第47卷 第1期

2024年03月

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.01.01

王福,胡云壮,田立柱,施佩歆,李建芬,陈永胜,李勇,商志文,姜兴钰,袁海帆,杨朋,文明征,赵琰琳,杨怡,王宏.2024. 渤海湾海面变化[J].华 北地质,47(1):1-20.

Wang Fu, Hu Yunzhuang, Tian Lizhu, Shi Peixin, Li Jianfen, Chen Yongsheng, Li Yong, Shang Zhiwen, Jiang Xingyu, Yuan Haifan, Yang Peng, Wen Mingzheng, Zhao Yanlin, Yang Yi, Wang Hong. 2024. Sea Level Change in Bohai Bay[J]. North China Geology, 47(1):1-20.

渤海湾海面变化

王 福^{1,2,3}, 胡云壮^{1,2,3}, 田立柱^{1,2,3}, 施佩歆^{1,2,3}, 李建芬^{1,2,3}, 陈永胜^{1,2,3}, 李 勇⁴, 商志文^{1,2,3}, 姜兴钰^{1,2,3}, 袁海帆^{1,2,3}, 杨 朋^{1,2,3}, 文明征^{1,2,3},

赵琰琳^{1,5},杨怡^{1,5},王宏^{1,2,3*}

 (1.中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心),天津 300170; 2.中国地质调查局海岸带地质 环境重点实验室,天津 300170; 3.天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室,天津 300170;
 4.河北环境工程学院,秦皇岛 066102; 5.天津城建大学,天津 300384)

摘 要:【研究目的】海面上升,是渤海湾泥质海岸带地区全新世海陆变化最主要的影响因素。通过重建海面变化历 史,有助于预测今后的变化趋势。【研究方法】全球基于实际调查的建模研究,恢复了过去数万年来较高分辨率的海 面变化历史、分析了导致这种变化的各类分量的贡献。我们通过地区性相对海面变化研究,着重对地区性和区域性 分量或做了定量评估、或进行了半定量推理分析,并做了具体的案例研究。【研究结果】这些研究表明,距今10~7ka 时全球海面平均上升速率是~9mm/a,同期渤海湾西岸相对海面平均上升速率是~5.6mm/a。这一较快的上升造 成了包括渤海湾在内全球沿海平原海岸线后退(以及渤海海盆--渤海湾可能的数道沿岸堤被淹没)。但是,7ka至 今,全球与冰融水等效海面(ice-equivalent sea level, ESL)的平均上升速率降至~0.64 mm/a;5 ka以来,甚至不再上 升。7 ka以来,渤海湾西岸相对上升速率是~0.46 mm/a; 5.5 ka之后,进一步减弱到~0.18 mm/a。上述全球和渤海 湾西岸海面变化,显示出明显的"二段式"上升特点。以~7ka为转折点:之前与之后的上升速率相差一个数量级。 对于渤海湾西岸而言,叠加在这个长达~7000年的明显减速但仍缓慢上升背景上的,是均衡掀升分量与下沉(新构 造下沉+沉积自压实下沉)分量的相互抵消。于是,全球性海面的缓慢上升、区域性均衡调整造成的掀升与局地下 沉,这三者的复杂博弈,形成了长达~7000年的、经常受高潮水影响的渤海湾西岸障壁岛型贝壳堤--潟湖盐沼洼地 周期性交替的沿海地形地貌格局。1870 CE至今的150余年间,全球海面平均上升速率~1.7 mm/a,近10余年来更 加速至3.7 mm/a,渤海湾同时期I堤海岸线向海侧的前凸岸段平均蚀退1~3 km。【结论】我们推断1870CE以来的全 球气温上升-海面上升与渤海湾同时期海岸线蚀退可能具因果关系。21世纪全球变暖及因此引起海面~6~8mm/a 上升的预测,是1870 CE至今全球加速升温-海面加速上升的必然延续。从地质学角度,这将导致渤海湾今后的"可 容空间"逐步增加,为海岸线-潮间带蚀退、盐沼湿地退化提供条件,从而将可能导致持续了~7000年的贝壳堤障壁 岛-潟湖盐沼地貌过程的终止,转入与7ka之前相似的海面上升加速时的沿岸堤-沿海低地模式。以上基于全球研 究及渤海湾实际调查结果做出的推断,将对渤海湾泥质海岸带的中长期发展产生影响。

收稿日期:2024-01-25

基金项目:国家重点基金课题:"环渤海滨海地球关键带地质结构和岩相古地理研究(42293261)";中国地质调查局项目:"津冀沿海资源环 境承载力调查(DD20189506)";中国地质调查局项目:"黄渤海海岸带重点生态保护修复区综合地质调查(DD20211301)";自然 科学基金项目:"渤海湾全新世海面标志点研究与变化历史重建(41372173)";"渤海湾西北岸4kaBP前后古环境重建(41806109)" 作者简介:王福(1979-),男,理学博士,研究员,主要从事海岸带与第四纪地质环境演化研究,E-mail:tjwangfu@163.com。 *通讯作者:王宏(1948-),男,理学博士,研究员,主要从事泥质海岸带第四纪地质研究,E-mail:wanghong tj@mail.cgs.gov.cn。

2				华	北	地	质	第 47
	关	键	词:历史海面变化;障壁岛型印	〕壳堤-	潟湖盐沼	过程终	止;海面力	l速上升;可容空间增加;海岸线蚀退
	创	新	点 :将消除人为影响的渤海湾;	相对海南	面变化与全	全球变化	对比,定	量分析了包括区域均衡补偿在内的影响
			渤海湾海面变化各分量的过	贡献,重	建了受海	面上升搭	2制的中的	免全新世障壁岛型贝壳堤潟湖盐沼地貌
			格局,预测了今后的演进趋	势。				

中图分类号:P736.2 文章编号:2097-0188(2024)01-0001-20 文献标志码:A

Sea Level Change in Bohai Bay

WANG Fu^{1, 2, 3}, HU Yunzhuang^{1, 2, 3}, TIAN Lizhu^{1, 2, 3}, SHI Peixin^{1, 2, 3}, LI Jianfen^{1, 2, 3}, CHEN Yongsheng^{1, 2, 3}, LI Yong⁴, SHANG Zhiwen^{1, 2, 3}, JIANG Xingyu^{1, 2, 3}, YUAN Haifan^{1, 2, 3}, YANG Peng^{1, 2, 3}, WEN Mingzheng^{1, 2, 3}, ZHAO Yanlin^{1, 5}, YANG Yi^{1, 5}, WANG Hong^{1, 2, 3*}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Coast Geo-Environment, CGS, Tianjin 300170, China; 3. Tianjin Key Laboratory for Coastal Geo-Process and Environmental Safety, Tianjin 300170, China; 4. Hebei College of Environmental Engineering, Qinhuangdao Hebei, 066102, China; 5. Tianjin University of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: This paper is the result of Coast Geo-Environment.

[Objective] Based on combination between the global sea level history and the reconstruction of the observed local Holocene relative sea level change, this research is aimed at revealing that the sea level change is the most important driving force controlling the land-sea change and morphological pattern transition and future coastal trend in the muddy coast of Bohai Bay, China. [Methods] Modelling effort has reconstructed high-resolution history of the global sea level change since the LGM (e.g., Lambeck et al., 2014; Peltier et al., 2015), and summarized contributions of various elements to the sea level change (e.g., Horton et al., 2018). On the other hand, as most coastal geologists, we scrutinized primarily the local and regional elements, which affected the relative sea level (RSL) behaviors in Bohai Bay coast, with quantitative or semi-quantitative estimates (Li et al., 2021; Wang, 2022) and more detailed case studies (Fan et al., 2005; Wang et al., 2020; Tian et al., in review). [Results] The aforementioned approaches indicated global mean sea level (GMSL) rise was ~9mm/a during 10 ~ 7 ka while the rate of the local relative mean sea (RMSL) was ~5.6 mm/a, contemporaneously. Such rapid rises resulted shoreline recession worldwide, including Bohai Sea region with possible inundation of a number of beach ridges. However, after ~7ka, rise of the ice-equivalent sea level (ESL) decreased to ~0.64 mm/a; after 5 ka, the rise even stopped. As to Bohai Bay, the RMSL rise was ~0.46 mm/a after 7 ka and was only ~0.18 mm/a since 5.5 ka. Both global and regional sea level changes show obvious two-stage-rise characteristics with a turning-point around 7 ka, before and after which the rise changed greatly with an order of magnitude. Overlapping on the remarkable deceleration is an essential offset between the regional isostatic uplift and the local subsidence of neotectonics and sediment self-compaction. Thus, the triple influences, caused by slowing rise of sea level, isostatic uplift and local subsidence, created a nearly ~7 ka long morphological pattern, in which a cyclicity evolution between barrier-typed shelly cheniers and lagoon/saltmarsh lowlands existed. During the last 150 years from 1870 CE, GMSL rised quickly with an average rate of ~1.7mm/a and even quicker in the last decade (IPCC AR6, 2021; IPCC AR6 SYN, 2023). By the same time, entire protruded sectors of muddy lowland (with upper part of intertidal flat), ~1 ~ 3 km in the front of Chenier I, were fully eroded away and, consequently, the 1870 CE-shoreline was retreated to the Chenier I, an old shoreline ended before the 1870's (Wang et al., 2002, 2010). Therefore, we think that there must be a reasonable causality between the global temperature-sea level rise and shoreline recession in our study area. [Conclusions] Following predictions of ~6 ~ 8 mm/a rise of global sea level in the 21 century (IPCC AR5, 2013; IPCC AR6 SYN, 2023), this will increase the local

http://hbdz.org.cn 华北地质, 2024, 47(1)

王福等:渤海湾海面变化

accommodation space and resulting RSL rise (sea level rise and local subsidence). Consequently, a number of coastal responses will follow such as shoreline retreat, tidal flat erosion and salt wetland deterioration. Finally, the local morphological pattern could plausibly return from the 7ka-lasted barrier-typed Chenier-Lagoon System to the Beach Ridge-Coastal Lowland System estimated during the late Pleistocene to early Holocene.

Key words: historical sea level change; barrier-island-typed Chenier-Lagoon/salt march System; ongoing rapid rise of sea level; increase of accommodation space; deterioration of coastal wetland

Highlights: A relative mean sea level (RMSL) of Bohai Bay, eliminated the influence of local groundwater withdrawal, is compared with the global sea level change. Contributions of numerous factors, including the regional isostatic adjustment, are analyzed quantitatively for the area. A geomorphologic pattern of the barrier-island-shaped shelly chenier and lagoon/salt marsh system, mainly controlled by sea level rise, is reconstructed during the mid- and late Holocene. Future evolution of sea level change and its impacts are summarized.

About the first author: WANG Fu, male, born in 1979, PhD, research fellow, engaged in the research of coastal Quaternary geo-environmental evolution. E-mail: tjwangfu@163.com.

About the corresponding author: WANG Hong, male, born in 1948, PhD, research fellow, engaged in the research of coastal Quaternary geology, E-mail: wanghong_tj@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Science Key Foundation (42293261), the National Natural Science Foundation of China (41372173, 41806109), the projects of China Geological Survey (DD20189506, DD20211301).

1 研究背景与定义

在详细论述之前,首先解释关于海面变化的两 个常用术语。

(1)冰融等效海面(the ice equivalent sea level, ESL)变化

地球在过去60万年间,至少经历了6次寒冷冰 期与温暖间冰期的转换(Cheng et al., 2016)。最后 一次冰期(称为"末次冰期",the Last Glacial Period) 发生在距今116~11.7 ka[®]之间,该冰期的最寒冷阶 段(称为"末次盛冰期",the Last Glacial Maximum, LGM),发生在距今~30~15 ka期间,当时全球海面 比现在低100余米,极低值是20.6 ka时的~-134 m (Lambeck et al., 2014)。随后,全球气温逐渐回升, 距今11.7ka时进入最后一次间冰期(又称"全新 世",the Holocene),此时海面已从~-130 m上升到 ~-60~-50 m。到距今~7 ka时,又回升到仅比现代 海面低~-5.4~-3.5 m的高度(Lambeck et al., 2014; Peltier et al., 2015)。7 ka至今,海面仅有数米的缓慢



(Lambeck et al., 2014; Peltier et al., 2015) 注:两条粗蓝线((a) Lambeck et al., 2014; (b) Peltier et al., 2015)构成了本文海面变化带的下、上边界,其余研究者的 变化曲线,大多被包含在该两条粗蓝线围成的变化带内 (Miller et al., 2020)、包括Li et al.(2014)的曲线。

^①ka,"千年"之意。后面出现的CE,即公元纪年。例如1870 CE,即公元1870年,而公元前2000年则可表达为-2000 CE或2000 BCE。这一新的表述正逐步取代过去常用的公元后(AD)、公元前(BC)。

质

华

上升(Lambeck et al., 2014)、而5 ka以来甚至停止上 升(Peltier et al., 2015)、或仅有分米级波动(Kemp et al., 2018)(图1)。

将地球假设作刚形球体时,因冰质量变化(冰 盖、冰川结冰-融水变化)引起的洋盆水质量增减所 表现出的等效海面升降,以往用 eustasy 表述(Cary et al., 1972),即长期以来中国研究者所认定的"绝 对的"海面变化或"水动型"海面变化(地球科学大 辞典,2006)。近年来多已改用"与冰融等效的海 面"(the ice - volume equivalent sea level 或 the ice equivalent eustatic sea level, ESL)变化表述(例如 Lambeck et al., 2014; Peltier et al., 2015)。

数十年前,海岸变化研究者极为关注"全新世 高海面"(highstand)。现在已认识到,即便有"高海 面"的遗存,在全球远离冰盖的大陆边缘,更多的不 过是(有均衡掀升叠加的,Clark and Lingle (1979)) 新构造抬升造成的,甚至不排除误判(即将不具备 海面指示意义的沉积物或地貌现象误作受到海水 影响、或对标志点"海面指示意义"的理解有误)。

(2)相对海面(Relative sea level)变化

地壳是粘弹性体,冰-水质量的转移,引起地 壳的隆升或塌陷、地幔物质的迁移。受此影响,位 于不同地区的局地海面高度因冰川-水的均衡调 整而与ESL海面明显不同。此外,不同地区的新构 造升降、沉积物自压实下沉和人为抽取地下水 (油、气和岩盐)下沉等引起的地面升降,也会造成 海面的相对升降。这样的海面,称作"相对海面" (relative sea level, RSL),指示一地区海面与陆地之 间的高差。

重建全新世海平面变化的历史,首先是经野外

实际调查获取相对海面变化标志点(the relative sea level indicator, RSL indicator; the relative sea level index point, RSLIP),进而根据其所蕴含的指示当时相 对海面[®]的地质、生物信息,将其转换为相对海平面 (the relative mean sea level, RMSL)标志点、进而建 立一地区的 RMSL变化曲线或变化带。对于这一过 程,在渤海湾西岸已有系统阐述(李建芬等,2015; Li et al., 2021; 王宏,2022)并有案例研究结果 (Wang et al., 2020; Tian et al., in review)。

2 渤海湾全新世海面变化及影响因素

作者研究团队查明渤海湾西岸距今~10 ka以 来的全新世海面变化历史的基础研究,已经持续了 30余年(Wang, 1994;范昌福等,2005;李建芬等, 2015; Tian et al., 2017; Wang et al., 2020; Li et al., 2021; 王宏,2022; Tian et al., in review);而作为该 项探索的基础与外延,对全球气温、海面上升研究 的跟踪及地区性应用研究,也一直在不间断地进行 着(Wang, 1992; 王福等,2005,2023;宋美钰等, 2008;王宏等,2008,2010; Wang et al., 2019; 天津地 质调查中心海岸带与第四纪地质室,2018,2021)。

2015年,我们建立了渤海湾西岸全新世贝壳 堤、牡蛎礁和沉积物三类、共计近百个相对海面标 志点(the relative sea level indicator)转换为相对海平 面标志点(the relative mean sea level indicator)的系 统过程,获得了全新世相对海平面变化带(李建芬 等,2015)。但是,当时还无法对局地新构造下沉、 沉积物自压实下沉和人为抽取地下水下沉这三类 局地下沉做定量校正。又积六年的努力,方才有能 力依次对这三类局地因素做了定量校正,获得了由

²⁰海面/sea level 与海平面/mean sea level。长期以来,中文习惯以"海平面"一词表达"海面"和"海平面"两个不同术语。"海 面",指的是海水面相对于陆地面的高度(二者的垂直差距),有高潮位海面、平潮位海面和低潮位海面以及极端海面等的复杂 区别,而"海平面"则指(>19年的)逐小时潮位的算数平均值(van de Plassche, 1986; Shennan, 2015)。每一地区的海面有平均 高潮位、平均低潮位等不同区别,但同一地区的海平面却是唯一的,而且同一地区平均大潮和平均低潮的平均值(平潮位),并 不等于该地区的海平面(例如渤海湾湾顶处二者相差15cm, Li et al., 2021)。从海面变化研究的专业角度,将首先从地层中发 现的相对海面位置信息转换到当时的相对海平面(即从相对海面标志点转换为相对海平面标志点),要经过查明其海面指示意 义(及当地古潮差信息)等的严格系统过程。实际上,sea level研究包含上述两个步骤,而并非特指后一步。例如 van de Plassche (1986)和Shennan et al. (2015)两部专著的术语名称,以及浩繁的学术论文,均以 sea level指代相对笼统的海面变 化,而以 mean sea level专指海平面。相反,当以"海平面"一词同时指代海面和海平面,若论及后者时,只好再加上"平均"二 字,成为"平均海平面"这一重叠、拗口的表述(相应地,在英语语境中就会是 mean mean sea level)。尽管社会大众和媒体长期 以来已经接受了"海平面"这个唯一的表述,但对于专业研究者而言,还是建议应该体察这二者间的关系。

110个标志点组成的、仅由全球海面变化(ESL)和区 域冰川-水均衡补偿(the Glacial Isostatic Adjustment, GIA;实际上,远区GIA包含the glacio- and hydro-isostasy两个方面)两个因素控制的相对海平面 变化带(Li et al., 2021)。

进一步,将人为抽取地下水造成的地面沉降 先行扣除,获得了仅剩下四个自然因素一全球海 面变化(ESL)、区域均衡补偿(GIA)、局地新构造下 沉和局地沉积自压实下沉一相互博弈的、时间下 限至7 ka的渤海湾"修订相对海平面变化带"(the corrected Relative Mean Sea Level, RMSLc)。这是消 除现代人为因素影响后、经贝叶斯统计学方法(变 量误差-综合高斯(EIV-IGP)模型)[®]校正的"纯" 自然状态下的距今7ka(王宏,2022)、乃至本文10 ka以来的(与李勇的讨论,2023)相对海平面变化 史,据此提出了渤海湾西岸沿海平原"障壁岛型贝 壳堤-潟湖盐沼"成因假说(王宏,2022),并成为今 后海岸带趋势预测的地质基础(见"讨论"一节与 图2a,2b)。

下面,逐一简述影响渤海湾相对海面时空变化的各种因素(分量)。

2.1 时间因素

目前指示海面变化时间的,主要是¹⁴C测年给 出的年龄。除了牡蛎礁里的原生牡蛎个体是不会 移动的之外,指示海面高度(深度)的沉积物中的含 碳物质(植物残片及泥炭层等)或贝壳堤、贝壳质沉 积层里的贝壳个体,常在它们形成后又经过再搬 运。因此,对这类¹⁴C年龄,还需要在分馏效应校 正、海洋贮存库效应校正和大气¹⁴C含量变化校正 的常规系统校正(Stuiver and Braziunas, 1993; Reimer et al., 2013)之后,再进行消除再搬运时间的 "驻留时间效应"校正(Residence time correction,



(b) Comparison between RMSL in Bohai Bay and Global ESL belt (Fig.1)

渤海湾10 ka以来110个 RMSL标志点扣除人为沉降影响之后,由4个自然因素控制的渤海湾西岸 RMSL变化带,是从 ~7.5 ka(王宏,2022)扩展至~10 ka的新结果。渤海湾与全球变化带的基本重叠,暗示区域GIA抵消了局地下沉。

³该模型充分考虑了所有的不确定性来源,用以描述相对海平面的连续动态演变过程。模型的目标是对相对海平面和年龄重建的不确定性进行如实评估,而不是为了减少不确定性。利用从GitHub下载的开源模型"EIV_IGP"对渤海湾西岸海面变化标志点数据进行了贝叶斯推理。此模型下载网址为https://github.com/ncahill89/EIV_IGP,同时考虑了海平面数据点的年代和高程误差、海平面数据点在时间域的非均匀分布特征,以及相对海平面变化的非线性过程。

质

RTC)(商志文等,2015;李建芬等,2015;Shang et al., 2016;Li et al., 2021)。我们的同一大样中至少2个或更多子样的对比测年结果表明,在渤海湾西岸这两类(再搬运植物有机物和再搬运贝壳)驻留时间的校正经验值分别是660 a和600 a(商志文等,2015;李建芬等,2015;Shang et al., 2016;Li et al., 2021)。进行这一校正后,使得渤海湾"二段式"的RMSL曲线的时间转折点偏年轻了~0.5 ka,位于7.5~6.8 ka之间(Li et al., 2021)(详见下面的2.2.1节)。作为另一种测年方法,光释光(OSL)年龄不存在驻留时间效应的问题,正在渤海湾海面变化研究中发挥越来越大的作用(陈永胜等,2021)。希望今后OSL与¹⁴C年龄的相互校验,能够不断修正海面变化的年代学序列。

2.2 空间因素

2.2.1 ESL 变化

图1是与冰融水等效的全球海面变化带(ESL), 以Lambeck et al. (2014)的海面变化曲线为该变化 带的下边界,以Peltier et al. (2015)的曲线为该带的 上边界。其他数条曲线(Miller et al., 2020; Li et al., 2014; Horton et al., 2018)几乎完全被这两条曲线围 成的变化带所包含。因此,我们可以这个变化带作 为距今~30 ka、特别是本文论及的近10 ka以来的、包 含时空误差[®]的全球海面变化的轨迹。~30~20 ka 末次盛冰期结束后海面快速上升,至~7 ka时上升转 缓甚至停止,ESL变化(图1、2b和表1)表现出明显的 "二段式"特征:7 ka之前平均上升速率~8 mm/a,7 ka 以来平均上升速率~0.64 mm/a、5.5 ka以来再降至 0.26 mm/a(表1)。第二阶段(7 ka之后)的上升速率, 比之前低了一个数量级,被认为是制约渤海湾西岸~ 7 ka以来直至1870CE期间的地貌格局的主要力量 (王宏,2022)。但是,随着升温加速,今后将可能重 新转回"二段式"的前一阶段,即7ka之前的快速上 升阶段(见"讨论"一节)。

2.2.2 均衡调整变化(GIA)

冰期-间冰期转换过程中的冰、水质量转换(陆地、海洋间因气候变化造成固体冰与液体水之间的

再分配),引起固体地球的粘弹性形变以及重力场和 地球自转的变化,从而导致被称为冰均衡调整(Glacio-isostatic adjustment, GIA))的相对海面变化。这 一末次冰期结束以来的均衡调整,目前仍在进行中 (Horton et al., 2018; Mitrovica et al., 2018),使包括中 国大陆在内的远离原冰盖区的远区(the far field)因 "杠杆作用"(continental levering)而处于地壳掀升状态(Clark and Lingle, 1979)。从全球而言,近2 ka以 来,GIA 线性掀升速率基本稳定在<0.3~0.5 mm/a (Horton et al., 2018; Mitrovica et al., 2018)。换言之, GIA 正在导致全球远区现代 RSL 的~0.3~0.5 mm/a 的下降。

至于渤海湾海岸带,我们目前尚不能像北美 (Engelhart et al., 2009)和荷兰(Vermeersen et al., 2018)那样建立区域性GIA模型并给出具体的局地 GIA数值。但是,我们的经贝叶斯统计学方法处理 过的RMSL带(该带经李勇2023年再次完善,时间 从7ka下延至10ka),大部分落在全球ESL带内(图 2b),暗示区域GIA与局地各种下沉分量的"博弈" 基本上是相互抵消的,由此间接推测出局地GIA数 值(王宏,2022),填补了以往在进行海面变化预测 时GIA分量的空缺。

2.2.3 指印效应和虹吸效应

(1)指印效应(Fingerprinting effect)

进入21世纪后,全球变暖导致格陵兰和南极西 部冰盖加速融化。这种冰盖的快速融化将改变海面 的形态,此效应被称之为"海面指印"(sea-level fingerprint)(Clark and Lingle, 1979; Horton et al., 2018; Mitrovica et al., 2018)。格陵兰和南极冰融水外流, 导致低纬度地区洋面上升。中国大陆沿岸的格陵 兰、南极冰盖现代消融这一"指印"效应造成的RSL 上升速率与全球海面上升速率的比率,均为~0.8~1 (Horton et al., 2018),说明两处冰盖的指印效应总 和几乎是正常全球海面上升量的2倍。南极冰盖融 化将造成美国东、西海岸海面最大1.4 m的上升量。 对于该地区而言,远大于全球海面的上升(Horton

^④Peltier团队不断改进的冰模型和地球模型,使ESL曲线总是处于不断修正完善的过程。例如本文引用的2015年曲线与他们的2004年曲线(Peltier et al., 2004)相比,在晚全新世之前整体上偏高了数米。至于Lambeck et al. (2014)的ESL曲线7ka时在-5.4 m处,表明他们认为自那之后全球冰川还有较大的消融空间,但这似乎并没有得到更新证据的普遍支持(与Törnqvist教授的讨论, 2023)。

et al., 2018)。该地区在末次冰期时曾是北美大冰 盖外围的隆起区(the forebulge)。冰期结束,原冰盖 区卸荷回弹,外围隆起区则塌陷,造成海水的涌入。 1万余年来,RSL一直保持上升(Engelhart et al., 2009),这一情况还包括西北欧沿海(Vink et al., 2007; Vermeersen et al., 2018)。这种RSL长期下沉 背景再被21世纪短期的"指印"型海面上升叠加,将 造成该类地区的更大的隐患。

在中国大陆,若2023年后全球海面仍保持~3 mm/a(IPCC AR6,2021)的上升速率,则按上面引述 的南、北两极"指印效应"的贡献,推测将可能达到~5 mm/a。Mitrovica et al. (2018)模型推测仅格陵兰冰 盖融化,就将使中国大陆沿海海面在21世纪上升数 十厘米。

(2)虹吸效应(Syphoning effect)

冰盖融化后因冰均衡作用而使原冰盖区卸荷 回弹、冰盖周围原来的隆起区却塌陷下沉(glacioisostasy),洋壳也因水均衡(hydro-isostasy)而下沉 (Clark and Lingle, 1979; Mitrovica and Milne, 2002; Milne, 2015; Horton et al., 2018)。因此,远区大陆边 缘产生均衡掀升的"杠杆作用";杠杆的另一端一陆 架外海地壳—则会塌陷,引起大陆边缘和大洋中央 少量海水的流动。此外,大洋中的海水还流向高纬 度塌陷区(如西北欧北德-荷兰-比利时和英格兰, 美国东、西海岸及墨西哥湾),这被称作"热带海洋 虹吸"(Mitrovica and Milne, 2002; Milne, 2015)。尽 管"虹吸"是海水真的流动,但却与冰的融化无关。

远区中全新世RSL高海面是(1)杠杆作用造成的大陆边缘掀升和(2)虹吸作用造成海水外流的共同结果,过去我们对后者认识不足。对于远区大陆边缘而言,地壳掀升了、水也流走了,二者兼有。

虹吸作用造成海水流出渤海海峡,海面下降。 只是这种下降,在渤海湾仅为亚毫米级的年变化速 率(Mitrovica and Milne, 2002)。与本节上面提及的 "指印"一样,两种效应在现有IPCC各类预案中是否 已被采信,我们尚不十分清楚;抑或即便采信亦属 "可能性小"(low-likelihood)的极端情况。因此,它 们虽在表1中列出,但并未纳入本文对渤海湾相对 海面升降预测的定量计算中(方程3、表1和图4)。 随着今后极端气候事件可能造成的冰盖加速融化, 宜对这两个分量加强跟踪研究。

2.2.4 新构造下沉

渤海湾西岸位于一级构造单元渤海湾盆地内。 从南东向北西,渤海湾西岸的基底依次是埕宁隆 起、黄骅凹陷和沧县隆起(Li et al., 2021)。120个油 田深孔的综合研究表明,近500万年来,黄骅凹陷的 新构造平均下沉速率是0.035 mm/a;即便是盆地中 心的渤中凹陷,其新构造平均下沉速率也仅为0.08 mm/a;至于埕宁隆起和沧县隆起,它们的平均下沉速 率甚至低于黄骅凹陷(Huang, 2014; Liu et al., 2016)。 为留有余地,我们采用整数值0.1mm/a作为整个渤海 湾西岸更新世-全新世的新构造平均下沉速率,并据 此对相对海面高度进行校正(Li et al., 2021: Fig. 8b 及Tables A4.1-4.3第13列的第一行数值)。 2.2.5 沉积自压实下沉

松散沉积物堆积后,即因自重而发生沉降。这

种固结压实沉降,在渤海湾海岸带地表之下400 m 以内的地层中无例外地均有发生(李继军等, 2009)。近10 ka以来的全新世海面变化,一般发生 于20 m以浅的地层中。因此,在重建海面高度时, 必须对沉积自压实量加以校正(Li et al., 2021: Fig. 8c及Tables A4.1-4.3第13列的第二行数值);而该 文的 Appendix B则给出了(该文作者之一于谦及其 研究生所做的)渤海湾西岸深度直至80 m的自压实 曲线和40 m以浅地层的每5 m深度节点处的压实 量值。

2.2.6 人为抽取地下水下沉

渤海湾地面沉降主要受新构造、自压实和抽地 下水三个分量控制。渤海湾西岸地面沉降表观监 测值的变化,可以将人为影响从天然的新构造和自 压实分量中区分出来。新构造与自压实量基本是 线性的,因此变化的沉降值即可以人为因素解释。 1975—2015年间,渤海湾西岸(特别是城区)人为抽 取地下水导致地面下沉累计最大3m以上。根据该 地区高分辨率下沉等值线图(中国地质环境监测院, 2016),对所有有关海面标志点高程进行了因抽地下 水造成下沉的校正(Li et al., 2021: Fig.8d及Tables A4.1-4.3第13列的第三行数值)。

近年来,沉降速率在天津平原地区呈现从数厘 米/年到~10 mm/a、再向7 mm/a逐渐减小的趋势(周

8			华	北步	b 质 第47卷
	表 1	控制渤海湾西	「岸海岸帯(沿海国	P.原和潮间带)	海面变化与地形地貌变化的地学参数一览
	Table ⁻	ユーデーター 1 Δlistshow	「一」」 S contributions	of the various	中国文化与地方地貌文化的地子学员 远
	Table	the see lo	vol and coastal	morphology	an the west east of Robai Ray
		life sea le	ver and coastar	morphology	on the west coast of bolial bay
代码	分量	时段	深度	平均变化速率	出处 / 说明
		25.5 ~ 7 ka	-127.5 ~ -3.5 m	6.7 mm/a	Peltier et al. (2015)
		20.65 ~ 7 ka	-134.3 ~ -5.4 m	9.44 mm/a	Lambeck et al. (2014) / -134 m为L氏学派给出的末次盛冰期全 球最低海面。两个学派从盛冰期各自认为的最低海面上升到主 要转折点7 ka时的上升速率平均值是~8.1 mm/a
		10 ~ 7 ka	-31.75~-4.45 m	9.1 mm/a	Lambeck et al. (2014), Peltier et al. (2015) / 据该两时间节点的平 均值-31.75 m 和-4.45 m, 获得 10~7 ka平均速率9.1 mm/a
					小结:以上显示的末次盛冰期最低海面到7ka期间的算数平均上 升速率是~9mm/a
		7 ~ 0 ka	-4.45 ~ 0 m	0.64 mm/a	Lambeck et al. (2014), Peltier et al. (2015) / 采用7~5.5 ka (主 次要转折点间)和次要转折点 5.5 ka~0 ka 两个时段速率的加权 平均值。7~0 ka上升平均速率0.64 mm/a
		7 ~ 5.5 ka	-4.45 ~ -1.41 m	2.02 mm/a	Lambeck et al. (2014), Peltier et al. (2015) / 7~5.5 ka (主要与次 要转折点之间)的平均速率2.02 mm/a
1	ESL	7 ~ 5 ka	-4.45 ~ -0.86 m	1.79 mm/a	Lambeck et al. (2014), Peltier et al. (2015)
	(全球海面上升)	7 ~ 2 ka	-5.4 ~ -0.26 m	1.03 mm/a	Lambeck et al. (2014)
		5.5 ~ 0 ka	-1.41 ~ 0 m	0.26 mm/a	Lambeck et al. (2014), Peltier et al. (2015) / L 氏与 P 氏 5.5 ka 时的 ESL 均值是-1.41 m。5.5~0 ka 时段 ESL 上升平均速率0.20 mm/a
					 (2)10~7 ka时段:9.1 mm/a, (3)7 ka~1870 CE时段:0.64 mm/a, (3.1)7~5.5 ka时段:2.02 mm/a, (3.2)5.5 ka~1870 CE时段:0.26 mm/a。 ~7 ka前后是最重要转折点,之后海面上升明显减速;而~5.5 k 节点又将7~0 ka时段的减速分为两个亚带。本文推测这些暗含着对于渤海湾西岸的地貌格局—(a)海水进入渤海至7 ka时段的快速上升-沿岸堤及(b)7 ka~1870 CE时段障壁岛-潟湖盐沼-根本的制约作用
		13 ~ 7 ka	~ -65 ~ -3.2 m	10.3 mm/a	海洋图集编委会 (1990),李培英等(2008) / 推测渤海海峡深度~ 65 m,渤海湾海侵最大边界时是~7 ka的~0 m (袁路朋等,2019 王宏,2022),而 ESL 上升到-65 m 时是~13 ka (Peltier et al. 2015; Lambeck et al., 2014)。据此获得海水从黄海进入渤海后的 平均上升速率
		10 ~ 7 ka	~ -19.9 ~ -3.2 m	5.57 mm/a	Li et al. (2021), 王宏(2022), 李勇经贝叶斯方法校正后扩展至 10 ka 的变化带(未发表数据, 2023) / 该时段显示明显台阶状, 质 因不清
		7 ~ 0 ka	-3.2 ~ 0 m	0.46 mm/a	出处同上 / 7~0 ka 时段的加权平均值[1.47 mm/a×1.5 ka+0.18 mm/a×5.5 ka]/7=0.46 mm/a]
	DMCI	7 ~ 5.5 ka	-3.2 ~ -1 m	1.47 mm/a	出处同上 / 同时段的 ESL 速率 2.02 mm/a 小一些
2	KMSL (渤海湾西岸相 对海面上升)	5.5 ~ 0 ka	-1 ~ 0 m	0.18 mm/a	出处同上 / 同样比同时段 ESL 速率稍小。7 ka 以来 RMSL 速率与 ESL 在同一数量级内表现出微小差别,是真实情况的反映或误差 的影响,尚不能分辨
					小结:7 ka前后的确显示出明显的"二段式"特征,与全球 ESL变 化基本相同。7~5.5 ka和5.5~0 ka两个亚时段有微小差别。渤海湾西岸海侵最大边界与V堤出现时的7~~5.5 ka时段,GIA 种

http://hbdz.org.cn 华北地质, 2024, 47(1)

原始地貌的出现无关

大于L1+L2(图3),受该时段ESL的高值(即Peltier et al.(2015)) 影响的高潮水,导致雄县东海侵最大边界处闭合蛏壳的出现,海 侵边界内成为潟湖盐沼状态。稍大于局地下沉的区域 GIA 掀升 作用,又使蛏壳现在的层位比其原始沉积层位稍高一些。中晚全 新世以来GIA与下沉的"零和"博弈,使渤海湾西岸成陆过程的古 地形地貌格局,受制于海面影响而继续长期处于潮间带状态。至 于3 ka之后因人类活动导致的垂直加积,已与障壁岛-潟湖盐沼

1 77		11.	· ·
<u></u>	_	- HI	
.4			

					续表1
代码	分量	时段	深度	平均变化速率	出处 / 说明
		1870— ~ 2020 CE	~ 20 cm(?)	~ 1.7 mm/a(?)	(1) IPCC AR5 (2013, 2014)/1880—2012 CE 期间气温上升了 0.85℃、1901—2010 CE 期间海面上升了~19 cm。(2) IPCC AR6 (2021)/20世纪的海面比过去3 ka期间任何一个世纪的上升都 要快,1901—2018 CE 期间上升了20 cm,速率是~1.71 mm/a。因 此,本文将~1.7 mm/a近似作为1870—2020 CE 的海面上升速率、 上升量则近似作20 cm。AR6指出,海面上升速率正在不断加速, 1971—2018 CE 期间是2.3 mm/a,但2006—2018CE 期间则是3.7
		1900—2000 CE	15.8 cm	1.58 mm/a	mm/a IPCC AR6 SYN (2021) / 1995—2004CE 期间的海面均值与 1900 CE时相比上升了 15.8 cm
		2000-2100 CE	~ 44 ~ 74 cm	5.9 mm/a	IPCCAR5 (2013, 2014) / RCP2.6和RCP8.5预案,平均值5.9 mm/a
		2023—2050 CE	~19~ 24.5 cm	7.25 mm/a	IPCC AR6 SYN (2023) / 两类排放预案 (SSP1-1.9 和 SSP5-8.5) 的平均值分别是 19 cm 和 24.5 cm,由此获得 2020—2050 CE 海面 平均上升速率~7.25 mm/a
3	21世纪全球 海面上升预测	2050—2100 CE	~41.5~82 cm	6.18 mm/a	IPCC AR6 SYN (2023) / 两类排放预案 (SSP1-1.9 和 SSP5-8.5) 的平均值分别是41.5 cm 和82 cm,由此获得2020—2100CE海面 平均上升速率~6.18 mm/a
	每面工力顶肉	2018—2100 CE	41 ~ 76 cm	7.1 mm/a	Vermeersen et al. (2018), Van de Spek(2018) / 分别对应 RCP2.6 和 RCP8.5 预案并考虑了荷兰更强的海洋动力及均衡塌陷分量 (动态,2020,15,3-4),平均速率7.1 mm/a
		2023—2073 CE	~48.7 cm	9.7 mm/a	CPRA (2023) / 中情境,平均速率9.7 mm/a
		2023—2073 CE	~76.2 cm	15.2 mm/a	CPRA (2023) / 中高情境,平均速率15.2 mm/a
		2019—2050	76 cm	24.5 mm/a	NYCEDC (2019) / 平均速率 24.5 mm/a
		2019-2080	146 cm	23.9 mm/a	NYCEDC (2019) / 半均速率23.9 mm/a
		2019—2100	192 cm	23.7 mm/a	NYCEDC (2019) / 半均速率23.7 mm/a
				~7 ~ 8 mm/a	小语: 小问组织, 机构天子 21 世纪每间上开漏床守的顶侧速举多往 ~7~8 mm/a, 这比7~0 ka期间的 ESL平均上升速率(0.64 mm/a) 和渤海湾实测 RMSL平均上升速率0.46 mm/a高了一个数量级,接 近末次盛冰期后直至7 ka时的快速上升期间的平均速率~9 mm/a。 这个重归快速上升的预测, 意味着已经持续了~7 000年的贝壳 堤障壁岛~潟湖盐沼模式可能终结、并超过7 mm/a (Santilan et al 2023)的潮间带共沼消生临界值
t		2 ~ 0 ka	57	<0.3 mm/a	Horton et al. (2018) / GIA造成近2 ka以来RSL变化速率是线性的、几乎稳定不变
		5 ~ 0 ka	0/	0.5 mm/a	Mitrovica et al. (2018) Fig. 1
			\sim	~0.5 mm/a (?)	Chen et al. (2018) / 中国北方现代海岸带情况
4.1	GIA(均衡补 偿,远区大陆边 缘掀升)	10 ~ 0 ka		~0.67 mm/a (?)	王宏(2022)/该值是按6ka时新构造+自压实下沉最大4m反推的。在贝壳堤平原甚至达到5m或6m(王宏,2022),这就是该 文脚注11贝壳堤平原GIA甚至更高一些的表述。相反,牡蛎礁 平原受张家口-渤中断裂带的影响,GIA相对变弱。总体上,0.67 mm/a这个与全球(例如Horton et al., 2018)相比偏大的值,与局 地地壳粘弹性特征有关(?)(Bradley et al., 2016)。据文献 Mitrovica and Milne(2002), Milne(2015)可知从中国大陆边缘 (onshore)和洋分分别源向陆观海(offshore)的第二类虹吸作用
					(ourshole) 和注血分别派问题来海(Ourshole) 的第二类虹吸作用 (syphoning effect)的速率是~0.1 mm/a。但是,该效应已被包含在 GIA之内,不必单独列出 Mitrovica and Milne(2002), Milne(2015), Mitrovica et al.(2018),
4.2	指印效应(海 水流入,海面 上升)	现代		~16 mm/a(?)	Horton et al. (2018) / Mitrovica et al (2018) 显示今后 3 个世纪因 北极冰盖可能的融化,将造成远区海面上升 1 m,而南极冰盖融 化将造成美国沿海 1.4 m的上升。二者加在一起,将是1~2 m, 相当于~5 mm/a。Horton et al. (2015)的Fig.2b,c显示指印效应造 成的 RSL 上升与 GMSL 上升的比率关系在中国沿海是~1,即 GMSL 在 21 世纪上升速率若是 8 mm/a(见上"小结"),则南、北两 极的指印贡献均为 1,表明 21 世纪南、北极指印效应导致的相对 海面速率合计甚至可能高达~16 mm/a。但是,这是叠加在 GMSL 之上的 (Horton et al., 2018)、属于 IPCC 近两次报告中"低可能性" 的极端预测值,本文在讨论今后海面上升时暂不计入 (图4、5)

力日	- +	10	TIL
胆生	: ÷,	91.	TJ.

10			1	¥ 11	地质 第47卷
					续表1
代码	分量	时段	深度	平均变化速率	出处 / 说明
5.1	L1(新构造下沉)	10 ~ 0 ka		~0.1 mm/a	Huang et al. (2014), Liu et al. (2015), Li et al. (2021)
5.2	L2(沉积自压 实下沉)	10 ~ 0 ka		~0.6 mm/a	Li et al. (2021) / 110个RMSL标志点显示近10ka以来,自压实平 均下沉速率~0.5~0.7mm.a, max.1~3 mm/a
5.3	L3(人为抽取 地下水/油/ 气下沉)	1975 CE以来		~10 mm/a (?)	Li et al. (2021) / 在 40 年统计时段内 min. 3mm/a (no.2), max. > 75 mm/a (例如塘沽上海道)
5.4	我们自己的长 观孔监测的沉 降结果	2010 CE以来		~10 mm/a	杨朋(未发表资料,2023)/研究团队近10年来滨海新区观测数据,随着时间推移有逐渐减弱趋势
5.5	最新发展趋势			7 mm/a	新华社据天津市规划和自然资源局(2023),Su et al. (2023)/天津 市平原地区近年来平均沉降速率7 mm/a,甚至减小到4.5 mm/a。 既然 GIA、新构造及自压实等分量在近数十年内未发生明显变 化,则表观下沉量从1~2 cm/a减至7 mm/a,即可视作人为抽取地 下水下沉分量的变化。
6	近现代垂直加 积	1870—2023 CE		~2.75mm/a	王宏等(2002),李建芬等(2003),王福等(2006),王宏(2022) / ²¹⁰ Pb和 ¹³⁷ Cs示踪结果表明沿海低地加积速率~1~4.5 mm/a,本 文取均值
7.1	海岸线蚀退	1870 CE以来	~1 ~ 3km		王宏等(2002,2008)
		1960—1980 CE			王宏等(2002,2008)
7.2	海岸线淤进	1985—2023 CE	~4.6 km	\smile	文明征(未发表资料,2023)
		2019 CE以来		max. ~50 m/a	杨朋等(2023), Wang W.Y. et al. (2023) / 米草+牡蛎共生体促淤
8	潮间带盐沼、 红树林的生存 临界值	18 ~ 0 ka		~7 mm/a	Sanitilan et al. (2023) / 该文已消除 GIA 影响,而我们 RMSL 中的 GIA 和新构造下沉+自压实下沉大致抵消,因此该临界值适用于 渤海湾西岸
9	热膨胀			?	IPCC AR6 (2017), Horton et al. (2018)/目前尚不能给出渤海湾 地区具体的热膨胀值,但该分量已被包含在 IPCC 等的上升预案 中,暂不必单独计算
10	10年级物理 海洋事件			?	IPCC AR6 (2017), Horton et al.(2018) / 目前尚不能给出该分量 地区性具体贡献值,可借用纳入 IPCC 预案中的该分量估值
11	分钟-小时级气 象因素(气象 增水)			3.092 m, 3.262 m	IPCC AR6(2017), Horton et al. (2018), 吴少华等(2002), 宋美钰 等(2008), 王宏等(2010), 天津地质调查中心海岸带与第四纪地 质室(2018, 2021), 王福等(2023), 孙玉芹等(2023)/这里仅给出 50年、100年一遇的两个风暴潮高水位经验值, 气象、海洋部门还 可提供新的经修订的数值

注:关于ka、CE的含义,参见脚注1。本表的0ka,泛指现代。使用CE时,则指代更为具体的年份(年代),例如~1850—1870 CE(小冰期 结束于1850—1870年代)、~1960 CE(人为成因的海岸线淤进的开始年代)以及~1975 CE(天津市抽取地下水引起大面积沉降始于 1975年前后)等。关于21世纪海面上升,IPCC等组织和众多研究团队不同预案的预测值相差甚远,读者可根据IPCC等的不断修正的 结果,做出判断。表内粗体数字,是本文计算21世纪海面变化时所依据的有关分量的数值(参见上文方程3)。

明,2006;易长荣,2017;新华社2023年据天津市规 划和自然资源局:天津市平原区现代年平均沉降速 率已降至7 mm/a)。我们自己设在沿海的三个站位 近10年来的监测表明,尽管有逐渐减小的趋势,但 平均速率仍达到~10 mm/a(杨朋,未发表资料, 2023)。迄今为止最为系统的研究指出,继2014年 开始接受南水北调水、2018年又启动地下水管理项 目后,天津沿海近年来地面平均沉降已经降到4.5 mm/a,一些地区甚至开始出现回弹(Su et al., 2023)。 另有通过InSAR揭示津冀北部交界处一带因强烈 抽用地下水致使2015—2020年间局部平均下沉速 率达到~50 mm/a (Wu et al., 2022)^⑤。

上述多方面的研究表明,沿海条带区的地面沉 降问题,不宜轻易地认为已经完全解决。其实,即便沿

^③这是去年以来"天津在全球海岸带城市中下沉最严重"的网上流传消息的来源。网上报道常会夸大偏颇,这是一个例证。实际上是,沉降总体处于不断减缓的过程中(Su et al., 2022)。

海地区采用趋缓的7~4.5 mm/a下沉值,其与绝对海面 上升及其他相对上升分量的和,也已达到15.7~13.2 mm/a,减去造成相对下降的分量后,仍保持~12~10 mm/a,这已经远大于7ka以来的上升速率0.46 mm/a, 重新回到7 ka之前海面快速上升的~5.7 mm/a量级 了(表1、图3、4)。今后海面上升预案宜分为两个亚 类(沿海条带区的风暴潮-沿海工程高度预案和向内 陆的低地区地质-生态环境演化预案),为保险起见, 建议前者在本世纪中叶前可考虑仍采用10 mm/a值, 而后者可采用7 mm/a值。









Fig.4 Rate-comparison between two categories of elements affecting the RMSL rise or fall in the west coast of Bohai Bay

注:分量代码及数值见表1。蓝色条和棕红色条分别为导致 相对海面上升、下降的两类分量。该两类分量相互抵消后, 21世纪RMSL仍将保持>12mm/a的相对上升速率。 2.2.7 水体热膨胀(Thermal expansion)

大洋水体热膨胀,是造成21世纪海面上升的因素之一。该分量在2100 CE低预案上升总量(中值~45 cm)中的占比为~33%或2100 CE高预案上升总量(中值~73 cm)占比40%、甚至更高(IPCC AR5, 2013, 2014)。目前,我们尚不能像荷兰同行(van der Spek, 2018; Vermeersen et al., 2018)那样给出渤海湾具体的地区性热膨胀值,只能采用IPCC等组织发布的21世纪海面上升预测值,因为这类预测结果包含热膨胀等对海面上升贡献的一般估值,而不必另行计算。

2.2.8 大气-海洋动力(Atmosphere-Ocean Dynamics)

关于动力分量的内涵,有不同的定义(Shennan, 2015),本文将海洋环流等引起的年际-年代际 的海面变化和近岸气象因素(风增水)等,统归入这 一范畴。 关于太平洋年代际波动(the Pacific Decadal Oscillation, PDO),有推测认为在过去20年里因此而使 西热带太平洋RSL上升速率达到15 mm/a。模型预 测到本世纪末,随着大西洋经向反转流(the Atlantic Meridianal Overturning Circulation, AMOC)的减弱, 北大西洋西侧边缘的海面将升高20~30 cm(Mitrovica et al., 2018; Horton et al., 2018)。但是,上述中 国大陆所在的西太平洋大气-海洋动力变化对海面 的影响,远超出本文作者的专业范围。对于该分 量,荷兰考虑了欧洲北海区因受气温变暖、降水增 强和大西洋经向反转流等的影响,确定了与全球平 均值不同的地区性海洋动力贡献(van der Spek, 2018; Vermeersen et al., 2018)。

我们目前可采用21世纪在RCP8.5高碳排放情 境下海面上升的一般预测值,尽管有研究表明动力 海面变化对中国大陆海岸的贡献是~-0.5~0.5 mm/a 之间(Horton et al., 2018; Fig.2a)。

另一类数小时-数日级的气象变化引起的海面 波动,是大家相对熟悉的气象增水。例如(1)渤海 湾西岸百年一遇的风暴潮水位3.262 m,得到了该地 区近130年来12次风暴潮(王宏等,2010)和2019年 "利奇马"风暴潮高水位(文明征等,2020)的支持。 这是比渤海湾平均高潮位高出2.05 m(Li et al., 2021: Table A2)的极端高值。(2)河北省灾害应急部 门发布2023年8月初渤海湾湾顶处有30~60 cm的 风增水,相比上面(1)的极端高值,这是更为普遍的 情况。这两类因素,是否可作为气象增水的高值、 低值,抑或还需要增加中等估值,这些,有气象和海 洋预报部门的进一步研究与量化,是相对容易确定 的分量。我们的一个案例研究,可作为参考(孙玉 芹等,2023)。

3 结果

3.1 海面变化-海陆变迁过程重建

第一,确立了渤海湾西岸分阶段相对海面变化 的认知。(1)10~7ka期间的快速上升,(2)7 ka~ 1870 CE期间的缓慢上升(又可进一步细分为7~ 5.5 ka和5.5 ka~1870 CE两个亚阶段),(3)1870 CE 以来地区性海岸线的自然蚀退与同期全球气温上 升-海面重新加速上升同步,从而推测地区变化同 样是对全球变化的响应(表1、表2)。

第二,确定了海面变化是渤海湾西岸海陆变化 的主要驱动因素。自海水进入渤海海盆后,渤海--渤 海湾西岸的地形地貌格局依次出现~13~7ka期间 的渤海海盆--渤海湾西岸沿岸堤--沿海平原(?)和7 ka~1870 CE期间的渤海湾西岸贝壳堤障壁岛--潟湖 盐沼洼地体系,以及1870 CE以来、特别是1984 CE 以来人工岸线(养殖池外侧土堤-海堤--围海造陆区 块外侧)受到来自海洋的压力和天然岸线的蚀退为主 要特征的现代沿岸堤--沿海平原地貌体系[©](图3、4)。

第三,论证了今后海面变化-海岸带演进是对 过去和当下地质过程的继承与延续。对以海面上 升为主要影响因素的渤海湾西岸21世纪海岸带演 进趋势及相应预案,开展了持续近20年的研究(王 福等,2005,2023;宋美钰等,2008;王宏等,2010; Wang et al.,2010;王福等,2023;Li et al.,2023)。在 此基础上,又开展了海面上升导致泄洪延期的初步 探索(孙玉芹等,2023)。这些探索表明,与全球一 些海岸带的基础研究与应用研究进展相比(CPRA, 2017,2023; Van der Spek,2018; Vermeersen et al., 2018; NYCEDC,2019),我们已经具备了较好的基 础,并仍有提升的空间。

[®]1870 CE之后渤海湾西岸侵蚀加剧的现象,得到大量实际调查的证实(例如翟乾祥、吕先进,1987),最明显者是凡明清"小冰期"时在贝壳堤I堤外(向海侧)前出1~3 km的低地,在1870 CE 后被海水冲蚀殆尽(王宏等,2010)。1950年代末以后,因河流上中游用水增加,夏秋季洪水不再能冲刷入海河流口门和潮间带的季节性淤积物,因而有约20~30年的岸线淤进、潮间带变宽。这一现象被1984 CE 后的潮间带养殖、2000 CE 后的潮间带-毗邻浅海区围海造陆极大地加强。但是,那些残存的天然岸段(及养殖池土堤)则一直显示着从未间断的受到侵蚀的迹象,只是这个迹象被极大地掩盖了。考虑到I堤堤后向陆侧即便有低于高潮位的残存潟湖洼地(如南、北大港),但已被阻断了与开放海湾的联系;洼地外一般低地的高程也已因农耕、城镇化而加高,与高潮水位相近甚至高于高潮水位。因此,尽管养殖岸线-海堤岸线(纯防护岸线与防护+亲水岸线两类)-围海造陆岸线构成的渤海湾西岸(天津岸段)的人工岸线仍起着与天然障壁岛贝壳堤同样的防护作用,但其向陆侧已不再是真正意义上的"潟湖"洼地了。加之21世纪海面极可能重回快速上升,有鉴于此,我们倾向于认为1870 CE 之后的渤海湾西岸地形地貌格局,已经开始转为"(人类活动影响下的)沿岸堤-沿海平原体系"(表2、图4)。

第四,跟踪了全球海面变化研究,并据实际调 查数据等确定了渤海湾海面变化的各个分量、做了 初步的定量评估(表1)。

3.2 影响海面变化各分量分析

21世纪海岸带可持续发展面临的地学挑战,要 求我们有尽可能好的基础研究、并尽可能快地转化 为应用研究。这里关键的一步,就是海面变化分量 的定量评估。相对海面变化(例如由潮位监测数据 给出的表观值),受到我们较为熟悉的"绝对"的全 球海面变化以及局地新构造、自压实、抽地下水和 短尺度气象事件(向岸风与风暴潮增水)的控制;此 外,还有相对不熟悉的冰-水质量转化引起的地壳 粘弹性均衡补偿、更长尺度的动力海洋事件和短尺 度地壳弹性变化("指印"效应,fingerprinting)和长 尺度虹吸效应(syphoning)等的影响。因此,相对海 面变化(A)可以下列等式表示(代码含义见表1):

A=[3+4.2+5.1+5.2+5.3+9+10+11]-[4.1+4.3+6] (1) 导致相对海面上升的分量:

3-指全球海面上升,4.2-指印效应(暂不考虑, 但若今后数十年内不能达到减排目标,此分量必将 得到高度重视),5.1-新构造下沉,5.2-沉积自压实 下沉,5.3-人为抽地下水(油、气)下沉(按过去半个 世纪的发展趋势,本文预计20-30年后该数值将归 0,届时将不必再考虑),9-热膨胀(地区性数值缺, 借用纳入分量3的一般估值),10-指10年级海洋动 力影响(地区性数值缺,借用纳入分量3的一般估 值),11-小时-日级气象影响;

导致相对海面下降的分量:

4.1-GIA(均衡掀升),4.3-虹吸效应(暂归入4.1 分量GIA内,不必考虑),6-沉积加积。

表1是影响相对海面变化的上述各分量的时空 特征及变化速率的集成。天津平原区5.3分量已从 ~20年前的1~2 cm/a 降到2023年的~7~4.5 mm/a。 按照乐观估计,今后该分量将继续降低、直至为0。 但是,其他分量的速率均不会发生明显变化,甚至 还会向不利方向发展,例如分量3、4.2、9、10和11, 多半会进一步加强而使相对海面上升的速率更高。 考虑到我们目前对个别分量的理解尚不深入(或可 能被包含在其他分量之中、或目前仍不具足够高的 确定性),例如4.2和4.3,因此方程1可简化为:

 $A = [3+5.1+5.2+5.3] - [4.1+6] \tag{2}$

这些将发挥实际作用的分量在表1中以粗体字 表示。相对上升与相对下沉博弈的具体结果是:

A = [8+0.1+0.6+7] - [0.67+2.75] mm/a(3)

结果是12.28 mm/a,即至少21世纪中叶前后渤 海湾西岸相对海面将保持~12.3 mm/a的上升速率。 21世纪下半叶,分量5.3将可能不复存在,但分量 4.2则可能凸显。因此,21世纪下半期的海面上升 将可能仍然保持至少>5 mm/a的速率。此外,无论 如何,均需考虑分量11(气象增水)的叠加。

4 讨论

4.1 海面变化对地貌格局的制约作用与过程重建

渤海湾相对海平面(RMSL)变化带与全球冰融 等效海面(ESL)变化带在~7 ka之后基本重叠(图 2b),是渤海湾全新世相对海面变化的一个显著特 征。这是全球ESL、区域GIA、局地下沉(新构造+自 压实下沉)和沉积供给^①等多方面共同博弈的结果。 表现在地形地貌上,就是~7 ka以来海侵最大边界 内出现受大潮水控制的贝壳堤障壁岛--潟湖盐沼的 周期性交替过程(图3)[®]。

图 3 显示渤海湾 RMSL变化带从快速到缓慢的 "二段式"上升、"~7 ka转折点"以及缓慢上升过程还 可细分出的次要的"~5.5 ka转折点"(图 3,表1、2)。

^①10 ka以来渤海湾西岸的沉积供给变化及对地貌格局的影响,以往仅有黄河它徙、贝壳堤形成的论断(李世瑜,1962;赵希涛, 1980),本文并未在这方面做深入的探索,留待今后弥补。

³⁸图3反映距今~10~8 ka以来,海水已经上升到现代渤海湾海平面以下~15~20 m的高度,~8ka时的海岸线大致位于现代海 岸线的正下方。随后,继续上升的海水在~7 ka时向西(内陆)入侵到最远位置(称作"最大海侵边界"),在雄县城关北东东 (NEE)方向8 km、埋深~10 m处发现的双壳闭合、直立状态的蛏壳(袁路朋等,2019)证实了这一点。7 ka之后,尽管海面仍在 缓慢上升,但在潮间带深度出现的障壁岛型贝壳堤海岸线以及与其共生的岛后潟湖盐沼洼地,将海岸线逐步向东扩展。这是 与7 ka之前从东向西的海进方向相反的、转而从西向东的海退过程。图3及下面的图4着力反映的就是这后一半:从西向东的 障壁岛-潟湖体系及其成陆过程,乃至21世纪可能重回"沿岸堤-沿海平原"地貌格局的演化预测。因此,该两图的海面上升变 化带做了水平翻转,以便更为具象地反映从西向东的过程。

7 ka之前

若不考虑新构造活动,根据海洋图集编委会(1990)、李培英等(2008)推测的渤海海峡的深度 是~-65 m。两条 ESL曲线显示海面升高到~-65 m 的时间是~13 ka(图3),此即海水刚进入渤海海盆 的时空状况[®]。另一方面,渤海湾海侵最大边界的 时空状况是~7 ka和~0 m (袁路朋等,2019;王宏, 2022)。据此可获得海水从黄海进入渤海后的平均 上升速率(表1)。

从~13 ka到7 ka时,在长达六、七千年的时间 里,海水从~-65 m的渤海海峡进侵到其最大边界 的~0 m高度的雄县东一带(在雄县东,蛏壳海面标 志点所在层位被埋在地表以下~10 m处,袁路朋 等,2019)。在近东西距离~400 km、地形坡度~ 0.16的空间以平均速率~10.3 mm/a的快速上升,相 对于7 ka以来从雄县东到现代海边的120 km长度、 地形坡度接近零[®]的空间以平均速率~0.46 mm/a的 缓慢上升(近数千年来甚至不再上升),形成强烈的 反差。推测前者应该是沿岸堤-沿海平原体系,而 后者才可能是海面相对缓慢上升时的贝壳堤障壁 岛-潟湖体系。

海水进入渤海后,在长期裸露的古渤海海盆 (李培英等,2008)有过数次上升相对放缓的时候。 图1显示~15~10 ka期间两条 ESL曲线的二、三次 相对快速上升与稍缓的转换;图2显示~9~8 ka时 在渤海湾更为明显的又一次变缓事件(图2a:~9~8 ka时海面变化带呈"平台状"),这些暗示着在这几 个时段可能有沿岸堤发育,特别是9~8 ka时在接 近现代海岸线处的-15~-17 m深度可能形成凸起 岸堤。这数道被埋藏在中晚全新世地层之下的古 海岸线,是今后寻找先民遗存的参考地带。

(2) 7 ka ~ 1870 CE

~7 ka转折点时渤海湾 RMSL 变化带高度-4.1-~-2.3 m(平均值-3.2 m),比同时期的 ESL带-5.4~-3.5 m(平均值-4.45 m)高>1m(图 2b、3),推测 GIA 稍大于局地下沉。5.5 ka转折点及以后则落在 ESL带内(图 2b),说明自~5.5 ka始,GIA已转为与下 沉正好相互抵消。5 ka以来,渤海湾 RMSL带就与 ESL带的时空位置完全相同了(图 2b)。7 ka以来, 海侵边界内古地表在 GIA 与局地下沉的博弈之下, 基本上总是被平均高潮水(MHW)淹浸[®]。

袁路朋等(2019)的雄县东剖面~3 ka时间线的 高度,说明7 ka的闭合蛏壳指示的海水影响环境与 3 ka沉积层之间在~4000年里仅沉积了~2~3 m 厚,也表明潟湖盐沼洼地的西半部长期保持地势低 下卑湿状态,直至3 ka时才逐渐脱离海水的影响。 图3据此推测了3 ka沉积等时线向东延伸的位置。 当与始于~6~5 ka时的V堤对比时,可知该3 ka等时 线向东应止于V堤处,V堤以东那时仍是开放潮间 带-极浅海。南运河的大规模开挖,还要更晚一些。

渤海湾西岸7ka主要转折点后海面上升减缓, 均衡补偿初期(7~5.5ka)稍大于下沉、随即(5.5ka ~1870 CE)二者相互抵消的地质条件,导致贝壳堤 障壁岛-潟湖盐沼地貌格局的形成。1870 CE 至今 及21世纪趋势见图5。两条蓝实线是全球 ESL带 上、下边界(图1),两条蓝虚线则是渤海湾的 RMSL 带上、下边界(图1),两条蓝虚线则是渤海湾的 RMSL 带上、下边界(图2a)。图内通过纵轴0 m的水平线 同时兼顾时间与东西向距离,并非等分。7ka海侵 最大边界雄县东与相邻最近的~6ka海岸线(V贝 壳堤)的东西向距离~80km。相反,另几道相对年 轻的贝壳堤间的距离就要短的多(IV 堤距现代海岸 线最远处~45km)。人类活动在~3ka后造成加积

[®]老铁山水道尽管存在-87 m的"跌水"(李培英等,2008),但海水能否进入取决于与黄海联通的最低通道而非更深的"跌水"。 [®]按Lambeck et al. (2014)和Peltier et al. (2015)两条ESL曲线在7 ka时的均值-4.45 m、以及GIA的贡献使渤海湾西岸RMSL 在当时位于-4.1 ~ -2.3 m (均值-3.2m)(图1,表1),作为当时海侵最大边界内的近似古地表代用指标,可知7~0 ka以来反向 内陆和缓倾斜的地表坡度接近0。

¹⁰渤海湾湾顶处现代平均高潮位(MHW)是~1.2 m,并近似地认为全新世古潮差与此相同(Li et al., 2021: Table A2)。据此,若7 ka时海平面是Peltier et al. (2015)的-3.5 m,则当时的MHW就是~-2.3 m。这个高度完全可以淹没当时的RMSL变化带因GIA 稍大于下沉而造成的-4.1 ~ -2.3 m的高度(图 2a)。若认为7ka时ESL是-5.4 m(Lambeck et al., 2014),则当时的高潮水-4.2 m 尚不足以淹没由RMSL所反映的当时地表高程的低值-4.1 m(图 2a)。这也是本文倾向于在7 ka前后采用Peltier et al. (2015)的相对较高估值的原因。又据Törnqvist教授:L氏在7 ka时-5.4 m的较低的海面,意味着那之后必须有更大量的冰融水注入洋盆。但直至目前,这样的认识似乎并未得到充分的证实(与T氏的个人讨论,2023.12)。

(3 ka等时线)。II 堤复合体处的海相层与上覆潟湖 盐沼层的时间界线是550 CE(商志文等,2015),据 此可推知该地潟湖盐沼层与上覆河流面流盖层的界 线要晚到北宋黄河北流入海的1048 CE。海面上升 速率见表1。

冰期时直接东去入海的河流因侵蚀基准面抬 升在7ka以后失去东流动力、成为潟湖盐沼低地中 的"散流",以致7~3 ka期间,NWW-SEE (北西西-南东东)向张家口-渤海断裂带(包括海河断裂)的 凹陷作用凸显,加上华北平原NNE-NE(北北东-北 东)向构造的控制作用,同时直到3ka之后出现的 人为加积的加剧,方才使7ka以来的散漫河流在3 ka后始转为重新下切、束窄,偏向北流动的相对固 定河型,并多有开始加高的天然堤(图3)。这多种 自然与人为因素的叠加,是距今2000至1000年间 多条河流出现近南北向河段,从而被先民加以疏 浚、贯通为运河的地质基础。其实,更深层的原因, 仍在于海面上升缓慢、均衡掀升对消下沉,使得渤 海湾西岸可以长期保持潮间带深度的潟湖盐沼洼 地地貌这个根本条件。运河的出现,是在此基础上 因人类活动导致水土流失加剧,从而加积并引起河 型变化的自然-人类活动复杂过程的响应。在2~ 3 ka之前,尚无下切的河段且即便有更强大的生产 力,也不大可能在潟湖盐沼低地中的缺少北向天然

堤的散流体系中开挖运河。

5.5 ka作为次要转折点,其与7 ka主要转折点 之间的1500年历时,是最老贝壳堤(V堤)出现及该 堤与海侵最大边界之间潟湖1期的发育时间。

作为从地貌学角度阐述渤海湾贝壳堤-沿海低 地发育史的第一人,王颖(1964)早已指出渤海湾西 南部平原可能的潟湖成因以及作为贝壳堤基础的 "背迭海积阶地"的存在。

设想 GIA 掀升太强、沉积加积太早,海侵边界 内很快就会成为高出高潮位的陆地,而不是潟湖 了;反之,GIA 掀升和沉积太弱太晚,而下沉太强,地 表高程则会过低,转为潮下带,同样不利于潟湖盐 沼的发育。沉积供给加速是3ka之后、主要发生于 海侵最大边界与V、IV 两道老贝壳堤之间的沿海低 地西半部潟湖1期、2期地区(图3:雄县向东的3ka 沉积等时线),至于到II堤一带,海相层被潟湖盐沼 层取代是550 CE的南朝中晚期(商志文等,2015; Shang et al., 2016),而陆源河流面状加积的出现,更 要晚到 1048 CE 的黄河北流了(图3)。

4.2 渤海湾海岸带21世纪演化趋势分析

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)自1990年 代开始,先后发布了六份气候变化评估报告,针对 全球气温上升导致的现代海面上升(与冰融水等质

时段	亚时段	亚时段 海面上升 平均速		地貌响应
10 ~ 7 ka		快	5.57 mm/a	海水进入渤海海盆,沿岸堤-沿海平原不断被淹没,海岸线后退
7 ka ~	7 ~ 5.5 ka	慢	1.47 mm/a	形成介于海侵最大边界与较老的障壁岛型贝壳堤(V、IV堤)之间宽达80 km、时间跨度~1500年的潟湖1期、2期洼地,此即"雍奴薮"的一部分。7 ka之前的具下切河道的东流古黄河、古海河在此时因侵蚀基准面抬升而成为固定下切河道功能几乎丧失的散流
1870 CE	5.5 ka ~ 1870 CE	更慢	0.18 mm/a	形成 IV-I 道障壁岛型贝壳堤岸线与各道堤之间的潟湖盐沼洼地(依次编为潟湖3-6期)。只是在3ka之后,先民对内陆山地植被的破坏才足以在潟湖1-4期地域开始明显加积作用。潟湖5-6期地域,则还要晚到550 CE前后(大港穿港路采土场)(商志文等,2015)。贝壳堤障壁岛与堤间潟湖盐沼洼地的交替,持续了近7000年
1870—2023 CE	23	重新 加快	~1.7 mm/a	1870 CE前后,小冰期结束,海岸线随即表现为明显蚀退。~1950—2010 CE人类 活动导致岸线推进(潮间带养殖池与围海造陆)。但是,自然蚀退从未停止(例如 青坨子、汪子岛岸段的现代蚀退)。同时,~1990 CE(?)之后地下潜水位开始出现 反向倾斜
2024—2100 CE		可能更快	~8 mm/a(?)	河流不再能搬运足够多的泥砂填补相对海面上升而在潮间带和毗邻潮下带产生的越来越大的垂直空间(可容空间增加),海岸侵蚀将加强。海岸线向陆一侧的低地因人类活动而使地表高程增加,一般不再低于高潮位,从地貌学上应归入"沿海低地",以人工为主的海岸线(海堤、围海造陆区块)遂成为"沿岸堤"。由此推测将转为与10~7ka期间相同的地貌格局

表2 渤海湾西岸海面变化与地形地貌格局的响应(海面变化速率见表1)

Table 2 Sea level change and response of the local morphology in the west coast of Bohai Bay

华

量的等效上升及气温上升造成海面上升的其他影 响分量),提出了各种预案。表1尽可能地开列了包 括这些在内的引起海面上升的全球、区域与局地分 量的定量评估值。

以IPCC发布的21世纪海面上升预测结果及全球、渤海湾地区10ka以来的海面变化对比研究为基础,我们给出了渤海湾西岸21世纪海面上升的初步预判(图4)。

图4推测了至少将持续至21世纪中叶的相对 海面~12.3 mm/a的"净"上升速率。从地质学角度, 可解释为21世纪因相对海面加速上升而致可容空 间(accommodation space)增加(表2、图5)。

1983—2023 CE期间,渤海湾湾顶处马棚口岸 段的高潮水边线(高潮岸线)人为向海推进了4.6 km,新的高潮线附近因开挖虾池而在新生高潮滩面 上就近堆积了>2m的泥质沉积物,随即于近年来自 然地出现了"米草滩+牡蛎滩/礁+贝壳滩"盖层。但 是,今后这类起保护作用的、类似建筑物"散水" (apron)的盖层,将可能因"一刀切"的铲除米草而消 失,不利于应对海面上升造成的滩面侵蚀、岸线后 退,特别是潮间带盐沼的消失(南方则是红树林消 失)(Saintilan et al., 2023)。

质

自7 ka以来,缓慢上升的海面变化保证了渤海 湾西岸沉积可容空间的基本稳定,致使贝壳堤障壁 岛-潟湖盐沼周期性交替的发育过程一直持续到~ 1870 CE前后的"小冰期"结束。1870年前后至21 世纪第一个十年期间,全球气温上升了~0.85°C、海 面上升了~19 cm,平均上升速率~1.7 mm/a(IPCC AR5, 2013, 2014)。但是,近年来上升速率呈加速趋 势,1971-2018 CE期间是2.3 mm/a,2006-2018 CE 是 3.7 mm/a (IPCC AR6, 2021)。可见, 自 1870 CE 至今的150年里,全球气温与海面保持加速上升的 趋势。这一进程,若在完全自然状态下,会造成海 岸线的蚀退,这已得到了渤海湾西岸1870—1950 CE期间岸线全面蚀退的证实(翟乾祥、吕先进, 1987;王宏等,2008),贝壳堤I堤在小冰期时向海方 向淤出的1~3km宽的低地及新生的贝壳质障壁小 岛被蚀退殆尽、甚至I堤自身也受到了侵蚀(王宏等, 2002)(图6)。但是,这一进程随即被人为影响掩盖 了。1960 CE之后, 工农业活动用水需求增加, 造成 入海河流夏秋季大洪水对潮间带季节性淤积的冲刷 能力减弱,潮间带开始淤宽、淤平;先后始于1984 CE





注:1870 CE时的前凸岸线随着小冰期结束而被蚀退至1950 CE的位置,甚至I堤岸线也被蚀退(虚线)。近40年来的人 为岸线向海推进了~3~5 km(甚至超过了1870 CE岸线)。但是,随着海面上升、地面下沉造成的"可容空间"不断增加, 相对海面上升,今后海岸线将可能从2023 CE处重新转为蚀退。向右侧开口的蓝色三角带表示逐渐增加的可容空间和 上升的相对海面(参见表1),注意为强调相对海面上升的危险,右侧纵轴的标度是"cm"。

http://hbdz.org.cn 华北地质, 2024, 47(1)



图 6 渤海湾西岸阶段性海面上升及海岸带地貌响应的 演化重建 (13 ka-2023 CE) 与预测 (2024-2100 CE) 模型示意图

Fig.6 Physical model illustrates the reconstructed stage-rise of sea level and resulting morphological evolution (13 ka—2023 CE) and prediction (2023—

2100 CE)

注:时间和深度标尺均为示意性的,并非等分。1870—2023 CE全球海面上升值为实测,~20 cm (表1);但 2024—2100 CE的上升则按各类极端高预案,至2100CE时可达~1.5 m、 甚至更高(表1估值:IPCC AR6 SYN, 2023; CPRA, 2017, 2023; NYCEDC, 2019),这是比图5选用的中、高预案更高的 估值。

和2000 CE前后的个人行为(养殖业)与政府行为(围海造陆),导致海岸线大规模地向海推进。即便如此, 那些仍保持天然状态的岸段,仍显示出从未间断的蚀退,例如中新生态城的青坨子岸段,在2004 CE 后仅 三、四年时间就在贝壳堤I堤前方(向海侧)的天然高 潮线处侵蚀出 1.5 m高的海蚀陡坎(Wang et al., 2010)。类似地,渤海湾西南岸 2019—2023 CE 的年 际监测显示,汪子岛五年间遭受侵蚀的7km长的贝壳 堤岸段,平均蚀退速率~4 m/a、最大蚀退距离 27 m, 形成 0.5 m高的侵蚀陡坎(Wen et al., 2022; 天津地质 调查中心海岸带与第四纪地质室,2023)。海岸线加 剧侵蚀后退,是海岸带面临的重要现代地质环境问题 (Wang, 2019)(图5)。

5 结论

本文是我们将海面变化基础研究转向应用研

究的最新尝试。其预期读者,包括专业同行以及海岸工程、海岸带规划管理和政策制定者两类人群。因此,我们注重对基本概念的解释和尽可能易懂的 表述。

本文从地质学角度,回顾了末次冰期结束后, 气温转暖、海面上升在渤海湾留下的地质印记。这 一过程的重建,成为认识今后海面变化必不可少的 基础。我们试图揭示海水进入渤海海盆、到达最大 海侵边界、然后退回至现代海岸线处的13~10 ka 以来渤海湾西岸海面上升的二段式特征:10~7 ka 期间快速上升与沿岸堤-沿海低地地貌格局及7 ka —1870 CE期间上升明显减速直至停止与贝壳堤障 壁岛-潟湖盐沼地貌格局。我们的研究表明,海面 上升及其变化的速率,是渤海湾西岸得以形成的最 主要的驱动因素。~3 ka 以来人类活动的参与,又 在这一地质大背景下演绎出人-地相互影响、制约 的极其生动的画卷(例如运河的诞生),对此的深入 挖掘,将是我们今后又一个以基础研究服务地方经 济社会发展的新挑战。

以上面的认识为基础,本文还特别注意并强调 了1870 CE这个距我们最近的时间节点。渤海湾西 岸在该时间节点后,终结了已经持续近7000年的 贝壳堤障壁岛-潟湖盐沼地貌格局。随着可容空间 的增加,今后可能转回至13~7ka期间海面快速上 升-沿岸堤地貌格局(即"二段式"海面-地貌格局的 前一段)。这些,需要我们给予足够的关注。

以上,是我们预期的"渤海湾西岸21世纪地学 报告"的基础材料。文内介绍的思路、方法和尽可 能定量化的表述,将在今后得到进一步修改完善, 并为其他研究者提供参考和借鉴。

海面上升、地面下沉造成的可容空间增加、相 对海面上升,今后可能导致:

(1)海岸线蚀退、潮间带变窄;

(2)直接进入潮下带上部的围海造陆区块的前 缘基足面临被淘蚀的危险;

(3)>7 mm/a的相对海面上升对潮间带盐沼、红树林造成毁灭性破坏(Saintilan et al., 2023);

(4)海水侧向压力进一步加剧,加重潜水位反 向倾斜和沼泽化的潜在风险;

(5)地面下沉、潮水位抬高与气象增水,三者叠

加将延长闸外高潮位高于闸内河流洪水位的时长, 从而缩短泄洪时间(孙玉芹等,2023);

(6)海岸线的侵蚀后退,同时也威胁河口、泄洪 闸口,直接破坏所有沿海工程(海堤、泄洪闸、围海造 陆区块外围护堤和"亲水岸线"等),并将迫使这些工 程的高度作相应调整、乃至整个构筑物的搬迁。

总之,面对海面上升,我们必须高度重视潮间 带和沿海低地的地质环境安全,加强中长尺度的基 础调查与研究。例如"固滩促淤",依据实际数据评 价近年来正在现代潮滩上生长着的滩面保护盖层 "米草滩-牡蛎滩/礁(天津地质调查中心海岸带与第 四纪地质室,2021;杨朋等,2023;Wang et al., accepted)-贝壳滩"的利弊等。又如,开展海岸线战略布 局研究[®]。另一方面,建议海岸工程设计者考虑本 文所提出的海面上升、岸线蚀退问题;建议规划管 理和决策者组织相关单位,尽早谋划、启动海岸带 应对海面上升的预案研究。

致谢:长期以来,我们的海岸带地学调查与研究,得 到了上级单位、同行们的大力支持;与T.Törnqvist教 授(美国图兰大学)讨论ESL曲线;三位评审专家对 文稿提出了宝贵的意见建议;编辑部王小丹、王国明 和曾乐认真校对、编辑文稿,一并致谢。本文也是 "天津市海洋地质生态联盟"的成果。

中文参考文献

陈永胜,胡亦潘,姜兴钰,等.2021.渤海湾沿海低地第II海相层记录的MIS 5a阶段海侵[J/OL].中国地质,https://kns.cnki.net/kcms/

detail/11.1167.P.20210628.1339.004.html.

质

- 地球科学大辞典编委会.2006.地球科学大辞典[M].北京:地质出版 社,962-963.
- 范昌福,王宏,李建芬,等.2005.渤海湾西北岸牡蛎礁体对区域性构 造活动与水动型海面变化的响应[J].第四纪研究,(25):2,235-244.
- 高抒.2021.巨浪来袭:海面上升与文明世界的重建(原著:Goodell J.)[M].上海:上海科学技术出版社,289.
- 海洋图集编委会.1990.渤海黄海东海海洋图集[M].北京:海洋出版 社,3-5.
- 李继军,翟子梅,沈键,等.2009.天津城市地质调查成果报告[R].天 津市地质调查研究院,628.
- 李建芬,王宏,夏威岚,等.2003.渤海湾西岸²¹⁰Pb,¹³⁷Cs测年与现代 沉积速率[J].地质调查与研究,(26):2,114-128.
- 李建芬,商志文,王福,等.2015.渤海湾西岸全新世海面变化[J].第四 纪研究,(35):2,243-264.
- 李培英,徐兴永,赵松龄.2008.海岸带黄土与古冰川遗迹[M].北京: 海洋出版社,49-51.
- 李世瑜.1962.古代渤海湾西部海岸遗迹及地下文物的初步调查研 究[J].考古,6,652-657.
- 商志文,陈永胜,姜兴钰,等.2015.渤海湾西岸先民用海的新发现及 对"西汉海侵"的启示[J].地质论评,(61):6,1468-1480.
- 宋美钰,王福,王宏.2008.21世纪中叶天津沿海地区极端高水位趋势预测[J].地质通报,(27):6,829-836.
- 孙玉芹,张泽,姜兴钰,等.2023.海面上升导致泄洪延时:子牙新河案 例分析[J/OL]. 华北地质, https://link. cnki. net / 12.1471. p2023 0921.1655.002.
- 天津地质调查中心海岸带与第四纪地质室.2018.21世纪海面上升 与我国研究案例;渤海湾地区(案例1)[J].海岸带地质环境研究 动态,6,15-21.
- 天津地质调查中心海岸带与第四纪地质室.2021.海面变化与21世纪上升预测[J].海岸带地质环境研究动态,17,17-26.
- 天津地质调查中心海岸带与第四纪地质室.2021.海岸带生态保护 修复亟待加强天然牡蛎礁保护的建议[R].中国地质调查局报

¹⁰南京大学高抒教授在其所译的《巨浪来袭:海面上升与文明世界的重建》一书的序言中强调"绿色海堤"概念:同时修筑两道 海堤,内侧的是传统的防止高潮水位的挡水海堤,外侧是抗浪海堤。两堤之间和外侧抗浪堤以外(向海侧)均可建成盐沼湿地, 用海岸生态系统抵御海面上升和岸线侵蚀(高抒,2021)。厦门大学李炎教授则进一步指出,这种"复合海堤系统"与2023年夏 秋"华北大洪水"的排泄(孙玉芹等,2023)存在矛盾:一维剖面上的复合海堤系统很难满足充分泄洪要求。那么自然界中是否 存在这种具有双向耦合特征的海岸带呢?欧洲北海沿岸著名的"障壁岛-瓦登海"海岸系统就是最典型的二维双向耦合复合 海岸带系统:障壁岛是外侧天然的自组织"抗浪海堤";瓦登海内的围垦区大堤则是人工的"挡水海堤"(或在长江中下游称作" 围垸");两者之间留有潮汐汊道、潮坪和盐沼系统,因其共振频率处于M4和M2分潮之间的"近共振状态",较好地兼顾了水体 连通交换条件和较稳定的潮波振幅条件,也为陆域泄洪准备了足够的缓冲水体,为瓦登海内创造出一个丰富多彩的,具有双向 应对海面上升-风暴潮灾害和陆域暴雨洪水灾害的韧性,且适宜人类活动的滨海生态系统。华北平原,特别是黄河三角洲海 岸带,同样具备建造离岸障壁岛的自然条件和社会经济条件。渤海湾至莱州湾一带浅海的海洋油气开发集群,以及沿岸的海 上风电群、光伏群,应可以规划出应对未来数百年气候变化和海面上升的障壁岛工程群的空间,经过技术与生态环境论证,允 许按百年尺度的"绿色围填海",既可成为新的经济活动热点,又可作为人为抽取地下水(油气)引起的地面下沉的生态修复工 程,同时又是黄河入海沉积中心有序的"后备"地带(李炎,未发表资料,2023)。

477 B		4-	
- <u>-</u>	<u> </u>	ΒН	
THO 2		ㅁㅂ	

告.

- 天津地质调查中心海岸带与第四纪地质室.2023.渤海湾海岸带贝 壳堤生态地质调查研究获得新进展[R].中国地质调查局报告.
- 王福,钟新宝,康慧,等.2005.天津市及其沿海地区地表高程变化现 状及趋势[J].地质通报,(24):1,87-91.
- 王福,王宏,李建芬,等.2006. 渤海地区²¹⁰Pb,¹³⁷Cs 同位素测年的研 究现状[J]. 地质论评,(52):2,244-260.
- 王福,王宏,李建芬,等.2023.中国海岸20ka以来的演替过程及趋势 分析:对现代海岸生态保护修复的启示[J].中国地质,(50):1,61-83.
- 王宏,李建芬,康慧,等.2002.渤海湾西岸泥质海岸带现代地质作用 (沉积,侵蚀与岸线变迁)及精细测年[R].中国地质调查局报告, 81.
- 王宏,宋美钰,王福,等.2008.渤海湾西岸泥质海岸带地质环境现状 与趋势预测[J].地质通报,(27):6,726-738.
- 王宏, 商志文, 王福, 等. 2010. 渤海湾西岸风暴潮: 叠加地质因素的 新探讨[J]. 地质通报, (29): 5, 641-649.
- 王宏.2022. 渤海湾障壁岛-潟湖型成陆过程及对今后海岸带可持续 发展的启示[J]. 华北地质, (45): 1, 1-17.
- 文明征,姜兴钰,杨朋,等.2020.汪子岛贝壳堤地质调查年报[R].中国地质调查局天津地质调查中心报告,20.
- 杨朋,李建芬,王福,等.2023.我国天然牡蛎礁现状及保护修复建 议[J].中国地质,(50):4,1082-1092.
- 易长荣.2017.天津市控制地面沉降工作最新进展[J].海河水利,3, 42-43.
- 袁路朋,王永,姚培毅,等.2019.河北雄县全新世中期海侵地层的发现[J].地质通报,(38):6,911-915.
- 翟乾祥,吕先进.1987.历史时期渤海湾西岸的演变,天津史地知识 (一)(卞僧慧主编)[M].天津:天津市地名委员会办公室,1987, 116-133.
- 赵希涛.1980.渤海湾西岸全新世海岸线变迁,华北断块区的形成与 发展(中国科学院地质研究所,国家地震局地质研究所主 编)[M].北京:科学出版社,302-309.
- 中国地质环境监测院.2016.华北平原关键地区地面沉降报告[R]. 中国地质调查局报告,240.
- 周明.2006.本市地面沉降速率减缓[N].城市快报,2006,11,10.

References

- Cary M, McAfee R, Wolf C L. (eds.). 1972. Glossary of Geology[M]. Washington D.C., American Geological Institute, 241, 300.
- Chen N, Han G Q, Yang J S. 2018. Mean relative sea level rise along the coasts of the China Seas from mid-20th to 21st centuries[J]. Continental Shelf Research, 152, 27-34.
- Cheng H, Edwards R L, Sinha S, et al. 2016. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. Nature, 534, 30, 641-646.
- Clark J A, Lingle C S. 1979. Predicted relative sea-level changes (18,

000 years B.P. to present) caused by Late-Glacial retreat of the Antarctic Ice Sheet[J]. Quaternary Research, 11, 279-298.

- CPRA. 2017. Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast[R]. State of Louisiana, 167.
- CPRA. 2023. Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast[R]. State of Louisiana, 187.
- Engelhart, Simon E , Horton, et al. 2009. Spatial variability of late Holocene and 20th century sea-level rise along the Atlantic coast of the United States[J].Geology, (37):12, 1115-1118.
- Horton B P, Rahmstorf S, Engelhart S E, et al. 2014. Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300, Quaternary Science Reviews, 84, 1-6.
- Horton B P, Kopp R E, Garner A J, et al. 2018. Mapping sea-level change in time-space, and probability[J]. Annu. Rev. Environ., 43: 481-521.
- Huang L, Liu C Y, Wang Y B, et al. 2014. Neogene-Quaternary postrift tectonic reactiviation of the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin, 98, 7, 1377-1400.
- IPCC AR5. 2013. Sea Level Change, In: Climate Change 2013 (Stocker T.F. et al. eds.)[M]. Cambridge University Press, 1107-1216.
- IPCC AR5 SYN. 2014. Climate Changes 2014: Synthesis Report, 31.
- IPCC AR6. 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change, In: Climate Change 2021 (Masson-Delmotte V. et al. eds.) [M]. Cambridge University Press, 257.
- IPCC AR6 SYN. 2023. Climate Change 2023[R]: Synthesis Report, 184.
- Kemp A C, Wright A J, Edwards R J. et al. 2018. Relative sea-level change in Newfoundland, Canada during the past ~3000 years[J]. Quaternary Science Reviews, 201, 89-110.
- Li G X, Li P, Liu Y. et al. 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. Earth Science Reviews, 139, 390-405.
- Li J F, Shang Z W, Wang F, et al. 2021. Holocene sea level trend on the coast of Bohai Bay, China[J]. Acta Oceanol. Sin., (40): 7, 198-248.
- Li Y, Wen M Z, Yu H., et al. 2023. Changes of coastline and tidal flat and its implication for ecological protection under human activities: Take China's Bohai Bay as an example[J]. China Geology, (6) : 1-10.
- Liu Q Y, He L J, Huang F, et al. 2015. Cenozoic lithospheric evolution of the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton: constraint from tectonic-thermal modeling[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 115, 368-382.
- Miller K G, Schmelz W J, Browning J V. 2020. Ancient sea level as key to the future[J]. Oceanography, (33):2, 32-41.
- Milne G A. 2015. Glacial isostatic adjustment, In: Handbook of Sea-Level Research[M].(Shennan I., Long A.J., Horton B.P., eds.), John

http://hbdz.org.cn 华北地质, 2024, 47(1)

Wiley & Sons, 421-437.

- Mitrovica J X, Milne G A. 2002. On the origin of late Holocene sealevel highstands within equatorial ocean basins[J]. Quaternary Science Reviews, 21, 2179-2190.
- Mitrovica J X, Hay C, Kopp R, et al. 2018. All sea level is local[J], Bulletin of the Atomic Scientists, (74):3, 142-147.
- NYCEDC. 2019. Financial District and Seaport Climate Resilience Master Plan 2021[M]. 189.
- Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. 2013. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 years cal BP[J], Radiocarbon, (55): 4, 1869-1887.
- Saintilan N, Horton B, Törnqvist T E, et al. 2023. Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5°C[J]. Nature, https://doi.org/10.1038/s41586-023-06448-z.
- Shang Z W, Wang F, Li J F, et al. 2016. New residence times of the Holocene reworked shells on the west coast of Bohai Bay, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 115, 492-506.
- Shennan I. 2015. Handbook of sea level research: framing research questions, In: Handbook of Sea Level Research (Shennan I., Long A.J., Horton B.P. eds.)[M], UK, John Wiley & Sons, 9-11.
- Stuiver M, Braziunas T. 1993. Modelling atmospheric ¹⁴C influences and ¹⁴C ages of marine samples to 10,000 BC[J]. Radiocarbon, 35, 137-189.
- Su G L, Xiong C B, Zhang G Y, et al. 2023. Coupled processes of groundwater dynamics and land subsidence in the context of active human intervention, a case in Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 903, http://doi. org / 10.1016 / j. scitotenv., 2023.166803
- Tian L Z, Chen Y S, Jiang X Y, et al. 2017. Post-glacial sequence and sedimentation in the western Bohai Sea, China, and its linkage to global sea-level changes[J]. Marine Geology, 388, 12-24.
- Tian L Z, Wang F, Jiang X Y, et al. Holocene history of relative sea level on the south coast of Bohai Sea: far-field GIA process and an associated sea-level highstand for the Mid-Holocene[J]. Quaternary Science Reviews, in review.
- Van de Plassche O. 1986. Introduction, In: Sea-Level Research: a Manual for the Collection and Evaluation of Data (Van de Plassche O. ed.)[M]. London, Geo Books, 6-9.

- Van der Spek Ad. J.F. 2018. The development of the tidal basins in the Dutch Wadden Sea until 2100: the impact of accelerated sea-level rise and subsidence on their sediment budget-a synthesis, Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw)[J], (97):3, 71-78.
- Vermeersen B L A, Slangen A B A, Gerkema T, et al. 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea[J]. Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw), (97):3, 79-127.
- Vink A, Steffen H, Reinhardt L, et al. 2007. Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea) [J]. Quaternary Science Reviews, 26, 3249-3275.
- Wang F, Li J F, Shi P X, et al. 2019. The impact of sea-level rise on the coast of Tianjin-Hebei, China[J]. China Geology, (2): 1, 26-39.
- Wang F, Zong Y Q, Mauz B, et al. 2020. Holocene sea-level change on the central coast Bohai Bay, China[J]. Earth Surf. Dynam., 8, 679-693.
- Wang H. 1992. Isostasy and Holocene high sea levels in East and Southeast Asia[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, (7): 1, 17-21
- Wang H. 1994. Palaeoenvironment of Holocene Chenier and Oyster Reefs in the Bohai Bay (China)[M], Doctoral Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 244.
- Wang H, Shang Z W, Li J F, et al. 2010. Holocene shoreline changes and marine impacts on the muddy coast, western Bohai Bay, China[J].Geological Bulletin of China, (29):5, 627-640.
- Wang W Y, Fan C F, Song Z J, et al. Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) shell growth duration and carbon sequestration in Bohai Bay, China[J], China Geology, accepted.
- Wen M, Zhang H B, Wang S J, et al. 2022. Field Investigation on the Coastal Erosion and Progradation Evolution of the Binzhou Shelly Chenier in China: Comparisons between Normal and Typhoon Hydrodynamics[J]. Journal of Marine Science and Engineering, (10): 6, 752.
- Wu P C, Wei M, Hondt S. 2022. Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR[J].Geophysical Research Letters, 49: 7, https://doi.org/10.1029/2022GL098477.