

文章编号:1009-2722(2015)02-0009-08

渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展

姚政权,石学法

(国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室,青岛 266061)

摘要:海岸带海侵研究具有重要的理论和现实指导意义。第四纪以来,渤海湾沿岸地区受海平面升降波动影响发生多次海进和海退事件。对渤海湾地区已发表的钻孔资料进行整理和分析,结果显示该区早—中更新世海侵在空间上分布较为局限且变化较大,对于早更新世海侵存在与否仍存有争议,而大规模海侵发生在晚更新世以来 MIS5、MIS3 和 MIS1 时期。研究表明本区海侵的发生是在第四纪以来持续构造沉降的背景下,间冰期气候变暖造成海平面上升的结果。MIS3 时期强烈的区域性“视海侵”在空间上并非普遍存在:在靠近渤海湾的地区,MIS3 时期海侵为水深较深的滨海—浅海相沉积;而向内陆方向,该时期沉积转变为海陆过渡相和陆相。对于这种现象,一种解释是该区当时西高东低的地势起伏较大,海水逐渐向内陆侵入形成同期异相;另一种可能原因是由于冰盛期时河流侵蚀作用加强,靠近内陆地区的 MIS3 时期海侵沉积遭受后期河流侵蚀,其确切原因或者是否还存在其他因素,如以前测得的 MIS3 海侵实际在 MIS5 形成还需进一步研究。

关键词:渤海湾;海侵;海平面变化;MIS3 阶段

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.02002

沿海平原和陆架浅海地区受海陆交互作用影响,对气候及海平面变化非常敏感,是研究海陆相互作用的理想场所。约 3.6 Ma 前后北半球形成大冰盖以来^[1,2],全球气候以冰期—间冰期旋回为主要特征,导致海平面频繁波动。海平面升高会造成沿海地区发生海侵,因而海侵研究对探讨海岸带地区海平面变化具有重要意义^[3]。同时,我国海岸线漫长,海岸带是我国经济发达和人口集中的地区,该区地势低平,极易受到海平面升降变化影响,因而,海侵研究同时具有重要的现实意义。

20 世纪 60 年代以来,众多学者根据地质钻孔资料对渤海湾沿岸地区进行了大量海侵研究,主要探讨该区海进、海退及与气候变化的关系,为

海岸带海侵变化研究提供了宝贵的资料^[4-14]。已有钻孔资料显示,渤海湾沿岸地区第四纪以来发生多次海侵和海退事件^[4-13]。然而,不同地区记录的海侵次数不尽相同,部分海侵事件发生的年代还存有争议,这些海侵在空间上的对比及其与气候和构造的联系是目前关注的问题之一。其中,MIS3 海侵在该区具有特殊性,不仅表现在其指示的区域性海面标高^[15]与此时全球海平面^[16-18]相差较大,而且此次海侵在空间上并非普遍存在。本文对前人在该区已有的成果进行归纳和整理,主要讨论了以下 3 个问题:①渤海湾沿岸第四纪以来海侵事件时空变化;②该区海侵发生的气候和构造背景;③ MIS3 时期海侵的特殊性及可能原因。

1 研究区概况

华北平原是中、新生代形成的断陷盆地,北起

收稿日期:2014-12-11

基金项目:国土资源部海洋地质调查专项(GZH201100202);
国家自然科学基金(41476055;41006039)

作者简介:姚政权(1980—),男,博士,副研究员,主要从事海洋地质与第四纪地质方面的研究工作。E-mail:yaozq@fio.org.cn

燕山山脉,南至大别山北麓,西起太行山与秦岭,东临渤海。进入新近纪和第四纪,渤海湾盆地由古近纪的断陷阶段进入拗陷阶段,盆地开始整体下沉^[19,20]。在大地构造上,华北平原属华北断坳,其中包括北东向的冀中坳陷、沧县隆起、黄骅坳陷、埕宁隆起等次级构造单元(图 1)。这些坳陷与隆起组成了渤海湾盆地的基本构造框架。华北平原面积约 310 000 km²,它是由黄河、淮河和海河等河流携带泥沙沉积而成^[21](图 2)。渤海湾沿岸地区地势平缓,本区自古近纪以来发育了巨厚的陆相以及海陆过渡相地层。坳陷区和隆起区

沉积物厚度不等,如冀中坳陷深度达 600 m,而沧州隆起则仅为 200~350 m^[22]。

2 渤海湾沿岸第四纪以来海侵

20 世纪 60 年代以来,依据微体古生物识别第四纪海侵地层已取得了很好的效果^[4-13,24,25],如今在沿海平原海侵研究中仍占有重要地位,是确定海侵沉积的主要手段。许多学者以微体古生物研究为主要依据,结合测年资料,论述了渤海湾沿岸海进、海退变化及海侵期次等问题^[4-13]。

2.1 早更新世海侵

早更新世海侵的确定,主要依据在北京、冀西、山西运城等地的钻孔中发现海相微体古生物^[26-30],古地磁测年结果认为该次海侵发生在早更新世~2.26 Ma BP^[30]。然而对于该区钻孔中海相生物的来源,不同学者有着不同的观点。有的学者认为是由海水通过河流或构造通道溯流至湖泊^[26,28,31],后来的研究^[32,33]认为海相微体生物也可由外力(风、鸟等)带入湖泊存活下来,因可能并非存在海侵通道^[33]。王强等^[34]认为北京、冀西、山西运城等地不可能存在与海洋连通的通道,第四系中、深部地层中零星海相微体生物的出现是水质咸化的反映,与大陆盐渍化有关^[35];王世杰等^[36,37]对泥河湾盆地沉积中出现的有孔虫化石群进行锶同位素地球化学研究后发现,这些有孔虫的出现与海水无关,其宿生水体为陆相环境;最近,肖应凯等^[38]对位于延庆盆地杨户庄第四纪早—中期地层中的有孔虫进行了 B 和 Sr 同位素研究,结果显示,该剖面中的有孔虫生存环境非海相环境。然而,对于此次海侵令人费解的是,为何早更新世海相微体生物只是局限在北京、冀西、山西运城等地的盆地沉积中,而在其他地区却鲜有发现。最近,我们在天津市获取的 2 支岩心 BZ1(深度为 204.5 m)和 BZ2(深度为 203.5 m)磁性地层研究显示底界年龄分别为 2.2 Ma^[39]和 3.18 Ma BP^[40],同样,在钻孔沉积早更新世期间并未发现指示海侵存在的海相微体生物^[41]。由于当时测年技术所限,对该次海侵的研究相对较少。近年来有学者在渤海沿岸地区获得了大量长钻孔岩心,详细的沉积学研究同样未在早更新世地层

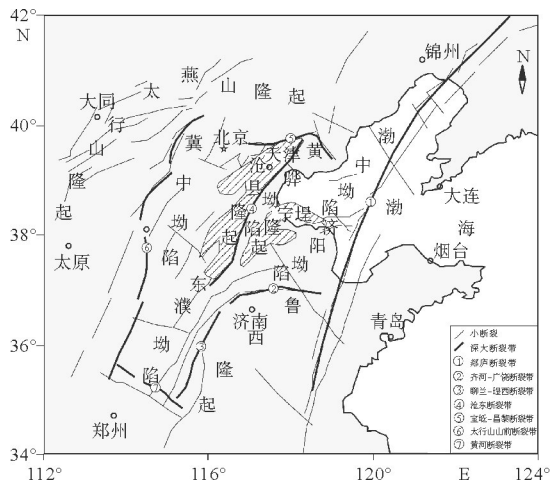


图 1 渤海湾盆地及其周边地区构造(据文献[23]修改)

Fig. 1 Tectonic map of Bohai Bay Basin and its adjacent regions (modified from reference [23])

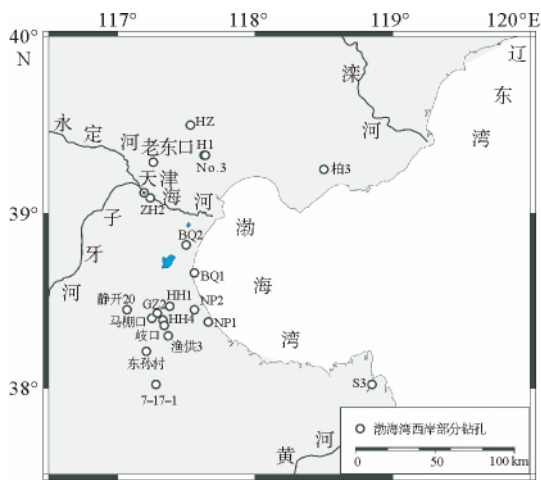


图 2 研究区及渤海湾西岸部分钻孔位置

Fig. 2 Schematic map of the study area and cores mentioned in the study

发现有典型的海侵沉积^[42,43]。对于在早更新世期间海水是否能够影响到北京、山西等地, 还需要更多新的具有较好年代控制的钻孔资料进行对比验证。在渤海湾沿岸地区, 由于目前仅在北京、冀西、山西运城等地的盆地沉积中发现有孔虫化石群, 因此, 在不同地区和构造单元, 特别是盆地外缘进行钻孔资料分析, 也许有助于解决上述问题。

2.2 中更新世以来海侵

汪品先等^[13]对辽宁、河北、江苏、上海和浙江 5 省市沿海 7 个钻孔进行对比研究后发现, 除存在上述早更新世一次海侵外, 我国东部台湾海峡以北沿海平原的第四系普遍发育 4 个海侵层。依据¹⁴C 及古地磁年代推测, 这 4 个较普遍的海侵层自下而上分别对应深海氧同位素 MIS9、MIS5、MIS3 和 MIS1 阶段^[13]。王强和李凤林^[8]根据渤海湾西岸 60 个钻孔的微体古生物分析, 认为本区第四纪以来发生 5 次海侵过程, 研究结果与汪品先等^[13]相同。来自渤海湾西、南岸平原 150 多个钻孔微体古生物资料综合分析显示, 该区早更新世以来同样发生了 5 次海侵事件^[12]。而杨子赓等^[6]综合对比河北平原东部各海相层后认为第四纪以来本区存在 6 次较确切的海进和一次推断的海进。渤海湾南部 S3 孔研究显示第四纪以来存在 7 个海相地层, 古地磁、¹⁴C 和 ESR 测年显示这 7 个海相层是中更新世中晚期(417 ka)以来的沉积^[11]。近年对在渤海中部长度为 212.4 m 的 BH08 钻孔进行研究, 结果表明过去 1 Ma 以来该区至少发生 9 次海进与海退变化过程^[44]。上述研究资料表明, 不同学者对不同地点关于中更新世以来海侵的次数以及各次发生的时代还存有差异, 需要更进一步研究。对于发生在中更新世以来超出¹⁴C 测年范围的海侵沉积, 作者主要依据古地磁极性漂移事件并结合气候地层学原理来确定的, 因而, 在样品分辨率低的情况下, 各海侵层的年代及相互间对比还存在不确定性。

众多学者对渤海湾沿岸平原晚更新世以来海侵层和海侵范围进行深入研究后, 发现华北平原东部普遍发育 3 个海侵层, 从早到晚分别对应深海氧同位素 MIS5、MIS3 和 MIS1^[5,7,8,13,45]。其中, 黄骅南排河孔是当时该区代表性钻孔之一^[7](图 3)。近来, 闫玉忠等^[45]对位于渤海湾西岸的

BQ1 和 BQ2 孔进行了详细的释光年代学和沉积环境研究, 结果显示, 2 钻孔均记录了晚更新世以来 3 次海侵, 这 3 次海侵为 MIS5 时期以来的沉积^[45]。河北省黄骅北部地区 4 个钻孔岩心详细的年代学、微体古生物学以及孢粉研究表明, 本区地下 30 m 左右的海侵沉积形成于 MIS3^[9]。与早、中更新世相比, 这 3 次海侵在渤海湾沿岸地区分布较为广泛, 同时测年数据也相对丰富和详实。

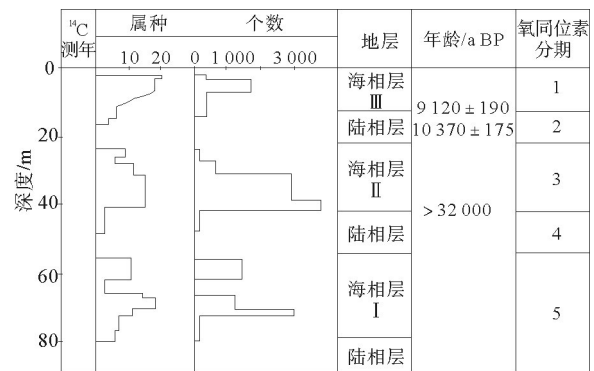


图 3 黄骅南排河钻孔地层, 有孔虫

(据文献[7]修改)与深海氧同位素分期

Fig. 3 Stratigraphy and foraminifera of the Nanpaihe core in the Huanghua area (modified from reference [7] and correlation with Marine Isotope Stage (MIS))

在渤海湾地区晚更新世以来 3 次海侵中, 全新世海侵分布范围最广^[13]。王一曼^[46]在该区已有地质资料基础上, 通过野外考察并对该区 3 个沉积剖面孢粉和微体古生物进行研究认为, 渤海湾西北地区全新世最大海侵范围大致在自东向西的滦南县暗牛淀—丰南县黄各庄—丰润县丰登坞—玉田县虹桥—宝坻县张古庄南—安次南—永清东—文安县兴隆宫—线。大量钻孔资料显示该海侵层底部埋深为 ~20 m, 厚度普遍为 ~15 m, 局部可达 40~50 m^[13]。在该区第四纪所有海侵沉积中, 该海侵层年龄资料最为丰富。渤海湾西北岸宁河县 H1 孔测年显示全新世海侵发生在距今 8 000 a 左右^[47]。山东垦利地区该海侵层下测得年龄为 ~5 600 a^[48]; 河北黄骅地区南排河渔供 3 孔该海侵层底部的泥炭层¹⁴C 测年为 (8 590 ± 170)a, 此层以下的陆相泥炭层的年龄为 (9 650 ± 190)a; 静海四党口静开 20 钻孔深度 15.0 m 处的泥炭层¹⁴C 年龄为 (7 920 ± 655)a^[49]。黄骅北部

地区4个钻孔(NP1、NP2、HH1、HH4和GZ2)的资料显示,该海侵层下部样品的 ^{14}C 测年为8 000 a左右^[9];渤海湾西岸BQ1和BQ2钻孔记录得此次海侵分别发生在 $(8\ 620\pm 40)\text{a}$ 和 $(7\ 955\pm 40)\text{a}$ ^[45]。渤海湾南部S3钻孔该海侵层的底部年龄为 $(8\ 570\pm 50)\text{a}$ ^[11];位于渤海湾北岸柏各庄地区的柏3钻孔海侵深度为15 m,底部 ^{14}C 年龄为 $(8\ 620\pm 250)\text{a}$ ^[50];河北滦河县的S1和S2钻孔海侵层底部泥碳层 ^{14}C 测年数据显示分别为 $(9\ 940\pm 120)\text{a}$ 和 $(9\ 360\pm 110)\text{a}$ ^[51]。根据渤海湾沿岸大量 ^{14}C 测年资料可以推断该次海侵在该区发生在距今约 $(6\ 000\sim 9\ 000)\text{a}$ ^[13,50-57]。总之,该区地下第1海侵层是全新世以来的沉积,但此层年龄范围各地可能不同,表现出从渤海陆架沿岸向内陆由老变新的趋势^[13]。

3 海侵发生的气候和构造背景

海平面的变化是影响渤海湾沿岸平原沉积环境的一个重要因素。第四纪以来,以冰期—间冰期交替为主要特征的全球气候变化造成海平面频繁波动。根据古气候研究结果,第四纪以来冰期和间冰期的海面升降幅度可达100多米^[17]。海平面波动势必导致侵蚀基准面发生变化,并造成海岸线长距离进退,在沿海平原和大陆架留下海进和海退的沉积序列。第四纪以来随着间冰期—冰期海面升降,渤海湾沿岸地区遭受多次海进—海退过程^[4-13],这些海侵事件均与全球海平面升高一致,钻孔沉积孢粉分析结果也显示海侵发生时期对应于气候温暖湿润期^[10],表明该区海侵和海退受冰期—间冰期旋回变化控制^[7,8,10,13]。渤海湾沿岸地区较普遍的,大规模的海侵发生于晚更新世以来^[5-8,13],而靠近渤海湾的地区则发生时间较早,在中更新世^[11]。最近,位于天津市大港区的BZ1钻孔磁性地层及沉积学研究显示,钻孔中~70 m(约1 Ma)开始出现海侵沉积,而该深度以下均为河流相沉积^[39]。靠近内陆的BZ2钻孔在~25 m处才开始受到海侵影响^[58]。进入第四纪以来全球海平面呈现波动性逐渐降低趋势^[16,17,59,60],假设在构造稳定的地区,海水入侵的影响从早到晚应当是减弱的。然而前人研究^[6,7,13,61]表明,在渤海湾沿岸地区大规模海侵发

生在晚更新世以来,显然这些海侵与新近纪以来渤海湾盆地长期下沉^[19,20]过程有关^[13,62]。因此,在中国东部渤海湾沿岸地区,海侵—海退是在本区第四纪以来持续的构造沉降背景下,全球冰期—间冰期气候变化造成海平面波动下发生的,这同中国东部长江中下游地区海侵发生的背景相一致^[63,64]。

4 MIS3 时期海侵

MIS3阶段相当于末次冰期中的间冰阶,古气候研究发现该时期的气候和环境已达到间冰期程度,气温较高,降水较多^[65,66]。在MIS3时期,冰盖消融造成海平面上升,全球海面低于现代海平面约40~70 m^[16-18]。然而在渤海湾沿岸该次海侵却存在许多特殊之处。前人研究显示MIS3间冰阶我国东部的海面仅低于现代海平面8~10 m左右^[67];基于渤海湾西岸46个钻孔海相层中有孔虫、介形类等海相微体生物化石的组合特征恢复的MIS3阶段(28~40 ka)海面最高标高达-11~-5 m^[15],这些均与全球海平面低于现代海面达约40~70 m^[16-18]的背景不协调。魏灵等^[15]认为,末次冰期导致海平面下降造成渤海湾西岸远离沉积区而遭受强烈冲刷侵蚀,在冰期边缘海式构造下沉与弧后盆地性质的构造下沉背景下造成区域性异常地面低洼,形成区域性强烈的“视海侵”,即当时海侵时部分地区海水深度很大,而海水陆泛范围则很局限。然而,对于地下深度为15~40 m的第2海侵层是否于MIS3时期形成仍有学者持怀疑态度。Yim等^[68]对华南沿海海侵沉积研究发现,用贝壳测得 ^{14}C 年龄会偏新,原来用 ^{14}C 测得 $>30\text{ka}$ 的地层用铀系法测得为140 ka,因此,原来认为MIS3的海侵层应该是MIS5时期形成的。但是Yim等^[68]的研究不能够解释那些采用其他材料和测年方法而得出MIS3海侵沉积的现象。

同时,该次海侵沉积在渤海湾沿岸地区并非普遍存在。靠近渤海湾的BQ1孔研究结果显示3次海侵发生在晚更新世MIS5时期以来,且均为水深较深的滨浅海相沉积^[45](图4);而距BQ1孔大约15 km靠近内陆的BQ2钻孔中对应MIS3的海侵层为海陆过渡相地层^[45](图4)。

位于天津市大直沽 ZH2 钻孔释光和沉积环境研究^[69]表明, 在该地未见晚更新世 MIS3 海侵。宁河县俵口地区的 H1 钻孔研究显示, MIS3 时期为河流相沉积^[56]。上述研究资料表明, 在靠近渤海湾的钻孔中, MIS3 时期海侵沉积为水深较深的滨海—浅海相沉积^[45]; 而向内陆方向, 该时期沉积转变为海陆过渡相和陆相^[45,56,69]。对于这一现象, 存在 2 种可能解释: ①靠近内陆和靠近海洋的地区存在同期异相。在 MIS3 时期, 全球海平面与此前 MIS5 时期相比较低, 同时由于这一区域地势西高东低, 河流造陆作用强, 海水向内陆入侵的程度有限, 因此, 在远离渤海的 BQ2 钻孔所在位置仅见过渡相沉积, 而在靠近内陆的 ZH2 和 H1 钻孔所在位置为河流相沉

积; ②在 MIS3 阶段海平面升高的时期, 靠近内陆的 ZH2 和 H1 钻孔所在地区也曾受到海侵的影响。但是, 随着 MIS3 之后盛冰期来临, 全球海平面下降达 ~130 m^[70], 我国东部黄海和渤海陆架全部裸露成陆, 河流入海口向海洋方向移动数百公里。由于河流侵蚀基准面下降, 靠近内陆地区的河流侵蚀作用加强, MIS3 时期的海侵沉积极易受到后期河流作用的侵蚀, 因而在钻孔中表现为无海侵沉积。但是, 最近基于莱州湾沿岸钻孔光释光年代学的研究显示, 本区第 2 海侵层是在 MIS3—MIS5 阶段形成的^[71]。至于究竟是何种因素造成这种现象, 现在还难以确定, 需要在空间上对更多具有详细和准确年代控制的钻孔进行研究。

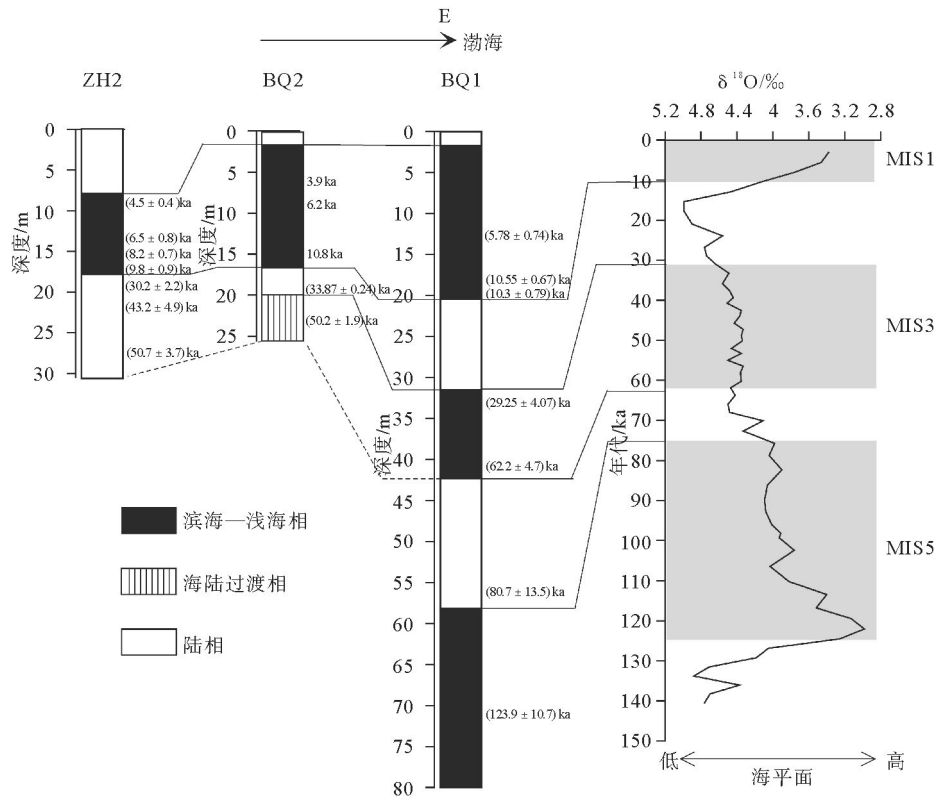


图 4 渤海湾地区 ZH2、BQ2 和 BQ1 钻孔反映的沉积环境与深海氧同位素的对比 (ZH2 来自文献^[69], BQ1 和 BQ2 来自文献^[45], ODP846 氧同位素数据来自文献^[1])

Fig. 4 Sedimentary environment change based on ZH2 (from reference ^[69]), BQ2 and BQ1 cores (from reference ^[45]) along the Bohai Bay, and correlation with marine $\delta^{18}\text{O}$ values at ODP846 site (from reference ^[1])

5 全新世海侵与全球海平面变化

由于测年材料、方法以及长尺度钻孔获取等

条件限制, 渤海湾沿岸全新世海侵相对于历次海侵研究最多, 测年数据也最为详实可信。该区大量钻孔资料显示, 此次海侵发生在距今约 6 000~9 000 a^[13,50-57], 经统一校正后的年代为 7~10 ka

BP(图5)。沉积学研究表明,该区全新世海侵沉积以受潮汐影响的三角洲前缘沉积为主^[9,57]。在构造抬升的海岸带地区,如巴布多斯岛(Barbados)^[72,73]、巴布亚新几内亚的休恩半岛(Huon Peninsula)^[74]以及塔希提岛(Tahiti)^[75]等,珊瑚礁是指示海岸线位置的良好记录,能够重建海平面变化历史。根据上述珊瑚礁记录重建的末次冰期以来海平面变化曲线(图5)显示,17~7 ka BP期间海平面迅速上升;之后,海平面上升减慢,并逐渐达到现在的水平。通过指示海岸线的地貌和沉积证据重建的我国东部海平面变化历史^[76]显示了与全球海平面变化相似的趋势(图5)。渤海湾沿岸全新世海侵于海平面迅速升高后期(7~10 ka)开始,并在海平面缓慢上升或稳定的时期(7 ka以来)沉积海侵沉积。因此,在海平面上升减慢和相对稳定的条件下,河流进积作用加强造成该区三角洲普遍发育,这与全球河流入海三角洲形成的大背景是一致的^[77]。

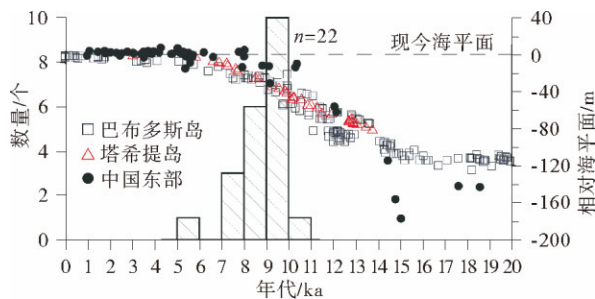


图5 渤海湾沿岸全新世海侵开始年代的分布与全球和我国东部海平面变化曲线对比(全新世海侵开始年代数据来自文献^[9,11,45,50-57,69,78],海平面变化数据来自文献^[18,72,73,75,76])

Fig. 5 Initiation age of Holocene transgressions along the Bohai Bay (from references ^[9, 11, 45, 50-57, 69, 78]) and correlation with global sea level change (from references ^[18, 72, 73, 75, 76])

6 问题与展望

在全球气候变暖的背景下^[79],气温升高导致极地冰盖部分消融造成全球海平面上升,因而会引起诸如海岸带侵蚀加强、海水入侵、沿海洪水灾害增加等地质环境问题。近几十年来,尽管我国第四纪海侵研究已经取得了许多重要成果,认识

了海侵在时间及空间上的基本变化规律。然而对部分问题的认识仍不够深入,比如海侵变化模式、不同地区海侵事件空间上如何对比、早更新世和MIS3海侵以及构造—气候—海平面变化耦合对海侵沉积的影响等,这些都可为今后评价海平面升降变化对海岸带的影响提供理论依据,值得进一步研究。在区域大范围内对具有较好年代控制的钻孔进行系统的沉积学研究是解决上述问题的关键。

致谢:感谢天津地质矿产研究所王强研究员对本文提出的宝贵意见!

参考文献:

- [1] Mix A C, Le J, Shackleton N J. Benthic foraminiferal stable isotope stratigraphy of Site 846; 0-1.8 Ma[J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific results, 1995, 138: 839-854.
- [2] Shackleton N J, Hall M A, Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of site 846[J]. Proceedings of Ocean Drilling Programs, Scientific Results, 1995, 138: 337-355.
- [3] 赵希涛. 中国海平面变化[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 44-150.
- [4] 林景星. 华北平原第四纪海进海退现象的初步认识[J]. 地质学报, 1977, 51(2): 109-116.
- [5] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15-24.
- [6] 杨子庚, 李幼军, 丁秋玲. 试论河北平原东部第四纪地质几个基本问题[J]. 地质学报, 1979, 53(4): 264-279.
- [7] 杨怀仁, 陈西庆. 中国东部第四纪海面升降、海侵海退与岸线变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 59-80.
- [8] 王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 83-89.
- [9] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS 3阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 79-95.
- [10] 高秀林, 王强, 李玉德, 等. 从天津P8孔看中更新世末期以来海侵期、气候期对比问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(1): 53-64.
- [11] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部S3孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 27-35.
- [12] 王强, 李凤林, 李玉德, 等. 对渤海西、南岸平原第四纪海侵命名的讨论[J]. 海洋学报(中文版), 1986, 8(1): 71-81.
- [13] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报, 1981, 55(1): 1-12.
- [14] 陈金霞, 石学法, 乔淑卿. 渤海地区全新世孢粉序列及古

- 环境演化[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 99-105.
- [15] 魏 灵, 贾玉连, 易朝路, 等. 近 4 万年渤海西岸海侵时古海面的现代标高对比研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 361-369.
- [16] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. Quaternary Science Reviews, 1987, 6: 183-190.
- [17] Chappell J, Shackleton N J. Oxygen isotopes and sea level [J]. Nature, 1986, 324: 137-140.
- [18] Bard E, Hamelin B, Fairbanks R. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados; sea level during the past 130,000 years[J]. Nature, 1990, 346: 456-458.
- [19] Allen M, Macdonald D, Xun Z, et al. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 951-972.
- [20] Hu S B, O'Sullivan P B, Raza A, et al. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China; a Cenozoic rifted and local pull-apart basin[J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2001, 126(3): 221-235.
- [21] 陈望和, 倪明云. 河北省第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-186.
- [22] 叶青超. 华北平原地貌体系与环境演化趋势[J]. 地理研究, 1989, 8: 10-20.
- [23] Zhang L, Liu J S, Hao T Y, et al. Seismic tomography of the crust and upper mantle in the Bohai Bay Basin and its adjacent regions[J]. Science in China Series D 2007, 50: 1 810-1 822.
- [24] 汪品先, 闵秋宝. 海洋微体古生物论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 1980.
- [25] 李元芳, 安凤桐. 天津平原第四纪微体化石群及其古地理意义[J]. 地理学报, 1985, 40(2): 155-168.
- [26] 王乃文. 山西外旋九字虫(新属新种)的发现及其地层与古地理意义[J]. 地质学报, 1981, 55(1): 14-19.
- [27] 王乃文, 何希贤. 北京平原地区钙质超微化石的发现及其意义[J]. 科学通报, 1982, 27(13): 805-808.
- [28] 关绍曾, 萧宗正, 张清波, 等. 北京延庆盆地第四纪早期介形类动物群, 古生态及对该区古环境的认识[J]. 化工矿产地质, 1995, 17(4): 217-228.
- [29] 关绍曾, 萧宗正, 张清波, 等. 北京地区第四纪早期海相介形类[J]. 微体古生物学报, 1997, 14(2): 191-202.
- [30] 安芷生, 魏兰英, 卢演涛, 等. 顺 5 孔的磁性地层学和早松山世的北京海侵[J]. 地球化学, 1979, 4: 239-249.
- [31] 庞其清, 黄兴根. 北京延庆盆地第四纪早期有孔虫化石的发现及海侵的探讨[J]. 海洋与第四纪地质, 1984, 4(2): 91-100.
- [32] 孙镇城, 曾学鲁. 柴达木盆地盐湖有孔虫的发现及其地质意义[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 252-257.
- [33] 吴乃琴. 弱海相性有孔虫群的特征及其代表的沉积环境[J]. 第四纪研究, 1993, 3: 267-280.
- [34] 王 强, Li C G, Tian G Q, et al. 7.1 Ma 以来运城盆地地表系统巨变及盐湖形成的构造背景[J]. Science in China (Series D), 2000, 30(4): 420-428.
- [35] 王 强, 刘立军, 王卫东, 等. 环渤海地区及华北平原第四纪古环境变迁机制[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 129-138.
- [36] 王世杰, 刘秀明, 贾玉鹤, 等. 泥河湾盆地第四系有孔虫化石群锶同位素及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 302.
- [37] 王世杰, 刘秀明, 贾玉鹤, 等. 陆相有孔虫形成环境的地球化学证据——以小渡口剖面为例[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(8): 677-682.
- [38] 肖应凯, 肖 军, 赵志琦, 等. 延庆杨户庄第四纪有孔虫的非海相生存环境: 硼和锶同位素证据[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 801-806.
- [39] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 909-916.
- [40] 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 9-15.
- [41] Yao Z, Guo Z, Xiao G, et al. Sedimentary history of the western Bohai coastal plain since the late Pliocene: Implications on tectonic, climatic and sea-level changes [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 54-55: 192-202.
- [42] 袁桂邦, 胥勤勉, 王 艳, 等. 渤海湾北岸 Bg10 孔磁性地层研究及其构造意义[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 285-298.
- [43] 胡云壮, 胥勤勉, 袁桂邦, 等. 河北海兴小山 CK3 孔磁性地层与第四纪火山活动记录[J]. 古地理学报, 2014, 16(3): 411-426.
- [44] Yao Z, Shi X, Liu Q, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial-interglacial sedimentation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 393: 90-101.
- [45] 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.
- [46] 王一曼. 渤海湾西北岸全新世海侵问题的初步探讨[J]. 地理研究, 1982, 1(2): 59-69.
- [47] 林 防, 李凤林, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸全新世介形类组合特征及海进海退旋回[J]. 地球学报, 2004, 25(1): 53-58.
- [48] 王沼鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1979, 9(1): 15-25.
- [49] 彭 贵, 张景文, 焦文强, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层¹⁴C年代学研究[J]. 地震地质, 1980, 2(2): 71-77.
- [50] 李华梅, 王俊达. 渤海湾北岸平原钻孔岩心的古地磁研究[J]. 地球化学, 1983, 2: 196-204.
- [51] 王 强. 渤海西岸全新世早期基底泥炭堆积时间域初步

- 研究[J]. 第四纪研究, 1999, 1: 91.
- [52] 李汉鼎, 王升忠, 冷雪天, 等. 渤海湾沿岸泥炭沼泽形成机制与时空分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(2): 11-16.
- [53] 肖嗣荣, 李庆辰, 张 稳, 等. 河北沿海全新世海侵与岸线变迁探讨[J]. 地理学与国土研究, 1997, 13(2): 47-52.
- [54] 李元芳, 牛修俊, 李庆春. 海河河口地区全新世环境及地层[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 363-375.
- [55] 李建芬, 王 宏, 李凤林, 等. 渤海湾牡蛎礁平原中部兴坨剖面全新世地质环境变迁[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 169-176.
- [56] 李凤林, 王 宏, 王云生, 等. 渤海湾滨海平原全新统层型剖面地层划分与建组[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 124-135.
- [57] 王 强, 袁桂邦, 张 熟, 等. 渤海湾西岸贝壳堤堆积与海陆相互作用[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 775-786.
- [58] 姚政权, 肖国桥, 梁美艳. 华北平原 BZ₂ 钻孔沉积物的常量元素地球化学组成与化学风化[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3 400-3 403.
- [59] Aharon P. 140,000-yr isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea[J]. Nature, 1983, 304: 720-723.
- [60] Lambeck K, Esat T M, Potter E. Links between climate and sea levels for the past three million years[J]. Nature, 2002, 419: 199-206.
- [61] 汪品先, 闵秋宝. 我国第四纪海侵研究中的几个基本问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(1): 15-23.
- [62] 王 强, 田国强. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. 地质力学学报, 1999, 5(4): 41-48.
- [63] 王张华, 丘金波, 冉莉华. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 1-7.
- [64] Zhao B C, Wang Z H, Chen J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during late Pleistocene in the Changjiang delta area and adjacent continental shelf[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 164-172.
- [65] 施雅风, 于 革. 40-30ka BP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(1): 1-11.
- [66] Shi Y, Yu G, Liu X, et al. Reconstruction of the 30-40 ka enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 169(1/2): 69-83.
- [67] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. 地理学报, 1980, 35(4): 300-310.
- [68] Yim W W S, Uvanivucg M, Yu K F. Young age bias of radiocarbon dates in pre-Holocene marine deposits of Hong Kong and implications for Pleistocene stratigraphy [J]. Geo-marine Letter, 1990, 10: 165-172.
- [69] 赵 华, 卢演涛, 张金起, 等. 天津大直沽晚第四纪沉积物红外释光测年及环境变迁年代学[J]. 地质科学, 2002, 37(2): 174-183.
- [70] Clark P U, Mix A C. Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(1/3): 1-7.
- [71] Yi L, Lai Z, Yu H, et al. Chronologies of sedimentary changes in the south Bohai Sea, China: constraints from luminescence and radiocarbon dating[J]. Boreas, 2013, 42(2): 267-284.
- [72] Peltier W R, Fairbanks R G. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25: 3 322-3 337.
- [73] Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G, Zindler A. Calibration of the 14-C timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals[J]. Nature, 1990, 345: 405-409.
- [74] Cutler K B, Edwards R L, Taylor F W, et al. Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 206(3/4): 253-271.
- [75] Bard E, B, Hamelin M, Arnold L, et al. Sea level record from Tahiti corals and the timing of deglacial meltwater discharge[J]. Nature, 1996, 382: 241-244.
- [76] 赵希涛, 耿秀山, 张景文. 中国东部 20000 年来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 269-281.
- [77] Stanley D J, Warne A G. Worldwide Initiation of Holocene Marine Deltas by Deceleration of Sea-Level Rise[J]. Science, 1994, 265(5169): 228.
- [78] 阎玉忠, 王 宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 357-382.
- [79] IPCC. Climate Change: The physical science basis[M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working group I to the fourth assessment. Report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

(下转第 70 页)

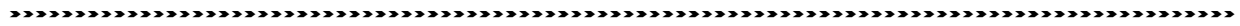
SEISMIC STUDY ON SEDIMENTARY CHARACTERISTICS OF THE NEOGENE IN SOUTH YELLOW SEA

WU Zhiqiang^{1,2}, CHEN Shanshan^{1,2}, ZHAO Weina^{2,3}, ZHANG Xunhua^{1,2},
GUO Xingwei^{1,2}, WEN Zhenhe^{1,2}

(1 The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3 Ocean University of China, Qingdao 266036, China)

Abstract: Seismic technology is the main tool for revealing sedimentary characteristics of the deposits under seabed. In the South Yellow Sea, it is an urgent need to carry out the research of seismic methods for better interpretation of sedimentary characteristics of the Neogene. The methods for data purification, multiple wave suppression and high resolution lithology identification have been adopted to improve the signal-to-noise ratio and resolution. Together with velocity analysis and time-depth conversion, multi-channel seismic stack velocity data are used to ensure the accurate calculation of the buried depth of strata. Following the principles of marine geology and seismic stratigraphy, depositional facies and evaluation of sedimentary environment are defined. CSDP-1 hole is selected as the case to test the validity of the methods.

Key words: seismic method; multiple wave suppression; lithology processing; velocity analysis; sedimentary characteristics



(上接第 16 页)

A REVIEW OF QUATERNARY TRANSGRESSION RESEARCHES ALONG THE BOHAI BAY

YAO Zhengquan, SHI Xuefa

(Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology of State Oceanic Administration, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Marine transgressions and regressions occurred frequently along the Bohai Bay during the Quaternary period due to sea level changes. The stratigraphic and chronologic data from previously published cores suggest that the early-middle Pleistocene marine transgressions are limited in small areas, and uncertainties still remain with its existence. Large-scale transgressions occurred mainly in MIS5, MIS3 and MIS1 of Late Pleistocene. It is believed that the transgression was caused by sea-level rises induced by interglacial climate under a long-term tectonic background of subsidence. During the period of MIS3, due to the effect of topography, which was higher in west and lower in east, shallow marine deposits were formed in the basin with transitional and continental deposits formed along the coast with gradual sea level rise. Some researchers argued that that transgression deposits formed MIS3 in the inland area may have been eroded during the following glacial. Further researches are required to reveal the cause.

Key words: Bohai Bay; transgression; sea level changes; MIS 3 stage