

渤海湾全新世贝壳堤与牡蛎礁:古气候与海面变化

王 宏¹, 陈永胜^{1,2}, 田立柱¹, 李建芬¹, 裴艳东¹, 王 福¹,
商志文¹, 范昌福³, 姜兴钰¹, 苏盛伟^{1,2}, 王海峰^{1,4}

WANG Hong¹, CHEN Yong-sheng^{1,2}, TIAN Li-zhu¹, LI Jian-fen¹,
PEI Yan-dong¹, WANG Fu¹, SHANG Zhi-wen¹, FAN Chang-fu³,
JIANG Xing-yu¹, SU Sheng-wei^{1,2}, WANG Hai-feng^{1,4}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

1. *Tianjin Center of China Geological Survey (CGS), Tianjin 300170, China;*

2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;*

3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要:讨论了早全新世晚期以来渤海湾西岸贝壳堤平原成堤、西北岸牡蛎礁平原(及毗邻浅海区)建礁过程的同步性特征和气候变化与这一特征之间的关系,以及堤、礁记录的相对海面变化。堤、礁大致同时发育,可分为 6 期,依次分别被寒冷事件 5、4、3、2 和 1 分隔。堤底板前、后缘高差大致对应 3m 的大潮差、礁顶板大致对应海平面。据二者分别重建了南部贝壳堤平原、北部牡蛎礁平原的相对海面变化:南部自 7ka cal BP 以来基本与现代海平面等高,小的波动在±1m 之间,压实固结作用抵消了中全新世的相对高海面;北部中全新世的相对海平面位置因新构造和固结压实双重下沉作用的影响,已位于现代海平面 2~3m 以下。

关键词:贝壳堤;牡蛎礁;气候变化;相对海面变化;渤海湾

中图分类号:P534.63⁺2; P736

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)09-1405-07

Wang H, Chen Y S, Tian L Z, Li J F, Pei Y D, Wang F, Shang Z W, Fan C F, Jiang X Y, Su S W, Wang H F. Holocene cheniers and oyster reefs in Bohai Bay: palaeoclimate and sea level changes. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(9): 1405-1411

Abstract: This paper deals with the synchronous characteristics of cheniers existing on the Chenier Plain along the west coast of Bohai Bay and oyster reefs existing on the Oyster Reef Plain of northwest Bohai Bay and its adjacent shallow sea. Approximately, such synchronous processes can be separated into six periods, alternately intercalated with the Holocene cold events of 5, 4, 3, 2 and 1. The vertical range between front-foot and rear-base of the chenier-bottom corresponds to the vertical 3m contemporaneous high tidal range, and the reef top approximately reflects the MSL (mean sea level). Since 7ka cal BP, the relative sea level trend in the Chenier Plain has been quite similar to the present situation, with possible small fluctuations being less than ±1m. The Mid-Holocene high stand of the relative sea level was offset by sedimentary consolidation. However, under the joint influences of neotectonic subsidence and consolidation, the relative MSL was 2~3m below the present sea level on the Oyster Reef Plain.

Key words: cheniers; oyster reefs; climate change; relative sea level change; Bohai Bay

收稿日期:2011-03-18;修订日期:2011-07-12

资助项目:国家自然科学基金项目《海面升高与气温上升的耦合与非耦合关系》(批准号:40742011)、《渤海湾西北岸埋藏牡蛎礁记录的中全新世古环境变化》(批准号:40872106)和中国地质调查局项目《泥质海岸带对全球变化的响应与趋势预测》(编号:1212010911069)

作者简介:王宏(1948-),男,博士,研究员,从事泥质海岸带第四纪地质学研究。E-mail: whong@cgs.cn

根据对渤海湾贝壳堤与牡蛎礁的时空分布、沉积学特征和作为海面变化标志点研究的最新认识(本期苏盛伟等、王海峰等的文章),本文尝试进一步探讨贝壳堤与牡蛎礁之间的关系,以及古气候变化对二者的控制作用和全新世相对海面变化。

1 堤、礁对比

作为不同的地质体,贝壳堤主要分布于渤海湾西岸的贝壳堤平原,而牡蛎礁则位于西北岸的牡蛎礁平原和毗邻的浅海区。但是,它们毕竟共存于渤海湾海岸带这一相对较小的地域内,又均形成于全新世,二者应具有内在的可比性。多年来,堤、礁对比的尝试一直在进行之中^{[1]①②}。本文以研究小组的积累

为基础,再次将堤、礁和与它们相间的泥质沉积过程加以对比(表 1)。

贝壳堤被视为岸线稳定、停顿时的产物。牡蛎礁发育时,附近岸线同样是稳定的。礁体被厚层的泥质沉积覆盖,代表沿岸流及随后的陆源泥砂供给充足、沉积作用强盛或河流改道,总之是非稳定时期。就这一点而言,堤与礁二者具有同时性。这一认识,是下文讨论气候变化对堤、礁发育的可能控制作用的基础。

2 堤、礁与全新世气温变化的关系

近一二十年来,国内外对全新世气候变化的研究不断深入^[3-12]。在北大西洋发现了全新世的 9 次气

表 1 贝壳堤、牡蛎礁的对比及其与泥质沉积过程的关系
(按时间的发展顺序:由下向上)(据参考文献[1]中表 4 修改)

Table 1 Comparison between cheniers and oyster reefs and in relation to muddy sedimentation processes

阶段	亚阶段	贝壳堤平原		牡蛎礁平原	
		贝壳堤(岸线停顿)	泥质盖层扩展(岸进)	牡蛎礁(岸线停顿)	泥质盖层扩展(岸进)
I	a: 序幕	老贝壳堤前的海滩上再次发育贝类席状体,新的 I a 阶段复又开始		河口、潮间带和浅海区上部再次出现建礁“初始阶段”1 和 2,新的 I a 阶段复又开始	
II: 泥层形成期	堤、礁停止发育	堤前滩面和堤后泻湖-盐沼被泥质沉积充填,堤停止发育,老的堤(V、IV 及部分 III 堤)甚至被泥层覆盖; I 堤向上发育风成沙丘		被潮间带上部泥砂质沉积、继而泻湖-盐沼泥层覆盖,礁体死亡	
I: 堤礁形成期	c: 建造与次级波动	进一步向上堆积更粗的贝屑、单瓣贝壳,形成岛(堤)的中部-上部环境		堤内多次出现次级停顿:发育土壤层或风暴夹层	
	b: 初期	贝壳及其碎屑被波浪、潮流筛选并堆积成水下线形沙坝-障壁岛		礁内多次出现了次级停顿:发育水平夹层	
	a: 序幕	潮间带和浅海区贝类繁盛,形成(与泥混杂的)表层贝类席状体		形成凸起的礁体	
				出现礁体雏形	
				河口、潮间带和浅海区上部出现牡蛎个体并逐渐增多:“初始阶段”1 和 2 (据文献 [2] 中的图 6)	

(1) 此处所引的年龄,均为原作者已校正的太阳历纪年数值。本文引用的其他作者的历史文献中的公元纪年年龄,为与放射性碳校正年龄对比,按公元 1950 年为起算点做了折算,例如 1050BC 折算为 3000cal BP 或 3ka cal BP

温下降事件,分别是 11.1ka⁽¹⁾/事件 8、10.3ka/事件 7、9.5ka/事件 6、8.2ka/事件 5、5.9ka/事件 4、4.3ka/事件 3、2.8ka/事件 2、1.4ka cal BP/事件 1 和约 300 年前的“小冰期”(注:对(1)的注释见前页注脚处)。有中国研究者认为,事件 2 在渤海湾西岸所在的中国东北部发生的时间早约 200 年,当在公元前 10 世纪^[13]或 1050~950BC 间^[6]。本文统一表述为 3~2.9ka BP。

贝壳堤和牡蛎礁的发育,可约略分为 6 期(图 1)。

- 1 期:8.2~7.6ka cal BP,牡蛎礁群 Pre-I-1;
- 2 期:7.7~7.6ka cal BP,礁群 I;
- 3 期:7~6.1(5.8)ka cal BP,包括贝壳堤 V,礁群 II、II-1、II-2 和 IV;
- 4 期:5.7~4.2ka cal BP,包括贝壳堤 IV,礁群 III 及 III-1;
- 5 期:2.8~1.8ka cal BP,包括贝壳堤 II 及 II-1、II-2,礁群 V、V-1、VI 和 VII;
- 6 期:1.3~0.3ka cal BP,包括贝壳堤 S-T、I 及 I-1、I-2,礁群 VIII。

8.2ka cal BP 事件 5 之后,在海面上升过程中发育了 1 期的 Pre-I-1 礁群。

在 7.7~7.6ka cal BP,海侵达到最大边界,形成 2 期的牡蛎礁平原东老口礁群 I。堤、礁起讫端员常有 100~200 年(?)的误差,详见后边“讨论”一节。下文在论及同样内容时,不再赘述。此时正值 MWP2^[14]。

稍早于 7ka 至约 6ka cal BP 前后,形成了第 3 期:此时贝壳堤平原出现迄今发现的最老的东孙村

V 堤。当与牡蛎礁对比时,暗示着在其西侧发现与东老口相当的属于 2 期的贝壳堤的可能性。

3 期和接下来的 4 期、5 期、6 期,分别被时间为 5.9ka 的事件 4、4.4~3.8ka 的事件 3、3~2.9ka 的事件 2 和 1.4ka 的事件 1 分隔,6 期之后是“小冰期”(图 1)。寒冷事件 1,即中国的魏晋南北朝冷期,为 1.68~1.4ka cal BP (270~550AD),平均气温较今低 0.5~1.2℃^[5-6]。这一持续 300 年左右的寒冷事件恰好隔开了第 5 和第 6 堤/礁的发育期(图 1)。

自早全新世晚期(约 8.2ka cal BP)以来,渤海湾西岸贝壳堤平原和西北岸牡蛎礁平原似乎表现出同时发育堤、礁的岸线停顿和同时出现泥质沉积作用的岸线推进的交替特征(图 1)。

3 堤、礁海面变化标志点

沿岸堤、沉积贝壳层和牡蛎层是重建海面变化的标志点(sea-level index points)^[15]。近年来,并非精确的重建海面变化的研究中有关于密西西比河海岸带和欧洲地区较新的报道^[16-17]。渤海湾全新世贝壳堤和牡蛎礁被视作海面变化标志点,也已有 30 余年的研究史^[18-19]③。近年来,根据贝壳堤和牡蛎层重建海区、长江三角洲和华南沿海全新世海面变化的新成果断续发表^[20-24]。但是,渤海湾海岸带贝壳堤、牡蛎礁的海面变化标志点研究,自 1990 年代以来至今仍少有新的成果。本文拟在 2 篇论文(苏盛伟等、王海峰等)的基础上,尝试作新的探讨。

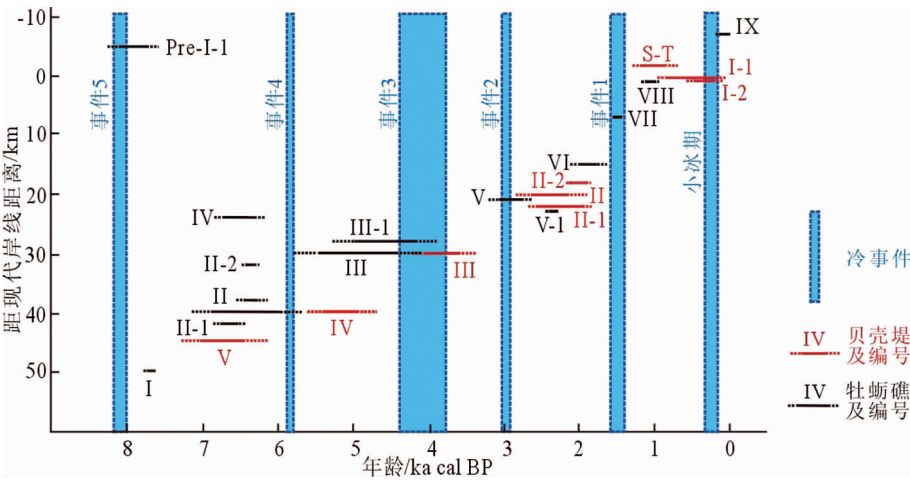


图 1 早全新世晚期以来贝壳堤、牡蛎礁时空分布及其被寒冷事件^[19]分隔的示意图

Fig. 1 Sketch diagram showing temporal and spatial distribution of cheniers and oyster reefs, separated by the cold events

贝壳堤和牡蛎礁能够作为海面变化标志点的属性(indicative meaning)包括 2 点:确定本身的高度误差(indicative range)和确定与当时海面的关系(reference water level)^[15,25]。类似的认识存在于大量的文献之中^[14,26]。

(1)贝壳堤:根据本期苏盛伟等的研究成果,堤底板前、后缘高差或依实测,或在仅 1 个数据时依前、后缘高差经验值 1m 作误差校正,由此获得了按统一标准建立的底板高程图(图 2-A;以粗线框表示)。但是,重建堤与当时海面的关系还要再作进一步的误差校正,补足至 3m(±1.5m)的垂直范围,以恢复当时大潮位的垂直范围(图 2-A;以细线框表示)。

(2)牡蛎礁:鉴于实测获得的地区性礁体顶板的最大起伏幅度是 1.4m,而其所代表的海平面与大潮高潮位之间的垂直幅度是约 1.5m,二者大致相同,因此在将礁顶起伏误差统一校正至±0.7m 后,可近似地认为已对应当时的海平面(见本期王海峰等的文章)。除了大吴庄礁体顶部有多个年龄(王海峰等文章的表 1、表 2 及脚注①),其它礁体顶部均仅以单一年龄表示(图 2-B),因此不能像贝壳堤底板那样(图 2-A)以时间-深度方框表示。

4 海面变化

以 Clark 等^[27-28]、Peltier^[29-30]、Lambeck 等^[31-32]的研究为基础,全新世水动型海面变化(eustatic sea level change)、冰均衡与水均衡调整(ice-isostatic and hydro-isostatic adjustments)、相对海面(relative sea level, RSL)变化的研究近年来又有大量新的成果。基于冰融水海面上升(ice-equivalent sea level rise, ice-equivalent eustatic sea level rise)、冰均衡和水均衡的晚更新世—全新世 RSL 变化预测(prediction)、实际观察到的(observation)海面位置的对比,使区分水均衡和新构造升降成为可能^[14,33-37]。

稍早的推测认为,大规模的冰盖融化在中全新世结束^[27-29]。但是,关于中晚

全新世是否仍有小的融化的探索,在野外调查^[14,37]和冰川模型研究^[32]2 个方面一直未停止。一种推测认为,“远区”的水动型海面在中全新世时达到现在的高度,随后因停止了大规模的冰盖融化,水动型海面保持不变直至现代^[27,29]。另一种推测是,中全新世以来因冰盖少量融化而仍有小的海面上升^[32-33]。Jansen 等^[10]认为,过去 2ka 以来的全球冰融水折合成海面上升量是 0~0.2mm/a,英国研究者将这一速率应用于整个晚全新世 4ka 以来^[37]。换言之,过去 4ka 以来的海面因少量的冰融水上升了约 0~80cm。

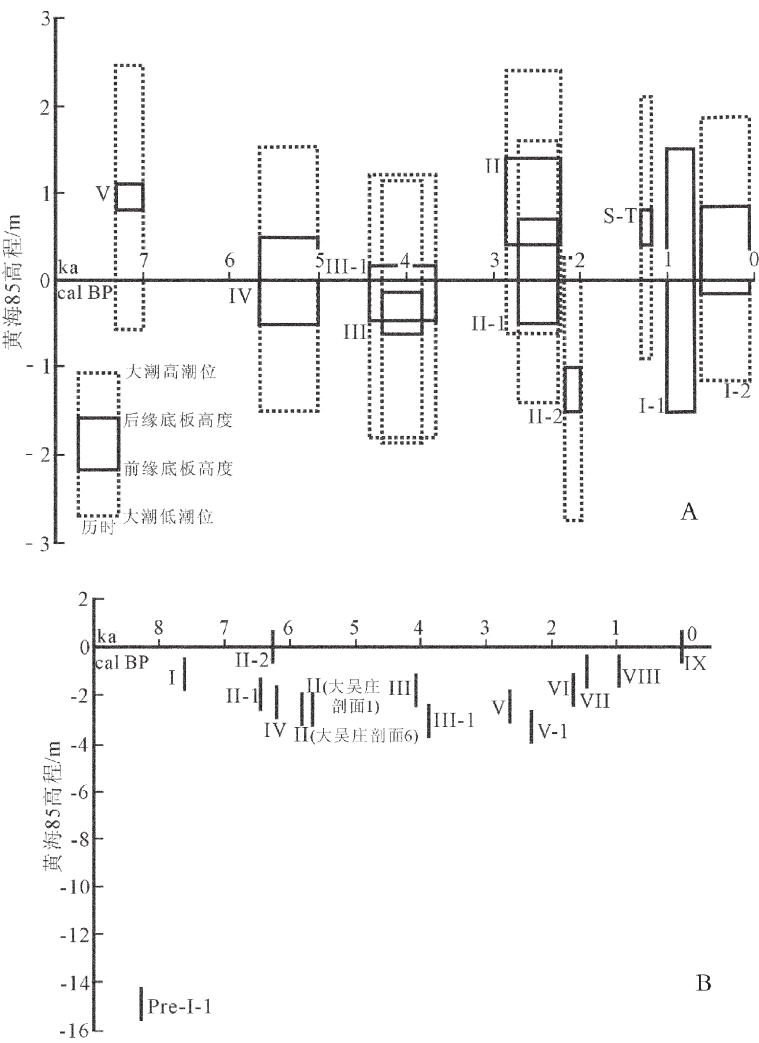


图 2 贝壳堤平原贝壳堤底板作为海面变化标志点的时空分布图 (A) 与牡蛎礁平原牡蛎礁顶板作为海面变化标志点的时空特征 (B)

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of the chenier-bottoms as sea level indicators, Chenier Plain (A) and temporal and spatial characteristics of the oyster reef-tops as sea level indicators, Oyster Reef Plain (B)
(唯一的例外是礁体 Pre-I-1:其中上部年龄已与礁群 I 重叠,暗示只有底部才可能反映海平面的位置,参见本期王海峰等的文章)

按照 Clark 和 Peltier 的水均衡模型,渤海湾所在的“远区”的 RSL 在中全新世形成明显的峰值,即尽管水动型海面高度在中全新世时已与现在相同,但均衡补偿导致的大陆边缘掀升使 RSL 自那时以来上升了约 2m。中全新世以来若仍有少量冰融水进入洋盆,则 RSL 高海面长期相对稳定,直至近千年间才逐渐接近现代海平面^[14]。但是,无论是哪一种冰盖融化理论,对于渤海湾西岸所在的“远区”而言,均认为均衡调整造成中全新世以来约 2m 的向上掀斜(tilting),即中全新世时的 RSL 高海面大约在+2m 处。相反,新构造沉降与沉积物自身压实造成的地面下沉则使 RSL 的高度下降。

图 2-A 显示,自 7ka cal BP 以来,贝壳堤平原相对大潮差波动幅度小于 1.5m。总体上,仍遵循全新世中期 RSL 曲线因均衡掀升至+2m、随后缓慢下降的格局。在 7~3.5ka 期间,相对大潮差位置稍低于“远区”RSL 下降趋势范围。进入全新世后,作为贝壳堤平原基底的沧州隆起与黄骅坳陷的差异性构造活动趋于平静^[38]。因此,推测 7~3.5ka 时沉积物固结下沉作用较为明显,速率达到 0.3~0.5mm/a。4.3~3.8ka、2.2~2ka 时,相对大潮差位置略有下降。

若无新构造下沉和固结下沉,牡蛎礁平原代表中全新世相对海平面高度的各礁群(Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ)礁顶,因均衡掀斜作用应位于约+2m 的高度,晚全新世礁体顶部的位置亦应在 0 m 上下。但是,图 2-B 显示 6ka 前后的礁顶位在-2~-3m 之间,比中全新世均衡作用导致的相对海平面高度低了 4~4.5m。该平原中部分布着 NWW—SEE 方向、断面南倾的汉沽断裂^{④⑤}。一般而言,正断层上盘接近断裂面表现为相对更强一些的构造下沉。因此,凡位于上盘接近断裂面处的礁体,其礁顶高度更低一些^[39]。从 4~4.5m 中扣除沉积物固结压实作用(按 0.5mm/a,见上),尚有 1~1.5m 应为构造下沉所致,下沉速率为 0.17~0.25mm/a。

5 讨 论

5.1 各种误差对重建堤、礁与古气候的关系和海面变化的影响

(1)以往文献提供的高度值不一定完全经过水

准测量,有些可能仅能从图上查得,笔者研究小组自身的水准测量要与过去近 20 年间不同行政区域的、不同高程系统的水准点联测,钻探取心误差⁽²⁾(注:对(2)的注释见本页注脚处)等,凡此种种,很可能造成分米级甚至米级的误差。这与在厘米级精度水平上的研究^[26,35,37]相去甚远。今后,笔者计划进行贝壳堤平原、牡蛎礁平原所有研究地点的 RTK 水准测量,建立统一的高程系统。另外,在目前研究精度仅为分米级(甚至米级)水平时,笔者认为上述高度误差大致可被重建当时的海面位置的误差——贝壳堤恢复到平均大潮潮差之间(3m)、牡蛎礁恢复到当时海平面($\pm 0.7\text{m}$)——所包含,不再另行计算。

(2)当底板资料匮乏且缺少可靠的沉积学证据时,以一段底板的中点或以单一底板高度值为中点,补加底板自身误差,特别是重建大潮差的误差(本期苏盛伟等文章第 3 大节“堤底板海面变化标志点”中 B(4)、(5)所述者),存在很大的不确定性。本文在讨论贝壳堤平原的相对海面变化时,意识到这一点。

(3)堤和礁的起讫年龄,常通过多个经 ^{14}C 测年的样品年代学的相互校验,或有所取舍或取其平均值来确定。这本身即存在误差。样品是否具有明确的沉积学意义、其年龄是否已排除被污染的可能性(参见文献[40]关于“ ^{14}C 样品可靠性”的表述)、实验过程中可能的二次污染、测年仪器本身的精度误差,均会对数据的真实性造成影响。笔者研究小组近年来积累了不同实验室间的 3 组对比测试结果:同一大样的同种贝壳在不同实验室获得的年龄数据可相差数百年^⑥。本期王海峰等的文章已提及,大吴庄礁体剖面 1 与剖面 6 历时有较大差别。当 AMS 方法与液闪法对比时,出现后者数据偏老的情况^⑥。有鉴于此,在依据本期苏盛伟等、王海峰等文中给出的堤和礁历时绘制它们的时间分布图时,堤、礁的初始、结束 2 个时间端员(即它们的起讫端)大约各 150~200 年的时段,均以虚线表示,表明关于“历时”的判断,存在着不确定性(图 1)。这里仅有的几个例外——Ⅱ堤上古林段(Ⅱ-1 和 Ⅱ-2 堤)起讫时间为 2710~1800cal BP,Ⅰ堤贾家堡段起讫时间为 920~80cal BP;礁群Ⅲ俚口礁体结束时间为 4070cal BP,礁群Ⅴ北淮淀礁体结束时间为 2620cal BP——因相对较有

(2)海区全取心机械钻探时,使用测深仪监测水深变化、进尺深度,并据当地的潮汐变化校正孔口深度(及相应的地层深度),从而纳入黄海 85 高程系统,岩心取心率一般大于 90%。这个过程可能造成分米级的深度误差

把握,未对相应端员采取以虚线表示的方法。

(4)北淮淀牡蛎礁的厚度是调和不同作者的数值给出的平均值(王海峰等文中的表 2),若依实际观测到的最小值 1.2m^③并消除可能的水平夹层(王海峰等文中的表 2),则从其结束年龄 2620cal BP 回溯,1.2m 厚的礁体历时可能仅 1 个世纪左右⁽³⁾(注:对(3)的注释见本页注脚处),即其初始年龄可能仅为 2.8~2.7ka cal BP。因此,该礁体的出现可能在事件 2 结束之后。目前掌握的巨葛庄贝壳堤起始时间约为 4240cal BP(苏盛伟等文章的表 1),与事件 3 大约同时。这一点尚难用寒冷事件与堤/礁相间解释。研究小组正在进行巨葛庄堤的系统 AMS ¹⁴C 测年研究^⑧,新的年龄数据可能有助于该问题的解决。

5.2 海面上升

堆积厚度大于 3m(-15.05~-11.85m)的 Pre-I -1 礁体历时约 700 年。该礁体中部以上与礁群 I 的年龄重叠(王海峰等文中的表 2)。本文推测,Pre-I -1 礁体底部-14.9m 的 8270cal BP 层位接近 8.2ka 寒冷事件 5 刚结束时的较低的海平面,近似地代表当时海平面的时空位置。随后,海面迅速上升,至该礁体的中上部时,海水在该礁体所在的位置已深达 10 余米,而当时的海岸线已迅速推进至礁群 I 所在的东老口一带。暗示在 8.2~7.7ka cal BP 的 500 年时间里,相对海面上升约 10m、岸线向陆推进约 50km。MWP2 海面上升约发生于 7.6ka cal BP^[29],而本文的牡蛎礁高度变化反映的海面跃升要更早一些。是否真的如此,尚需新的沉积学和更精准的年代学研究加以校验(遗憾的是,研究小组至今尚未在东老口一带重新发现前人^[42]曾研究过的礁体)。

与贝壳堤平原毗邻的渤海湾西部浅海区岩心研究表明,在全新世初期有反映潮间带环境的贝壳堆积,是否为埋藏贝壳堤、其与 8.2ka 事件的关系如何,未深入研究。其与东老口礁群对应的分布于全新世海侵最大边缘处的贝壳堤,理论上应该存在,但至今未能发现。即便对年轻一些的东孙村堤,尚有不同的认识。

6 结 论

以本期苏盛伟等、王海峰等 2 篇论文为基础,进一步讨论了早全新世晚期以来渤海湾西岸贝壳堤平

原成堤和西北岸牡蛎礁平原建礁过程中的同时性特征,气候变化与这一特征之间的关系和堤、礁记录的相对海面变化。堤、礁大致同时发育,可分为 6 期,依次与寒冷事件 5、4、3、2 和 1 相间。堤底板大致对应 3m 的大潮差、礁顶板大致对应海平面。据二者分别重建了南部贝壳堤平原、北部牡蛎礁平原的相对海面变化:南部自 7ka cal BP 以来基本上与现代海平面等高,存在±1m 的小波动,压实固结作用抵消了中全新世的相对高海面;北部中全新世的相对海平面位置因新构造和固结压实双重下沉作用的影响,已位于现代海平面以下 2~3m 处。

致谢:李凤林、阎玉忠、王云生、刘会敏、盛晶瑾、张玉发、张金起、康慧、钟新宝等对该项研究亦有贡献,匿名审稿者提出了宝贵的修改意见,谨致谢意。

参考文献

- [1]王宏. 渤海湾泥质海岸带近现代地质环境变化研究(Ⅱ): 成果与讨论[J]. 第四纪研究, 2003, 23(4): 393-403.
- [2]王宏, 范昌福, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸全新世牡蛎礁研究概述[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 315-331.
- [3]施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1-212.
- [4]方修琦, 葛全胜, 郑景云. 环境演变对中华文明影响研究的进展与展望[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 85-94.
- [5]郑景云, 满志敏, 方修琦, 等. 魏晋南北朝时期的中国东部温度变化[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 129-140.
- [6]葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去 5000 年中国气温变化序列重建[J]. 自然科学进展, 2006, 16(6): 689-696.
- [7]王绍武. 全新世气候[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 247-248.
- [8]吴文祥, 胡莹, 周扬. 气候突变与古文明衰落[J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 455-463.
- [9]Bond G, Showers W, Cheseby N, et al. A Pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. Science, 1997, 278: 1257-1266.
- [10]Jansen E, Overpeck J, Briffa K R, et al. Palaeoclimate [R]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:433-497.
- [11]Ge Q S, Wang S W, Wen X Y, et al. Temperature and precipitation changes in China during the Holocene[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(6): 1024-1036.
- [12]Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37, L03703.

(3)迄今为止,获得的渤海湾全新世牡蛎壳体平均生长速率约为 1cm/a^[41]和 1.6~2.08cm/a^⑦。单个壳体生长与整个礁体建造之间的关系,参阅文献[2]

- doi: 10.1029/2009GL041281.
- [13]竺可桢. 中国过去五千年气候波动的初步研究[J]. 中国科学, 1973, 16: 168-189.
- [14]Woodroffe S A. Testing models of mid to late Holocene sea-level change, North Queensland, Australia [J]. Quaternary Science Review, 2009, 28: 2472-2488.
- [15]Van de Plassche O. Sea-Level Research: a manual for the collection and evaluation of data[M]. Norwich: Geo Books, 1986: 1-618.
- [16]McBridge R A, Taylor M J, Byrnes M R. Coastal morphodynamics and Chenier-Plain evolution in southwestern Louisiana, USA: A geomorphic model[J]. Geomorphology, 2007, 88: 367-422.
- [17]Rodríguez-Ramírez A, Yáñez-Camacho C M. Formation of chenier plain of the Doñana marshland (SW Spain): Observations and geomorphic model[J]. Marine Geology, 2008, 254: 187-196.
- [18]赵希涛, 耿秀山, 张景文. 中国东部 2000 年来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 269-281.
- [19]徐家声. 渤海湾黄骅沿海贝壳堤与海平面变化[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 68-77.
- [20]Chen Z Y, Staley D J. Sea-level rise on Eastern China's Yangtze Delta[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(1): 360-366.
- [21]Yim W W S, Huang G. Middle Holocene higher sea-level indicators from the south China coast[J]. Marine Geology, 2002, 182(3/4): 225-230.
- [22]Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China[J]. Quaternary International, 2004, 117: 55-67.
- [23]Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2004, 209: 45-67.
- [24]Chen Z Y, Zong Y Q, Wang Z H, et al. Migration patterns of Neolithic settlements on the abandoned Yellow and Yangtze River deltas of China[J]. Quaternary Research, 2008, 70: 301-314.
- [25]Woodroffe S A, Horton B P. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific[J]. Journal of Asian Sciences, 2005, 25: 29-43.
- [26]González J L, Törnqvist T E. A new late Holocene sea-level record from the Mississippi Delta: evidence for a climate/sea level connection?[J]. Quaternary Science Review, 2009, 28: 1737-1749.
- [27]Clark J A, Farrel W E, Peltier W R. Global changes in postglacial sea level: a numerical calculation[J]. Quaternary Research, 1978, 9: 265-287.
- [28]Clark J A, Lingle C S. Predicted relative sea-level changes (18000 years BP to present) caused by Late-Glacial retreat of the Antarctic ice sheet[J]. Quaternary Research, 1979, 11: 279-298.
- [29]Peltier W R. Mechanisms of relative sea-level change and the geophysical response to ice-water loading[M]//Devoy R J N. Sea Surface Studies: A Global View. UK: Croom Helm Ltd., 1987: 57-94.
- [30]Peltier W R. Lithospheric thickness, Antarctic deglaciation history, and ocean basin discretization effects in a global model of Postglacial sea level change: a summary of some sources of nonuniqueness[J]. Quaternary Research, 1988, 29(2): 93-112.
- [31]Lambeck K. Late Pleistocene, Holocene and present sea levels: constraints on future change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1990, 89: 205-217.
- [32]Lambeck K, Nakada M. Late Pleistocene and Holocene sea-level change along the Australian coast[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1990, 89: 143-176.
- [33]Nakada M, Yonekura N, Lamberk K. Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 85: 107-122.
- [34]Yokoyama Y, Nakada M, Maeda Y, et al. Holocene sea-level change and hydro-isostasy along the west coast of Kyushu, Japan[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 123: 29-47.
- [35]Shennan I, Horton B. Holocene land- and sea-level changes in Great Britain[J]. Journal of Quaternary Science, 2002, 17(5/6): 511-526.
- [36]El Kadiri K, de Galdeano C S, Pedrera A, et al. Eustatic and tectonic controls on Quaternary Ras Leona marine terraces (Strait of Gibraltar, northern Morocco)[J]. Quaternary Research, 2010, 74: 277-288.
- [37]Gehrels W R. Late Holocene land- and sea-level changes in the British Isles: implications for future sea-level predictions[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 1648-1660.
- [38]阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 321-326.
- [39]王宏. 渤海湾牡蛎礁与新构造活动: 几个基本问题的讨论[M]//卢演传, 高维明, 陈国星, 等. 新构造与环境. 北京: 地震出版社, 2001: 171-184.
- [40]王宏, 张金起, 张玉发, 等. 渤海湾西岸的第一道贝壳堤的年代学研究及 1 千年来的岸线变化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 7-14.
- [41]Wang H, Keppens E, Nielsen P, et al. Oxygen and carbon isotope study of the Holocene oyster reefs and paleoenvironmental reconstruction on the North West Coast of Bohai Bay, China [J]. Marine Geology, 1995, 124: 289-302.
- [42]李元芳, 高善明, 安凤桐. 天津北部全新世海进[J]. 地理集刊, 1986, 18: 88-98.
- ① 裴艳东, 王宏, 王福, 等. 天津市海岸带调查报告. 天津市 908 专项 (908-TJ-02), 2008: 1-161 (彩色附图 21 幅).
- ② 李凤林. 渤海湾西岸地质环境图集 (修改版). 2010.
- ③ Wang H. Palaeoenvironment of Holocene Chenier and Oyster Reefs in the Bohai Bay (China). PhD Dissertation, Vrije Universiteit Brussel, 1994: 1-249.
- ④ 陈宇坤, 杨绪连, 高武平, 等. 滨海新区主要断裂及其活动性探测与研究成果简介. 天津市地震灾害防御中心, 2010: 1-23.
- ⑤ 李继军, 翟子梅, 沈键, 等. 天津城市地质调查成果报告. 天津市地质调查研究院, 2010: 1-628 (附图册一本).
- ⑥ 商志文, 王宏, 裴艳东, 等. 天津古海岸与湿地国家级自然保护区地勘一期项目勘查综合研究报告. 2007: 1-60 (附彩色图版 8 幅).
- ⑦ 范昌福. 渤海西岸中全新世埋藏牡蛎礁古环境记录. 中国地质科学院博士后出站报告, 2010: 1-96.
- ⑧ 苏盛伟, 王海峰, 王宏. 巨葛庄、板桥农场三分场贝壳堤底板调查报告. 2010: 1-20.