 and the slow sinking area of bigger rate after the earthquake are distributed in Modern Huanghe Delta and Bohai Sea Bay [85] [90] [91]

图 5. 渤海湾与现代黄河三角洲断裂，地震与烈度分布及现代黄河三角洲大速率缓慢下沉区展示图。该图显示近期大速率缓慢下沉区与 1969 年渤海湾 7.4 级地震地表破裂最严重，沿岸烈度最高处范围很一致，表明该地区大速率下沉不是因为沉积压实，而可能主要是地震构造作用所致(据文献[85] [90] [91]综合编制)

4. 晚更新世中晚期以来滨海相沉积无明显压实作用

滨海相沉积压实理论模式(徐起浩, 2018)显示, 当相同沉积物孔隙水与外界相通, 无沉积外干扰因素存在时, 沉积体下部土柱孔隙度总是比上部土柱的小, 压实量总比上部的大[99]。已知土体单元(面积等于 1)体积、孔隙比、孔隙度压缩前分别为 h_0 、 e_0 、及 n_0 , 压缩后分别为 h 、 e 、及 n , 张凤英, 刘尚仁(1996)根据土柱压实前后不可压缩的骨架和孔隙体积变化的关系得出[18]

$$h_0 = h \frac{1-n}{1-n_0} \tag{1}$$

$$\Delta h = h \frac{n_0 - n}{1-n_0} \tag{2}$$

唐芬等(2004)由压缩变形 Δh 与孔隙比变化 Δe 的关系[100]得:

$$\Delta e = \frac{\Delta h}{h_0} (1+e_0) \tag{3}$$

若将(3)式孔隙比改用孔隙度表示, 并用 $\Delta h = h_0 - h$ 代入也得(2)式。

实际研究中有关压实各参数之间的关系式内, 主要参数中仅 n 是测得的已知值, 对应 n 的其余 3 个参数 n_0 , h_0 , h 都是难以测得的可变值, 以往的研究都是通过类似上述的设定或模拟获得。而设定或模拟

很难接近这些参数真实的多变的数值。这是压实计算中总是存在难以解决问题的重要原因。

(2)式可写成:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1-n_0}{1-n} \quad (4)$$

为研究方便,徐起浩(2018)提出公式(5),导入沉积压实度概念[99]:

$$\text{令 } K = 1 - \frac{h}{h_0} \quad (5)$$

K 即为沉积压实度,反映沉积压实量相对大小或压实程度,为无量纲值。 K 越大,压实量相对越大,压实程度越高。当 $K = 0$,压实量为0。显然 $1 > K \geq 0$ 。压实度 K 及(4)式直观地显示压实度 K 仅与初始沉积孔隙度 n_0 及沉积后至今孔隙度 n 有关。

将(4)式代入压实度 K 算式(5)得

$$n = \frac{n_0 - K}{1 - K} \text{可写成 } n = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 - K} \quad (6)$$

式(6)是徐起浩(2018)首次提出沉积物孔隙度 n 与沉积压实度 K 及初始沉积孔隙度 n_0 的相关公式[99]。

(6)式为简单关系式,第2项为负值,清楚显示,当 n_0 一定时,压实度 K 变大, n 值变小,这即是随着沉积厚度的增大,从浅至深按沉积压实理论模式的顺序沉积; K 变小, n 会变大,这即是随着沉积厚度的增大,从深至浅按沉积压实理论模式的顺序沉积;当 K 不变时, n_0 大, n 也大,反之亦然。关系式说明对于具相同初始孔隙度 n_0 的相同土,无论是压实度变大或变小都不会产生上部土柱孔隙度小于下部的情况。若令下伏土柱初始孔隙度为 n_{01} ,压实后的孔隙度为 n_1 ,压实度为 K_1 ,当 K_1 不变时,上覆土柱可能按关系式(6)以另一初始孔隙度 n_{02} 及压实度 K_2 沉积,当 $n_{02} < n_{01}$ 时,可能造成上覆土柱压实后的孔隙度 $n_2 < n_1$,反之亦然。可认为,只要无沉积外干扰因素,当出现下伏土柱孔隙度大于上覆土柱孔隙度时,下伏土柱一定处欠压实状态。这是滨海相沉积上覆沉积后未被再压实的重要标志。这是最新认识,具有定律意义。并且这种重要标志现象在沉积厚几十厘米就可能发生。通过随机搜集广东沿海8个工程场地58个钻孔191个土样相同钻孔相同命名土,及广东和国内其他有关地区不同场地共208个土样不同钻孔相同命名土孔隙度与分布深度比较,显示大约40m以浅或晚更新世中晚期以来滨海相沉积这种欠压实特征,这种重要标志现象,无论在垂向还是横向分布都是普遍的。说明滨海相沉积渗水性不好,具不良的泄水环境,在利用地表下40m以内,或晚更新世中晚期以来滨海相沉积研究古海平面及海岸地壳运动时,一般地可不考虑沉积压实的影响。这些研究成果对充实沉积学理论,对晚更新世中晚期以来的海平面研究,对海岸带的地壳运动,对海岸带古地震的研究具有重要意义。

笔者对晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实量研究结果也适合非滨海的内陆湖相及其他流水盆地沉积。

5. 讨论

本研究成果必然引出更新的研究课题,如研究中提出了随序发生的初始沉积压实,欠压实和再压实的沉积压实的3个阶段[99],怎样识别再压实作用?既然地表40m以下或晚更新世中晚期以来的滨海相沉积渗水性不好,无明显压实作用,那么愈往深处可能泄水环境更不好,那么愈往深处造成沉积物孔隙度缩小的主要原因是什么?是再压实?是胶结作用还是其它?怎样拿出证据?胶结作用一般在多大深度发生?大量抽取地下水会使地面下沉,认为是再压实的结果,是怎样再压实的?孔隙度是怎样变化的?等等。所有这些或其他问题的提出和解答,一定会推动沉积学更深度地发展。

6. 结论

距今 7500 a 左右的福建深沪湾海底古油杉森林和距今 15,000~25,000 a 的大片古牡蛎滩这两个珍贵的自然遗迹在今天深沪湾潮间带海底共存是世界上极其罕见的自然景观。它可能蕴含丰富的自然信息和一个时期内极其罕见的自然作用力和过程。对其研究和揭示,可能增进我们对地球科学一些方面的崭新认识。

多年来深沪湾的景观催生了笔者如下研究,并得出新的认识:

1) 对深沪湾的古气候进行了研究,结果认为距今 8000~7200 a 左右深沪湾的古气候比今天要凉些,使得古油杉森林当时能在比今天生长地区海拔更低的地方生长。钻孔孢粉还反映,距今(20,200 ± 510) a 当时深沪湾地区不是盛冰期时的寒冷气候,而是湿热气候,气温可能比今天还更温暖些。

2) 对东南沿海晚更新世中晚期以来的海平面变化进行了研究。指出距今 45,000 a 以来滨海相沉积是连续的,水动型海平面变化是渐进上升的。距今 21,000~15,000 a 的海平面相应在今天海拔约-8.2~-4.7 m 之间。设定滨海相沉积无沉积压实,论证场址距今 45,000 a 以来地壳稳定,提出了《广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线》。

3) 对深沪湾古地震和晚更新世中晚期以来的地壳运动进行了研究。研究揭示深沪湾距今大约 12,000 a 以来经受三次 7 级以上(有的可能达 8 级)大的古地震,使深沪湾经历由海变陆,由陆变海,又由海变陆,由陆变海的地壳形变和环境变化。揭示可能因为大古地震使沿岸龙湖内的原先古河流生成,以后又是因为大古地震使古河流被堵塞,形成今天的龙湖,前港湖等地震断塞湖。这是我国首次在海岸带地区发现晚更新世晚期和全新世强古地震。福建深沪湾古地震和地壳运动研究不仅对福建沿海,而且对同处东南沿海地震带的广东、广西、海南海岸带地区的地震研究及可能的震害预测都有一定意义。这些研究都结合利用了《广东中山石岐距今 45,000 a 以来的渐进上升水动型海平面变化曲线》。

4) 上述研究催生了对沉积压实量的研究。结果指出滨海相沉积具有不好的渗水性和不良的泄水环境。在利用滨海相沉积研究晚更新世中晚期以来的古海平面和地壳运动及古地震时一般可不考虑沉积压实变化。首次建立了沉积物沉积后孔隙度 n 与压实度 K 及初始沉积孔隙度 n_0 的理论关系式,指出在正常沉积情况下当出现下伏土柱孔隙度大于上覆土柱孔隙度时,下伏土柱一定处欠压实状态。这是滨海相沉积上覆沉积后未被再压实的重要标志。这是最新认识,它具有定律意义。本文还指出现代黄河三角洲的大速率缓慢下沉不是由沉积压实造成,而可能主要是由地震构造作用造成。

致 谢

课题研究得到了广东省地震局离退休老干处何景琳处长的大力支持和帮助,审稿专家提出了宝贵意见,深表感谢。

基金项目

中国地震局 2018 年老专家科研基金(2018-05)。

参考文献

- [1] Wikipedia (2017) Talk: Compaction (Geology). [https://en.wikipedia.org/wiki/talk:compaction\(Geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/talk:compaction(Geology))
- [2] Athy, L.E. (1930) Density, Porosity, and Compaction of Sedimentary Rocks. *AAPG Bulletin*, **14**, 1-24. <https://doi.org/10.1306/3D93289E-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- [3] Bahr, D., Hutton, E.W.H., Syvitski, J.P.M., et al. (2001) Exponential Approximations to Compacted Sediment Porosity Profiles. *Computers & Geosciences*, **27**, 691-700. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00140-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00140-0)
- [4] Brain, M.J., Kemp, A.C., Hawkes, A.D., et al. (2017) Exploring Mechanisms of Compaction in Salt-Marsh Sediments

- Using Common Era Relative Sea-Level Reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, **167**, 96-111. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.027>
- [5] Brain, M.J., Kemp, A.C., Horton, B.P., Culver, S.J., Parnell, A.C. and Cahill, N. (2015) Quantifying the Contribution of Sediment Compaction to Late Holocene Salt-Marsh Sea-Level Reconstructions, North Carolina, USA. *Quaternary Research*, **83**, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.08.003>
- [6] Cahoon, D.R., Reed, D.J. and Day Jr., J.W. (1995) Estimating Shallow Subsidence in Microtidal Salt Marshes of the Southeastern United States: Keye and Barghoorn Revisited. *Marine Geology*, **128**, 1-9. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00087-F](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00087-F)
- [7] Tornqvist, T.E., Wallase, D.J., Storms, J.E.A., Wallinga, J., van Dam, R.L., Blaauw, M., et al. (2008) Mississippi Delta Subsidence Primarily by Compaction of Holocene Strata. *Nature Geoscience*, **1**, 173-176. <https://doi.org/10.1038/ngeo129>
- [8] Brain, M.J. (2016) Past, Present and Future Perspectives of Sediment Compaction as a Driver of Relative Sea Level and Coastal Change. *Current Climate Change Reports*, **2**, 75-85. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0038-6>
- [9] Teatini, P., Tosi, L. and Strozzi, T. (2011) Quantitative Evidence That Compaction of Holocene Sediments Drives the Present Land Subsidence of the Po Delta. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **116**, B08407. <https://doi.org/10.1029/2010JB008122>
- [10] Galvin, C. (2001) Apparent Sea-Level Rise Caused by Sediment Compaction. *GSA Annual Meeting*, Boston, 5-8 November 2001, Paper No.41-0.
- [11] Horton BP, and Shennan, I. (2009) Compaction of Holocene Strata and the Implications for Relative Sea-Level Change on the East Coast of England. *Geology*, **37**, 1083-1086. <https://doi.org/10.1130/G30042A.1>
- [12] Lambeck, K. and Johnston, P. (1995) Land Subsidence and Sea-Level Change: Contributions from the Melting of the Last Great Ice Sheets and the Isostatic Adjustment of the Earth. In: Barends, F.B.J., Ed., *Land Subsidence*, Balkema, Rotterdam, 3-18.
- [13] Higgins, S.A., Overeem, I., Steckler, M.S., et al. (2014) InSAR Measurements of Compaction and Subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **119**, 1768-1781. <https://doi.org/10.1002/2014JF003117>
- [14] Shi, X., Fang, R., Wu, J., Xu, H., Sun, Y. and Yu, J. (2012) Sustainable Development and Utilization of Groundwater Resources Considering Land Subsidence in Suzhou. *China Engineering Geology*, **124**, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.10.005>
- [15] Higgins, S., Overeem, I., Tanaka, A. and Syvitski, J.P.M. (2013) Land Subsidence at Aquaculture Facilities in the Yellow River Delta, China. *Geophysical Research Letters*, **40**, 3898-3902. <https://doi.org/10.1002/grl.50758>
- [16] Osmanoglu, B., Dixon, T.H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. and Jiang, Y. (2011) Mexico City Subsidence Observed with Persistent Scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>
- [17] Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. and Hong, S.-H. (2013) Sinking Cities in Indonesia: ALOS PALSAR Detects Rapid Subsidence Due to Groundwater and Gas Extraction. *Remote Sensing of Environment*, **128**, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- [18] 张文英, 刘尚仁. 沉积压实量分式及其在研究海面高度中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(增刊): 39-44.
- [19] 杨建明. 海平面变化研究中沉积物压实量的估算[J]. 台湾海峡, 1988, 7(4): 382-388.
- [20] 王绍鸿. 建立海平面变化曲线的若干问题[J]. 台湾海峡, 1990, 9(4): 301-308.
- [21] 师长兴, 尤联元, 李炳元, 等. 黄河三角洲沉积物的自然固结压实过程及其影响[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 175-181.
- [22] 高茂生, 薛春江, 叶思源. 现代黄河三角洲沉积压实下沉的计算分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 34-39.
- [23] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982: 1-274.
- [24] 陈伟光, 赵红梅, 常郁, 等. 珠江三角洲晚第四纪垂直构造运动速率[J]. 地震地质, 2001, 23(4): 527-536.
- [25] 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 113-114.
- [26] 刘琳琳, 张金功, 吴春燕. 砂泥岩埋藏过程孔隙度演化特征探讨[J]. 地下水, 2016, 38(1): 186-189.
- [27] 许红昆, 林畅松. 沉积物压实的一种校正方法[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 366.
- [28] 高国瑞. 近代土质学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2013: 1-292.
- [29] Greensmith, J.T. and Tucker, E.V. (1986) Compaction and Consolidation. In: van de Plassche, O., Ed., *Sea-Level Re-*

search: A Manual for the Collection and Evaluation of Data, Springer, Dordrecht, 591-603.

https://doi.org/10.1007/978-94-009-4215-8_22

- [30] 徐起浩. 由滨海相沉积样品反映的东南沿海海岸升降速率[J]. 华南地震, 2001, 21(1): 6-13.
- [31] 徐起浩, 彭承光, 王业新, 李运贵, 冯炎基. 关于沉东京传说的史学、社会学和地学的综合考辨[J]. 泉州文史, 1989(10): 53-64.
- [32] 徐起浩. 我国福建深沪湾海底古森林残迹的首次发现[J]. 科学通报, 1987(21): 1650-1653.
- [33] 徐起浩, 冯炎基. 福建深沪湾海底古森林及晚更新世牡蛎礁遗迹介绍[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 344-345.
- [34] 徐起浩. 福建深沪湾又发现两大片海底古森林遗迹[C]//中国地震学会第七次学术大会论文摘要集. 北京: 地震出版社, 1998: 74.
- [35] 徐起浩, 冯炎基. 深沪湾古森林淹没海底前生长的古凹陷环境[J]. 南京师大学报, 自然科学版(应用第四纪专集), 2000, 23(4): 164-169.
- [36] Xu, Q.-H. and Feng, Y.-J. (2002) The Paleo-Depression Environment at Shenhuwan Bay before Submergence of the Paleo-Forest Grew There. *Journal of Natural Science Nanjing Normal University*, 4, 66-73.
- [37] 徐起浩. 深沪湾新发现的海底古森林遗迹分布及植物学、年代学特征[J]. 海洋科学, 2001, 25(2): 46-49.
- [38] 王绍鸿, 唐丽玉, 赵希涛. 福建深沪湾海底林的测量与新进展[J]. 第四纪研究, 1999, 19(5): 477.
- [39] 刘剑秋, 林文群, 赵希涛, 等. 福建深沪湾海底古森林遗迹的新发现及其环境意义[J]. 科学通报, 2003(13): 1449-1451.
- [40] 王明亮, 许志峰, 洪阿实. 深沪湾古森林遗迹和牡蛎礁的 ^{14}C 年代[J]. 台湾海峡, 1991, 10(1): 101-102.
- [41] 徐起浩, 冯炎基, 杜文树. 福建深沪湾发现晚更新世牡蛎贝壳海滩岩[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(4): 38.
- [42] 徐起浩. 福建深沪湾晚更新世古牡蛎滩的发育与留存古环境[J]. 海洋科学, 2002, 26(4): 58-62.
- [43] 徐起浩, 叶秀薇, 华卫, 等. 福建深沪湾晚更新世沉积、古环境和地壳形变[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 66-84.
- [44] 俞鸣同, 王绍鸿, 赵希涛. 福建深沪湾牡蛎礁的测量与研究新进展[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 568.
- [45] (美)J. 肯尼特. 海洋地质学[M]. 成国栋, 谢继哲, 许东禹, 等, 译. 北京: 海洋出版社, 1982: 197-211.
- [46] 姚庆元. 福建深沪湾古森林遗迹和牡蛎礁发现的古地理意义[J]. 台湾海峡, 1988, 7(3): 299-301.
- [47] 张士三, 周秋麟, 何明海, 邵合道. 福建深沪湾古森林及牡蛎礁遗迹及其保护的意義[J]. 海洋与海岸带开发, 1991(4): 34-37.
- [48] 唐丽玉, 王绍鸿. 深沪湾-福建海岸演化的信息库[J]. 福建地理, 1999, 14(1): 5-8.
- [49] 陈斯盾, 陈润生, 石建基, 等. 福建深沪湾古生物奇观成因研究[J]. 福建地质, 2006, 25(3): 1-131.
- [50] 方世明, 李江凤, 李丹阳. 福建深沪湾地学旅游资源及其科学价值评价[J]. 海洋科学, 2006, 30(3): 35-40.
- [51] 张明书, 李绍全, 刘健. 中国海岸带晚第四纪地质研究中的问题与进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(3): 61-67.
- [52] 蔡爱智. 晚全新世以来的中国海岸沙滩与风沙[M]//陈富斌. 中国应用第四纪研究——全国第一届应用第四纪学术会议论文集. 成都: 科技大学出版社, 1996: 117-121.
- [53] 张明书, 刘守全, 李绍全. 福建深沪湾晚更新世湖泊-冲洪积地层序列的发现及其意义[J]. 中国地质, 1998(9): 23-25.
- [54] 邵合道, 吴根耀. 福建中南部全新世的森林——牡蛎礁遗迹[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 299.
- [55] 王绍鸿, 俞鸣同, 唐丽玉, 等. 福建深沪湾海底古森林遗迹分布区全新世自然环境演变[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 352-358.
- [56] 俞鸣同, 藤井昭二, 坂本亨. 福建深沪湾牡蛎礁成因分析[J]. 海洋通报, 2001, 20(5): 24-30.
- [57] 王绍鸿, 俞鸣同, 唐丽玉. 福建深沪湾潮间带全新世有孔虫及其环境意义[J]. 台湾海峡, 2002(1): 6-11.
- [58] 俞鸣同, 黄向华. 福建深沪湾潮间带沉积介体及其成因初探[J]. 海洋科学, 2003, 27(12): 42-44.
- [59] 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): 2647-2654.
- [60] 袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 1-13.
- [61] 余素华. 东南沿海环境变迁与区域可持续发展福建晋江现场学术研讨会在福建晋江召开[J]. 地球化学, 2008, 37(5): 519.

- [62] 张路, 曲国胜. 福建东南沿海第四纪盆地构造沉降[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3): 633-643.
- [63] 汪卫国, 叶翔. 福建晋江龙湖中晚全新世沉积的环境意义[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 348-354.
- [64] 范雪春, 吴金鹏, 黄运明, 等. 福建晋江深沪湾潮间带旧石器遗址[J]. 人类学学报, 2011(3): 209-306.
- [65] 何耀堂. 福建泉州湾全新世海滩岩及物源环境分析[J]. 福建地质, 2014, 33(2): 112-117.
- [66] Xu, Q.H. and Huang, Z.G. (1993) Elevation Distribution of Littoral Facies Sediment during the Culmination of the Latest Ice Age and Earthquakes in Southeast China Coast with Calling of the Viewpoint of the Lowest Global Sea Level -100 m into Question. *Scientia Geologica Sinica*, 2, 369-378.
- [67] 徐起浩, 黄镇国. 东南沿海末次盛冰期古海平面标志与地震关系——100 m 以下最低海平面问题质疑[J]. 地震地质, 1995, 17(2): 149-157.
- [68] 徐起浩. 最末盛冰期-100m 以下最低海平面质疑[J]. 海洋科学, 1996(5): 68-69.
- [69] 徐起浩. 存在最末盛冰期-100m 以下最低海平面吗?——从深沪湾古牡蛎贝壳海滩岩的发现谈起[C]//中国第四纪研究委员会, 中国第四纪科学研究会应用第四纪专业委员会, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院地质研究所. 中国应用第四纪研究. 全国第一届应用第四纪学术会议论文集. 成都: 科技大学出版社, 1996: 46-49.
- [70] 徐起浩. 存在最末盛冰期-100m 以下最低海平面吗[J]. 地球, 1996(2): 4-5.
- [71] 徐起浩, 冯炎基. 广东中山晚更新世最早海浸层与水动型海平面变化[J]. 地震地质, 1997, 19(1): 91-95.
- [72] 徐起浩, 冯炎基. 深沪湾晚更新世以来的古气候、古海平面与地壳升降运动[J]. 台湾海峡, 1990, 9(3): 231-238.
- [73] 丁祥焕, 王耀东, 叶盛基. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1998: 1-223.
- [74] Dennon, G.A., et al. (1973) Holocene Climatic Variations-Pattern and Possible Cause. *Quaternary Research*, 3, 155-205. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(73\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(73)90040-9)
- [75] 施少华. 中国全新世高温期中的气候突发事件及其对人类的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(4): 65-73.
- [76] 徐起浩, 冯炎基, 施建生. 导致古森林沉没于海的福建深沪湾古地震研究[J]. 地震地质, 2001, 23(3): 367-380.
- [77] 徐起浩, 冯炎基, 施建生. 福建深沪湾海底古森林与全新世强古地震[J]. 国际地震动态, 2002(1): 8-10.
- [78] 徐起浩, 冯炎基, 施建生. 福建深沪湾地区晚更新世中晚期以来的地壳运动[J]. 地震地质, 2002, 24(1): 111-123.
- [79] 徐起浩, 冯炎基, 施建生. 福建深沪湾晚更新世古牡蛎滩与晚更新世中晚期以来的地壳运动[J]. 国际地震动态, 2002(1): 11-14.
- [80] 徐起浩, 施建生. 晋江龙湖湖盆古凹陷内古河流形成与消亡及与地震关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 53-63.
- [81] 林文群, 刘剑秋, 赵希涛. 福建晋江深沪湾海底古森林群落类型的初步研究[J]. 地质科学, 2001, 36(4): 492-493.
- [82] 徐起浩, 叶秀薇, 邓荣佐, 等. 晚更新世中晚期以来的滨海相沉积不存在沉积压实作用[C]//中国地震学会第九次学术大会论文摘要集. 北京: 地震出版社, 2002: 39.
- [83] 徐起浩, 施建生, 聂树民, 等. 福建晋江市前港湖、龙湖、虬湖等的地震堵塞成因研究[J]. 国际地震动态(中国地震学会第十次学术大会论文摘要专集), 2004(6): 27.
- [84] 徐起浩, 施建生. 福建晋江市前港湖, 龙湖等四湖泊的成因机理[J]. 地震地质, 2012, 34(1): 110-128.
- [85] 别君, 黄海军, 樊辉, 等. 现代黄河三角洲地面沉降及其原因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 29-35.
- [86] 秦伟颖, 庄新国, 黄海军. 现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(1): 38-43.
- [87] 徐杰, 高战武, 孙建宝, 等. 1969 年渤海 7.4 级地震区地质构造和发震构造的初步研究[J]. 中国地震, 2001, 17(2): 123-133.
- [88] 刘西林, 申旭华. 山东沿黄河断裂带的地震地质特征[J]. 华北地震科学, 1993, 1(3): 55-61.
- [89] 苗庆杰, 周翠英, 马玉香, 苗春兰, 李霞, 刘霞. 1969 年渤海 7.4 级地震研究述评[J]. 华北地震科学, 2010, 28(1): 8-15.
- [90] 季同仁, 刘元生, 王安岳. 1969 年 7 月 18 日渤海 7.4 级地震[M]//张肇诚. 中国震例. 北京: 地震出版社, 1988: 19-40.
- [91] 陈锦泰, 蔡全利, 许坤福, 等. 山东地震构造[M]//马杏元. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989: 42.

- [92] 郭钦华, 丁原章, 李群. 1605 年琼山地震的烈度问题[M]//丁原章, 李坪, 时振梁. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 1988: 249-258.
- [93] 徐起浩. 海南岛北部东寨港的形成、变迁与 1605 年琼州大地震[J]. 地震地质, 1986, 8(3): 92-96.
- [94] 徐起浩. 1605 年琼州大地震陆陷成海和可能的海啸[J]. 海洋学报, 2007, 29(3): 146-156.
- [95] 徐起浩. 琼北东寨港地区的近期下沉[J]. 海洋科学, 1986, 10(1): 24-28.
- [96] 徐起浩, 彭承光, 李运贵. 南澎列岛及其附近海域、岛屿的地震地质特征[J]. 华南地震, 1986, 6(3): 29-36.
- [97] 刘以宣. 南海新构造与地壳稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [98] O. K 列昂节夫. 海岸与海底地貌学[M]. 王乃梁, 等, 译. 北京: 中国工业出版社, 1955.
- [99] 徐起浩. 无明显压实的滨海相沉积孔隙度识别及其机理与意义[J]. 沉积学报, 2018, 36(6): 1091-1104.
- [100] 唐芬, 唐德兰. 土力学与地基基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 7-135.