

渤海湾西北岸 QHJ01 孔记录的晚新生代 气候与沉积环境演化

黄猛¹⁾, 李明辰¹⁾, 樊航宇¹⁾, 张晓飞¹⁾, 李继军¹⁾, 胥勤勉²⁾

1) 天津市地质调查研究院, 天津, 300191; 2) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 300170

内容提要:渤海湾西北岸是华北平原构造最为活跃的地区,其第四纪地层的深入研究能为区域地震地质和水文地质研究提供基础资料。本文依据渤海湾西北 QHJ01 孔沉积物岩性、结构构造以及孢粉分析等结果,结合年代学结果,重建了区域 5.20Ma 以来的古气候及沉积环境演化过程。QHJ01 孔 5.20~3.33Ma 早期植被类型为以落叶为主的针阔叶混交林,气候温湿,晚期植被类型为针阔叶混交林,气候向冷干的趋势发展,沉积环境以湖泊为主;3.33~2.12Ma 植被类型以荒漠草原为主,个别地段为针阔叶混交林草原,气候温凉干旱,沉积环境为曲流河和泛滥平原;此阶段沉积环境受气候变化影响较为明显。2.12~0.13Ma 为湖泊发育期,其中 2.12~1.78Ma 植被类型为针阔叶混交林,气候凉湿,1.78~0.90Ma 气候干冷,0.90~0.13Ma 气候波动幅度增大,此阶段沉积环境受气候波动影响较小,主要受区域构造沉降控制。0.13Ma 以来气候波动变化较为明显,落叶阔叶分子含量逐渐增高,有逐渐变暖的趋势,早期沉积环境主要为湖泊、湖泊三角洲、泛滥平原交替发育,晚期发育海相三角洲;此阶段沉积环境受气候变化影响较为明显,同时亦受区域构造沉降控制。

关键词:渤海湾西北岸;古气候;古植被;沉积环境;新构造运动

渤海湾西北岸为华北平原北部北东向断裂带和北西向断裂带交汇的区域,成为新构造的主要沉降区,沉积了 800~5400m 的新生代沉积物(Xu Qinmian et al., 2017, 2018; Gao Feng et al., 2017)。同时唐山断裂带和张家口一蓬莱断裂带的活动在渤海湾西北岸产生了一系列地震(Wen Xueze et al., 2006; Jiang Wali, 2006; Xu Jie et al., 2011)。近几十年来,结合区域水工环地质和地震地质的调查研究,不同学者根据古地磁、孢粉、微体古生物、岩性特征等资料对研究区周边拗陷区不同构造单元第四纪沉积环境演化进行研究(Wang Xianyu, 1983; Wang Qiang et al., 1983, 1999, 2007, 2009; Gao Xiulin et al., 1986; Wang Hong et al., 2006; Shi Linfeng et al., 2009; Fan Shuxian et al., 2010; Xu Qinmian et al., 2011; Yang Jilong et al., 2015)。但渤海湾西北岸隆起区第四纪地层尚未深入研究,从而限制了对断裂带新构造活动的研究。已有的研究表明渤海湾

沿岸早、中更新世沉积物环境差异较大,西岸主要为泛滥平原相,北岸主要为湖泊相,而湖相和泛滥平原相在何处过渡,和断裂构造是否有关,却没有相应的研究。同时渤海湾沿岸晚第四纪发生三期海侵,三期海侵的范围也依赖更多钻孔的深入研究。另外工作区第四纪沉积中砂体较为丰富,是天津市重要的应急供水水源地之一(Wang Qiang et al., 2009)。因此,区域第四纪地层深入研究能为本区域沉积环境演化、新构造活动、区域地震地质和水文地质提供基础资料。

本文在对渤海湾西北岸 QHJ01 孔进行年代学、沉积学和孢粉分析等研究的基础上,得到了古植被与古气候演变初步的认识,重建了区域上新世以来沉积演化过程,分析了气候变化及新构造运动对沉积环境演化的影响。

1 研究区概况

渤海湾西北岸位于沧县隆起、黄骅拗陷与唐山

注:本文为中国地质调查局项目(DD20160042)与天津市国土和房屋管理局项目(国土房任(2014)19号)联合资助的成果。

收稿日期:2018-04-20;改回日期:2018-07-23;网络发表日期:2018-12-10;责任编辑:黄敏。

作者简介:黄猛,男,1985年生。工程师,主要从事第四纪地质与区域地质研究。Email:390183708@qq.com。通讯作者:胥勤勉,男,1979年生。高级工程师,主要从事华北第四纪地层研究工作。Email: xuqinmian@163.com。

引用本文:黄猛,李明辰,樊航宇,张晓飞,李继军,胥勤勉. 2019. 渤海湾西北岸 QHJ01 孔记录的晚新生代气候与沉积环境演化. 地质学报, 93(4): 899~914. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019107.
Huang Meng, Li Mingchen, Fan Hangyu, Zhang Xiaofei, Li Jijun, Xu Qinmian. 2019. Late cenozoic climate and sedimentary environment evolution of the northwestern coast of the Bohai Bay revealed by borehole QHJ01. Acta Geologica Sinica, 93(4): 899~914.

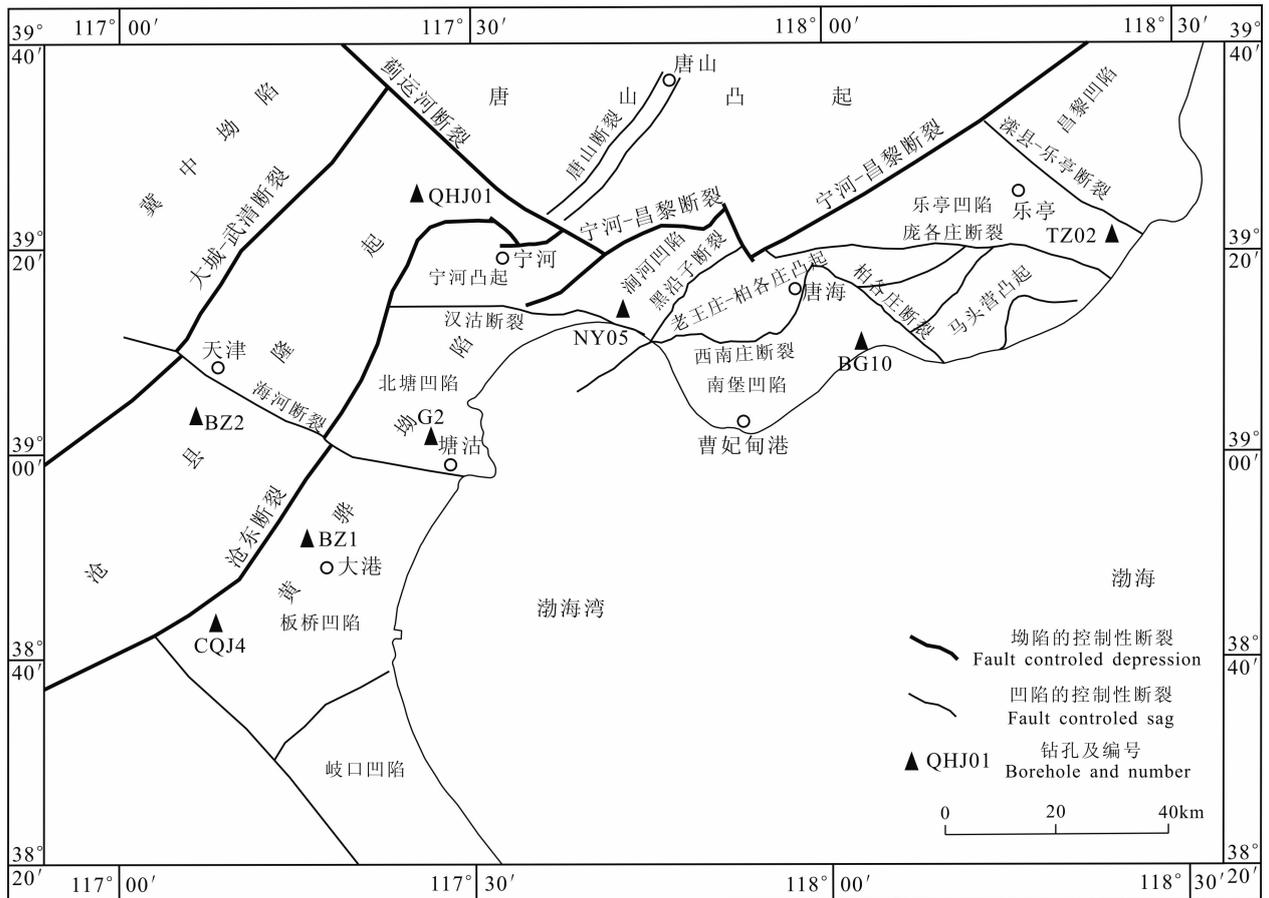


图1 渤海湾西北部构造简图及QHJ01钻孔位置图(据 Xu Qinmian et al., 2018 修改)

Fig. 1 Tectonic map of northwest Bohai Bay and the location of QHJ01 borehole (modified after Xu Qinmian et al., 2018)

凸起的交汇部位(图1),受北东东向及北西向断裂构造的影响,形成多个次级构造单元。隆起区缺失古近纪沉积,仅发育新近纪沉积,厚度800~1800m,凹陷区古近纪厚度最厚约为3000m,新近纪沉积最厚度约为2400m(Geological and Mineral Bureau of Hebei province, 1989; Wang Qiang et al., 1992; Petroleum Geology Compiling Group of of Dagang Oil Field, 1993; Dong Yuexia et al., 2010)。第四纪时期为新生代晚期裂陷后的加速沉降时期(Dong Min et al., 2012),渤海湾西北岸的第四纪沉积以湖相和河流相沉积为主,同时夹有海相沉积,其中第四系厚度220~390m(Xu Qinmian et al., 2018),晚第四系厚度80~126.60m(Xu Qinmian et al., 2011)。

2 取样与测试方法

QHJ01孔(39°25.45', 117°37.40'E)位于天津市宁河区东棘坨镇,大地构造位置处于沧县隆起北部,地面标高约2.20m,孔深500.50m,均采用旋转机械钻进,岩芯直径108mm,岩芯采取率

97.26%,孔斜为2.10°。

2.1 沉积相分析方法

利用沉积物的颜色、岩性、沉积结构、构造及包含物等沉积特征,并结合测井曲线中自然伽马和电阻率等反应岩性粗细的指标,宏观判断沉积相和沉积环境。

本次测井以5cm间隔获得电阻率和自然伽马等测井曲线。电阻率随分选程度变差而增高,随泥质含量增高而降低;自然伽马能划分岩性,指示砂黏比,黏土含量增高,自然伽马增大(Ouyang Jian et al., 1999; Fu Wenzhao et al., 2017);各种测井曲线的幅度、形态、波动性和锯齿化程度组合成箱形、钟形、漏斗形等基本形态,反映了沉积相的变化(Chen Ganghua et al., 1996; Jin Yan et al., 2002)。

2.2 孢粉分析

QHJ01孔孢粉样品取样深度为0.60~481.40m,取样岩性为黏土、粉砂质黏土、黏土质粉砂及粉砂,一般按层采取,岩性变化较大及特殊层位(灰黑色、深灰色黏土及夹含化石碎片层)要加密取

样,砂层较厚时减少样品数量,共完成样品测试 219 件,测试工作由中国地质科学院水文地质与环境地质研究所孢粉实验室完成。

根据样品性质,取 10~100 克样品用于孢粉分析,用清水浸泡,加入浓度为 10%~15% 的稀盐酸溶液,待反应完全后水洗至中性;然后加入 2~3 倍的氢氟酸溶液,放在水浴锅上加热至煮沸 10h,后水洗至中性,用 7 μ m 孔径筛子过滤提取孢粉,最后制片。花粉鉴定统计在 10 \times 40 倍日本 OLYMPUS 光学生物显微镜下进行,每个样品的鉴定所统计花粉数量是在观察统计 4 个以上玻片得到。

2.3 年代学

本次工作采用¹⁴C 和光释光(OSL)建立了钻孔浅部地层年代格架。其中¹⁴C 样品 1 件,岩性为灰黑色炭质黏土,为全新世海侵底部泥炭层,深度为 14.40m,样品测试在北京大学考古文博学院第四纪年代测试实验室完成,测得年龄值为 10449 \pm 41 a BP。光释光样品 2 件,深度分别为 34.00m 和 44.60m,样品测试在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室释光年代学实验室完成,所获得的年龄值分别为 >130 ka BP 和 >180 ka BP,此结果与岩石地层确定年龄值明显偏大,判断为沉积物经过再搬运,堆积之前沉积速率较快,曝光时间短且不均匀,信号残留高且颗粒间分布不均一造成(Zhang Keqi et al., 2015)。

深部地层年代学研究采用古地磁测试的方法,在新鲜层面上用 2cm \times 2cm \times 2cm 的无磁立方体塑料盒定向采取无扰动的岩芯。古地磁测试和磁性参数测量在中国地质科学院地质力学所古地磁与古构造重建实验室完成,样品均在磁屏蔽空间(<300nT)内,使用美制 2G-755 型 U-CHANNEL 无液氦超导磁力仪进行测试。除了完成对所有样品的天然剩磁(NRM)测试外,还开展了系统的交变退磁测试,退磁步骤为:5 mT、10 mT、15 mT、20 mT、25 mT、30 mT、35 mT、40 mT、45 mT、50 mT、55 mT、65 mT、75 mT、85 mT、100 mT,共计 15 步。样品的特征剩磁(ChRM)组分均利用主向量法分析获得。

3 结果

3.1 地层年代

根据样品的退磁结果,QHJ01 孔多数样品的退磁曲线在交变退磁场为 20mT 时可以获得稳定可靠的磁倾角。从样品的剩磁矢量正交投影图可以看

出,大部分样品在交变退磁场为 50~60mT 时已经退去天然剩磁的 80%,甚至更多,且退磁方向趋向原点,能获得较好的退磁效果(图 2)。本次工作共完成 700 个测试样品,其中的 462 个样品(占全部样品的 66%)可分离出较稳定的 ChRM 方向,用于建立磁性地层序列,钻孔岩芯的磁偏角无意义,仅用倾角建立磁性柱(Shi Linfeng et al., 2010; Chang Hong et al., 2012; Qin Yongpeng et al., 2012),且连续两个以上的样品出现反极性时,定义一次漂移或极性亚时,4 个以上样品出现反极性时定义一次极性时。QHJ01 孔共有 15 个极性时(图 3),其中 8 个正极性时,分别为 N1(0.00~110.33m)、N2(116.12~123.20m)、N3(153.49~194.00m)、N4(241.90~269.20m)、N5(278.47~301.25m)、N6(330.45~343.95m)、N7(396.50~409.38m)和 N8(448.97~500.50m);7 个负极性时,分别为 R1(110.33~116.12m)、R2(123.20~153.49m)、R3(194.00~241.90m)、R4(269.20~278.47m)、R5(301.25~330.45m)、R6(343.95~396.50m)和 R7(409.38~448.97m)。

N1 中¹⁴C 和 OSL 年代均指示其实为 Brunches 正极性时,因此 N1 对应 C1n,为 Brunches 正极性时。R1~R3 为 Matuyama 负极性时,其中 R1 对应 C1r.1r, N2 对应 C1r.1n,为 Jaramillo 正极性亚时。Olduvai 正极性亚时持续时间长,且强度大,在渤海湾沿岸其他钻孔中均有出现,因此推断 N3 对应 C2n,为 Olduvai 正极性亚时。R2 对应 C1r.2r + C1r.3r, R3 对应 C2r.1r + C2r.2r。N4~N6 为 Gauss 正极性时,其中 R4 和 R5 分别对应 C2An.1r 和 C2An.2r。R6 对应 C2Ar, N7 至 N8 对应 C3n,该段砂层较多,古地磁样品数量较少,不能将个别极性时和标准极性时严格对应。依据 N7 和 C3n.1n 对应的斜率,判断钻孔底部应该在 C3n 底部,年龄为 5.20Ma。

3.2 沉积环境与沉积相

依据沉积物岩性、结构、构造和包含物等特征以及测井曲线中自然伽马和电阻率曲线,岩芯自上而下为 4 个沉积组合,其年代依据地层特征和磁性地层及其线性内插获得,依次为沉积组合 I,年代为 0.00~0.13Ma;沉积组合 II,年代为 0.13~2.12Ma;沉积组合 III,年代为 2.12~3.33Ma;沉积组合 IV,年代为 3.33~5.20Ma。

3.2.1 沉积组合 I

本组合埋深为 0.00~71.90m,下部为湖相一河

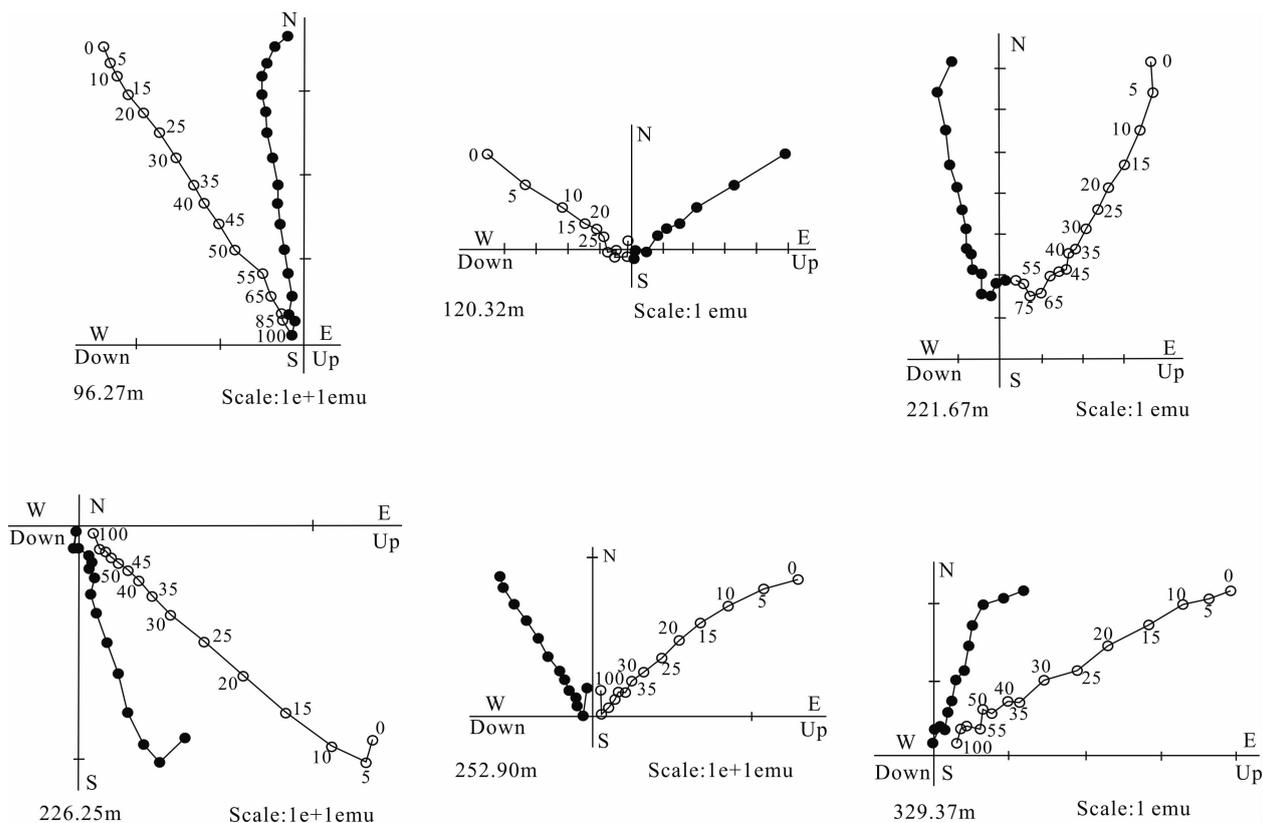


图2 渤海湾西北岸QHJ01孔代表性样品的系统交变退磁正交矢量投影

Fig. 2 Orthogonal (Zijderveld) vector plots of representative specimens of QHJ01 borehole in northwest Bohai Bay

流相沉积,上部为湖相—海相沉积,可划分为四个亚段(图3)。

I-1亚段为湖相—海相沉积,埋深为0.00~15.30m,年代为0.00~0.01Ma,上部岩性为棕黄色、棕灰色黏土质粉砂、粉砂质黏土、黏土夹细砂、粉砂,具水平、交错、波状、透镜状和脉状层理,潜育化发育,见沼螺和扁小旋螺化石,含较多有孔虫及海相介形类,自然伽马值向上逐渐变小,反映了含砂粒逐渐增加,代表了三角洲的进积,为潮上带及海滩脊沉积。中部为黑灰色黏土质粉砂,发育水平层理、透镜状层理、波状层理等,见少量蛤类化石碎片及虫孔构造,自然伽马值向上逐渐变大,说明黏土含量增加,为滨海潮坪、潟湖相沉积,对应MIS1阶段沉积。下部为棕黄色、灰黄色粉砂质黏土、黏土质粉砂,深灰色粉砂质黏土,发育波状层理,可见虫孔,为湖沼相沉积,对应MIS2阶段上部沉积。

I-2、I-3和I-4亚段为湖相—河流相沉积,埋深为15.30~71.90m,年代为0.01~0.13Ma,由三套湖相—河流相沉积旋回组成,分别为I-2(埋深为15.30~34.35m)、I-3(埋深为34.35~50.81m)、I-4(埋深为50.81~71.90m)。旋回下部以黏土为

主,颜色多为棕灰色、绿灰色、深灰色,相对较深,夹薄层细砂及中砂,具波状、透镜状及水平层理,自然伽马值向上增大,视电阻率值向上减小,粒度向上变细,为湖相沉积;旋回上部为灰黄色、黄棕色、棕黄色粉砂及粉砂质黏土,水平层理及波状层理发育,自然伽马和视电阻率曲线呈钟形,粒度为由粗变细的正粒序,属曲流河相及泛滥平原相沉积。I-2亚段15.30~25.95m对应MIS2阶段下部沉积,25.95~34.35m对应MIS3阶段沉积。I-3亚段34.35~39.09m对应MIS4阶段沉积,39.09~50.81m对应MIS5^{a-b}阶段沉积。I-4亚段对应MIS5^{c-e}阶段沉积。

3.2.2 沉积组合II

埋深为71.90~212.43m,年代为0.13~2.12Ma,本组合以湖相及湖相砂体沉积为主,顶部夹曲流河沉积。其中71.90~96.90m,砂层变厚,粒度变粗,岩性以中粗砂、中细砂及细砂为主,底部含砾中粗砂,夹黏土及粉砂质黏土,颜色为灰黄色、棕灰色及灰色,黏土中发育透镜状层理,见钙质结核,下部自然伽马和电阻率曲线呈箱形,为湖相砂体,上部自然伽马和视电阻率曲线较平滑,夹小型波

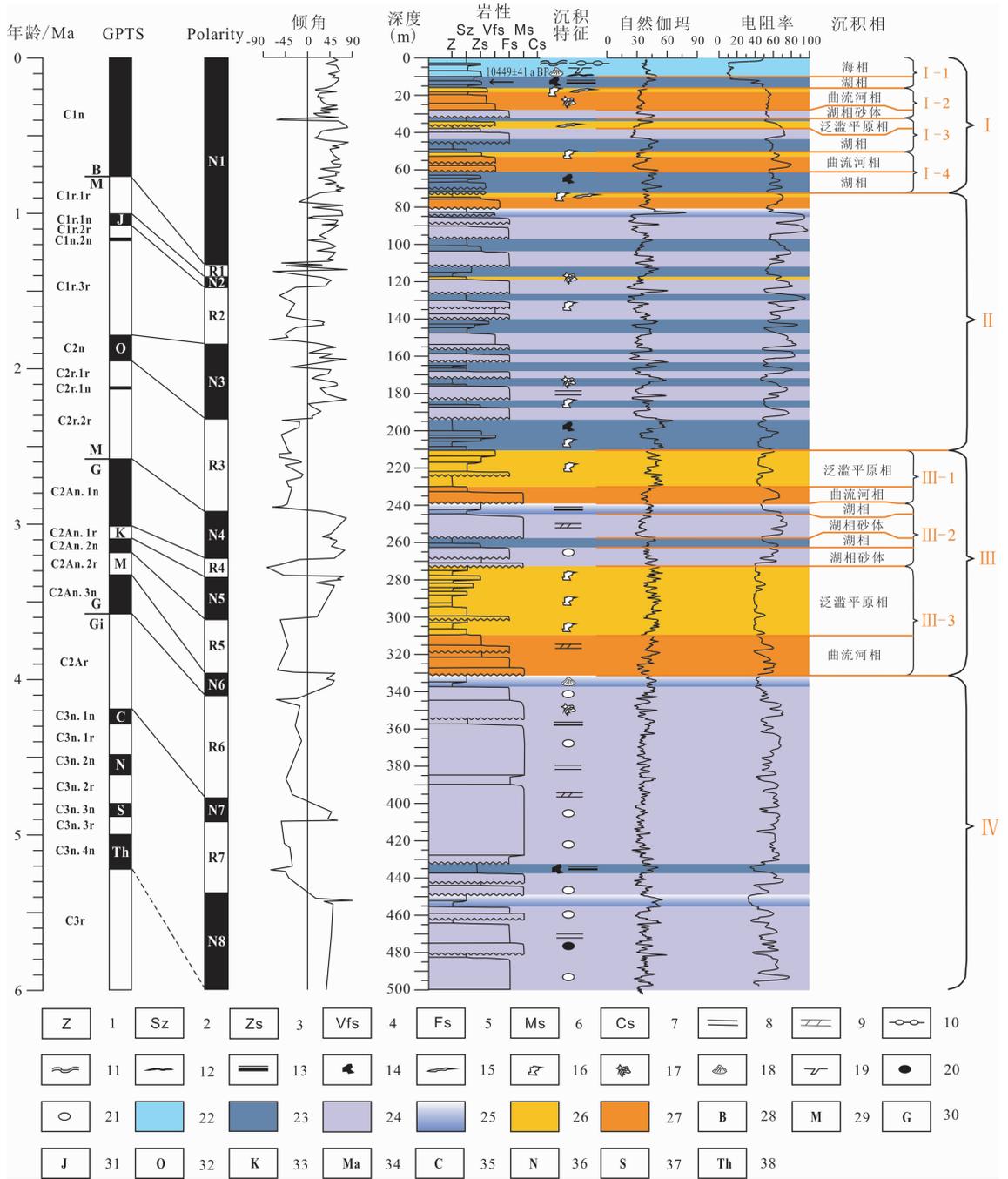


图 3 渤海湾西北岸 QHJ01 孔地磁极性柱、测井曲线、沉积相分类图

Fig. 3 The magnetic polarity stratigraphy and the curves of logging and the sedimentary of QHJ01 borehole in Northwest Bohai Bay

1—黏土; 2—粉砂质黏土; 3—黏土质粉砂; 4—粉砂; 5—细砂; 6—中砂; 7—粗砂; 8—水平层理; 9—交错层理; 10—透镜状层理; 11—波状层理; 12—碳质碎屑; 13—泥炭层; 14—碳质斑点; 15—钙质淀积; 16—钙质结核; 17—铁锰质锈染及结核; 18—贝壳及碎片; 19—生物潜穴; 20—泥砾; 21—砾石; 22—海相; 23—湖泊相; 24—湖相砂层; 25—浅湖相; 26—泛滥平原; 27—河流相; 28—布容极性柱时; 29—松山极性时; 30—高斯极性时; 31—贾拉米洛极性时; 32—奥尔杜威极性时; 33—凯纳极性时; 34—马莫斯极性时; 35—柯奇蒂极性时; 36—努尼瓦克极性时; 37—西杜夫加加极性时; 38—斯瓦拉极性时

1—clay; 2—silty clay; 3—clay silt; 4—silt; 5—fine sand; 6—medium sand; 7—coarse sand; 8—horizontal bedding; 9—cross bedding; 10—lenticular bedding; 11—wavy bedding; 12—carbon fragment; 13—peat; 14—carbon spot; 15—calcium deposition; 16—calcareous nodule; 17—ferromanganese rust and nodule; 18—shell; 19—burrow; 20—boulder clay; 21—pebble; 22—marine facies; 23—lacustrine facies; 24—lacustrine facies sand; 25—shallow lake facies; 26—floodplain facies; 27—fluvial facies; 28—Brunches; 29—Matuyama; 30—Gauss; 31—Jaramillo; 32—Olduvai; 33—Keana; 34—Mammoth; 35—Cochiti; 36—Nunivak; 37—Sidufjall; 38—Thvera

状起伏,为曲流河沉积;96.90~112.05m由灰色、棕灰色、绿灰色中细砂、细砂、粉砂及黏土组成,粉砂中见少量钙质结核,黏土中见波状层理及脉状层理,砂层中发育板状交错层理,自然伽马和视电阻率曲线呈纺锤形,整体表现为先反粒序后正粒序的韵律特征,反映了湖泊相、湖泊三角洲前缘砂体的沉积特征;112.05~212.43m由多套向上变细的韵律构成,沉积物颜色多以深绿灰色及绿灰色为主,下部为中砂、中细砂及细砂,平行层理及交错层理发育;上部为粉砂质黏土及黏土夹薄层粉砂。测井曲线呈指状起伏,属湖相、湖相砂体沉积。

3.2.3 沉积组合Ⅲ

埋深为212.43~331.00m,年代为2.12~3.33Ma,本组合为曲流河相夹湖相沉积,可划分为三个亚段。

Ⅲ-1亚段:埋深为212.43~239.05m,由多套向上变细的韵律组成,整体颜色以绿黄色、棕黄色、橙黄色为主,韵律下部粒度较粗,以中粗砂、中砂、粉细砂为主,向上逐渐变细,过渡为黏土质粉砂、粉砂质黏土、黏土等,砂层中发育交错层理,黏土层中含较多钙质结核,下部自然伽马和视电阻率曲线呈钟形,向上逐渐变平直,夹小型波状起伏,反映了向上水动力逐渐减小,属河流相、泛滥平原相沉积。

Ⅲ-2亚段:埋深为239.05~271.67m,由两套向上变粗再变细的韵律组成,沉积物为灰色、棕灰色、绿灰色含砾中粗砂、中砂、细砂夹粉砂、粉砂质黏土、黏土,发育交错层理、脉状层理及炭质纹层,自然伽马和视电阻率曲线在239.05~260.00m及260.00~271.67m段各为一个纺锤形,均表现为先反粒序后正粒序的韵律特征,为一套湖泊三角洲前缘砂体夹湖泊相沉积。

Ⅲ-3亚段:埋深为271.67~331.00m为灰黄色、棕黄色含砾中粗砂,发育交错层理,向上过渡为以黏性土为主,夹薄层细砂,含大量钙质结核,309.15~331.00m自然伽马和视电阻率曲线呈箱形,反映了较均质的河道砂沉积,271.67~309.15m自然伽马和视电阻率曲线呈低幅、平直形,局部夹小的齿峰,属曲流河和泛滥平原相沉积。

3.2.4 沉积组合Ⅳ

埋深为331.00~500.50m,年代为3.33~5.20Ma,本组合为厚层湖泊砂体沉积,岩性以粗砂、中粗砂、中细砂及细砂为主,颜色为灰色、绿灰色、灰绿色,板状交错层理、平行层理、炭质纹层普遍发育,少见化石,含砾粗砂中见树木茎干化石,331.00~

362.43m及428.08~455.18m段自然伽马和视电阻率曲线呈纺锤形,整体表现为先反粒序后正粒序的韵律特征,反映了湖泊相、湖泊三角洲前缘砂体的沉积特征;362.43~428.08m及455.18~500.50m段自然伽马和视电阻率曲线呈连续箱状夹小型波谷,为湖相砂体沉积夹湖相沉积。

3.3 孢粉组合特征

本次研究在219块样品中鉴定出38879粒孢粉化石,大部分样品中都发现了花粉化石,但由于整体上数量较少,高于50粒的样品为136个,高于100粒的样品106个,本文选择100粒为有效鉴定数量,对花粉图谱进行了百分比图谱的分析。

本次研究鉴定出的孢粉化石较丰富,科属类型较多,分属于88个科属。其中木本植物花粉有33个科属,花粉有柏科 Cupressaceae、杉科 Taxodiaceae、罗汉松属 *Podocarpus*、松科的雪松属 *Cedrus*、落叶松属 *Larix*、松属 *Pinus*、云杉属 *Picea*、冷杉属 *Abies*、铁杉属 *Tsuga*、桦科的桤木属 *Alnus*、桦属 *Betula*、鹅耳枥属 *Carpinus*、榛属 *Corylus*、山毛榉科的山毛榉属 *Fagus*、栎属 *Quercus*、榆科的榆属 *Ulmus*、朴属 *Celtis*、榉属 *Zelkova*、胡桃属 *Juglans*、山核桃属 *Carya*、枫香属 *Liquidambar*、椴属 *Tilia*、柳属 *Salix*、漆属 *Rhus*、槭属 *Acer*、桑科 Moraceae、冬青属 *Ilex*、忍冬科 Caprifoliaceae 等;草本植物花粉有38个科属类型,花粉有麻黄属 *Ephedra*、禾本科 Poaceae、菊科 Asteraceae、蒿属 *Artemisia*、蒲公英属 *Taraxacum*、菊属 *Chrysanthemum*、紫菀属 *Aster*、藜科 Amaranthaceae、毛茛科 Ranunculaceae、唐松草属 *Thalictrum*、蔷薇科 Rosaceae、地榆属 *Sanguisorba*、蓼科 Polygonaceae、豆科 Fabaceae、唇形科 Lamiaceae、十字花科 Brassicaceae、旋花科 Convolvulaceae、玄参科 Scrophulariaceae、茄科 Solanaceae、茜草科 Rubiaceae、葎草属 *Humulus* 等,湿生水生草本植物花粉有泽泻属 *Alisma*、眼子菜属 *Potamogeton*、香蒲属 *Typha*、莎草科 Cyperaceae、狐尾藻属 *Myriophyllum* 等;蕨类植物孢子有17个科属,有石松科 Lycopodiaceae、卷柏属 *Selaginella*、中华卷柏 *S. sinensis*、水龙骨科 Polypodiaceae 等。上述孢粉化石均属本地现生植物花粉。

根据QHJ01孔孢粉分析和鉴定统计结果,选择了典型的具生态意义的孢粉科属类型绘制孢粉图谱(图4),并据此划分了8个孢粉组合带和7个亚带。

孢粉带I(深度433.60~481.40m):孢粉较丰

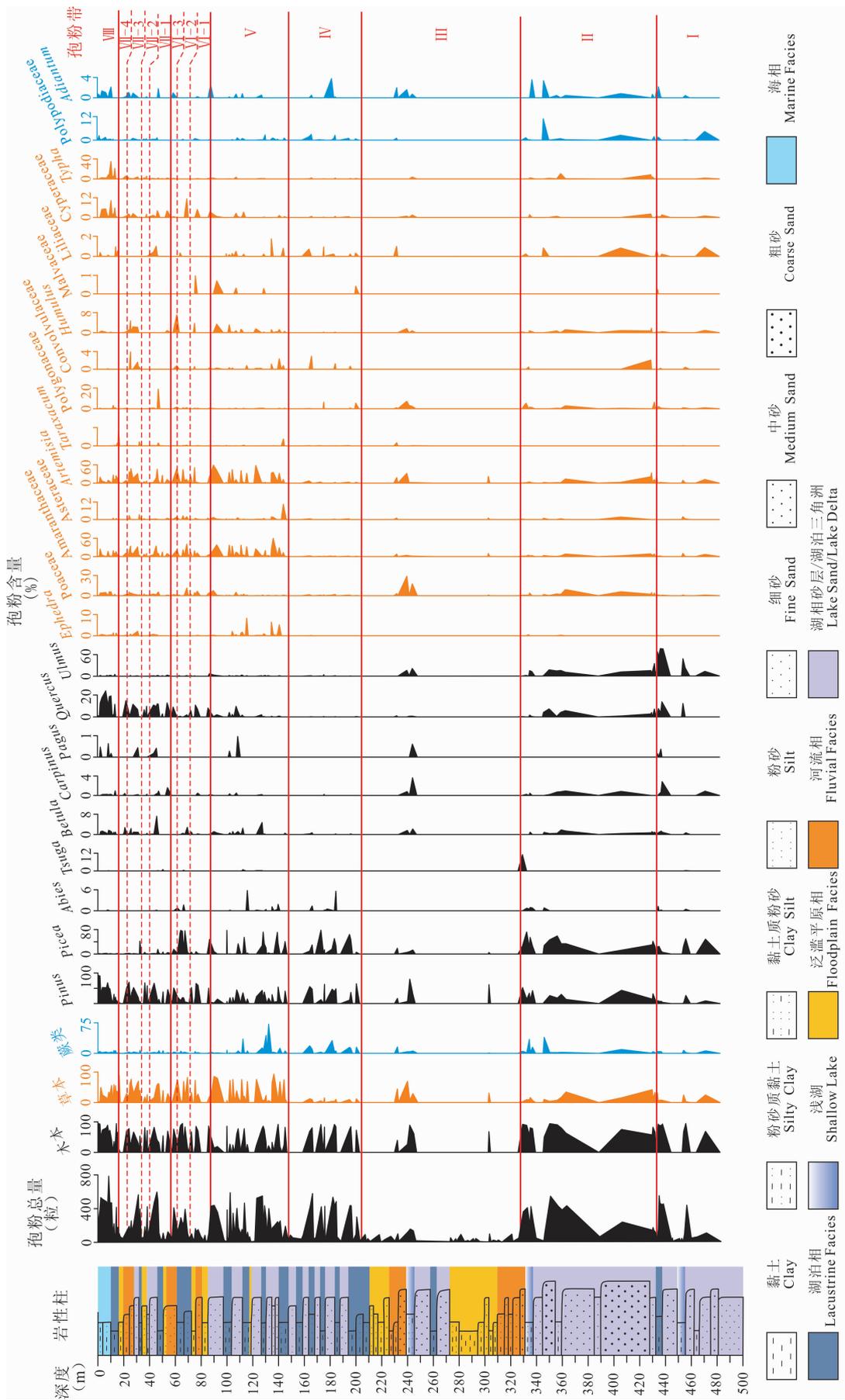


图 4 渤海湾西北部 QHJ01 孔孢粉图谱
Fig.4 Spore-Pollen diagram of QHJ01 borehole in northwest Bohai Bay

富,木本植物花粉占优势,草本植物花粉次之。木本花粉含量占 67.9%~94.8%,花粉以榆属为主,最高含量占 63.6%,为本孔之首,其次是云杉属、松属、山核桃属等。草本植物花粉含量占 3.4%~24.8%,花粉有藜科、蒿属、禾本科等;湿生水生草本有泽泻属、莎草科。蕨类植物孢子含量占 1.8%~7.5%,有石松科、卷柏属。

孢粉带 II (深度 328.55~433.60m):孢粉较丰富,针叶树种增加,木本植物花粉仍占优势。木本花粉含量占 50.4%~94.3%,木本花粉仍以云杉属、松属为主,最高含量分别占 72.3%和 52.6%,其次是榆属、栎属等。草本花粉含量占 2.8%~42.0%,花粉仍以蒿属为主,最高含量为 27.8%,其次是藜科、禾本科等;湿生水生草本以香蒲属为主,最高含量为 10.6%,还有莎草科和狐尾藻属等。蕨类植物孢子含量占 0.7%~39.5%,有石松科、卷柏属等。

孢粉带 III (深度 202.45~328.55m),孢粉少,仅在 231.70~243.70 m 和 302.55 m 花粉含量达到了统计数量,其余均未达到统计数量,草本花粉有所增加,木本花粉仍占优势。木本花粉含量占 39.6%~89.3%,花粉仍以松属为主,最高含量占 79.9%,其次是云杉属、柏科、榆属等。草本植物花粉含量占 29.2%~69.6%,花粉以禾本科和蒿属为主,含量分别占 28.8%和 26.4%,其次是藜科、菊科等;水生湿生草本有莎草科和香蒲属等。蕨类孢子含量占 1.0%~15.8%,有石松科、水龙骨科等。孢粉带 III 所含孢粉很少,多数样品未达到统计量,其主要受沉积环境影响。此带沉积环境为曲流河、泛滥平原夹湖泊沉积。曲流河水动力条件比较强,不利于花粉沉积(Bonny, 1978);泛滥平原间歇性物源补给,孢粉通量也相对较小;湖相沉积中以砂体沉积为主,所携带的花粉也较少,细粒沉积物中孢粉含量相对较多。同时孢粉含量低与孢粉保存条件有关,泛滥平原的氧化作用强烈,对花粉的破坏性最大(Li Yuecong et al., 2005),也不利于花粉的保存。

孢粉带 IV (深度 146.30~202.45m):草本植物花粉明显减少,蕨类植物孢子增加,木本植物花粉占绝对优势。木本花粉含量占 64.0%~91.7%,花粉以云杉属、松属为主,最高含量分别占 78.0%和 64.8%,还有少量的柏科、冷杉属、落叶松属、铁杉属等。草本植物花粉含量占 3.7%~15.4%,花粉有藜科、蒿属、禾本科。蕨类植物孢子占 1.6%~31.5%,蕨类孢子以膜蕨科和瘤足蕨科为主,其次是

卷柏属、水龙骨科等。

孢粉带 V (孔深 85.68~146.3m):木本植物花粉、草本植物花粉、蕨类植物孢子三者相互出现高峰,气候处于波动状态中。木本植物花粉略占优势,木本花粉含量占 4.1%~92.1%,花粉仍以云杉属和松属为主,含量分别占 72.0%和 54.2%,其次是栎属、榆属、桦属、胡桃属等。草本植物花粉含量占 3.7%~93.3%,花粉以藜科、蒿属为主,分别占 60.0%和 49.1%,其次是麻黄属、禾本科、菊科等;水生湿生草本有泽泻属、莎草科。蕨类植物孢子占 0.5%~71.8%,蕨类孢子以水龙骨科为主,最高占 71.1%,其次是膜蕨科、石松科等。

孢粉带 VI (孔深 47.20~85.68m):孢粉数量较孢粉 V 带减少,蕨类植物孢子明显减少,木本植物花粉占优势,可划分为三个亚带。

VI-1 亚带(70.40~85.68m):孢粉数量相对较少,其中木本花粉含量占 22.8%~86.5%,花粉以松属为主,最高含量占 65.9%,其次是云杉属、栎属、柏科等。草本植物花粉含量占 12.6%~72.8%,花粉以蒿属、藜科为主,最高含量分别占 41.9%和 19.1%,其次是禾本科、蓼科、菊科等;水生湿生草本有莎草科、香蒲属。蕨类植物孢子占 0.9%~4.3%,有卷柏属、中华卷柏、水龙骨科等。

VI-2 亚带(63.55~70.40m):孢粉数量较 VI-1 亚带有所增加,其中木本花粉含量占 17.0%~95.0%,花粉以云杉、松属为主,最高含量分别占 19.6 和 77.40%,云杉属为本孔含量最高,其次是桦属、栎属、柏科等。草本植物花粉含量占 4.6%~82.1%,花粉以蒿属、藜科为主,最高含量分别占 36.6%和 40.6%,其次是禾本科、菊属、蒲公英属、菊科;水生湿生草本有莎草科、狐尾藻属。蕨类植物孢子占 0.9%~5.1%,有瘤足蕨科、卷柏属等。

VI-3 亚带(47.20~63.55m):孢粉数量相对 VI-2 亚带减少,其中木本花粉含量占 24.8%~76.3%,花粉以松属为主,最高含量占 51.0%,其次是云杉属、栎属等。草本植物花粉含量占 20.5%~74.4%,花粉以蒿属、藜科为主,最高含量分别占 39.2%和 20.8%,其次是蓼科、蒲公英属等;水生湿生草本有莎草科、香蒲属等。蕨类植物孢子占 0.8%~6.4%,有中华卷柏、水蕨属、蹄盖蕨科等。

孢粉带 VII (孔深 11.54~47.20m):孢粉数量较孢粉带 VI 明显增加,草本植物花粉明显增加,木本植物花粉占优势,本带可划分为四个亚带。

Ⅶ-1 亚带(38.16~47.20m):孢粉数量明显增加,其中木本花粉含量占 36.0%~82.0%,花粉以松属为主,最高含量占 51.0%,其次是栎属、云杉属等。草本植物花粉含量占 15.6%~61.6%,花粉以蒿属、藜科为主,最高含量分别占 37.8% 和 34.5%,其次是禾本科、蒲公英属等;水生湿生草本有莎草科、香蒲属。蕨类植物孢子占 1.0%~2.6%,有水龙骨科、中华卷柏等。

Ⅶ-2 亚带(33.68~38.16m):孢粉数量明显减少,仅一个样品达到统计数目,木本花粉含量占 80.9%,花粉以松属为主,含量占 67.9%,其次是栎属、云杉属、柏科、落叶松属。草本植物花粉含量占 17.9%,花粉以蒿属、藜科为主,含量分别占 7.6% 和 3.8%,其次是禾本科、香蒲属、菊属、菊科、蒲公英属;水生湿生草本为香蒲属。蕨类植物孢子占 1.1%,有中华卷、水龙骨科。

Ⅶ-3 亚带(20.45~33.68m):孢粉数量及种类明显增加,草本花粉增加明显,其中木本花粉含量占 22.4%~89.4%,花粉以松属为主,最高含量占 70.0%,其次是栎属、云杉属、桦属、榆属。草本植物花粉含量占 8.5%~76.5%,花粉以蒿属、藜科为主,最高含量分别占 39.4%和 31.5%,其次是禾本科、蒲公英属、蕨草科等;水生湿生草本有香蒲属、莎草科、狐尾藻属。蕨类植物孢子占 0.6%~7.1%,有中华卷柏、卷柏属、蹄盖蕨属等。

Ⅶ-4 亚带(16.03~20.45m):本亚带孢粉数量明显减少,仅一个样品达到统计数目,以草本花粉占优势。草本花粉含量占 89.7%,花粉以蒲公英属为主,含量为 71.0%,其次为藜科、蒿属、菊科、禾本科等,木本花粉划分含量占 9.4%,花粉为柏科、松属、栎属、榆属等。蕨类植物孢子含量为 0.9%,主要为中华卷柏。

孢粉带Ⅷ(孔深 0.60~16.03m,编号为 BF001-BF016):草本植物花粉中水生草本明显增加,木本植物花粉仍占优势。木本花粉含量占 35.4%~94.4%,花粉仍以松属为主,其含量占 92.2%,其次是栎属,含量占 23.8%,为本孔之首,还有柏科、云杉属、榆属、桦属等。草本植物花粉含量占 2.3%~57.9%,花粉以水生香蒲属为主,最高含量占 34.8%,其次是耐旱的藜科、蒿属、禾本科、蒲公英等;其他水生湿生草本有黑三棱属、莎草科、狐尾藻属。蕨类植物孢子占 1.7%~4.9%,有中华卷柏、蹄盖蕨科、水龙骨科、石松属等。

4 讨论

4.1 沉积环境与孢粉浓度的关系

根据沉积相分析结果,QHJ01 孔沉积环境可划分为五大类:河流相、泛滥平原相、湖相、湖泊三角洲相、海相。

从图 4、图 5 可以看出,不同沉积相中孢粉浓度的平均值有很大不同。海相及海洋三角洲沉积物中孢粉浓度最高,平均孢粉浓度为 483 粒/50g,最高为 785 粒/50g;湖泊相沉积物中平均孢粉浓度为 203 粒/50g,最高为 597 粒/50g;湖泊三角洲相沉积物中平均浓度含量为 199 粒/50g,最高为 547 粒/50g;河流相沉积物中平均孢粉浓度为 122 粒/50g,最高为 726 粒/50g;泛滥平原相沉积物中平均孢粉浓度为 70 粒/50g,最高为 436 粒/50g。

沉积物中孢粉浓度受花粉的传播方式、搬运及沉积条件、氧化作用、土壤 pH 值、干湿度变化、有机质含量和微生物作用的多重影响。QHJ01 孔中泛滥平原沉积物中孢粉浓度最低,河流相略高,湖相、海相最高,反映了孢粉浓度受水流作用影响明显。前人研究表明水流携带花粉的能力较强(Bonny, 1978),只有在缓流和静水中才能沉积(Brush et al., 1972),泛滥平原中仅发育间歇性流水作用,仅在洪水期才有水到达,所以携带的花粉含量最低,河流相中主流槽中水流较快,但在边滩沉积周围水流明显变慢,有利于花粉沉积,在湖泊(海相)三角洲中,受湖水(海水)顶托作用的影响,河水流速明显降低,使花粉大量沉积。湖水基本处于平静状态,故而湖相沉积物中孢粉浓度较高(Xu Qinghai et al., 1994)。泛滥平原沉积物中孢粉浓度低还受氧化作用影响的原因。研究表明,土壤表层 8cm 以下(Xu Qinghai et al., 2005; Li Yuecong et al., 2005),花粉总浓度迅速降低,氧化作用对花粉的破坏性最大。泛滥平原沉积物大部分时间暴露于地表,氧化作用强烈,花粉遭到了破坏被分解掉,故而花粉含量较低。

一般在湖相沉积旋回顶部的沉积物中孢粉含量也很低,主要原因有两种:①湖泊演化到最后逐渐盐碱化,随着酸根离子 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 逐渐沉淀,水体碱化,pH 值升高,花粉遭到破坏(Xu Qinghai et al., 2005; Li Yuecong et al., 2005);②随着水位下降,湖泊沉积物暴露于地表,发生潜育化,强烈的氧化作用造成了花粉浓度的降低。此外,孢粉浓度的变化比沉积环境变化相对滞后,沉积环境发生变化时,其

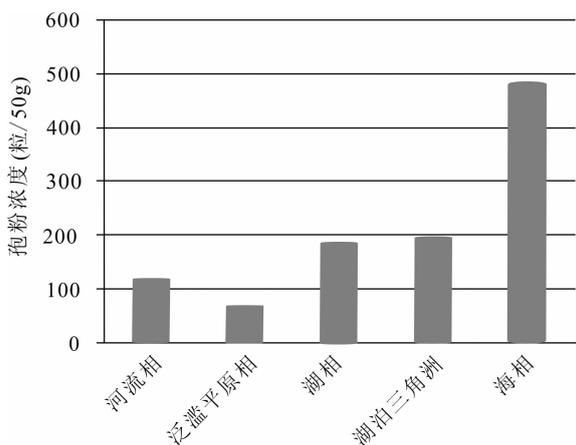


图5 渤海湾西北部 QHJ01 孔不同沉积环境平均孢粉浓度
Fig. 5 Average pollen concentration among different sedimentary environment of QHJ01 borehole in northwest Bohai Bay

底部样品中孢粉浓度仍继承沉积环境变化之前的特征, 后继慢慢发生变化, 反映了沉积环境是影响孢粉浓度变化的重要因素。

4.2 古气候、古植被演化

孢粉植物群是恢复古气候、古环境的手段之一, 此外气温和降水量是了解古气候模式的两个基本参数 (Zhang Ping et al., 2013)。温度变化主要靠孢粉

中喜温分子含量来衡量, 喜温分子主要包括榆属、栎属、桦属、桤木属、鹅尔枥属、枫香属、罗汉松属、凤尾蕨属等 (Wang Weiming, 1994)。降水量变化主要靠乔木类花粉含量与非乔木类花粉含量的比值来衡量, 一般草本植物的增加与乔木植物的减少通常被认为是干旱化的标志。现代植被的分布特征研究表明菊科和藜科是相对干燥和寒冷的标志, 莎草科、香蒲属通常被认为是与当地水环境有关的植被 (Wu Fuli, 2011)。同时研究表明温度和降水量存在正相关的关系 (Zhang Ping et al., 2013), QHJ01 孔也大致显示了相同的规律, 上新世期间气温相对较高, 气候也相对湿润, 个别时段相对较干燥, 进入第四纪气温降低, 与上新世相比降水量偏少, 相对干燥 (图 6)。

5.20~3.33 Ma: 孢粉组合带 I 和 II 孢粉组合特征 (图 4) 及定性古气候重建 (图 6) 显示上新世早期乔木类花粉占比相对较高, 尤其落叶阔叶等喜暖分子, 非乔木类花粉含量相对较低, 表明气候较为温暖, 降水量相对较大, 进入上新世晚期, 草本植物花粉含量开始增加, 气候逐渐干燥, 气温也有所降低。其中 5.20~4.38Ma (孢粉组合带 I) 木本花粉是以落叶阔叶为建群种, 以栎属、榆属为主, 还有一定数量的松科分子, 喜温分子含量 8.8%~83.6%, 平均

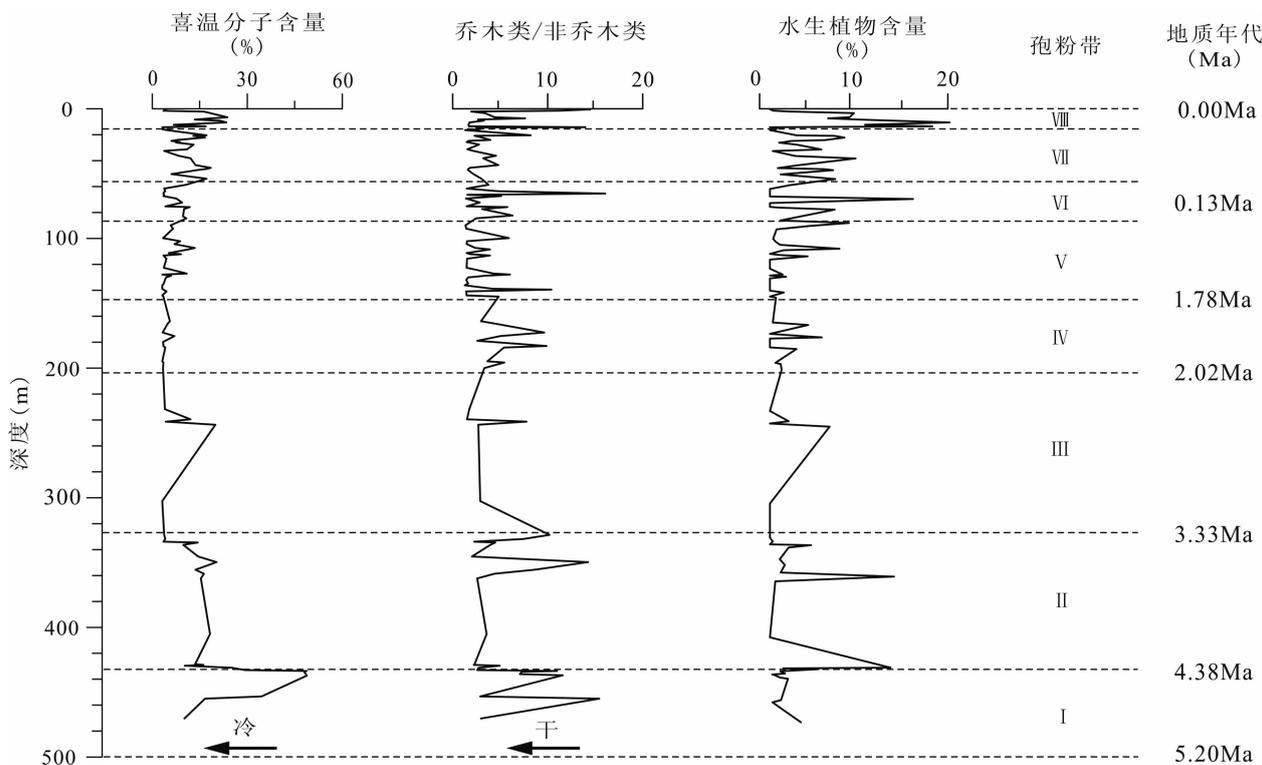


图6 渤海湾西北部 QHJ01 孔定性古气候重建图

Fig. 6 Qualitative paleoclimate reconstruction of QHJ01 borehole in northwest Bohai Bay

值为 43.9%，乔木/非乔木比值为 2.1~18.2，平均值为 9.1，水生植物含量平均值为 1.0%，反映当时当地气候比较温暖、湿润，植被类型为以落叶为主的针阔叶混交林的植被景观，个别时段为荒漠草原植被类型。4.38~3.33Ma(孢粉组合带 II)木本花粉中云杉和松属交替出现高峰，喜暖的落叶阔叶树种较前带明显减少，喜温分子含量 0.5%~33.1%，平均值为 14.0%，乔木/非乔木比值为 1.0~16.6，平均值为 4.7，水生植物含量平均值为 2.3%。植被类型为针阔叶混交林为主，个别地段出现针阔叶混交林草原植被景观，气候向冷干的趋势发展。

3.33~1.78Ma:孢粉组合带 III 和 IV 孢粉组合特征(图 4)及定性古气候重建(图 6)显示花粉数量明显减少，乔木类花粉中针叶树种明显增加，显示了此阶段气候温凉湿润，表明上新世晚期进入第四纪气温明显降低，降水量也明显减少。其中 2.12~3.33Ma 以喜凉针叶树种增加，落叶阔叶减少为特点，喜温分子含量 1.0%~21.2%，平均值为 6.9%，乔木/非乔木比值为 0.4~8.4，平均值为 2.7，水生植物含量平均值为 1.3%，气候进一步变凉变干，植被类型为荒漠草原为主，个别地段植被为针阔叶混交林草原的植被景观，气候冷干。1.78~2.12Ma 针叶树种花粉增加，尤其是云杉在本孔含量第一，落叶阔叶显著减少，喜温分子含量 0.2%~4.9%，平均值为 1.3%，乔木/非乔木比值为 2.2~11.1，平均值为 5.1，水生植物含量平均值为 2.1%，反映气候较孢粉组合 III 凉，但降水量、水生植物及蕨类植物含量增加，反映向湿的方向发展，当时植被类型为针阔叶混交林植被景观，气候凉湿。

1.78~0.13Ma:孢粉组合带 V 和 VI-1 孢粉组合特征(图 4)及定性古气候重建(图 6)显示乔木类花粉中阔叶树种开始增加，但仍以针叶树种占优势地位，喜温分子含量 0.3%~12.9%，平均值为 3.8%，乔木/非乔木比值为 0.2~11.7，平均值为 2.4，较孢粉组合带 IV 有所降低，水生植物含量平均值为 1.6%，反映了气候相对干冷，有变暖的趋势。末期喜暖的落叶阔叶分子增加，喜湿生水生草本有所增加，和以湖相为主的沉积环境相一致，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。中更新世革命后，也就是 0.90Ma 之后，气候波动幅度增大，反映了冰期一冰期的旋回由 4 万年周期转为 10 万年周期。孢粉组合带 VI-1 喜暖的落叶阔叶分子增加，喜温分子含量 1.2%~10.9%，平均值为 7.7%，乔木/非乔木比值为 0.3~6.4，平均值为 3.1，较孢粉组合带 IV 有所

降低，水生植物含量平均值为 2.3%，反映当时当地气候向温湿的方向发展，植被类型为针阔叶混交林为主，末期乔木/非乔木比值、水生植物含量均有所降低，有向温干的趋势发展，个别地段有针阔叶混交林草原和草原的植被景观。

0.13~0.00Ma:晚第四纪以来气候波动变化较为明显，但是有逐渐变暖的趋势，落叶阔叶分子含量逐渐增高。孢粉组合带 VI-2 显示 MIS5 阶段早期喜暖的落叶阔叶分子减少，喜湿生水生草本及蕨类有所增加，喜温分子含量 0.5%~5.7%，平均值为 1.6%，乔木/非乔木比值为 0.2~19.0，平均值为 6.1，水生植物含量平均值为 2.0%，反映当时当地气候向冷湿的方向发展，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。孢粉组合带 VI-3 显示 MIS5 阶段中期喜暖的落叶阔叶分子增加，喜温分子含量 0.8%~17.6%，平均值为 9.2%，乔木/非乔木比值为 0.3~3.2，平均值为 1.5，水生植物含量平均值为 2.7%，反映当时当地气候向温干的方向发展，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。孢粉组合带 VII-1 显示 MIS5 阶段晚期喜暖的落叶阔叶分子增加，水生湿生草本植物增加，喜温分子含量 11.3%~19.3%，平均值为 15.4%，乔木/非乔木比值为 0.6~4.6，平均值为 2.1，水生植物含量平均值为 3.8%，反映当时当地气候向温湿的方向发展，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。孢粉组合带 VII-2 显示 MIS4 阶段喜暖的落叶阔叶分子降低，水生湿生草本植物降低，反映当时当地气候向冷干的方向发展，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。孢粉组合带 VII-3 显示 MIS3 阶段喜暖的落叶阔叶分子明显增加，水生湿生草本植物增加，喜温分子含量 0.8%~17.6%，平均值为 9.2%，乔木/非乔木比值为 0.3~8.9，平均值为 2.1，水生植物含量平均值为 3.0%，反映当时当地气候向温湿的方向发展，植被类型为针阔叶混交林的植被景观。孢粉组合带 VII-4 显示 MIS2 阶段草本植物明显增加，木本植物明显降低，未见水生湿生草本植物，蕨类植物很少，反映当时当地气候寒冷偏干，植被类型为荒漠草原的植被景观。孢粉组合带 VIII 显示 MIS1 阶段喜暖的落叶阔叶分子和喜湿生水生草本增加，喜温分子含量 0.5%~26.1%，平均值为 15.1%，乔木/非乔木比值为 0.7~16.9，平均值为 5.7，水生植物含量平均值为 6.4%，反映气候向暖湿的方向发展，与汝河地区 12000~11000aBP 大洪水事件相对应(Chen Yinglu et al., 2017)，代表了末次冰消期以寒冷为特征的新仙女木

事件结束向温暖的全新世过渡,引起海平面的上升,形成海侵。海侵初期在渤海湾沿岸不同区域普遍发育一套滨岸沼泽沉积(Wang Qiang et al., 1983, 1999; Gao Xiulin et al., 1986; Shi Linfeng et al., 2009; Gu Xiaoyuan et al., 2016)。此阶段植被类型为针阔叶混交林草原的植被景观。全新世晚期气候向干旱化发展,末期进一步变暖,气候波动加剧,与泸沽湖地区、青藏高原东北缘共和—贵德盆地等地全新世中晚气候波动加剧的研究结果相一致(Li Suping et al., 2016; Qin Xiaoguang et al., 2017)。

4.3 沉积环境演化

4.3.1 湖泊扩张期(5.20~3.33Ma)

沉积组合Ⅳ为厚层湖相砂体夹薄层浅湖相黏性土沉积,测井曲线表现为多个漏斗型及箱状形态,体现了三角洲的进积作用与河流加积砂体在湖中沉积,沉积物颜色较深,多以灰绿色为主,表明水体较深,浅湖相沉积黏土中发育钙质淀积,局部黏土层中发育潜育化现象,表明了湖水短暂性变浅和沉积物暴露出水面的过程。此阶段孢粉带Ⅰ、Ⅱ中孢粉总量相对较高,表明水体处于缓流及静水状态,湿生水生草本植物及蕨类植物含量相对较高,表明沉积背景相对湿润,多与湖相或湖泊三角洲沉积有关。综合研究表明此阶段本地区处于湖泊扩张期。

4.3.2 湖泊消亡期(3.33~2.12Ma)

沉积组合Ⅲ为以曲流河沉积为主,夹湖相沉积,由两个旋回组成,自下而上分别为浅湖相—一曲流河相—泛滥平原和湖相—湖相砂体—一曲流河相—泛滥平原相,显示了湖泊被充填的沉积特征。此阶段孢粉带Ⅲ中孢粉总量相对较低,多数样品未达到统计标准,表明孢粉沉积及保存条件相对较差,多与河流沉积环境相关,说明了此阶段本地区以河流进积作用为主,湖盆被充填,逐渐消亡。同时期渤海湾北侧BG10(Yuan Guibang et al., 2014; Zhao Linlin et al., 2016)孔和TZ02(Gao Feng et al., 2017)孔也为泛滥平原相与湖相的交互沉积。

4.3.3 湖泊发育—扩张期(2.12~0.13Ma)

沉积组合Ⅱ为以湖相沉积和湖相砂体为主,夹少量泛滥平原相沉积,由两个旋回组成,底部为浅湖相沉积,上部由多个湖相—湖相砂体的沉积旋回组成,底部沉积物颜色较浅,向上颜色逐渐变深,显示了水体逐渐变深的过程。局部为湖相—湖相砂体—泛滥平原相沉积,显示了短暂水体变浅及湖盆萎缩的过程,同时表明湖盆沉积中心的不断变化。此阶段孢粉带Ⅳ、Ⅴ中孢粉总量相对较高,表明水体处于

缓流及静水状态。孢粉带Ⅳ中木本植物占绝对优势,草本植物含量相对较低,蕨类植物含量相对较高,表明湿度相对较大,水体较丰富,此阶段以湖相为主。孢粉带Ⅴ中,草本植物含量明显增多,蕨类植物向上含量减少,表明了逐渐干旱化的趋势,河流进积作用增强,沉积环境有湖相逐渐向湖泊三角洲相过渡。同时期渤海湾北侧BG10孔为湖泊的边部,多接受河流沉积,TZ02孔湖相仅有少量砂体,并以富营养湖为主,说明TZ02孔为湖泊中心。与BG10孔和TZ02孔相比,QHJ01孔湖相砂体明显增多,说明QHJ01孔处于湖盆的边部,受三角洲进积作用影响更为强烈。

4.3.4 湖相、海相三角洲发育期(0.13~0.00Ma)

沉积组合Ⅰ下部由三个湖泊—泛滥平原的沉积旋回组成,上部为湖泊相—海相—海洋三角洲相的韵律组成,湖相沉积物中潜育化作用强烈,显示了湖水逐渐变浅、湖盆萎缩,河流进积作用逐渐增强。此阶段孢粉含量波动变化明显,总体相对较高,说明了沉积环境变化较为频繁,河流沉积与湖相、海相沉积交替出现,三角洲较为发育。同时期MIS5阶段BG10孔和TZ02孔发育海相地层,而QHJ01孔为湖相地层;MIS3阶段BG10为海相地层,TZ02孔为辫状河沉积,QHJ01孔为湖相砂体沉积;MIS1阶段BG10孔和TZ02下部为海相沉积,上部为河流相沉积,QHJ01孔下部为海相沉积,上部为三角洲进积,说明在沉降构造背景条件下,河流进积作用造成湖盆沉积中心的不断迁移,造成同期异相的结果。

4.4 新构造运动对沉积环境的影响

华北平原新生代以来经历了强烈的裂陷和沉降,第四纪为加速沉降时期(Dong Min et al., 2012),第四纪沉降中心在黄骅坳陷的北部(Tang Liangjie et al., 2008)。研究表明,在黄骅坳陷内不同次级构造单元的第四纪沉积厚度会有明显的差异(Xu Qinmian et al., 2011),黄骅坳陷内钻孔磁性数据表明不同钻孔的B/M界限、M/G界限有很大的不同,整体显示为向北、向东界限变深,证实了黄骅坳陷向东北方向倾伏。黄骅坳陷内不同构造单元的差异性沉降造成了渤海湾北岸、西岸不同地区沉积环境的差异,渤海湾北岸BG10孔、TZ02孔在进入第四纪开始持续发育湖相沉积,而渤海湾西岸G2、CQJ4、CH500孔孔进入第四纪则以河流相和泛滥平原相沉积为主(Shi Linfeng et al., 2009; Yang Jilong et al., 2015; Pei Yandong et al., 2016)。

渤海湾西北岸QHJ01孔处于沧县隆起的北部,

沉积环境分析结果表明早、中更新世沉积环境与渤海湾西北岸黄骅拗陷内其他钻孔趋于一致,均以湖相沉积为主。QHJ01 孔 B/M 界限在 110m 左右, M/G 界限在 240m 左右,比黄骅拗陷内 BG10 孔、TZ02 孔明显要浅(Yuan Guibang et al., 2014; Gao Feng et al., 2017),反映了隆起区与拗陷区的差异性沉降。

沧县隆起南部 BZ2 孔、TN3 孔 B/M 界限在 56m 左右, M/G 界限在 163m 左右(Chen Yukun et al., 2008),比 QHJ01 孔相比明显偏浅。BZ2 孔、TN3 孔同时早、中更新世沉积环境以河流相、泛滥平原相沉积为主,夹少量湖相沉积,与 QHJ01 孔早、中更新世沉积环境也明显不同。综合分析表明,第四纪时期沧县隆起北部的第四纪时期的沉降速率要大于南部,沧县隆起亦存在向北东方向倾伏的趋势,造成了沉积环境的差异。

渤海湾北部、西部不同钻孔的磁性地层数据及沉积环境综合分析表明,第四纪时期沧县隆起及黄骅拗陷存在向北东方向倾伏的趋势,沧县隆起和黄骅拗陷北部构造沉降明显,北西向构造断裂带活动强烈,产生了一系列的地震活动,成为华北平原北部构造活动最为强烈的地区。同时差异性沉降造成了渤海湾西北岸与渤海湾西岸早、中更新世沉积环境的巨大差异。晚更新世开始构造差异性逐渐减小,受气候波动影响,渤海湾北岸、西岸沉积环境演化趋向一致,普遍发育海侵沉积。

4.5 气候变化对沉积环境、海侵的影响

QHJ01 孔综合研究表明,渤海湾西北部上新世时期气候变化对沉积环境影响明显,5.20~3.33Ma 气候温暖湿润,湖盆开始发育,沉积环境以湖相为主,上新世晚期—第四纪早期气候开始变干变冷,3.33~2.12Ma 气候温凉干旱,湖盆开始消亡,沉积环境过渡为曲流河、泛滥平原。第四纪开始构造沉降加剧,沉积相主要受构造影响,气候变化对沉积环境影响作用减弱,2.12~0.13Ma 沉积环境持续以湖相为主。晚第四纪开始,气候波动变化较为明显,但是有逐渐变暖的趋势,一般暖期发育湖相、湖相砂体沉积,冷期发育曲流河及泛滥平原沉积。MIS5 阶段早期及晚期气候温暖偏湿,中期寒冷偏湿,沉积环境表现为湖相夹曲流河相;MIS4 阶段气候向冷干的方向发展,沉积环境为泛滥平原;MIS3 阶段气候向温湿的方向发展,微体古生物鉴定在顶部发现有典型中华美花介,沉积环境为咸化湖泊及湖相砂体沉积,可与区域第 II 海侵层对应;MIS2 阶段气候

寒冷偏干,沉积环境为曲流河、泛滥平原。MIS1 阶段气候向暖湿的方向发展,沉积环境为海相、海洋三角洲相,沉积物中含大量有孔虫及海相介形类,水生湿生草本植物明显增加,为区域第 I 海侵层。

5 结论

综合渤海湾西北岸 QHJ01 孔的花粉数据、年代学结果及沉积相和沉积体系等资料,我们可以得出以下结论:

(1)沉积物中孢粉浓度受花粉的传播方式、搬运及沉积条件、氧化作用、土壤 pH 值、干湿度变化、有机质含量和微生物作用的多重影响,其中水流作用影响明显,流速越低孢粉越容易沉积,同时埋藏和保存条件也是影响孢粉浓度的关键因素。根据沉积相分析结果,QHJ01 孔沉积环境可划分为五大类:河流相、泛滥平原相、湖相、湖泊三角洲相、海相。不同沉积环境中孢粉含量的平均值有很大不同,海相及海洋三角洲沉积物中孢粉含量最高,其次为湖泊三角洲相、河流相和曲流河相。

(2)QHJ01 孔 5.20~3.33Ma 早期植被类型为以落叶为主的针阔叶混交林,气候温湿,晚期植被类型为针阔叶混交林,气候向冷干的趋势发展;3.33~2.12Ma 植被类型以荒漠草原为主,个别地段为针阔叶混交林草原,气候温凉干旱。2.12~0.13Ma 为湖泊发育期,其中 2.12~1.78Ma 植被类型为针阔叶混交林,气候凉湿,1.78~0.90Ma 气候干冷,0.90~0.13Ma 气候波动幅度增大。0.13Ma 以来气候波动变化较为明显,落叶阔叶分子含量逐渐增高,有逐渐变暖的趋势。

(3)上新世以来 5.20~3.33Ma 为湖泊发育—扩张期,沉积了厚层的湖相砂体及湖泊沉积,3.33~2.12Ma 为湖泊消亡期,为曲流河和泛滥平原相沉积,此阶段沉积环境主要受气候变化影响较为明显。2.12~0.13Ma 再次发育湖泊沉积并进一步扩张,此阶段沉积环境主要受区域构造沉降控制,受气候波动影响较小。0.13Ma 以来主要发育湖相—河流相的湖相三角洲沉积,其中全新统主要为海相沉积,此阶段沉积环境受气候变化影响较为明显,同时亦受区域构造沉降控制。

致谢:感谢天津市地质调查研究院总工程师王家兵在论文创作过程中给予的指导,感谢两位审稿人提出的宝贵意见,感谢责任编辑对本文的校核。

References

Bonny A P. 1978. The effect of pollen recruitment processes on

- pollen distribution over the sediment surface of a small lake in Cumbria. *J Ecol*, 66: 385~416.
- Brush G S, Brush L M. 1972. Transport of pollen in a sediment-laden channel: A laboratory study. *American Journal of Science*, 272: 1359~1381.
- Chang Hong, An Zhisheng, Liu Weiguo, Qiang Xiaoke, Song Yougui, Ao Hong. 2012. Magnetostratigraphic and paleoenvironmental records for a Late Cenozoic sedimentary sequence drilled from Lop Nor in the eastern Tarim Basin. *Global and Planetary Change*, 80~81: 113~122.
- Chen Ganghua, Wang Zhongwen, Wang Xiangwen. 1996. Study of sedimentary microfacies of river facies and electrofacies. *Well Logging Technology*, 20(5): 335~340 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yinglu, Huang Chunchang, Zhang Yuzhu, Guo Yongqiang, Zhou Yali, Li Yuqin, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Shi Binnan, Liu Wenjin. 2017. Sedimentology and OSL dating study of the Holocene palaeoflood on the Ruhu River. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2351~2367 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yukun, Li Zhenhai, Shao Yongxin, Wang Zhisheng, Gao Wuping, Yang Xulian. 2008. Study on the Quaternary chronostratigraphic section in Tianjin area. *Seismology and Geology*, 30(2): 383~399 (in Chinese with English abstract).
- Dong Min, Qi Jiafu, Yang Qiao. 2012. Tectonic subsidence characteristics of Huanghua depression in Bohai Bay Basin in Cenozoic. *Chinese Journal of Geology*, 47(3): 752~755 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yuexia, Xiao Long, Zhou Haimin, Wang Chunzeng, Zheng Jianping, Zhang Ning, Xia Wenchen, Ma Qian, Du Jingxia, Zhao Zhongxin, Huang Hongxiang. 2010. The Tertiary evolution of the prolific Nanpu Sag of Bohai Bay Basin, China: Constraints from volcanic records and tectono-stratigraphic sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3/4): 609~626.
- Fan Shuxian, Zhai Zimei, Zhang Xuebin, Ji Yunping, Liu Linjing. 2010. Palaeovegetation and palaeoclimate since 4.00 Ma BP in northern Tianjin. *Journal of palaeogeography*, 12(6): 654~662 (in Chinese with English abstract).
- Fu Wenzhao, Yu Jifeng, Li Qing, Wang Dongdong, Yuan Xuexu, Wang Chongjing. 2017. Natural gamma ray spectrum and Magnetic susceptibility characteristics analysis of different sedimentary rocks. *Geological Review*, 63(6): 1451~1464 (in Chinese with English abstract).
- Gao Feng, Xu Qinmian, Yuan Guibang, Yang Jilong, Fan Youliang, Liu Wenda, Zhao Jianjun. 2017. Sedimentary environment evolution of borehole TZ02 in northern Bohai Bay during late Cenozoic. *Quaternary Sciences*, 37(3): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xiulin, Wang Qiang, Li Yude, DU Naiqiu, KONG Zhaochen. 1986. On correlations between transgressions and climatic phases since late Middle-Pleistocene based on data of drilling hole P8 in Tianjin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 6(1): 53~65 (in Chinese with English abstract).
- Geological and Mineral Bureau of Hebei province. 1989. *Regional Geological Annals of Hebei Province, Beijing and Tianjin*. Geological Publishing House, 590~616.
- Gu Xiaoyuan, Lu Qingyuan, Ye Siyuan, Zhao Guangming, Ding Xigui, Yuan Hongming, Yang Shixiong, He Lei, Wang Jin. 2016. Deltaic progradation and geo-environmental succession of coastal wetlands in the Yellow River Delta. *geological review*, 62(3): 682~692 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali. 2006. Discussion on seismogenic fault of the 1976 Tangshan earthquake. *Seismology and Geology*, 28(2): 312~318 (in Chinese with English abstract).
- Jin Yan, Zhang Xu, Xia Kaiqiong. 2002. The theory and study on logging Facies analysis. *Natural Gas Exploration & Development*, 25(2): 21~22 (in Chinese without English abstract).
- Li Suping, Li Jinfeng, Wu Zhengjie, Yao Jianxin. 2016. Climatic and environmental changes of the Lugu Lake Area during the late Holocene. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1998~2012 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuecong, Xu Qinghai, Yang Xiaolan, Chen Hui, Lv Xinmiao. 2005. Pollen-vegetation relationship and pollen preservation on the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Grana*, 44(2): 160~171.
- Ouyang Jian, Wang Guiwen, Wu Jiyu. 1999. *Logging Geologic Analysis and Quantitative Evaluation of Reservoir*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~306.
- Pei Yandong, Hus J, Tian Lizhu, Yang Jilong, Jiang Xingyu. 2016. Magnetostratigraphy of borehole CH500 on western coast of Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(4): 19~28 (in Chinese with English abstract).
- Petroleum Geology Compiling Group of Dagang Oil Field. 1993. *Petroleum Geology of China (Volume 4): Dagang Oil Field*. Beijing: Petroleum Industry Press, 32~49.
- Qin Xiaoguang, Yin Zhiqiang, Wang Meihua, Zhao Wuji, Mu Yan, Zhang Lei. 2017. Loess records of the Holocene climate change of Gonghe and Guide basins in the northeastern boundary of the Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 266~286 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yongpeng, Hou Xianhua, Zheng Mianping, Yang Zhenyu, Li Hongpu, Shi Linfeng. 2012. Magnetostratigraphy of Liang-ZK02 Borehole in Dalangtan, Qaidam Basin and Its Paleoenvironmental Significance. *Geological Review*, 58(3): 553~564 (in Chinese with English abstract).
- Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, Zhang Xuebin, Yang Zhenyu. 2009. Geochronological Study on Transgression Layers of the CQJ4 Borehole at Dagang area in Tianjin, China. *Geological Review*, 55(3): 375~384 (in Chinese with English abstract).
- Shi Linfeng, Zheng Mianping, Li Jinsuo, Wang Youde, Hou Xianhua, Ma Nina. 2010. Magnetostratigraphy of Liang ZK05 Borehole in Dalangtan, Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1631~1640.
- Tang Liangjie, Wan Guimei, Zhou Xinhua, Jin Wenzheng, Yu Yixin. 2008. Cenozoic Geotectonic Evolution of the Bohai Basin. *Geological Journal of China Universities*, 14(2): 191~198 (in Chinese with English abstract).
- Tianjin municipal Bureau of Geology and Mineral Resources. 1992. *Tianjin Regional Geology of Tianjin*. Beijing: Geological Publishing House, 116~154.
- Wang Hong, Fan Changfu, Li Jianfen, Li Fenglin, Yan Yuzhong, Wang Yunsheng, Zhang Jinqi, Zhang Yufa. 2006. Holocene oyster reefs on the northwest coast of Bohai bay, China. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(3): 315~331 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Li Congxian. 2009. The type of quaternary sequence in the east China coastal plain. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 39~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Li Fenglin. 1983. The changes of marine-continental conditions in the west coast of the Bohai Gulf during Quaternary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3(4): 83~89 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Tian Guoqiang. 1999. The neotectonic setting of late Quaternary transgressions on the eastern coastal plain of China. *Journal of Geomechanics*, 5(4): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Yuan Guibang, Zhang Shu, Liu Zengshou, Wang Weidong, Liu Zhijie, Zhuang Zhenye. 2007. Shelly ridge accumulation and sea-land interaction on the west coast of the Bohai Bay. *Quaternary Sciences*, 27(5): 775~786 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weiming. 1994. Paleofloristic and paleoclimatic implications of Neogene palynofloras in China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 82(3-4): 239~250.
- Wang Xianyu. 1983. Quaternary Paleo Climate evolution in Tianjin plain. *Journal of Hebei Institute of Geology*, (1): 65~72 (in Chinese without English abstract).
- Wen Xueze, Ma Shengli. 2006. Influence of the Tangshan earthquake

- on earthquake recurrence behavior of it's the adjacent fault segments. *Progress in Natural Science*, 16 (10): 1346~1350 (in Chinese without English abstract).
- Wu Fuli, Fang Xiaomin, Mark Herrmann, Volker Mosbrugger, Miao Yunfa. 2011. Extended drought in the interior of Central Asia since the Pliocene reconstructed from sporopollen records. *Global and Planetary Change*, 76(1-2): 16~21.
- Xu Jie, Zhou Bengang, Ji Fengju, Gao Xianglin, Lv Yuejun, Wang Mingming, Chen Guoguang. 2011. A primary study on the neotectonic pattern of the Bohai area in China. *Acta Petroli Sinica*, 32 (3): 442~449 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qinghai, Wu Chen, Meng Lingyao, Wang Zihui, Yang Xiaolan, Yao Zuju. 1994. Pollen assemblages from different geomorphic units in the North Plain, China. *Chinese Science Bulletin*, 39 (19): 1792~1795 (in Chinese without English abstract).
- Xu Qinghai, Li Yuecong, Yang Xiaolan, Chen Hui, Lv Xinmiao. 2005. A study of some typical pollen types taphonomy and relationships with vegetation in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau. *Advances in Earth Science*, 20(1): 89~98 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qinmian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, Qin Yafei. 2011. Stratigraphic Division of the Late Quaternary Strata along the Coast of Bohai Bay and Its Geology Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1352~1367.
- Xu Qinmian, Yuan Guibang, Yang Jilong, Xin Houtian, Yi Liang, Deng Chenglong. 2017. Plio-Pleistocene magnetostratigraphy of northern Bohai Bay and its implications for tectonic events since ca. 2.0 Ma. *Journal of Geodynamics*, 111: 1~14.
- Xu Qinmian, Yang Jilong, Hu Yunzhuang, Yuan Guibang, Deng Chenglong. 2018. Magnetostratigraphy of two deep boreholes in southwestern Bohai Bay: Tectonic implications and constraints on the ages of volcanic layers. *Quaternary Geochronology*, 43: 102~114.
- Yang Jilong, Qin Yafei, Xu Qinmian, Zhou Xinying, Hu Yunzhuang, Du Dong, Meng Lishan. 2015. Palaeovegetation Evolution Features of the Tianjin Coastal Region Since 7.65Ma BP. *Acta Geologica Sinica*, 89 (6): 1134~1143 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Guibang, Xu Qinmian, Wang Yan, Yang Jilong, Qin Yafei, Du Dong. 2014. Magnetostratigraphy and geology significance of BG10 norehole in northern coast of Bohai Bay. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 285~298 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Keqi, Wu Zhonghai, Lv Tongyan, Feng Hui. 2015. Review and progress of OSL dating. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 183~203 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ping, Miao Yunfa, Zhang Zhiyong, Lu Shengmei, Zhang Yanjie, Chen Huogen, Li Xiangqian, Miao Qiaoyin, Feng Wenli, Ou Jian, Gong Xulong, Jiang Bo, Li Wei. 2013. Late Cenozoic sporopollen records in the Yangtze River Delta, East China and implications for East Asian summer monsoon evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 388: 153~165.
- Zhao Linlin, Xu Qinmian, Yang Jilong, Yuan Guibang, Guo Jinjing. 2016. Sedimentary evolution of BG10 borehole in northern coast of Bohai Bay during Late Cenozoic. *Quaternary Sciences*, 36(1): 196~207 (in Chinese with English abstract).
- 董敏, 漆家福, 杨桥. 2012. 渤海湾盆地黄骅坳陷新生代沉降特征. *地质科学*, 47(3): 752~755.
- 范淑贤, 翟子梅, 张学斌, 吉云平, 刘林敬. 2010. 天津北部 4.00Ma BP 以来古植被与古气候. *古地理学报*, 12(6): 654~662.
- 付文钊, 余继峰, 李卿, 王东东, 袁学旭, 王崇敬. 2017. 不同沉积岩的初始伽玛能谱与磁化率响应特征. *地质论评*, 63(6): 1451~1464.
- 高峰, 胥勤勉, 袁桂邦, 杨吉龙, 范友良, 刘文达, 赵建军. 2017. 渤海湾北岸 TZ02 孔晚新生代沉积环境演化过程. *第四纪研究*, 37(3): 1~12.
- 高秀林, 王强, 李玉德, 杜乃秋, 孔昭宸. 1986. 从天津 P8 孔看中更新世末期以来海侵期、气候期对比问题. *海洋地质与第四纪地质*, 6(1): 53~65.
- 顾颂源, 鲁青原, 叶思源, 赵广明, 丁喜桂, 袁红明, 杨士雄, 何磊, 王锦. 2016. 黄河三角洲进积与滨海湿地地质环境演替模式. *地质评论*, 62(3): 682~692.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 590~616.
- 姜娃利. 2006. 有关 1976 年唐山地震发震断层的讨论. *地震地质*, 28(2): 312~318.
- 金燕, 张旭, 夏开琼. 2002. 测井沉积微相分析方法研究. *天然气勘探与开发*, 25(2): 21~22.
- 李素萍, 李金锋, 武振杰, 姚建新. 2016. 泸沽湖地区晚全新世气候和环境演变. *地质学报*, 90(8): 1998~2012.
- 欧阳健, 王贵文, 吴继余. 1999. 测井地质分析与油气藏定量评价. 北京: 石油工业出版社, 1~306.
- 裴艳东, Hus J, 田立柱, 杨吉龙, 姜兴钰. 2016. 渤海湾西岸 CH500 孔磁性地层年代研究. *海洋地质与第四纪地质*, 36(4): 19~28.
- 秦小光, 殷志强, 汪美华, 赵无忌, 穆燕, 张磊. 2017. 青藏高原东北缘共和-贵德盆地全新世气候变化. *地质学报*, 91(1): 266~286.
- 秦永鹏, 侯献华, 郑绵平, 杨振宇, 李洪普, 施林峰. 2012. 柴达木盆地大浪滩梁 ZK05 孔的磁性地层及其古环境研究. *地质论评*, 58(3): 553~564.
- 施林峰, 翟子梅, 王强, 张学斌, 杨振宇. 2009. 从天津 CQJ4 孔探讨中国东部海侵层的年代问题. *地质评论*, 55(3): 375~384.
- 施林峰, 郑绵平, 李金锁, 王有德, 侯献华, 马妮娜. 2010. 柴达木盆地大浪滩梁 ZK05 孔的磁性地层研究. *地质学报*, 84(11): 1631~1640.
- 汤良杰, 王桂梅, 周心怀, 金文正, 余一欣. 2008. 渤海盆地新生代构造演化特征. *高校地质学报*, 14(2): 191~198.
- 天津市地质矿产局. 1992. 天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 116~154.
- 王宏, 范昌福, 李建芬, 李凤林, 阎玉忠, 王云生, 张金起, 张玉发. 2006. 渤海湾西北岸全新世牡蛎礁研究概述. *地质通报*, 25(3): 315~331.
- 王强, 李从先. 2009. 中国东部沿海平原第四系层序类型. *海洋地质与第四纪地质*, 29(4): 39~51.
- 王强, 李凤林. 1983. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁. *海洋地质与第四纪地质*, 3(4): 83~89.
- 王强, 田国强. 1999. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景. *地质力学学报*, 5(4): 41~48.
- 王强, 袁桂邦, 张熟, 刘增寿, 王卫东, 刘志杰, 庄振业. 2007. 渤海湾西岸贝壳堤堆积与海陆相互作用. *第四纪研究*, 27(5): 775~786.
- 王宪瑜. 1983. 天津平原第四纪古气候演化初探. *河北地质学院学报*, (1): 65~72.
- 闻学泽, 马胜利. 2006. 唐山大地震对相邻断裂段地震复发的影响. *自然科学进展*, 16(10): 1346~1350.
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 高祥林, 吕悦军, 王明明, 陈国光. 2011. 渤海地区新构造格局. *石油学报*, 32(3): 442~449.
- 许清海, 吴忱, 孟令尧, 王子惠, 阳小兰, 姚祖驹. 1994. 华北平原不同地貌单元冲积物孢粉组合特征. *科学通报*, 39(19): 1792~1795.
- 许清海, 李月丛, 阳小兰, 陈辉, 吕新苗. 2005. 青藏高原东北部典型花粉类型埋藏特征及其与植被关系的研究. *地球科学进展*, 20(1): 89~98.

参 考 文 献

- 陈钢花, 王中文, 王湘文. 1996. 河流相沉积微相与测井相研究. *测井技术*, 20(5): 335~340.
- 陈莹璐, 黄春长, 张玉柱, 郭永强, 周亚利, 李喻琴, 庞奖励, 查小春, 石楠桐, 刘雯瑾. 2017. 汝河全新世古洪水沉积学与光释光测年研究. *地质学报*, 91(10): 2351~2367.
- 陈宇坤, 李振海, 邵永新, 王志胜, 高武平, 杨绪连. 2008. 天津地区第四纪年代地层剖面研究. *地震地质*, 30(2): 383~399.
- 大港油田石油地质编写组. 1993. 中国石油地质志(卷四): 大港油田分卷. 北京: 石油工业出版社, 32~49.

胥勤勉,袁桂邦,张金起,秦雅飞. 2011. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义. 地质学报, 85(8):1352~1367.

杨吉龙,秦雅飞,胥勤勉,周新鄂,胡云壮,杜东,孟利山. 2015. 7. 65 Ma BP以来天津滨海地区的植被演变特征. 地质学报, 89(6):1134~1143.

袁桂邦,胥勤勉,王艳,杨吉龙,秦雅飞,杜东. 2014. 渤海湾北岸 Bg10

孔磁性地层研究及其地质意义. 地质学报, 88(2):285~298.

张克旗,吴中海,吕同艳,冯卉等. 2015. 光释光测年法——综述及进展. 地质通报, 34(1):183~203.

赵琳琳,胥勤勉,杨吉龙,袁桂邦,郭进京. 2016. 渤海湾北岸 BG10 孔晚新生代沉积环境演化过程. 第四纪研究, 36(1):196~207.

Late cenozoic climate and sedimentary environment evolution of the northwestern coast of the Bohai Bay revealed by borehole QHJ01

HUANG Meng¹⁾, LI Mingchen¹⁾, FAN Hangyu¹⁾, ZHANG Xiaofei¹⁾, LI Jijun¹⁾, XU Qinmian^{*2)}

1) Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin, 300191;

2) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170

* Corresponding author: xuqinmian@163.com

Abstract

The northwestern coast of the Bohai Bay is the most active in the North China Plain. The study of Quaternary strata can provide the background data for regional seismic geology and hydrogeology. Based on the lithology, structure, and sporopollen analysis of sediments in QHJ01 hole, along with the results of paleomagnetic dating, the climate and sedimentary environment evolution process since 5.20 Ma was reconstructed. QHJ01 hole reveals that during the early stage of 5.20~3.33Ma, the vegetation type was mixed forest of broad leaved trees and some coniferous trees, suggesting a warm and wet climate. During the late stage of 5.20~3.33Ma, the vegetation type was mixed forest of coniferous trees and broad leaved trees, indicating a cool and dry climate with a sedimentary setting of lake. During the period of 3.33~2.12Ma, the vegetation type was dominated by desert steppe, with some areas being mixed steppe and broad leaved trees, suggesting a cool and wet climate and a sedimentary setting of meandering stream and floodplain, with the latter less affected by the former. 2.12~1.78Ma was the period of lake development in which vegetation type was mixed forest of coniferous trees and broad leaved trees, indicating a cool and wet climate. 1.78~0.90Ma witnessed a dry and cool climate and 0.90~0.13Ma a variable climate, during the periods the sedimentary environment was less affected by climate but controlled by regional tectonic subsidence. Since the period of 0.31 Ma, the climate fluctuated distinctly, getting warm with increasing of broad leaved contents. The early sedimentary environment was dominantly alternative development of lake, lake delta and floodplain, and the late environment was mainly marine delta. The sedimentary environment was affected distinctly by climate change and also controlled by regional tectonic subsidence since 0.13Ma.

Key words: northwest Bohai Bay; paleoclimate; paleovegetation; sedimentary environment; neotectonics