

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092901

渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应

杨士雄^{1,2}, 叶思源^{1,2}, 何磊¹, 袁红明¹, 赵广明^{1,2}, 丁喜桂¹, 裴绍峰^{1,2}, 路晶芳¹

1. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

摘要:通过对渤海湾西岸 BXZK11 孔沉积物黏土矿物、地球化学元素组分、粒度分析以及 AMS¹⁴C 年代测定并与研究区周边 6 个具有较好年龄控制的钻孔剖面对比, 结合黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值以及元素 Al/Si 和 Al/Na 比值对气候变化的响应, 探讨了渤海湾西岸地区全新世以来沉积环境以及气候变化过程。结果表明, 末次盛冰期到 8830 cal. aBP, 海平面快速上升, 海水临近研究区, 沉积物以黄河古河道沉积为主, 气候温凉略湿; 8830~6255 cal. aBP, 海侵范围达到最大, 研究区主要为潮坪-浅海环境, 气候温暖湿润; 6255~3650 cal. aBP, 海平面逐渐降低, 沉积环境为前三三角洲沉积, 沉积物为黄河三角洲的一期超级叶瓣, 气候转为温凉稍湿; 3650~2780 cal. aBP, 海平面趋于稳定, 三角洲不断进积, 为三角洲前缘环境, 气候向凉干方向变化; 2780 cal. aBP 至今, 古黄河三角洲不断进积, 该区变成三角洲平原环境, 气候凉干与现今相似。

关键词:黏土矿物; 地球化学; 沉积环境; 全新世; 渤海湾西岸

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

Geochemical and clay mineral characteristics of the Holocene sediments on the west coast of Bohai Bay and their implications for environmental and climatic changes

YANG Shixiong^{1,2}, YE Siyuan^{1,2}, HE Lei¹, YUAN Hongming¹, ZHAO Guangming^{1,2}, DING Xigui¹, PEI Shaofeng^{1,2}, LU Jingfang¹

1. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences of China Geological Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: Based on the data of clay mineralogy, element geochemistry, grain size and AMS¹⁴C dating from the core of BXZK11 collected from the west coast of Bohai Bay and the correlation made with six well dated core profiles surrounding the study area, in addition to the smectite/(illite+chlorite) ratio, Al/Si ratio and Al/Na ratio analysis results, the sedimentary environmental and climatic changes since the beginning of Holocene are discussed for the region in this paper. The results suggest that owing to the rapid sea level rising during the period from the Last Glacial Maximum to 8830 cal. aBP, the sea water was quite close to the study area, the sedimentary environment had been dominated by the paleo-channel of the Yellow River, and a cool and slightly humid climate. During the period of 8830 to 6255 cal. aBP when the transgression reached its peak, the study area had been dominated by tidal flat and shallow sea and a warm and humid climate. From 6255 cal. aBP to 3650 cal. aBP, as the sea level was gradually dropping, this area had been occupied by a prodelta deposit, as one of the super lobes of the Yellow River Delta, under a cool and slightly humid climate. In the period from 3650 to 2780 cal. aBP, the sea level had remained stable to keep the delta continuously prograding as a delta front, while the climate changed to cool and dry. Since 2780 cal. aBP, the ancient Yellow River Delta has been continuously expanding, and the study area become a wide deltaic plain and the climate is cool and dry, similar to that of the present.

Key words: clay minerals; geochemistry; sedimentary environment; Holocene; the west coast of Bohai Bay

海岸带-陆架区是海陆交互作用最为强烈和敏感的地区, 是大陆边缘“源”到“汇”系统中一个极其

重要的环境单元^[1]。海岸带沉积作为古环境变化记录的重要载体, 它不仅记录了过去的沉积环境变化,

资助项目:国家自然科学基金“基于现代孢粉传播机制探讨渤海中部泥质区全新世物质来源及陆缘植被变化”(41876057), “辽河三角洲海岸带全新世沉积演化时空差异的研究”(41706057); 中国地质调查局项目(DD20160144, DD20189503, DD20190208); 山东省泰山学者项目(ts201511077)

作者简介:杨士雄(1982—), 男, 博士, 副研究员, 从事第四纪地质与环境变化研究, E-mail: ysx_666@163.com

通讯作者:叶思源(1963—), 女, 研究员, 主要从事海洋地质、地球化学研究, E-mail: ysiyuan@mail.cgs.gov.cn

收稿日期:2020-09-29; **改回日期:**2020-12-08. 文凤英编辑

同时也揭露了气候波动、海洋与河流的变迁、生态环境演化,以及人类对环境的影响等诸多信息^[2-3],已经成为近年来地学研究热点之一。21 世纪以来,气候变暖导致的海平面上升及极端的自然灾害(例如洪涝、风暴或海啸)已严重威胁到近海区域的经济发展及人类活动。因此,深入开展海岸带-陆架地区的历史变化研究不仅是地球科学研究的需要,而且有助于沿海地区的开发与保护,有利于沿海地区经济和社会的可持续发展。

渤海西岸地处新生代以来持续下沉的华北沉降带,沉积了厚达 500 余米的第四纪沉积物^[4],全新世地层厚度为 10~32 m^[5],受全球性冰期-间冰期气候的影响,曾发生数次海进与海退^[6-9],并在海岸地貌和沉积地层中留下大量遗迹和记录,包括古海蚀崖、贝壳堤、牡蛎礁、海相层等^[10],为研究海侵历史、海岸环境演化和海平面变化提供了重要依据。近十多年来,该地区进行了大量关于地层与古环境演变研究^[7-9, 11-20],而针对全新世以来该区气候变化研究略显薄弱^[10, 21-22]。全新世以来的气候变化与现代人类面临的未来挑战密切相关。因此,开展该区全新世以来气候环境变化研究尤为必要。

陆源碎屑中的黏土矿物粒径细,搬运距离长,对物源变化具有良好的指示作用^[23]。其组合特征与物源区气候演变有着密切的关系^[24-30],已成为区域古气候和古海洋环境重建的有效工具^[31-33]。地球化学元素的分布、分配、聚集和迁移规律与源岩、沉积环境及气候条件关系紧密,沉积物元素地球化学研究,有助于正确提取古环境、古气候及物源变

化信息^[34-36]。尽管渤海湾泥质海岸带沉积地质过程已有大量研究成果^[18-20, 37-38],然而,仍缺乏通过精确定年、多指标、多钻孔综合对比全新世以来该区沉积环境过程的研究。因此,本文利用渤海西岸 BXZK11 孔沉积物,基于 AMS¹⁴C 年代结果,开展了沉积物粒度、黏土矿物、元素地球化学分析,结合沉积物中有孔虫数据^[39],阐述渤海西岸地区全新世以来沉积物特征及风化程度,并与区内多个钻孔进行对比,揭示全新世以来区域沉积演化过程对物源及气候变化的响应。

1 研究区概况

渤海湾位于渤海西部(图 1),与莱州湾、辽东湾并称渤海的三大海湾。湾口北起河北省大清河河口,南至山东半岛北岸的黄河口^[40]。渤海湾西岸平原地区为新生代一直处于沉降状态的华北沉降带,地势平坦,坡度仅为 1/30 000~1/20 000,是华北沿海一带地势最低平的地方^[41]。地表广泛地被第四纪滨海冲积、湖积或海积层覆盖,沉积物以黏土与粉砂为主,沿海岸呈带状分布^[42]。第四纪地层以河湖相沉积为主,夹有多个海相地层,最大厚度近 500 m^[43]。晚更新世以来,海平面发生多次升降变化和频繁的岸线迁移,渤海湾及相邻沿岸低地经历了 3 次大的海陆交替过程^[44]。自下而上普遍发育 3 套海相地层^[4, 6-7]。其中,第 I 海相层记录了距今约 1 万年以来的全新世海侵,地层保存完整,信息记录最为丰富^[45],为本研究的关注重点。

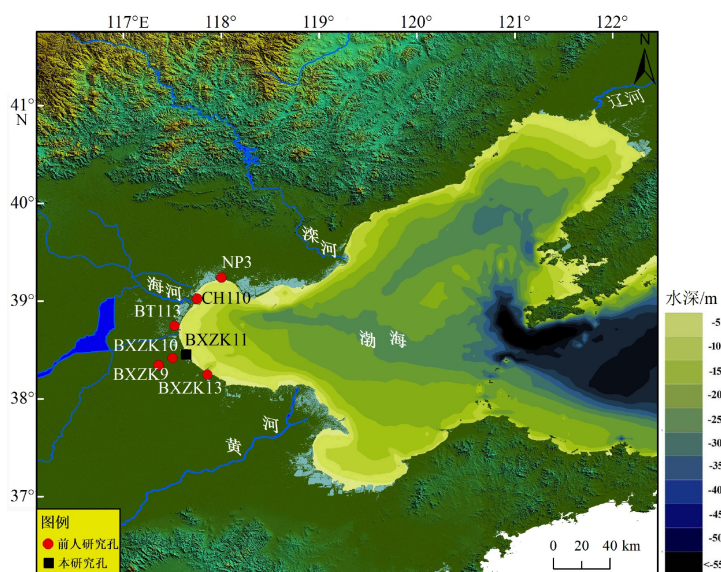


图 1 渤海湾西岸 BXZK11 孔和其他研究孔^[20, 38]位置图

Fig.1 The location of core BXZK11 and other studied cores in the west coast of Bohai Bay

渤海湾西岸平原入海河流主要为滦河、蓟运河、海河以及黄河等^[40]。区内属华北平原暖温带落叶阔叶林-草原植被区, 由于人类活动致使原始植被无存^[21]。该区冬冷夏热, 四季分明。1 月份气温最低, 平均气温为-2℃, 7 月份气温最高, 平均气温为 25℃, 年平均气温为 12℃, 年温差较大, 达 27℃^[40]。降水量呈现显著的季节性变化, 主要集中于 7 和 8 月份, 两个月份降水量达到全年降水量的 58%, 春季则少雨, 年平均降水量为 500~600 mm^[40]。

2 材料和方法

钻孔 BXZK11(38°27'29.39"N、117°38'16.53"E, 高程 2.67 m)(图 1)于 2016 年 7 月在渤海西岸的黄骅市南排河镇赵家堡附近使用钻孔机械回旋取芯方法获取。钻孔共 30.76 m 长, 取芯率为 88.7%。钻

孔上部 3.4 m 为人工填土, 下部主要为自然沉积, 全新世沉积物主要以黏土质粉砂为主, 具体岩性变化特征如图 2。

BXZK11 孔 9 个测年样品均采自岩芯中保存较完整且磨损程度较低的贝壳和少部分泥炭或植物根茎碎屑, 对样品进行 AMS ¹⁴C 测年。贝壳化石一般是先鉴定再进行测年, 年代测试在美国迈阿密 Beta 实验室完成。渤海湾地区区域海洋碳库效应校正值为 ΔR=-178±50a^[46], 选择 CALIB 7.0.2 软件进行年代校正^[47], 详细年代信息见表 1。年代模式主要通过两个 AMS ¹⁴C 年龄之间的线性差值以及向外延伸方法获得, 年代深度模型通过 R 软件生成(图 3)。

粒度样品以 10 cm 间距取样, 总共获取 237 个粒度样品。粒度分析采用常规处理方法, 用 10% 的 H₂O₂ 去除有机质, 处理后的样品用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定, 粒

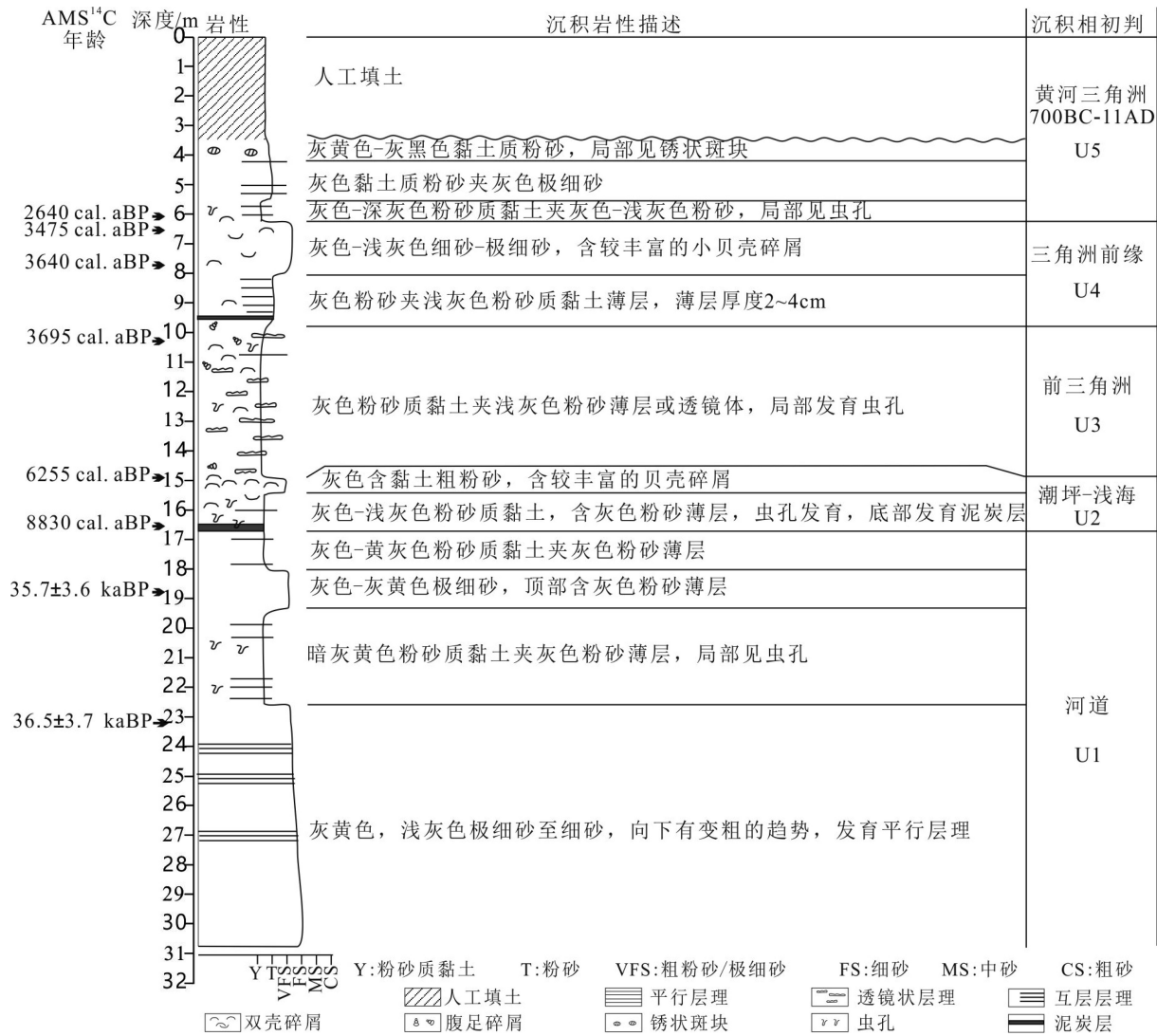


图 2 BXZK11 钻孔岩性描述、AMS¹⁴C 测年与沉积相划分
Fig.2 Lithology description, AMS¹⁴C dates and sedimentary facies division of core BXZK11

表 1 BXZK11 孔 ¹⁴C 年代测试数据
Table 1 AMS ¹⁴C dating of core BXZK11

样品编号	实验室编号	深度/m	材料	δ ¹³ C/‰	惯用年龄/aBP	校正年龄/cal. aBP	
						中值	范围 (1σ)
BXZK11S1	462377	6.1	<i>Potamocorbula laevis</i>	-2	2700±30	2640	2568~2730
BXZK11S5	485924	6.58	<i>Potamocorbula ustulata</i>	-1.5	3400±30	3475	3400~3543
BXZK11S6	485925	7.76	<i>Estellarca olivacea</i>	-1.7	3540±30	3640	3555~3716
BXZK11S4	470414	10.3	<i>Nassarius</i> sp.	-2.5	3580±30	3695	3609~3776
BXZK11S2	462378	14.95	<i>Anomia</i> sp.	0.7	5660±30	6255	6190~6306
BXZK11S3	462379	16.6	植物碎屑	-27.9	7950±30	8830	8717~8975

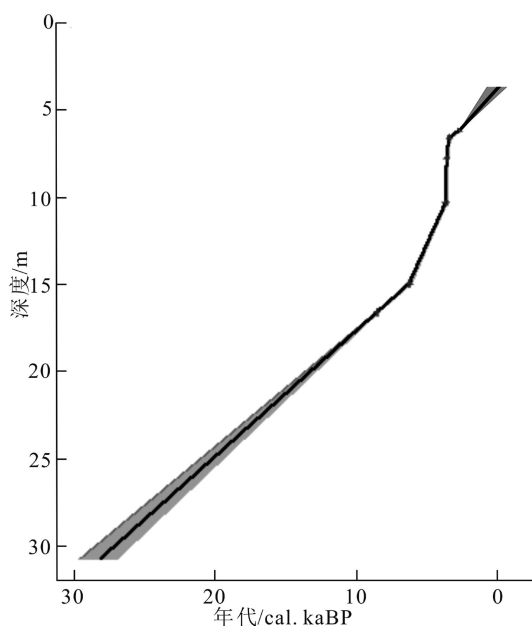


图 3 BXZK11 孔年代-深度模型
Fig.3 Age-depth model of core BXZK11

级分辨率为 0.01Φ, 仪器测量范围为 0.02~2 000 μm, 重复测量相对误差 <1%。沉积物粒度数据采用尤登-温德华氏等比值粒级标准, 将粒径大小归纳为三类, 由粗到细分别为砂 (63~2 000 μm)、粉砂 (4~63 μm)、黏土 (<4 μm)。采用谢帕德 (Shepard) 沉积物三角分类法对沉积物进行分类和命名^[48]。粒度分析测试在中国地质调查局青岛海洋地质研究所测试中心完成。

常量元素以 20 cm 间距取样, 共分析样品 107 个。常量元素分析由青岛海洋地质研究所测试中心完成, 对不同指标采用不同的分析测试方法。Al₂O₃、TF₂O₃、CaO、K₂O、Na₂O、MgO、TiO₂、P₂O₅ 和 MnO 等质量分数的测定方法为: 采用熔片法将试样用混合熔剂熔融, 以硝酸铵为氧化剂, 加少量溴化锂作为脱模剂, 试样与熔剂的质量比为

1:12; 在熔样机上于 1050 ℃ 熔融, 制成玻璃样片, 用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 进行测定。用硅氟酸钾容量法测定 SiO₂; 容量法 (VOL) 测定 FeO。CaCO₃ 质量分数的测定方法为: 将试样加 8% 的乙酸溶液; 在沸水浴上加热 40 分钟后, 取滤液用等离子体发射光谱法 (ICP-OES) 测定^[49]。

黏土矿物样品以 20 cm 间距取样, 本次共分析样品 102 个。黏土矿物 XRD 测试在青岛海洋地质研究所测试中心完成, 测试仪器为 D/Max-2500 型 X 射线衍射仪, CuK α 辐射, 管压 40 kV, 管流 125 mA。取 10 g 左右样品, 先后用体积含量为 30% 的 H₂O₂ 和 1 mol/L 的 HCl 反应去除有机质和钙质, 加去离子水清洗两次, 使样品有抗絮凝作用。根据 Stoke 原理所确定的沉淀时间^[27], 抽取上部小于 2 μm 的悬浮液, 离心浓缩, 分别制成自然定向片和乙二醇饱和定向片, 使用 X 射线仪进行测试分析。黏土矿物的鉴定和解释主要依据 3 种测试条件下获得的 XRD 叠加图谱的综合对比^[50]。每个波峰参数的半定量计算使用 MacDiff 软件在乙二醇曲线上进行, 黏土矿物相对含量主要为 (001) 晶面衍射峰的面积比。其中, 蒙脱石和伊利石相对含量分别用 17Å 衍射峰面积×1 和 10Å 衍射峰面积×4 表示; 高岭石和绿泥石相对含量之和为 7Å 峰强的面积×2, 再利用 3.57Å 和 3.54Å 峰面积的比值即可换算出样品中高岭石和绿泥石的相对含量^[51]。

3 结果

从沉积物粒度组成与平均粒径分布特征 (图 4) 可以看出, 沉积物样品由砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂质黏土组成, 平均粒径为 2.4~8.3Φ, 平均值为 5.6Φ。黏土矿物以伊利石为主, 其相对百分含量为 50.7%~62.7%, 平均为 56.4%; 其次为绿泥石, 含量为 18.5%~

32.6%, 平均为 24.3%; 再次为高岭石, 含量为 11.4%~20.1%, 平均为 15.1%; 蒙脱石含量最低, 含量为 0.9%~9.4%, 平均为 4.2%。黏土矿物组合形式为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石。常量元素主要以 SiO₂ 为主, 其次为 Al₂O₃、CaO、TF₂O₃、Na₂O、MgO、K₂O、TiO₂、MnO 和 P₂O₅(图 5)。微量元素主要为 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、As、La、Ce、Pr、Nd、Sm 等(图 6)。根据岩性变化特征, 将该钻孔剖面划分为 5 个沉积单元。

U1(30.76~16.7 m): 沉积物主要为浅灰色砂质粉砂和灰色粉砂质砂。该阶段两个 AMS¹⁴C 都超出了 AMS 测年范围, 可能是由于沉积物主要通过河流搬运而来导致年代较老。通过上部年代模式可推测该阶段年龄可能为末次盛冰期到早全新世过渡期。沉积物粒度自下而上由粗变细。沉积物中伊利石、高岭石与蒙脱石含量呈现逐渐增加趋势, 而绿泥石含量则呈现降低趋势。常量元素 Al₂O₃、CaO、MgO、K₂O、TiO₂、P₂O₅、MgO 和 TF₂O₃ 自下

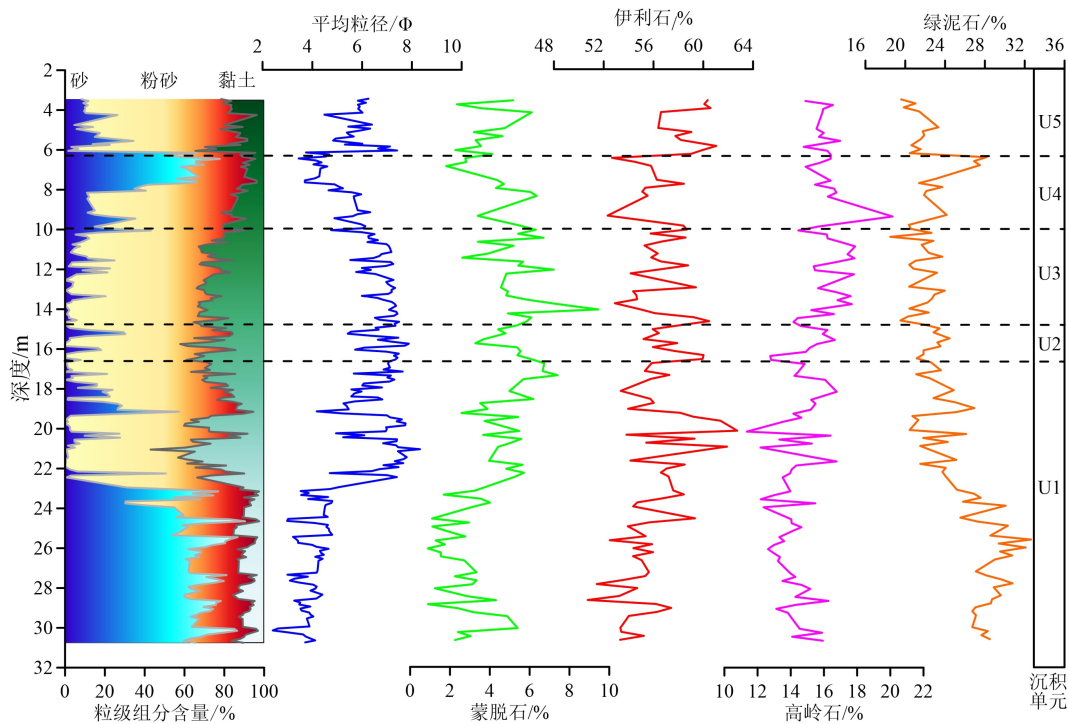


图 4 BXZK11 孔沉积物粒度组分与黏土矿物含量综合图

Fig.4 The vertical distribution of grain size composition and clay mineral content of core BXZK11

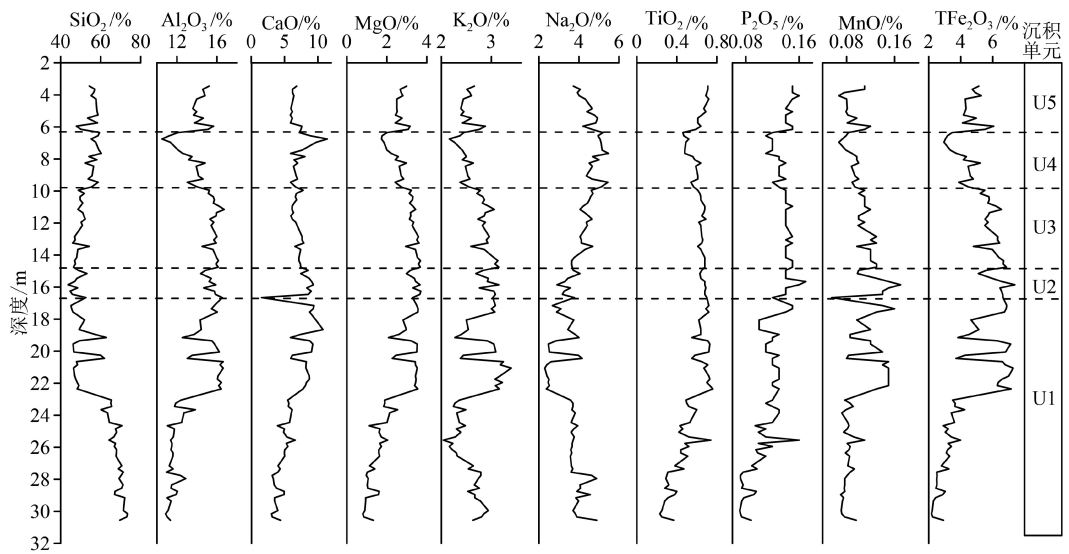


图 5 BXZK11 孔常量元素含量垂向分布

Fig.5 The vertical distribution of major elements in core BXZK11

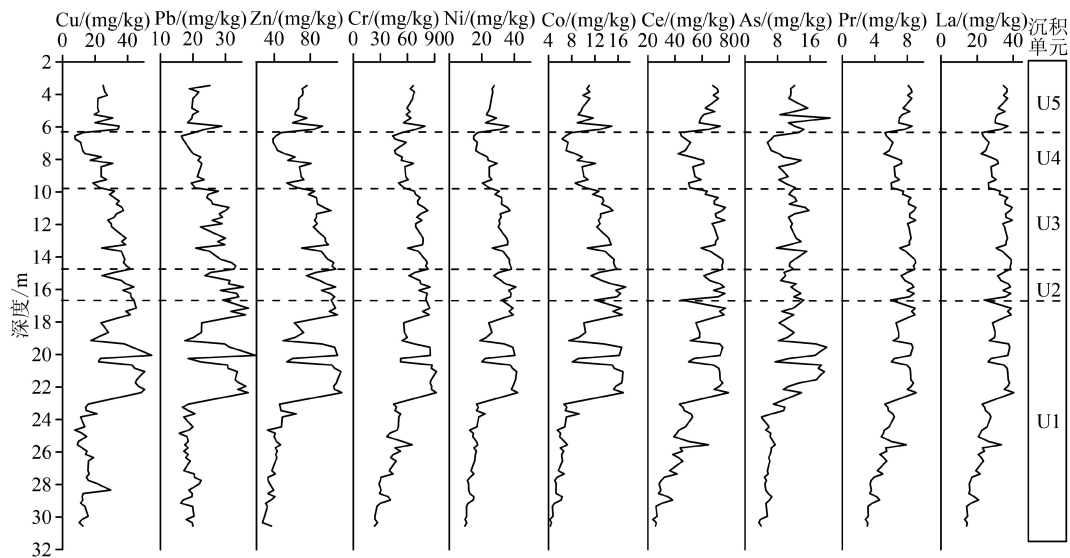


图6 BXZK11孔微量元素含量垂向分布

Fig.6 The vertical distribution of trace elements in core BXZK11

而上呈现出增加的趋势,而 SiO_2 和 Na_2O 含量变化则呈现相反趋势;微量元素总体含量呈现由低到高逐渐增长的规律。

U2(16.7~14.9 m): 沉积物主要以灰色—浅灰色粉砂质黏土为主,平均粒径为 6.8Φ 。16.6 m处植物碎屑和14.95 m处贝壳 AMS^{14}C 年龄分别为 7950 ± 30 cal. aBP和 5660 ± 30 cal. aBP。黏土矿物伊利石含量平均为57.4%,绿泥石含量为22.8%,高岭石含量为15%,蒙脱石含量为4.8%。常量元素 Al_2O_3 (15.4%)、 CaO (7.8%)、 MgO (3.4%)、 TiO_2 (0.7%)、 P_2O_5 (0.14%)和 TFe_2O_3 (6.3%)在整个剖面中含量相对较高; SiO_2 (48%)和 Na_2O (3.5%)在整个剖面中含量相对较低。微量元素Cu(37.8 mg/kg)、Pb(30 mg/kg)、Zn(96 mg/kg)、Cr(75 mg/kg)、Ni(34 mg/kg)、Co(14 mg/kg)、As(12 mg/kg)、La(34 mg/kg)、Ce(67 mg/kg)、Pr(8 mg/kg)、Nd(30 mg/kg)和Sm(5.5 mg/kg)等在整个剖面中含量相对较高。

U3(14.9~9.8 m): 沉积物主要以灰色粉砂质黏土为主,平均粒径为 6.7Φ ,与U2数值相当。10.3 m处贝壳 AMS^{14}C 年龄为 3580 ± 30 cal. aBP。黏土矿物伊利石含量平均为56.7%,绿泥石含量为21.6%,相对上阶段略有降低;而高岭石含量为16.3%,蒙脱石含量为5.5%,相对上阶段略有增加。常量元素 Al_2O_3 (15.7%)、 CaO (6.9%)、 MgO (3.4%)、 TiO_2 (0.65%)、 P_2O_5 (0.14%)和 TFe_2O_3 (6.0%)较上阶段略有降低或者变化不大; SiO_2 (49%)和 Na_2O (4.3%)呈现少量增加的趋势。微量元素Cu(34.3 mg/kg)、Pb(27.8 mg/kg)、Zn(92 mg/kg)、Cr(74 mg/kg)、Ni(33.3 mg/kg)、Co(13.7 mg/kg)和As(12 mg/kg)较

上阶段略有降低;而La(36 mg/kg)、Ce(70 mg/kg)、Pr(8.3 mg/kg)、Nd(31 mg/kg)和Sm(5.7 mg/kg)较上阶段略有增加。

U4(9.8~6.18 m): 沉积物仍以灰色粉砂质黏土为主,平均粒径为 4.9Φ ,沉积物粒度较上阶段略细。7.76 m处和6.58 m处贝壳 AMS^{14}C 年龄分别为 3540 ± 30 cal. aBP和 3400 ± 30 cal. aBP。黏土矿物伊利石含量(55.5%)较上阶段略有降低,而绿泥石(23.9%)、高岭石(16.5%)和蒙脱石(7.5%)含量较上阶段略有增加。常量元素 Al_2O_3 (12.9%)、 CaO (7.5%)、 MgO (2.3%)、 TiO_2 (0.5%)、 P_2O_5 (0.13%)和 TFe_2O_3 (4.0%)较上阶段含量较低; SiO_2 (56.8%)和 Na_2O (5.0%)较上阶段含量增加。微量元素Cu(18 mg/kg)、Pb(20 mg/kg)、Zn(57 mg/kg)、Cr(54 mg/kg)、Ni(21 mg/kg)、Co(9 mg/kg)、As(9 mg/kg)、La(27 mg/kg)、Ce(51 mg/kg)、Pr(6 mg/kg)、Nd(23 mg/kg)和Sm(4 mg/kg)较上阶段整体显著降低。

U5(6.18~3.4 m): 沉积物转变为以灰色—灰黄色粉砂质砂为主,平均粒径为 5.8Φ ,沉积物粒度较上阶段略有变粗。6.1 m处贝壳 AMS^{14}C 年代为 2700 ± 30 cal. aBP。黏土矿物伊利石含量(59%)较上阶段增加,而绿泥石(21%)、高岭石(15.8%)和蒙脱石(3.9%)含量较上阶段略有降低。常量元素 Al_2O_3 (14.5%)、 MgO (2.7%)、 TiO_2 (0.7%)、 P_2O_5 (0.15%)和 TFe_2O_3 (4.8%)含量较上阶段略有增加, CaO (6.4%)、 SiO_2 (55.5%)和 Na_2O (4.4%)含量较上阶段略有降低。微量元素Cu(26 mg/kg)、Pb(22 mg/kg)、Zn(72 mg/kg)、Cr(65 mg/kg)、Ni(27 mg/kg)、Co(11 mg/kg)、As(13 mg/kg)、La(34 mg/kg)、Ce(67 mg/kg)、Pr(8 mg/kg)、

Nd (30 mg/kg) 和 Sm (5.5 mg/kg) 较上阶段整体显著增加。

4 讨论

4.1 渤海湾西岸全新世沉积环境演化

全新世以来渤海湾西岸受海陆交互作用的影响,普遍经历了潮坪-浅海-前三三角洲-三角洲前缘-三角洲平原环境的演化过程^[52],但从北向南沿岸或者由陆向海方向各沉积环境的发育时间不尽相同。即使在同一时间内,渤海湾西岸沿现代岸线方向或者由陆向海方向的沉积环境表现出不同程度的差异。

末次盛冰期到 8830 cal. aBP(U1), 钻孔沉积物为粉砂到粉砂质黏土转变, 沉积物中未出现有孔虫。此时期渤海海水到达现代渤海中部地区, 但仍未达到钻孔区域^[53](图 7)。且黄河在 10.8~8.5 cal. kaBP 左右流经黄骅和海丰之间, 大致垂直现今海岸线向东北注入渤海湾^[20]。说明研究区可能为黄河古河道, 沉积环境可能为河道向冲积平原再向分流河道沉积转变^[20]。钻孔以北近岸的两个钻孔 NP3 和 BT113 沉积也记录与该钻孔相似的河道沉积环境^[52](图 8)。

8830~6255 cal. aBP(U2), 该阶段钻孔底部出现一层泥炭层沉积, 向上主要为灰色粉砂质黏土。沉积物中有孔虫的含量高, 大量贝壳碎屑出现。有孔虫主要以 *Ammonia tepida* 和 *A. beccarii* vars. 底栖有孔虫为主^[39]。在渤海湾西岸, 大量钻孔发现了全新世海侵期开始前有一个厚度不等的泥炭层出

现^[53]。这层泥炭层可能与冰后期海平面上升过程中存在较短停滞期, 并在渤海西岸形成大面积湖泊或者沼泽沉积^[54-55]。由于后期海平面快速上升, 导致钻孔沉积区快速转变为潮坪到浅海环境。与之相邻钻孔 BXZK09、BXZK10、BT113、CH110 和 NP3 沉积记录中也出现了相似沉积环境, 说明此时期海平面相对较高, 海水淹没陆地范围较广^[20, 38, 52-53](图 8)。

6255~3650 cal. aBP(U3), 沉积物仍以粉砂质黏土为主, 但黏土含量从底部向上部逐渐降低, 砂含量却呈现逐渐增加趋势, 与之相邻沿岸钻孔 NP3 和 BT113 沉积物也呈现类似趋势^[38, 52]。沉积物中有孔虫主要以 *Ammonia beccarii* vars.、*A. tepida* 和 *Nonion* sp. 为主^[39]。此时段海平面高度较上阶段降低, 海岸线向海方向逐渐退却^[53], 但钻孔位置仍为海水所淹没, 沉积环境主要为前三三角洲沉积。渤海西岸众多钻孔沉积环境研究表明, 钻孔位置此时期主要为黄河三角洲的一期超级叶瓣阶段, 时间大约为 5500~3600 cal. aBP^[20]。

3650~2780 cal. aBP(U4), 沉积物由下部砂质粉砂逐渐向上部粉砂质砂过渡, 且 SiO₂ 含量显著增加, 可能是粗粒级石英类矿物增加所致, 说明此时期沉积环境较上阶段已经改变。底部沉积物含少量有孔虫, 顶部有孔虫缺失^[39]。在垂直海岸带方向, 由海向陆的钻孔 BXZK09 和 BXZK10 沉积剖面缺失了本研究钻孔所记录的该层沉积, 为冲积平原环境^[20]。由于该钻孔距离现代海岸线较近, 此时期钻孔位置还处于 3000 cal. aBP 古海岸线内^[53], 海水仍覆盖钻孔区, 但由于三角洲的进积作用, 此时期钻孔位置水深较浅, 属于三角洲前缘环境。近岸钻

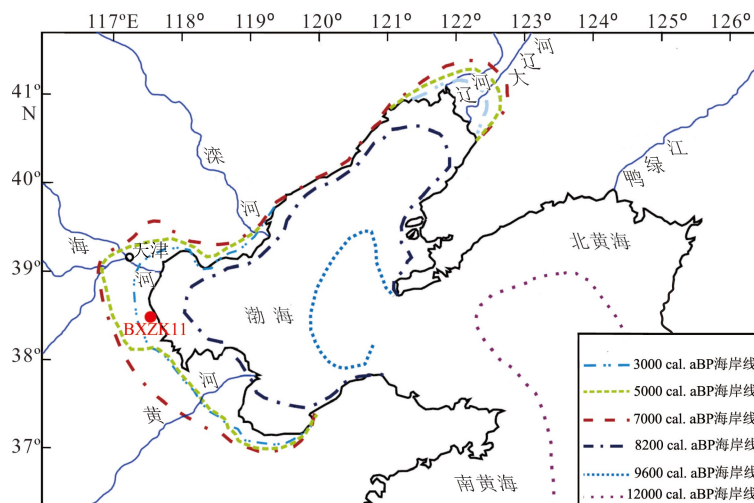


图 7 钻孔位置和北黄海与渤海海域 12000 cal. aBP 以来的海岸线变化^[53]

Fig.7 Location of core BXZK11 and coastline changes in the North Yellow Sea and the Bohai Sea since 12000 cal. aBP

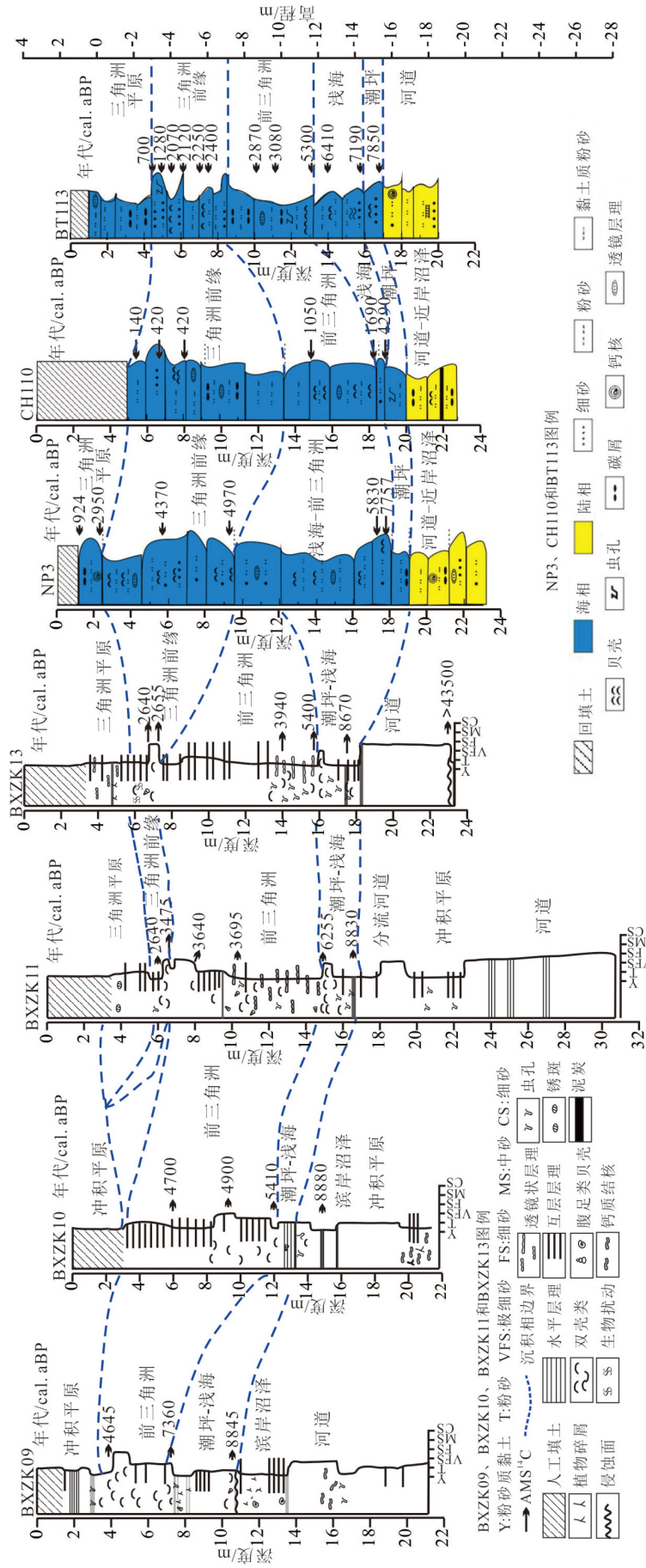


图 8 渤海湾西岸由陆向海以及沿海岸线分布钻孔剖面对比图

钻孔位置图见图 1^[20,43]。

Fig.8 Stratigraphic panel comparison of cores from land to sea and along the coastal shoreline in the west coast of Bohai Bay

The location of cores is shown in figure 1^[20,43].

孔 NP3 与 BT113 也清晰地记录了类似沉积环境变化^[38, 52]。

2780 cal. aBP 至今(U5), 沉积物主要为棕色—浅黄棕色粉砂质黏土、黏土质粉砂和粉砂, 其间夹有灰色粉砂到细砂层, 并发现虫孔结构。3.8 m 处发现微红色锈斑, 表明此时期主要为三角洲平原沉积。与海岸线平行钻孔 BXZK13、NP3 和 BT113 也清晰记录了类似沉积环境特征^[20, 38]。此时期海平面趋于稳定且与现在海平面位置接近, 由于黄河此时期由此入海, 三角洲进积导致该区海岸线向现代海方向推进^[53]。前人研究也证实了黄河三角洲超级叶瓣(700BC—11AD)在研究区的发育^[20]。

4.2 黏土矿物与地球化学揭示的气候特征

黏土矿物是母岩风化的产物, 其形成和转变受气候、环境和时间的控制^[54]。前人研究表明, 伊利石与绿泥石多分布于高纬地区及沙漠地区, 反映弱化学分化作用的干旱寒冷气候。在潮湿温暖的气候条件下, 母岩受强烈的化学风化与淋滤作用的影响, 形成大量的高岭石和蒙脱石^[55], 因此, 高岭石与蒙脱石组合指示强烈风化作用下的温湿气候^[56]。黏土矿物组合的变化反映了源区气候冷暖周期性旋回, 记录了搬运、再沉积等环境演化的重要信息, 为古环境再造、古季风变迁以及海陆对比提供了有力证据^[57]。此外, 前人利用 Al/Si 值来反映沉积物矿物成分成熟度^[58], 同时也利用其比值大小来指示气候冷暖变化以及化学风化程度的强弱, 比值越大, 气候越相对湿润, 化学风化程度越强; 比值越小, 气候越相对干冷, 化学风化程度越弱^[34, 59]。一般说来, 在化学风化过程中, Na 比 Al、K、Ba 活泼, 更易从母岩中迁移出来, 因此, Al/Na 的高值代表较强的化学风化, 其低值代表较弱的化学风化^[34]。本文主要通过蒙脱石/(伊利石+绿泥石)、Al/Si 和 Al/Na 比值来探讨该区全新世以来的气候变化。

末次盛冰期以来, 随着全球气温回暖, 海平面快速上升。至 8830 cal. aBP, 海平面上升到约 -15 m^[60], 海水即将到达钻孔区域。钻孔沉积物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值相对较高, Al/Si 和 Al/Na 比值也相对较高, 表明此时期气候相对暖湿。中国季风区孢粉湿润指数呈现逐渐增加趋势^[61], 石笋所反映的东亚夏季风也呈现出一个逐渐加强的过程^[62]。附近地区的四海龙湾玛珥湖年平均温度与年平均降水量相对低^[63]。河北地区孢粉记录显示全新世早期气候以温凉半干旱为主^[64]。这可能与北半球太阳辐射增强、热带辐合带北移, 促使东亚季风增强

有关^[65]。

8830~6255 cal. aBP, 黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值相对上阶段有所降低, 但仍相对较高。可能是由于海平面快速上升, 钻孔区水深较深, 距离岸线较远^[53], 陆源物质输入量减少所致。Al/Si 和 Al/Na 比值与上阶段含量相当, 气候相对暖湿。此时期海侵达到最大范围^[53], 孢粉湿润指数达到整个剖面最高^[61], 附近四海龙湾年平均温度也达到了最高值^[63], 表明此时期气候最为暖湿, 进入全新世大暖期^[66]。华北地区其他研究也显示了该时段降水较多^[67-68]。渤海湾西岸孢粉分析表明此时期主要为以松属、栎属和桦木属为主的落叶阔叶混交林以及混交林-草原植被^[22], 气温较现在略高 2~3 °C^[66]。

6255~3650 cal. aBP, 黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值与上阶段相当, Al/Si 和 Al/Na 比值较上阶段整体呈下降趋势, 气候温凉。总体来说, 该时期水热条件仍较好, 气候总体温暖偏湿, 但温度和湿度有所下降。渤海西岸海岸线也逐渐向当代海岸线方向收缩, 该区海侵范围变小^[53], 海平面由最高海平面下降至现今高度^[60]。此时期东亚夏季风逐渐减弱^[62], 受东亚气候驱动的四海龙湾地区气温也呈现降低的特点^[63]。白洋淀和岱海地区沉积记录也揭示了温湿的气候特征^[67-68]。

3650 cal. aBP 至今, 沉积环境由三角洲前缘向三角洲平原转变, Al/Si 和 Al/Na 比值总体相对较低, 蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值也相对较低。此时期东亚季风较弱^[62], 季风区孢粉湿润指数也呈现低值^[61], 气候温凉偏干。邻近地区四海龙湾玛珥湖也记录了低的年平均气温和降水量^[63]。海平面稳定, 但黄河三角洲向海进积导致渤海湾海岸线向海方向推进^[53], 到达现今位置。气温与现今接近。

从整个钻孔沉积剖面气候替代性指标分析我们可以得出(图 9), 元素 Al/Si 和 Al/Na 比值与董哥洞石笋氧同位素曲线变化有很好的对应性。Al/Si 和 Al/Na 比值越大, 气候相对暖湿^[34], 由此说明该区气候环境变化与东亚季风变化密切相关。东亚季风强盛, 降雨丰沛, 气候相对湿热。

5 结论

(1) 研究区沉积物黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值以及元素 Al/Si 和 Al/Na 比值对气候变化有较好的响应。其中元素 Al/Si 和 Al/Na 比值与石笋氧同位素曲线有很好的对应性, 说明该区气候环境变化与东亚季风变化密切相关。

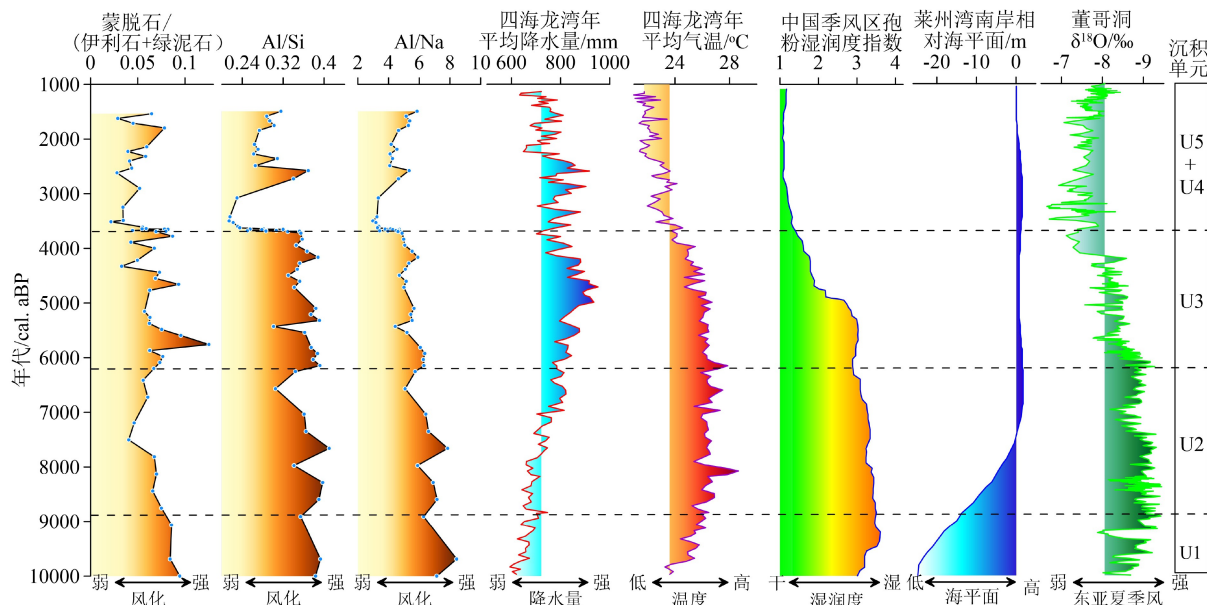


图9 BXZK11孔黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)、元素Al/Si和Al/Na比值与四海龙湾玛珥湖年平均降水量和年平均温度^[63]、中国季风区孢粉重建湿润度指数^[61]、莱州湾南岸相对海平面^[60]和董哥洞石笋氧同位素^[62]对比

Fig.9 Correlation of the ratio value of smectite/(ilulite+chlorite) of clay mineral, elements Al/Si and Al/Na from core BXZK11, the mean temperature of the warmest month and the mean annual precipitation of Shihailongwan Maar Lake, the pollen-based moisture index in monsoonal China, the relative sea level of the southern coast of Laizhou Bay, and the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ data from Nuanhe Cave

(2)自末次盛冰期到8830 cal.aBP,沉积物主要为粉砂和粉砂质黏土,沉积物中未出现有孔虫,黏土矿物蒙脱石/(伊利石+绿泥石)以及元素Al/Si和Al/Na比值相对较高,沉积环境主要为黄河的古河道沉积,气候温凉。8830~6255 cal.aBP,沉积物主要由底部的典型泥炭层和灰色粉砂质黏土组成,Al/Si和Al/Na比值相对较高,气候温暖湿润。此时期海平面达到最大高度,海侵范围达到最大,沉积区主要为潮坪—浅海环境。6255~3650 cal.aBP,海平面逐渐降低,沉积物仍以粉砂质黏土为主,蒙脱石/(伊利石+绿泥石)值相对较高,元素Al/Si和Al/Na比值较上阶段降低,沉积环境主要为前三三角洲沉积,气候转为温凉。3650~2780 cal.aBP,沉积物由下部粉砂质砂向上部的砂质粉砂转变,蒙脱石/(伊利石+绿泥石)以及元素Al/Si和Al/Na比值较低,气候温凉,海平面逐渐降低,为三角洲前缘沉积环境。2780 cal.aBP至今,古黄河三角洲不断进积,该区变成三角洲平原环境,气候凉干,与现今相似。

参考文献 (References)

- [1] Driscoll N W, Nittrouer C. Source to sink studies [J]. *Margins*, 2002, 11: 1-14.
- [2] Berglund B E. Human impact and climate changes-synchronous events and a causal link? [J]. *Quaternary International*, 2003, 105 (1): 7-12.
- [3] Dobrzańska H, Jerem E, Kalicki T. The Geoarchaeology of River Valleys [M]. Budapest: Archaeolingua, 2004: 1-216.
- [4] 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. [WANG Qiang, LI Fenglin. The changes of marine-cotinental conditions in the west coast of the Bohai Gulf during Quaternary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, 3 (4): 83-89.]
- [5] 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 73-139. [CHENG Guodong, XUE Chunting. *Sediment Geology of Huanghe River Delta* [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1997: 73-139.]
- [6] 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义 [J]. *地质学报*, 2011, 85 (8): 1352-1367. [XU Qinqian, YUAN Guibang, ZHANG Jinqi, et al. Stratigraphic division of the late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85 (8): 1352-1367.]
- [7] 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. [YAN Yuzhong, WANG Hong, LI Fenglin, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by Borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (3): 357-382.]
- [8] 陈永胜, 王宏, 裴艳东, 等. 渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42 (3): 747-759. [CHEN Yongsheng, WANG Hong, PEI Yandong, et al. Division and its geological significance of the late quaternary marine sedimentary beds in the west coast of Bohai Bay, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42 (3): 747-759.]
- [9] 陈永胜, 王宏, 李建芬, 等. 渤海湾西岸BT113孔35 ka以来的沉积环

- 境演化与海陆作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S1): 205-216. [CHEN Yongsheng, WANG Hong, LI Jianfen, et al. Sedimentary environment since 35 ka and terrestrial-marine interaction revealed by borehole BT113 in the western coast of Bohai Bay, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(S1): 205-216.]
- [10] 王宏, 陈永胜, 田立柱, 等. 渤海湾全新世贝壳堤与牡蛎礁: 古气候与海面变化[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1405-1411. [WANG Hong, CHEN Yongsheng, TIAN Lizhu, et al. Holocene cheniers and oyster reefs in Bohai Bay: palaeoclimate and sea level changes [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9): 1405-1411.]
- [11] 李凤林, 王宏, 阎玉忠, 等. 渤海湾西岸滨海平原晚第四纪以来的沉积间断[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 177-183. [LI Fenglin, WANG Hong, YAN Yuzhong, et al. The significance of the depositional hiatuses on the coastal plain of west Bohai Bay since the late Quaternary period [J]. Geological Survey and Research, 2004, 27(3): 177-183.]
- [12] 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. [LI Jianfen, WANG Hong, LI Fenglin, et al. Holocene geo-environmental changes at the Xingtuo section in the central part of the Oyster Reef plain, Bohai Bay [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(2): 169-176.]
- [13] 范昌福, 李建芬, 王宏, 等. 渤海湾西北岸大吴庄牡蛎礁测年与古环境变化[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(2): 124-129. [FAN Changfu, LI Jianfeng, WANG Hong, et al. Age and paleoenvironmental change of Dawuzhuang Oyster Reef on the northwest coast of Bohai Bay [J]. Geological Survey and Research, 2005, 28(2): 124-129.]
- [14] 范昌福, 王宏, 裴艳东, 等. 渤海湾西北岸滨海湖埋藏牡蛎礁古生态环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 33-41. [FAN Changfu, WANG Hong, PEI Yandong, et al. Palaeoecological environment revealed by the buried Binhaihu Oyster Reef on the northwest coast of Bohai Bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(1): 33-41.]
- [15] 商志文, 范昌福, 李冬玲, 等. 硅藻组合指示的渤海湾西北岸两个牡蛎礁体生长环境的差异[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(5): 33-39. [SHANG Zhiwen, FAN Changfu, LI Dongling, et al. Revealing paleo-environment difference of two oyster reefs by diatom assemblages in the northwest coast of Bohai Bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(5): 33-39.]
- [16] 商志文, 田立柱, 王宏, 等. 渤海湾西北部CH19孔全新统硅藻组合、年代学与古环境[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 675-681. [SHANG Zhiwen, TIAN Lizhu, WANG Hong, et al. Holocene diatom assemblages, chronology and palaeoenvironment of the borehole CH19 in the northwestern Bohai Bay, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(5): 675-681.]
- [17] Fan C F, Koeniger P, Wang H, et al. Ligamental increments of the mid-Holocene pacific oyster *Crassostrea gigas* are reliable independent proxies for seasonality in the western Bohai Sea, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 299(3-4): 437-448.
- [18] Xu Q M, Yang J L, Yuan G B, et al. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM [J]. Marine Geology, 2015, 367: 69-82.
- [19] Tian L Z, Chen Y P, Jiang X Y, et al. Post-glacial sequence and sedimentation in the western Bohai Sea, China, and its linkage to global sea-level changes [J]. Marine Geology, 2017, 388: 12-24.
- [20] He L, Xue C T, Ye S Y, et al. New evidence on the spatial-temporal distribution of superlobes in the Yellow River Delta Complex [J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 214: 117-138.
- [21] 张树山, 任振纪, 刘春源. 晚更新世以来渤海湾沿岸的海进海退及古气候环境[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 1996, 20(3): 96-102. [ZHANG Shushan, REN Zhenji, LIU Chunyuan. Transgression, regression and ancient climatic environment in the littoral of Bohai Sea since Pleistocene epoch [J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science, 1996, 20(3): 96-102.]
- [22] 李凤林, 阎玉忠, 商志文, 等. 渤海西岸全新世气候演化与海陆变迁[J]. 地质学刊, 2014, 38(2): 173-186. [LI Fenglin, YAN Yuzhong, SHANG Zhiwen, et al. Holocene climate evolution and land-sea changes on west Bohai Sea [J]. Journal of Geology, 2014, 38(2): 173-186.]
- [23] 王羽铭, 窦衍光, 李军, 等. 16 ka以来冲绳海槽中南部沉积物物源演化及其对古气候的响应[J]. 沉积学报, 2018, 36(6): 1157-1168. [WANG Yueming, DOU Yanguang, LI Jun, et al. Sediment provenance change and its response to paleoclimate change in the middle Okinawa Trough since 16 ka [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(6): 1157-1168.]
- [24] Singer A. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments-A review [J]. Earth-Science Review, 1984, 21(4): 251-293.
- [25] Chamley H. Clay Sedimentology[M]. New York: Springer-Verlag, 1989.
- [26] 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 50(11): 1674-1684. [LIU Zhifei, ZHAO Yulong, LI Jianru, et al. Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: implications for source analysis and East Asian monsoon evolution [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(11): 1674-1684.]
- [27] 刘志飞, COLIN C, TRENTSAUX A, 等. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的粘土矿物记录[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2005, 48(1): 84-92. [LIU Zhifei, COLIN C, TRENTSAUX A, et al. Clay mineral records of East Asian monsoon evolution during late Quaternary in the southern South China Sea [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(1): 84-92.]
- [28] Liu J G, Li T G, Xiang R, et al. Influence of the Kuroshio Current intrusion on Holocene environmental transformation in the South China Sea [J]. The Holocene, 2013, 23(6): 850-859.
- [29] Liu Z F, Wang H, Hantoro W S, et al. Climatic and tectonic controls on chemical weathering in tropical Southeast Asia (Malay Peninsula, Borneo, and Sumatra) [J]. Chemical Geology, 2012, 291: 1-12.
- [30] Zhang Q, Chen M H, Liu J G, et al. Clay mineral assemblages at IODP Site U1340 in the Bering Sea and their paleoclimatic significance [J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(5): 707-717.
- [31] Chamley H, Diester-Haass L. Upper Miocene to Pleistocene climates

- in northwest Africa deduced from terrigenous components of Site 397 sediments (DSDP Leg 47A). In: von Rad U, Ryan W B F. Et al. Initial Reports Deep Sea Drilling Project[M]. Washington D C: U. S. Government Printing Office, 1979, 47(1): 641-646.
- [32] Ehrmann W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139(3-4): 213-231.
- [33] Franke D, Ehrmann W. Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 286(1-2): 55-65.
- [34] Wei G J, Li X H, Liu Y, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2006, 21(4): PA4214.
- [35] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1695-1709.
- [36] Jiang H C, Guo G X, Cai X M, et al. Geochemical evidence of windblown origin of the Late Cenozoic lacustrine sediments in Beijing and implications for weathering and climate change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 446: 32-43.
- [37] 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. [WANG Qiang, YUAN Guibang, ZHANG Shu, et al. Shelly ridge accumulation and sea-land interaction on the West Coast of the Bohai bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 775-786.]
- [38] 陈永胜, 王福, 田立柱, 等. 渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J]. *地质通报*, 2014, 33(10): 1582-1590. [CHEN Yongsheng, WANG Fu, TIAN Lizhu, et al. Holocene sedimentation rates and their response to fluvial supply on the west coast of Bohai Bay [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(10): 1582-1590.]
- [39] Zhao G M, Ye S Y, He L, et al. Historical change of carbon burial in Late Quaternary sediments of the ancient Yellow River delta on the west coast of Bohai Bay, China [J]. *Catena*, 2020, 193: 104619.
- [40] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Department of Marine Geology, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. *Geology of Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [41] 方晶, 王福, 肖美美, 等. 岩芯EC、pH、泥分含量和有孔虫丰度对沉积环境的判读——以渤海湾西岸CZ61孔为例[J]. *第四纪研究*, 2018, 36(6): 1523-1526. [FANG Jing, WANG Fu, XIAO Meimei, et al. Analysis of paleoenvironment based on EC, pH, mud content and foraminifera numbers: Taking drilled core CZ61 collected from west coast of Bohai Bay as examples [J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 36(6): 1523-1526.]
- [42] 刘翀, 方晶, 王福, 等. 沉积物粘土混浊水电导率与pH值相关性研究: 以渤海湾西岸平原XZ、MD钻孔为例[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 319-325. [LIU Chong, FANG Jing, WANG Fu, et al. The correlation between electric conductivity and pH of the STICS-water: A case study of cores XZ and MD on the plain of west Bohai Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 319-325.]
- [43] Xue C T. Missing evidence for stepwise postglacial sea level rise and an approach to more precise determination of former sea levels on East China Sea Shelf [J]. *Marine Geology*, 2014, 348: 52-62.
- [44] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 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): 15-25. [ZHAO Songling, YANG Guangfu, CANG Shuxi, et al. On the marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the Gulf of Bohai [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1978, 9(1): 15-25.]
- [45] 李建芬, 商志文, 王福, 等. 渤海湾西岸全新世海面变化[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 243-264. [LI Jianfeng, SHANG Zhiwen, WANG Fu, et al. Holocene sea level change on the west coast of the Bohai Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 243-264.]
- [46] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian ocean and Southeast Asia [J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [47] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal 13 and Marine 13 radiocarbon age calibration curves 0-50, 000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1874.
- [48] 赵东波. 常用沉积物粒度分类命名方法探讨[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(8): 41-44, 46. [ZHAO Dongbo. Discussion on general methods of the grain-size classification and nomenclature of sediments [J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(8): 41-44, 46.]
- [49] 蓝先洪, 张志珣, 王中波, 等. 东海陆架晚更新世以来沉积物常量元素的分布及其地质意义[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(6): 1883-1891. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, WANG Zhongbo, et al. Content distributions and its geological implication of major elements in sediments from the continental shelf of the East China Sea during the late Pleistocene [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 1883-1891.]
- [50] Moore D M, Reynolds R C Jr. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997: 1-332.
- [51] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [52] 陈永胜, 李建芬, 王福, 等. 渤海湾西岸现代岸线钻孔记录的全新世沉积环境与相对海面变化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2016, 46(2): 499-517. [CHEN Yongsheng, LI Jianfen, WANG Fu, et al. Records of Holocene sedimentation environment and relative sea level by the boreholes collected along the present shoreline of the west coast of Bohai Bay, China [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2016, 46(2): 499-517.]
- [53] Xue C T, Qin Y C, Ye S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinoform off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 478-496.
- [54] 董红梅, 宋友桂. 黏土矿物在古环境重建中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 119-130. [DONG Hongmei, SONG Yougui. Clay mineralogy and its application to paleoenvironmental reconstruction [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 119-130.]

- [55] Rateev M A, Gorbunova Z N, Lisitzyn A P, et al. The distribution of clay minerals in the oceans [J]. *Sedimentology*, 1969, 13: 21-43.
- [56] 刘大为, 张可欣, 裴艳东, 等. 渤海湾西岸QG01钻孔沉积物黏土矿物分布及古气候替代指标研究[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(3): 28-36. [LIU Dawei, ZHANG Kexin, PEI Yandong, et al. The study of clay mineral assemblages and paleoclimatic proxies of borehole QG01 in the western coast of Bohai Bay, China [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(3): 28-36.]
- [57] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学风化特征及其与物源区气候环境的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336-346. [YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346.]
- [58] 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲DY03孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(2): 299-307. [HUANG Xiangtong, ZHENG Hongbo, YANG Shouye, et al. Investigation of sedimentary geochemistry of core DY03 in the Yangtze Delta: Implications to tracing provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 299-307.]
- [59] 钟巍, 李吉均, 方小敏, 等. 临夏盆地王家山剖面沉积物地球化学元素特征与季风演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(4): 55-62. [ZHONG Wei, LI Jijun, FANG Xiaomin, et al. Geochemical features of the sediment in Wangjiashan section in Linxia Basin and monsoon evolution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(4): 55-62.]
- [60] Liu Y X, Huang H J, Qi Y L, et al. Holocene coastal morphologies and shoreline reconstruction for the southwestern coast of the Bohai Sea, China [J]. *Quaternary Research*, 2016, 86(2): 114-161.
- [61] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Vegetation response to Holocene climate change in monsoon-influenced region of China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 97(1-4): 242-256.
- [62] Wang Y L, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [63] Stebich M, Rehfeld K, Schlütz F, et al. Holocene vegetation and climate dynamics of ne china based on the pollen record from Sihailongwan maar lake [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 124: 275-289.
- [64] 王绍武. 全新世大暖期[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 383-384. [WANG Shaowu. Megathermal [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(5): 383-384.]
- [65] 巩晓燕, 魏明建, 张玉华. 华北地区全新世气候时空变化特征研究述评[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 27(4): 73-78. [GONG Xiaoyan, WEI Mingjian, ZHANG Yuhua. General research on the spatio-temporal trait of climate change in North China in Holocene [J]. *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 27(4): 73-78.]
- [66] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. *中国科学 B 辑*, 1992, 22(12): 1300-1308. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. The climate fluctuations and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1992, 22(12): 1300-1308.]
- [67] 申改慧, 丁国强, 阳小兰, 等. 白洋淀地区全新世以来的气候环境变化[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(3): 756-768. [SHEN Gaihui, DING Guoqiang, YANG Xiaolan, et al. Holocene climate and environmental change in the Baiyangdian area [J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(3): 756-768.]
- [68] 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 孢粉资料定量重建全新世以来岱海盆地的古气候[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 99-108. [XU Qinghai, XIAO Jule, NAKAMURA T, et al. Quantitative reconstructed climatic changes of Daihai basin by pollen data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 99-108.]