

doi: 10.12029/gc20220513

陈皓, 何磊, 叶思源, 韩宗珠, 袁红明, Edward A. Laws. 2022. 渤海湾北部滦河三角洲晚更新世以来沉积环境划分及碳埋藏速率的评价[J]. 中国地质, 49(5): 1555–1570.

Chen Hao, He Lei, Ye Siyuan, Han Zongzhu, Yuan Hongming, Edward A.Laws. 2022. Differentiation of sedimentary environment and its carbon sequestration rate since the Late Pleistocene in the Luanhe River Delta, northern Bohai Bay[J]. Geology in China, 49(5): 1555–1570(in Chinese with English abstract).

渤海湾北部滦河三角洲晚更新世以来沉积环境划分及碳埋藏速率的评价

陈皓^{1,2}, 何磊², 叶思源^{2,3}, 韩宗珠¹, 袁红明², Edward A. Laws⁴

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003; 2. 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, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 4. 路易斯安那州立大学海岸与环境学院, 美国 巴吞鲁日 70803–4110)

摘要:【研究目的】开展渤海湾北部滦河三角洲晚更新世以来不同沉积环境的划分, 计算分析碳埋藏速率的大小和控制因素, 进一步评价区域碳储能力。【研究方法】本文对 BXZK03 孔岩芯开展晚更新世以来的古沉积环境恢复, 并取样分析了包括粒度、年代(AMS¹⁴C 和 OSL)、含水量、有机碳、总碳和其他营养成分等在内的测试指标。【研究结果】该孔晚更新世以来地层自下而上划分为泛滥平原、海滩沙脊、浅海、障壁沙坝(三角洲前缘)和潟湖的沉积环境单元, 各沉积单元平均有机碳埋藏速率大小依次为: 障壁沙坝 51.47 g/(m²·a) > 海滩沙脊 32.59 g/(m²·a) > 浅海 7.82 g/(m²·a) > 潟湖 4.66 g/(m²·a)。总碳、有机碳与各营养元素具有显著(P < 0.01)线性相关关系, 方差分析显示沉积速率和碳浓度分别是滦河三角洲碳埋藏速率的主要控制因素。【结论】滦河三角洲沉积物中有机碳浓度相对较低, 但是在全新世三角洲沉积速率较高, 使得有机碳埋藏速率也相对较高, 因此具有一定的碳储能力。

关键词: 有机碳; 碳储能力; 埋藏速率; 沉积环境; 气候变化; 滦河三角洲; 海洋与环境地质调查工程; 渤海湾; 天津; 河北

创新点: 揭示了滦河三角洲晚更新世以来沉积环境演化特征, 评估了不同沉积环境中碳埋藏速率。

中图分类号: P534.631; P343.5; P532 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)05–1555–16

Differentiation of sedimentary environment and its carbon sequestration rate since the Late Pleistocene in the Luanhe River Delta, northern Bohai Bay

CHEN Hao^{1,2}, HE Lei², YE Siyuan^{2,3}, HAN Zongzhu¹, YUAN Hongming², Edward A. Laws⁴

(1. School of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeology, China Geological Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China;

收稿日期: 2020–03–13; 改回日期: 2020–05–21

基金项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNL040003–3), 科技部政府间科技创新合作重点专项(2016YFE0109600), 中国地质调查局项目(DD20160144, DD20189503), 国家自然科学基金(41706057, 41876057)联合资助。

作者简介: 陈皓, 男, 1996年生, 硕士, 海洋地质专业; E-mail: chen hao1366@stu.ouc.edu.cn。

通讯作者: 叶思源, 女, 1963年生, 研究员, 主要从事海洋地质, 生物地球化学研究; E-mail: siyuanye@hotmail.com。

3. Qingdao National Laboratory of Marine Science and Technology, Laboratory of Marine Geological Process and Environmental Function, Qingdao 266061, Shandong, China; 4. School of coast and environment, Louisiana State University, Baton Rouge 70803-4110, USA)

Abstract: This paper is the result of marine and environmental geological survey engineering.

[Objective] Carry out the differentiation of the sedimentary environments since the Late Pleistocene in the Luanhe River Delta, northern Bohai Bay, calculate and analyze the magnitude and controlling factors of the carbon sequestration rate (CSR), and further evaluate the regional carbon storage capacity. **[Methods]** In this paper, the reconstruction of the paleo-sedimentary environment since the Late Pleistocene was carried out on the core of hole BXZK03, and the parameters including particle size, age ($AMS^{14}C$ and OSL), water content, organic carbon, total carbon and other nutrients contents were sampled and analyzed. **[Results]** Since the Late Pleistocene, the strata were divided from bottom to top into five sedimentary environmental units, including flood plain, sand ridge, shallow sea, barrier sand bar (delta front), and lagoon. The CSRs were in the order of barrier sand bar $51.47 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) >$ beach sand ridge $32.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) >$ shallow sea $7.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) >$ lagoon $4.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Correlation analysis showed that there was a significant ($P < 0.01$) linear correlation between total carbon, organic carbon and each nutrient element. Variance analysis suggested that CSRs were likely controlled by the deposition rate and carbon concentration, respectively. **[Conclusions]** Although the organic carbon concentrations of sediments in Luanhe River Delta were relatively low, there were relatively high organic CSRs due to an elevated deposition rate during Holocene. Therefore the Holocene sediment has a remarkable carbon storage capacity.

Key words: organic carbon; carbon storage capacity; burial rate; sedimentary environment; climate change; Luanhe River Delta; marine and environmental geological survey engineering; Bohai Bay; Tianjin; Hebei

Highlights: The characteristics of sedimentary environment evolutions in the Luanhe River Delta since late Pleistocene were revealed, and the rates of carbon sequestration in different sedimentary environments were evaluated.

About the first author: CHEN Hao, male, born in 1996, master, marine geology major; E-mail: chen hao1366@stu.ouc.edu.cn.

About the corresponding author: YE Siyuan, female, born in 1963, researcher, engaged in the study of marine geochemistry and carbon cycles; E-mail: siyuanye@hotmail.com.

Fund support: Supported by the Marine S & T Fund of Shandong Province for the Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (No. 2022QNL040003-3), the National Key R & D Program of China (No.2016YFE0109600), and the Projects of China Geological Survey (No.DD20160144, DD20189503), and National Natural Science Foundation of China (No.41706057, 41876057).

1 引 言

沉积物碳埋藏通量是碳循环研究的重要内容(范德江等, 2000; Brevik and Homburg, 2004; Smith, 2004; Duan et al., 2008; 丁喜桂等, 2014, 2016)。其中海岸带碳埋藏通量在全球海洋碳循环中占据着非常重要的地位, 全球海岸带大约可以为海洋贡献30%的初级生产力以及80%的有机碳埋藏通量(Smith et al., 1993; Muller-Karger et al., 2005)。海平面的上升和下降会导致海岸带形成有水和无水时期。在有水时期的滨浅海环境, 水体有机碳主要来源于河流沉积物中粉黏土矿物所携带的有机碳和滨浅海水生植物和浮游生物残体分解成的有机碳, 这些有机碳大部分会参与到水体的生物地球化

学过程中释放返回大气, 只有较少部分有机碳沉积下来(赵广明等, 2014)。在无水时期, 沉积的有机物质会被分解矿化, 并且释放到沉积物的孔隙水中, 只有少部分有机碳沉积埋藏下来(Ye et al., 2010, 2011)。因此, 地质历史沉积物碳埋藏通量的变化通常与沉积环境演变密切相关。

滦河三角洲是中国著名的海岸带三角洲之一。滦河携带大量泥沙自北向南从燕山山脉出山后, 在渤海湾北岸的平原快速沉积, 形成冲积扇—三角洲(高善明, 1985)。对该冲积扇—三角洲的研究大多集中在20世纪80年代, 主要涉及晚第四纪的沉积演化, 现代滦河三角洲的沉积特征和区域古气候演变等(高善明, 1981, 1985; 李从先等, 1982, 1983, 1984, 1985; 金小凤, 1984; Feng and Yang,

1998)。针对晚更新世以来的渤海湾北岸沉积环境和古气候的演化情况,缺乏足够精确的钻孔数据支撑(李元芳等,1982;袁桂邦等,2014;胥勤勉等,2014;赵琳琳等,2016;胡广元等,2017;黄猛等,2021;鲁庆伟等,2021),无法对该地区全新世以来的碳埋藏通量变化进行精确的评价。基于此,项目组2016年在滦河三角洲南堡地区布设的31.52 m全取芯钻孔,根据沉积学特征、粒度分析、主量元素测试结果,将揭示该区域晚更新世以来沉积环境演化特征,评估滦河三角洲晚更新世晚期以来不同沉积环境中碳埋藏速率。

2 研究区概况与方法

2.1 河流流域水文和气候特征

滦河发源于河北省丰宁县西北的巴彦图古尔山麓,流经内蒙古高原、燕山山区后进入平原,在河北省乐亭县入渤海,全长约888 km,流域面积44750 km²。其中山区面积为43940 km²,占总面积的98.2%;平原面积为810 km²,占总面积的1.8%(刘玉芬,2012),是中国东部较大入海河流中,山区面积占整个流域面积比例最大的(薛春汀,2016)。滦河冲积扇—三角洲和BXZK03钻孔位置如图1所示。

滦河流域地形差异较大,地形总趋势由西北向东南倾斜。按地质条件、地貌形态和成因类型等,可划分为坝上高原(海拔平均1300~1400 m)、燕山山地(海拔介于50~1800 m)、南部平原区(海拔50 m以下)三种地貌单元(刘玉芬,2012)。滦河流域为典型的温带、暖温带半湿润、半干旱大陆性季风气候。冬季气候寒冷干燥,夏季炎热多雨。流域上游年平均降雨量小于400 mm,中游在450~800 mm,下游平原区年平均降水量在600 mm左右(王日升和王绍武,2012)。

滦河水量丰富,泥沙含量较高。以滦河上游的潘家口水库蓄水为界(1979年),1929—1979年代表接近自然状态下的滦河年平均径流量 4.72×10^9 m³,输沙量 22.19×10^6 t,含沙量约4.7 kg/m³(郭文英和范成,1989)。其入海输沙量国内仅次于黄河、长江和珠江,入海的含沙量仅次于黄河。然而,滦河上游水库蓄水(1979年以后)以及引滦入津工程(1983年启用)之后滦河入海泥沙急剧下降,1980—2003年泥沙估算年平均输沙量仅 1.74×10^6 t,年平均径流

量约 1.17×10^9 m³(黎刚和殷勇,2010)。

滦河的泥沙主要来自中游燕山丘陵区,古老变质岩系、不同时代的火山岩和其他侵入岩体差异风化,加上自然植被稀少,导致水土流失严重,侵蚀模数高达1440 t/km²(高善明,1985)。另外流域气候导致滦河来水来沙主要集中在夏季,具有水沙猛涨猛落的特性。实测资料数据显示7—9月径流量占全年的68.4%,6—8月的来沙则占全年输沙总量的99.3%(姜太良等,1986)。

2.2 海洋水文

研究区域近岸潮汐性质比较复杂,自东北向西南发生有规律的变化:滦河口为混合潮,大清河口为不规则半日潮,至南堡和塘沽一侧为规则半日潮。潮差自东北向西南逐渐增长:滦河口平均潮差1.36 m,至南堡附近潮差1.51 m(大港油田地质研究所,1985)。整体而言,滦河属于弱潮汐河口(高善明,1981;大港油田地质研究所,1985;刘爱菊等,1986)。

研究区环流受北黄海暖流系统的影响。当该暖流系统进入渤海后,因地形的影响在现代滦河三角洲滨外分成两支,一支向左偏转进入渤海湾,一支向右偏转进入辽东湾。这两支海流对滦河三角洲近岸地带和滨外海域海滩的分布均有影响。滦河口以西涨海滩向西南,落海滩向东北,涨海滩表层流速通常大于落海滩,且滦河口(涨海滩速0.72~1.44 m/s)向南堡和曹妃甸方向(涨海滩速1.75~1.80 m/s)有逐渐加大的趋势(大港油田地质研究所,1985)。

滦河口位于渤海西侧,河口附近海域全年以风浪为主,涌浪极少,且具有明显的季节变化。春季(3—5月)常浪向为西南向,出现频率5月份达57%;夏季(6—8月)常浪向为东南向,出现频率7月份达33%;秋季(9—11月)常浪向为东北向,出现频率9月份达40%,强浪向为东北向与强风向一致。波高小于1.5 m的波出现频率和为97%(吴秀杰等,1986)。

2.3 样品采集

BXZK03孔位于唐山市滦南县南堡镇南堡二村,临近黄河大道及外侧潮滩,地理坐标:118°18'38.46"E,39°02'00.54"N。钻孔高程3.19 m,孔深31.52 m。钻孔采用单管回旋钻探取芯,取芯管直径90 mm,取

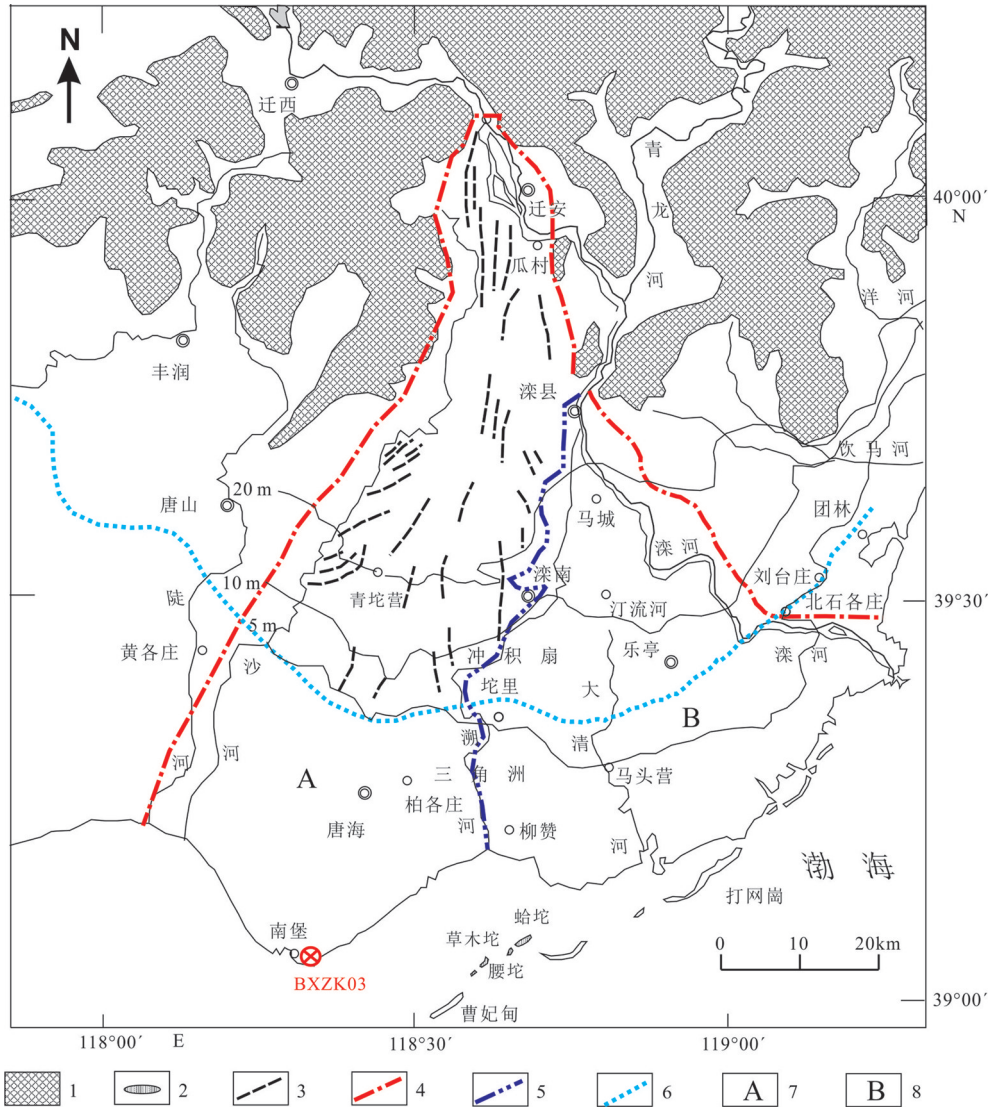


图1 滦河冲积扇—三角洲和BXZK03钻孔位置图(据薛春汀,2016)

1—山地、丘陵;2—贝壳堆积体;3—老冲积扇上的废弃河道;4—滦河冲积扇—三角洲边界;5—新、老滦河冲积扇—三角洲界限;6—全新世海侵边界;7—老滦河冲积扇—三角洲;8—新滦河冲积扇—三角洲

Fig.1 Location of Luanhe Fan-delta and core BXZK03 (modified from Xue Chunting, 2016)

1—Mountains and hills; 2—Shell accumulation; 3—Abandoned river channels on old alluvial fans; 4—Alluvial fan of Luanhe river-delta boundary; 5—Alluvial fan of the new and old Luanhe river-delta boundary; 6—Holocene transgression boundary; 7—Alluvial fan of the old Luanhe river-delta; 8—Alluvial fan of the new Luanhe river-delta

芯率 89.90%。在室内将岩芯剖开后,根据沉积物颜色、粒度组成和沉积物结构等特征,推测沉积相以及分样,钻孔沉积物分样过程对沉积物描述并照相及备份,同时对钻孔软体动物贝壳化石进行采集,洗净后进行鉴定及照相。样品分别用于原位密度、粒度分析、有孔虫鉴定、AMC¹⁴C 测年和 OSL 测年等。

2.4 样品处理与测试

沉积物样品共 104 件,平均采样间距 10~

40 cm。样品经过烘干、研磨和筛分步骤后,进行总碳(TC)、有机碳(C_{org})、总氮(TN)、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、S 元素和化合物组分含量的测定。样品的处理与测试由青岛斯八达分析测试有限公司完成。有机碳(C_{org})含量测定采用的是重铬酸钾氧化-还原容量法;总氮(N)含量测定采用的是凯氏定氮法;Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、S 的含量由电感耦合等离子体发射光谱法测定,通过元素分子量可以计算出元

素的量。

粒度分析样品共 131 件,平均采样间距 10~30 cm。样品由中国地质调查局海洋地质实验检测中心进行样品处理与分析。样品的前几个步骤分别为去除有机质,去除钙质胶结物以及洗盐。预处理完之后用英国马尔文(MALVERN)公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪进行测试。粒度参数计算方法采用 Folk and Ward (1957)的方法。

2.5 测年方法

测年采用光释光(OSL)以及 AMS¹⁴C 技术。其中对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样品进行 AMS¹⁴C 测年,获得 AMS¹⁴C 测年数据 4 个,该年龄测试在美国迈阿密 Beta 实验室完成,渤海湾地区校正值为 $\Delta R = -178 \pm 50$ a (Southon et al., 2002),校正版本为 CALIB 7.0.2 (Reimer et al., 2013)。OSL 测年广泛应用于第四纪沉积物年龄测定(郭良田等, 2013; 陈忠良等, 2022),其中在岩芯柱 2 个不同的深度处进行沉积物取样,每件样品由直径 3.5 cm、长 6 cm 的黑色圆筒胶卷盒密封、防震保存,获得 OSL 测年数据 2 个,该年龄测试在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。剂量率计算所需的 U 和 Th 的含量采用 Thermo X Series II 型等离子体质谱仪获得、K 的含量采用 IRIS Intrepid II XSP 型等离子体发射光谱仪检测,等效剂量通过 Daybreak 2200 型释光测量仪获得,实验激发光源为蓝光二极管($\lambda = 470 \pm 30$ nm),仪器的辐照源为(⁹⁰Sr/⁹⁰Y)β源。

2.6 数据处理

碳埋藏速率(AMAR)由碳含量(CC)、原位密度(BD)以及沉积速率(ASR)求得,具体的计算按照如下公式:

$$AMAR = CC \cdot ASR \cdot BD \cdot 10 \quad (1)$$

其中,碳埋藏速率单位为 $g/(m^2 \cdot a)$;碳含量单位为 mg/g ;沉积速率单位为 cm/a ;原位密度单位为 g/cm^3 。原位密度采用环刀法,其值=环刀内的干样重(g)/环刀体积(cm^3)。

分析数据的相关性使用 IBM SPSS Statistics 21 和 Excel 2013 软件,并且采用 Pearson 相关系数进行评价。图件采用 CorelDRAW、Grapher 等绘图软件完成。

3 结果

3.1 BXZK03 孔沉积环境分析、沉积速率计算

BXZK03 孔的测年数据如表 1 所示。该孔最新年龄为 695 cal a BP,位于孔深 5.24 m 处;最老年龄是 (22.2 ± 2.2) ka BP,位于孔深 28.4 m。关于 AMS¹⁴C 测年,完整的贝壳可能比不完整的贝壳的测年数据更为准确,因为不完整的贝壳极有可能是外来来源,在运移过程中容易被波浪作用和其他形式的湍流破坏(Xue, 2014)。在没有贝壳、有孔虫和植物碎片的情况下,笔者使用了 OSL 测年。如果两个测年原理不一样的方法得出相近的测年结果,说明测年结果可信度较高(张家富等, 2009)。参考 AMS¹⁴C 测年结果所计算出沉积速率, B3S-1、B3S-2、B3S-3 中 B3S-2 测年数据应该相对可靠。总之,笔者使用最可靠和最合理的测年数据。

根据钻孔岩芯、沉积特征及化石组合其层序从下往上可以划分为以下 6 个沉积单元(图 2):

U1 泛滥平原孔深 27.37~31.52 m,高程 -24.18~-28.33 m,厚度为 4.15 m,该段底部为灰色—灰黄色粉砂质黏土,局部夹灰色粉砂薄层,顶部为灰黑色粉砂和粉砂质黏土,富含有机质,发育虫孔。段内未见海相化石,所反映的沉积环境为低海平面时的陆相沉积阶段。本段沉积物平均粒径范围 5.77~8.41 Φ ,标准偏差 1.54~2.39 Φ ,粒度较细,分选性整体较差。未见底,与上覆地层为不整合接触关系。28.4 m 处沉积物(粉砂)的光释光测年结果 (22.2 ± 2.2) ka BP,综上推测该沉积单元为晚更新世古滦河的泛滥平原相。由于该段地层顶部有明显侵蚀界线,无法得知其被侵蚀的地层厚度和相应持续时间,暂无法计算该段的沉积速率。

U2 海滩沙脊孔深 25.30~27.37 m,高程 -22.11~-24.18 m,厚度为 2.07 m,该段整体为灰色—深灰色含黏土中细砂和贝壳碎屑层,贝壳碎屑含量较高可达 30%~50%,种类以牡蛎碎屑和幼体为主,含猫爪牡蛎 *Talonostrea talonostrea*,毛蚶 *Arca subcrenata*,不等蛤属 *Anomia* sp.,光滑蓝蛤 *Potamocorbula laevis*,三角卵凸蛤 *Pelecypora trigona*,丽小笔螺 *Mitrella bella*。本段沉积物平均粒径大小多在 1.74~4.54 Φ ,标准偏差 1.96~2.88 Φ ,粒度较粗,分选性整

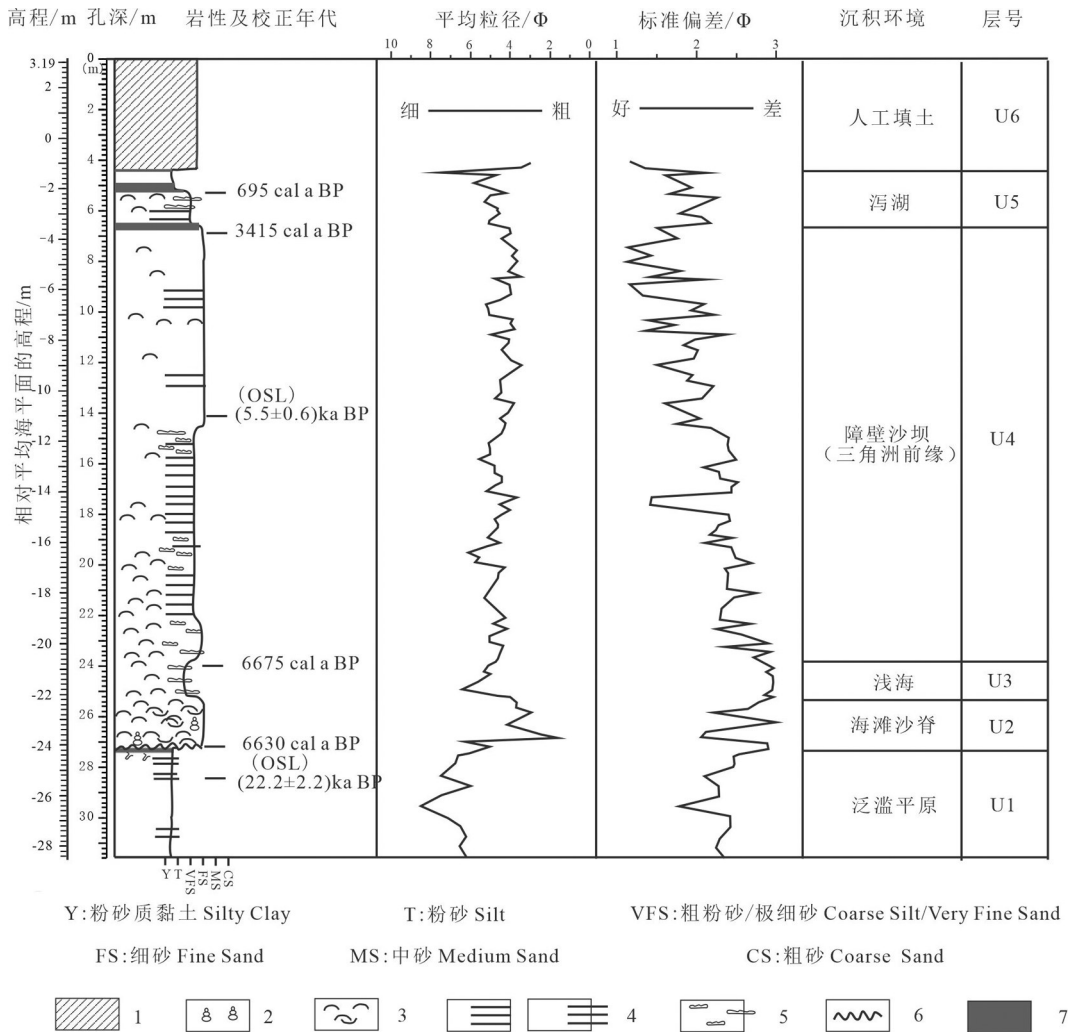


图2 滦河三角洲BXZK03孔沉积环境及形成年代

1—人工填土;2—腹足碎屑;3—双壳碎屑;4—互层层理;5—透镜状层理;6—侵蚀面;7—泥炭层

Fig.2 Depositional environment and age of sediment core BXZK03 from Luanhe River Delta

1—Manual soil filling; 2—Gastropod debris; 3—Bivalve debris; 4—Mutual layering; 5—Lenticular bedding; 6—Erosion surface; 7—Peat layer

体较差。与上覆为整合接触,和下伏地层为侵蚀接触关系。本段粒径较粗,且化石极其丰富,但多破碎且磨蚀严重,且为滨岸种属,推测该沉积单元为全新世早期的海滩沙脊相,通常发育在潮间带上部—潮上带位置,为波浪和潮汐(风暴潮)共同作用的产物,与下伏的陆相沉积为不整合接触。该段底AMS¹⁴C贝壳测年结果为6630 cal a BP,与上段孔深24.1 m的测试年龄6675 cal a BP类似,推测该风暴沉积段存在层位倒转。根据相邻钻孔NP05孔底部的测年数据(~8700 cal a BP),且该地区海平面约在8200 cal a BP之后快速上升(Xu et al., 2020),因此该段海滩沙脊相沉积时段约500 a,整体沉积速率为

(2737~2530)cm/(8700~8200)a=0.414 cm/a。

U3 浅海孔深 23.80~25.30 m, 高程 -20.61~-22.11 m, 厚度为 1.5 m, 该段整体为灰色粉砂质黏土, 含灰色细砂透镜体, 均匀分布较丰富的贝壳碎屑, 包括四角蛤蜊 *Maetra veneriformis*, 猫爪牡蛎 *Talonostrea talonostrea*, 不等蛤属 *Anomia* sp., 光滑蓝蛤 *Potamocorbula laevis*。沉积物平均粒径为 3.97~6.36 Φ , 标准偏差 2.62~2.84 Φ , 粒度较细, 分选性整体较差。该粒径相较于 U2 沉积单元变细, 表示该段海侵过后沉积环境水动力变弱, 推测该沉积单元为全新世早期的浅海相。与下伏地层和上覆地层均为整合接触关系。24.1 m 处的 AMS¹⁴C 贝壳

表1 BXZK03孔 AMS¹⁴C和 OSL 测年数据
Table 1 AMS¹⁴C and OSL data of core BXZK03

实验室编号	高程/m	测试手段	测试材料	$\delta^{13}\text{C}/(\text{per mil})$	保守年龄/(a BP)	校正年龄/(cal a BP)	
						中值/(a BP)	范围(1 σ)
BXZK03S1	-2.05	AMS ¹⁴ C	有机沉积物	-20.7	770±30	695	675~725
BXZK03S2	-3.66	AMS ¹⁴ C	植物材料	-27.6	3190±30	3415	3384~3446
BXZK03S3	-20.81	AMS ¹⁴ C	Talonostrea talonostrea (猫爪牡蛎)	0.4	6120±30	6675	6604~6751
BXZK03S4	-24.01	AMS ¹⁴ C	Talonostrea talonostrea (猫爪牡蛎)	-1.5	6050±30	6630	6544~6713
B3S-1	-8.81	OSL	\	\	\	1700	\
B3S-2	-10.91	OSL	\	\	\	5500	\
B3S-3	-13.42	OSL	\	\	\	1700	\
B3S-4	-25.21	OSL	\	\	\	22200	\

测年结果为 6675 cal a BP, 出现年龄倒置现象, 可能是由于当时风暴波浪等扰动产生的结果。在计算该段沉积速率时, 取海平面快速上升的时间为~8200 a BP (Xu et al., 2020), 该段沉积结束时间取 6600 a BP, 沉积速率为 (2530~2380) cm/(8200~6600) a=0.094 cm/a。

U4 障壁沙坝(三角洲前缘)孔深 6.70~23.80 m, 高程 -3.51~-20.61 m, 厚度为 17.10 m, 根据沉积特征, 本段可以分为上下两层。23.8~14.54 m 为灰色极细砂-细砂夹灰色粉砂质黏土-粉砂薄层或透镜体, 局部见贝壳化石, 包括中国蛤蜊 *Mactra chinensis*, 猫爪牡蛎 *Talonostrea talonostrea*, 光滑蓝蛤 *Potamocorbula laevis* 等; 14.54~6.70 m 为灰色-浅灰色细砂, 局部夹灰色粉砂薄层, 见少量贝壳碎屑, 如托氏瑁螺 *Umbonium thomasi*, 光滑蓝蛤 *Potamocorbula laevis* 及小牡蛎碎屑。本段沉积物平均粒径大小由下层的 3.57~6.07 Φ 略微变粗为上层的 3.42~5.17 Φ , 分选性整体也由较差变为中等。与下伏和上覆地层均为整合接触关系。本段沉积物岩性由下至上变粗, 分选性变好, 沉积结构类似典型的三角洲结构, 因此本段为全新世障壁沙坝沉积(三角洲前缘), 未见典型的前三角洲沉积。本单元的沉积速率可以分 6.85~14.10 m 和 14.10~23.80 m 两段计算, 14.1 m 处沉积物的光释光测年结果为 (5.5±0.6) ka BP, 该段上部沉积结束时间取上段 6.85 m 处植物碎屑 AMS¹⁴C 测年结果 3415 cal a BP, 该段底部沉积开始时间取下段沉积顶部结束时间 6600 a BP, 上层沉积速率为 (1410~685) cm/(5500~

3415) a=0.348 cm/a, 下层沉积速率为 (2380~1410) cm/(6600~5500) a=0.882 cm/a, 平均沉积速率为 0.615 cm/a。

U5 潟湖孔深 4.37~6.70 m, 高程 -1.18~-3.51 m, 厚度为 2.33 m, 该段底部为灰色-浅灰色粗粉砂-极细砂夹深灰色粉砂质黏土薄层, 透镜体发育, 向上渐变为灰色粉砂质黏土, 顶底部都发育薄层有机质富集层, 局部见小型贝壳碎屑, 含光滑蓝蛤 *Potamocorbula laevis*, 托氏瑁螺 *Umbonium thomasi*, 四角蛤蜊 *Mactra veneriformis*。该段平均粒径 5.01 Φ , 粒度较细, 与 U3 浅海段沉积平均粒径较为接近, 分选较差。与上下均为整合接触关系。本段粒度较细, 有机质层丰富, 化石单一且广盐型化石含量较高, 推测该沉积单元为全新世晚期的潟湖环境。底部 6.85 m 处植物碎屑 AMS¹⁴C 测年为 3415 cal a BP, 在 5.24 m 处发现有机质沉积层, 其测年结果为 695 cal a BP。计算沉积速率 (685~524) cm/(3415~695) a=0.059 cm/a。

U6 人工填土孔深 0~4.37 m, 高程 3.19~-1.18 m, 厚度为 4.37 m, 该段为人工填土, 整体为灰白色中细砂。

3.2 钻孔沉积物常量元素(含营养元素)和总碳总氮特征

3.2.1 常量元素(含营养元素)

BXZK03 孔沉积物中各营养元素浓度在各沉积环境如表 2 和图 3 所示。TC 总体浓度变化范围为 4.14~55.89 mg/g, 平均浓度为 12.65 mg/g, 从下往上的变化趋势为低-高一低, 海滩沙脊(34.55 mg/g)、

表2 滦河三角洲 BXZK03 孔沉积物元素浓度

Table 2 Element concentration of the sediments in Core BXZK03 from the Luanhe River Delta

沉积环境	数值 范围	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	TC	Corg	N	Mn	P	S
		mg/g								mg/kg			
潟湖(U5)	平均值	63.19	20.95	8.52	19.05	22.38	23.3	9.37	5.41	397.73	448.04	422.72	791.8
	最大值	82.34	26.08	10.84	24.53	32.45	31.01	11.62	8.15	566.02	581.54	533.68	2193
	最小值	55.71	16.96	6.73	16.15	19.37	20.49	7.48	3.56	283.19	347.67	304.05	321
障壁沙坝 (三角洲前缘)(U4)	平均值	57.36	19.1	7.59	17.65	20.2	23.84	9.33	4.78	380.88	380.63	306.82	563.95
	最大值	68.89	28.94	11.69	64.89	23.14	26.08	26.14	21.47	880	476.18	808.68	1890
	最小值	44.49	11.38	4.68	12	14.75	18.76	4.14	1.7	180	282.14	0	71
浅海(U3)	平均值	50.36	19.08	8.08	47.42	15.38	21.18	21.54	5.15	322.78	439.14	199.75	1140.6
	最大值	58.85	24.75	10.66	89.19	16.33	23.34	35.3	7.02	537.73	553.67	405.67	1493
	最小值	42.56	14.35	6.04	24.09	14.03	18.69	14.17	3.85	212.48	387.21	0.63	842
海滩沙脊(U2)	平均值	39.4	13.74	5.42	90.79	13.1	17.17	34.55	3.69	303.67	537.37	105.4	772.29
	最大值	57.22	21.2	8.23	160.85	16.14	21.28	55.89	7.02	520	642.91	302.43	1479
	最小值	25.7	7.18	3	31.73	10.95	13.29	13.58	2.57	220	436.54	0	397
泛滥平原(U1)	平均值	66.59	32.84	13.08	46.79	14.39	21.76	20.04	4.06	472.34	644.17	290.4	359.7
	最大值	78.37	43.31	16.19	75.16	16.11	23.99	31.6	8.1	1050	755.38	471.63	1034
	最小值	56.25	26.17	10.93	29.96	11.5	17.27	14.12	2.46	220	477.29	0	70
整体	平均值	56.98	20.15	8.04	26.88	19.03	23.03	12.65	4.68	382.49	422.57	292.11	597.01
	最大值	82.34	43.31	16.19	160.85	32.45	31.01	55.89	21.47	1050	755.38	808.68	2193
	最小值	25.7	7.18	3	12	10.95	13.29	4.14	1.7	180	282.14	0	70

浅海(21.54 mg/g)平均浓度较高,泛滥平原(20.04 mg/g)次之,潟湖(5.41 mg/g)和障壁沙坝(三角洲前缘)(9.33 mg/g)平均浓度较低。 C_{org} 总体浓度变化范围为1.70~21.47 mg/g,平均浓度为4.68 mg/g,从下往上整体变化波动不大,潟湖沉积相上部有机质层(8.15 mg/g)、潟湖沉积相下部有机质层(21.47 mg/g)和障壁沙坝(三角洲前缘)上部(10.86 mg/g)出现单个较大值,其他地层整体浓度偏低(1.70~7.78 mg/g)。N总体浓度变化范围为180.00~1050.00 $\mu\text{g/g}$,平均浓度为382.49 $\mu\text{g/g}$,从下往上整体变化趋势较为波动,障壁沙坝(三角洲前缘)下部(422.64 $\mu\text{g/g}$)、泛滥平原(472.34 $\mu\text{g/g}$)平均浓度较高,潟湖(397.33 $\mu\text{g/g}$)次之,障壁沙坝(三角洲前缘)上部(325.19 $\mu\text{g/g}$)、浅海(322.78 $\mu\text{g/g}$)和海滩沙脊(303.67 $\mu\text{g/g}$)平均浓度较低。S总体浓度变化范围为70.00~2193.00 $\mu\text{g/g}$,平均浓度为597.01 $\mu\text{g/g}$,从下往上整体变化趋势为低—高一低,浅海(2193.00 $\mu\text{g/g}$)平均浓度最高,潟湖(791.80 $\mu\text{g/g}$)、障壁沙坝(三角洲前缘)下部(716.68 $\mu\text{g/g}$)和海滩沙脊(772.29 $\mu\text{g/g}$)次之,障壁沙坝(三角洲前缘)上部(360.30 $\mu\text{g/g}$)、泛滥平原(359.70 $\mu\text{g/g}$)

平均浓度最低。P总体浓度变化范围为0~808.68 $\mu\text{g/g}$,平均浓度为292.11 $\mu\text{g/g}$,从下往上整体变化趋势较为波动,潟湖(422.72 $\mu\text{g/g}$)、障壁沙坝(三角洲前缘)下部(385.48 $\mu\text{g/g}$)平均浓度较高,泛滥平原(290.40 $\mu\text{g/g}$)次之,障壁沙坝(三角洲前缘)上部(201.93 $\mu\text{g/g}$)、浅海(199.75 $\mu\text{g/g}$)和海滩沙脊(105.40 $\mu\text{g/g}$)平均浓度最低。

BXZK03孔沉积物中各常量元素浓度在各沉积环境如表2和图4所示。Na总体浓度变化范围为10.95~32.45 mg/g,平均浓度为19.03 mg/g,K总体浓度变化范围为13.29~31.01 mg/g,平均浓度为23.03 mg/g,从下往上的变化趋势为由低到高,潟湖(22.38 mg/g, 23.30 mg/g)以及障壁沙坝(三角洲前缘)上部(20.86 mg/g, 23.67 mg/g)平均浓度较高,障壁沙坝(三角洲前缘)下部(19.70 mg/g, 24.00 mg/g)次之,浅海(15.38 mg/g, 21.18 mg/g)、海滩沙脊(13.10 mg/g, 17.17 mg/g)和泛滥平原(14.39 mg/g, 21.76 mg/g)平均浓度较低且波动较大。Al总体浓度变化范围为25.70~82.34 mg/g,平均浓度为56.98 mg/g,Fe总体浓度变化范围为7.18~43.31 mg/g,平

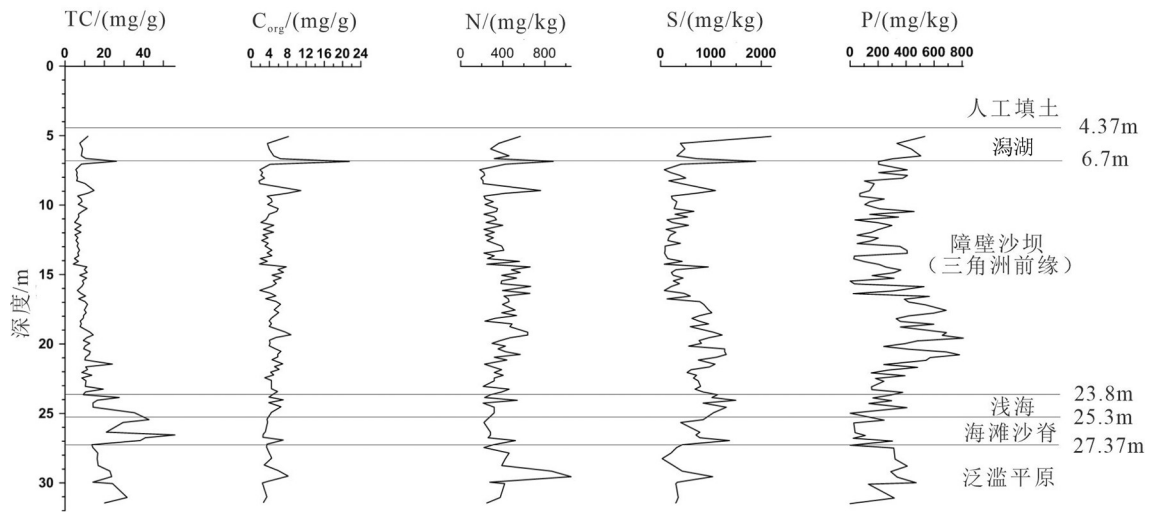


图3 沉积地层中的营养元素的垂向分布图

Fig.3 Vertical distribution of nutrient element contents in sedimentary strata

均浓度为 20.15 mg/g, Mg 总体浓度变化范围为 3.00~16.19 mg/g, 平均浓度为 8.04 mg/g, 从下往上的变化趋势为高一低一高一低一高, 潟湖 (63.19 mg/g, 20.95 mg/g, 8.52 mg/g)、障壁沙坝 (三角洲前缘) 下部 (58.27 mg/g, 21.38 mg/g, 8.44 mg/g)、浅海 (50.36 mg/g, 19.08 mg/g, 8.08 mg/g) 和泛滥平原 (66.59 mg/g, 32.84 mg/g, 13.08 mg/g) 平均浓度较高, 障壁沙坝 (三角洲前缘) 上部 (56.42 mg/g, 16.76 mg/g, 6.72 mg/g) 和海滩沙脊 (39.40 mg/g, 13.74 mg/g, 5.42 mg/g) 平均浓度较低。Mn 总体浓度变化范围为 282.14~755.38 $\mu\text{g/g}$, 平均浓度为 422.57 $\mu\text{g/g}$, 从下往上的变化趋势为高一低, 泛滥平原 (644.17 $\mu\text{g/g}$)、

海滩沙脊 (537.37 $\mu\text{g/g}$) 平均浓度最高, 潟湖 (448.04 $\mu\text{g/g}$)、浅海 (439.14 $\mu\text{g/g}$) 次之, 障壁沙坝 (三角洲前缘) (380.63 $\mu\text{g/g}$) 平均浓度最低。Ca 总体浓度变化范围为 12.00~160.85 mg/g, 平均浓度为 26.88 mg/g, 从下往上的变化趋势为低一高一低, 海滩沙脊 (90.79 mg/g) 和浅海 (47.42 mg/g) 含量较高, 泛滥平原 (46.79 mg/g) 次之, 潟湖 (19.05 mg/g) 和障壁沙坝 (三角洲前缘) (17.65 mg/g) 含量最低。

3.2.2 总碳和有机碳埋藏速率

BXZK03 孔原位密度值的范围介于 0.80~2.08 g/cm^3 , 平均值为 1.62 g/cm^3 。整体上原位密度垂向上变化波动较小 (图 5), 但各沉积单元平均值 (表 3)

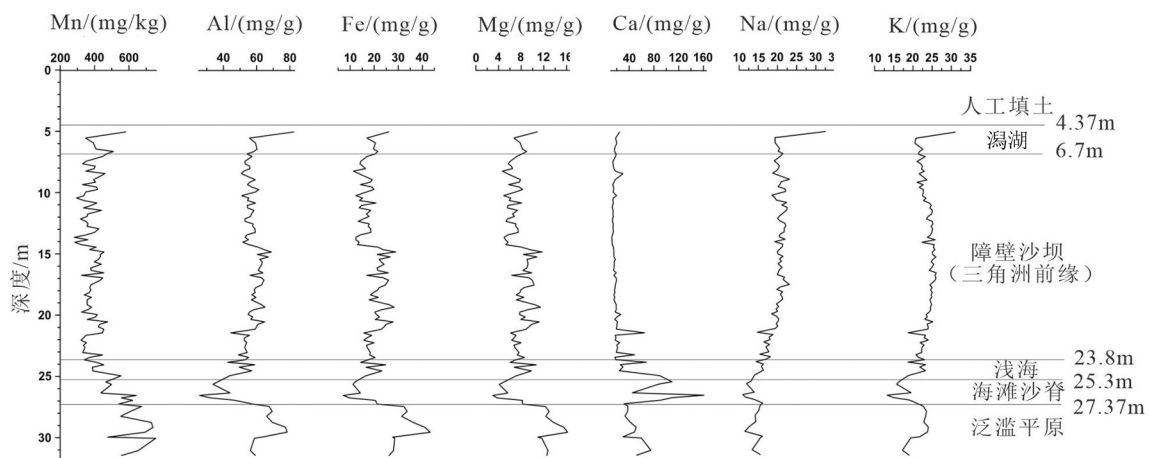


图4 沉积地层中的常量元素的垂向分布图

Fig.4 Vertical distribution of constant element contents in sedimentary strata

表3 滦河三角洲不同沉积环境垂向沉积速率与TC和C_{org}的埋藏速率

Table 3 Vertical sediment rate and accretion rate of carbon of diferent sediment environments in Luanhe River Delta

沉积环境	数值范围	沉积速率/ (cm/a)	原位密度 /(g/cm ³)	TC含量/ (mg/g)	C _{org} 含量/ (mg/g)	TC埋藏速率 /(g/(m ² ·a))	C _{org} 埋藏速率 /(g/(m ² ·a))
潟湖(U5)	平均值	0.06	1.48	9.37	5.41	8.33	4.66
	最大值		1.76	11.62	8.15	10.40	7.06
	最小值		0.80	7.48	3.56	3.99	2.34
障壁沙坝 (三角洲前缘)(U4)	平均值	0.62	1.62	9.33	4.78	103.95	51.47
	最大值		1.85	26.14	21.47	393.15	113.17
	最小值		1.37	4.14	1.70	29.16	9.18
浅海(U3)	平均值	0.09	1.61	21.54	5.15	32.77	7.82
	最大值		1.68	35.30	7.02	55.76	10.59
	最小值		1.55	14.17	3.85	21.51	5.68
海滩沙脊(U2)	平均值	0.41	1.87	34.55	3.69	220.78	32.59
	最大值		2.08	55.89	7.02	316.24	52.13
	最小值		1.79	13.58	2.57	101.52	25.61
泛滥平原(U1)	平均值	/	1.56	20.04	4.06	/	/
	最大值		1.83	31.60	8.10	/	/
	最小值		1.38	14.12	2.46	/	/
整体	平均值	0.30	1.62	12.65	4.68	99.92	45.67
	最大值		2.08	55.89	21.47	393.15	113.17
	最小值		0.80	4.14	1.70	3.99	2.34

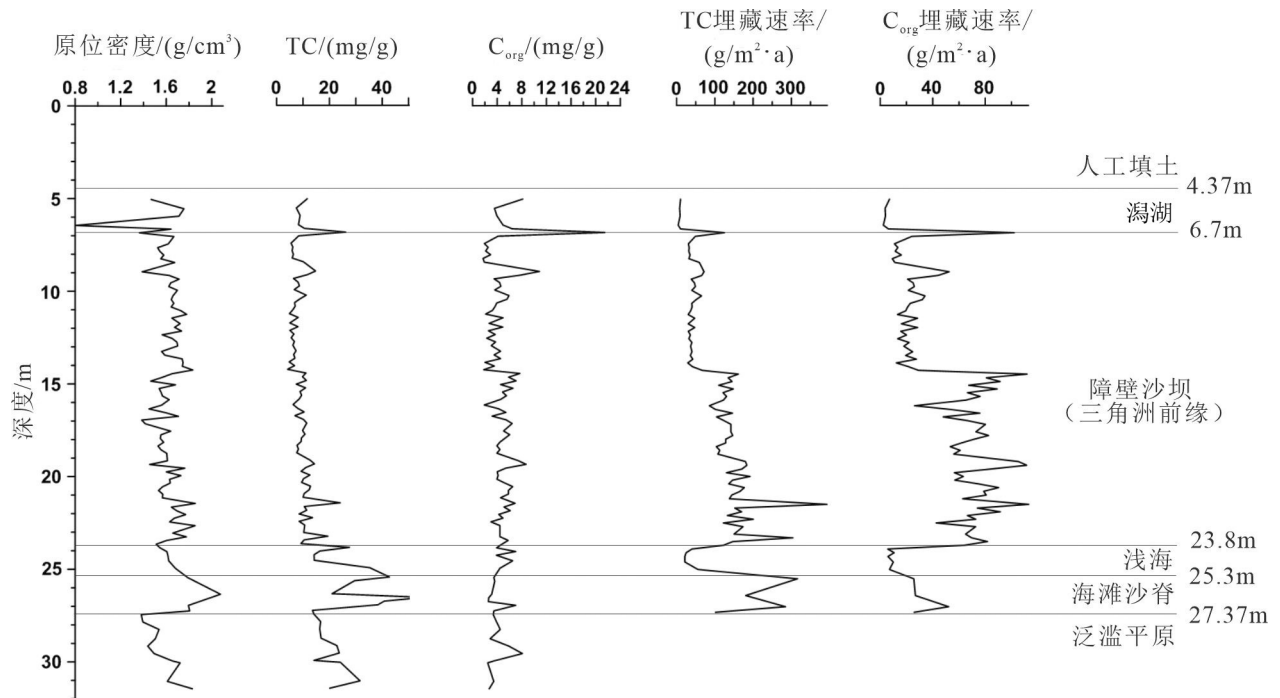


图5 碳埋藏速率的垂向分布图
Fig.5 Vertical distribution in C accretion rate

略有不同。泛滥平原的原位密度平均值为 1.56 g/cm^3 , 原位密度平均值最高的值为海滩沙脊沉积相约 1.87 g/cm^3 , 浅海和障壁沙坝(三角洲前缘)沉积相原位密度值次之, 平均值分别为 1.61 g/cm^3 和 1.62 g/cm^3 , 平均值最低的值为泛滥湖沉积相 1.48 g/cm^3 。

整体而言, 总碳埋藏速率值介于 $3.99\sim 393.15 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 平均值为 $97.79 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$; 有机碳的埋藏速率值范围为 $2.34\sim 113.17 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 平均值为 $45.60 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ (图5, 表3)。各沉积单元中, 海滩沙脊、障壁沙坝(三角洲前缘)下部和潟湖沉积相中的有机质层总碳和有机碳埋藏速率较高, 浅海相、潟湖相以及障壁沙坝(三角洲前缘)上部较低。海滩沙脊总碳和有机碳的平均埋藏速率值分别为 $220.78 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 和 $32.59 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 浅海总碳和有机碳的平均埋藏速率值分别为 $32.77 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 和 $7.82 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 障壁沙坝(三角洲前缘)下部总碳和有机碳的平均埋藏速率值分别为 $148.77 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 和 $71.95 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 障壁沙坝(三角洲前缘)上部总碳和有机碳的平均埋藏速率值分别为 $44.20 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 和 $24.16 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$, 潟湖总碳和有机碳的平均埋藏速率值分别为 $8.33 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 和 $4.66 \text{ g/(m}^2\cdot\text{a)}$ 。

4 讨论

4.1 粒度、常量元素与有机碳的相关性

BXZK03孔粒度整体上与有机碳没有明显相关性, 这个可能是由于不同时期沉积速率演化的影响, 干扰了地球化学元素粒度效应规律。但在该孔

下部海滩沙脊 ($r>0.823, P<0.05$) 和泛滥平原 ($r>0.913, P<0.01$) 具有极显著的正相关性。沉积物颗粒越细, 有机碳含量越大, 这是由于细颗粒物质的比表面积较大, 能够吸附更多的有机碳。此外, 由于沉积物颗粒较细在固碳过程中形成了密闭性较好的还原环境, 有机碳不易氧化分解, 使其得以保存下来。

BXZK03孔整体沉积物中TC、 C_{org} 及其他营养成分相关性分析见表4。TC整体与Ca的浓度呈极显著线性相关 ($r=0.960, P<0.01$), 总碳由无机碳和有机碳组成, 前者无机碳很可能是来自碳酸盐, 而后者有机碳反映了在生物作用过程中很可能同步加剧了矿物的风化过程 (Berne, 1992; Pei et al., 2020), 由此使总碳与矿物质成分Ca、Mn、Na、K均呈不同程度的显著性相关关系 ($r>0.641, P<0.01$)。 C_{org} 整体与N和S的浓度呈良好的线性相关 ($r>0.63, P<0.01$)是合乎逻辑的表现, 因为这3种元素本身是有机质的重要组成部分。综合以上相关性证实了土壤结构和营养成分元素对有机质的吸收具有重要作用 (Nair et al., 2001)。

不同沉积环境沉积物中TC、 C_{org} 及其他营养成分浓度相关性分析中存在差异。TC在泛滥平原、海滩沙脊、浅海沉积环境中与Ca浓度极显著线性相关 ($r>0.953, P<0.01$), 此时贝壳碎屑为主的无机碳是TC的主要组成; 在障壁沙坝(三角洲前缘)中与Ca和 C_{org} 浓度显著线性相关 ($r>0.714, P<0.01$), 此时有机碳和无机碳均是总碳的重要组成部分; 在潟湖沉

表4 沉积物TC、 C_{org} 以及其他营养成分浓度的相关系数
Table 4 Correlations between TC、 C_{org} and nutrients in the sediments

	N	Mn	P	S	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	TC	C_{org}
N	1	0.293**	0.295**	0.390**	0.512**	0.602**	0.577**	-0.061	0.057	0.300**	0.123	0.647**
Mn		1	-0.022	0.132	0.196*	0.596**	0.602**	0.619**	-0.515**	-0.335**	0.641**	0.106
P			1	0.377**	0.425**	0.433**	0.408**	-0.231*	0.226*	0.370**	-0.161	0.193*
S				1	0.020	0.186	0.194*	0.191	0.005	-0.017	0.355**	0.637**
Al					1	0.802**	0.789**	-0.553**	0.432**	0.740**	-0.473**	0.246*
Fe						1	0.986**	-0.066	-0.117	0.308**	0.044	0.308**
Mg							1	-0.048	-0.112	0.270**	0.064	0.302**
Ca								1	-0.742**	-0.788**	0.960**	-0.086
Na									1	0.762**	-0.725**	0.133
K										1	-0.751**	0.130
TC											1	0.166
C_{org}												1

注:**为在0.01水平(双侧)上显著相关;*为在0.05水平(双侧)上显著相关。

积阶段中与 C_{org} 浓度极显著线性相关 ($r=0.942, P<0.01$), 此时有机碳是总碳的绝大部分成分。 C_{org} 在泛滥平原沉积环境与 N、S、Al、Fe、Mg 和 Na 的浓度显著线性相关 ($r>0.777, P<0.01$), 在浅海与 S、Al、Fe 和 Mg 的浓度极显著线性相关 ($r>0.902, P<0.01$), 在潟湖沉积环境与 Mn、Mg 的浓度极显著线性相关 ($r>0.975, P<0.01$), 与 S 和 Fe 的浓度呈显著线性相关 ($r>0.943, P<0.05$), 以上三种沉积环境水动力较弱, 以粉砂质黏土为主, 富含石英、长石和黏土矿物, 在沉积和成岩过程中会形成含 Mn、Al、Fe、Mg 和 Na 的胶体和化学沉积物附着到有机质表面, 使得有机碳与之相关性较高, N、S 和有机碳同为有机质重要组成部分, 相关性较高; 在海滩沙脊沉积环境与 Fe、Mg 的浓度极显著线性相关 ($r>0.933, P<0.01$) 该段水动力较强沉积环境不稳定, 因此大部分常量元素与有机碳相关性较差, Fe、Mg 与有机碳具有极显著的相关性原因推测是元素进入到矿物晶格或与有机质结合成有机络合物较为稳定; 在障壁沙坝 (三角洲前缘) 沉积环境中与 N 和 P 的浓度显著线性相关 ($r>0.692, P<0.01$), 推测由于该阶段沉积速率高, 矿物风化程度较低, 有机碳与矿物质成分相关性较低, 而 N、P 和有机碳都为有机质的重要组成部分, 相关性较高。

4.2 碳埋藏通量的控制因素相关性分析

碳埋藏速率是湿地生态系统碳的重要研究内容, 埋藏速率的大小主要是由沉积速率、原位密度

和营养成分在沉积物中的含量决定。对各沉积单元各项数据进行相关性分析 (表 5), 结果表明 TC、 C_{org} 埋藏速率与原位密度无明显相关性, C_{org} 埋藏速率与有机碳含量呈显著的线性相关 ($r=0.52, P<0.01$), TC 埋藏速率与总碳含量呈显著的线性相关 ($r=0.55, P<0.01$), C_{org} 埋藏速率与沉积速率呈极显著的线性相关 ($r=0.84, P<0.01$), TC 埋藏速率和沉积速率呈显著的线性相关 ($r=0.69, P<0.01$), 由此看来 TC、 C_{org} 埋藏速率的主要控制因素中沉积速率占主导地位, 其次为碳浓度含量。

但是严格来说, 由于碳埋藏速率是碳含量、沉积速率和原位密度的乘积, 因此碳埋藏速率与这些变量中的任何一个之间的相关系数在统计上都是没有意义的。为了确定碳含量、沉积速率和原位密度对碳埋藏速率的方差有多大贡献, 笔者把等式 (1) 两侧同时换算成自然对数:

$$\text{Log(AMAR)} = \text{Log(CC)} + \text{Log(ASR)} + \text{Log(BD)} + 2.3 \tag{2}$$

Log(AMAR) 的方差计算如 (3) 所示:

$$\begin{aligned} V[\text{Log(AMAR)}] = & V[\text{Log(CC)}] + V[\text{Log(ASR)}] + \\ & V[\text{Log(BD)}] + 2 \cdot \text{COV}[\text{Log(ASR)}, \text{Log(BD)}] + 2 \cdot \text{COV} \\ & [\text{Log(ASR)}, \text{Log(CC)}] + 2 \cdot \text{COV}[\text{Log(CC)}, \text{Log(BD)}] \end{aligned} \tag{3}$$

其中 V 和 COV 分别代表方差和协方差。

表 6 显示了使用 Office Excel 2013 计算这些项的结果。为确定每个因素对碳埋藏速率的贡献, 将方程

表 5 沉积物 TC、 C_{org} 埋藏速率的相关系数

Table 5 Correlations between TC, C_{org} accretion rate in the sediments

	沉积速率	原位密度	TC 含量	C_{org} 含量	TC 埋藏速率	C_{org} 埋藏速率
沉积速率	1	-0.009	-0.092	0.076	0.685**	0.842**
原位密度		1	0.124	-0.344**	0.205	-0.099
TC 含量			1	0.388**	0.548**	0.158
C_{org} 含量				1	0.268*	0.524**
TC 埋藏速率					1	0.763**
C_{org} 埋藏速率						1

注: **为在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; *为在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

表 6 各因素对碳埋藏速率的方差的贡献 (V 代表方差, COV 代表协方差)

Table 6 The contribution of each factor to the variance of C accretion rate (V represents the variance, and COV represents the covariance)

Unit	V(LASR)	V(LBD)	V(LOC)	V(LTC)	2 · COV (LBD, LOC)	2 · COV (LASR, LOC)	2 · COV (LASR, LBD)	2 · COV (LBD, LTC)	2 · COV (LASR, LTC)
Total	0.1159	0.0019	0.0331	0.0380	-0.0047	0.0083	0.0041	0.0004	-0.0094

(3)中的项在不同的沉积单元中进行计算。

由计算结果可知, $V[\text{Log}(\text{碳埋藏速率})]$ 总体上主要由 $V[\text{Log}(\text{沉积速率})]$ 决定, 第二大影响因素为 $V[\text{Log}(\text{碳含量})]$, $V[\text{Log}(\text{沉积速率})]$ 对 $V[\text{Log}(\text{碳埋藏速率})]$ 贡献量是 $V[\text{Log}(\text{碳含量})]$ 贡献量的 3~4 倍 (表 6)。其他因素对 $V[\text{Log}(\text{碳埋藏速率})]$ 结果影响不大。然而, 该结果并不能说明沉积速率是碳埋藏速率的绝对控制因素, 在沉积速率较低, 碳含量较高的沉积单元, 碳含量可以成为碳埋藏速率的主控因素。在最高总碳含量为 34.55 mg/g 的海滩沙脊, 如此高的碳含量导致最高的总碳堆积速率 220.78 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (表 4)。

根据对碳含量、原位密度和沉积速率对碳埋藏速率的分析, 可以得出结论沉积速率和碳含量相对于其他影响因素是控制沉积单元中碳埋藏速率的两个主要因素。沉积速率和碳含量由于沉积速率和碳含量在不同沉积单元中有着不同的值相对应导致碳埋藏速率在不同沉积单元有着不同的值。

沉积速率高通常会导致有机碳含量低, 这是由于沉积速率较高时碳酸盐矿物或碎屑矿物的输入对有机质的稀释造成单位沉积物中含有的有机质量的减少。碳埋藏速率的计算可以大体上平衡掉沉积速率造成有机碳稀释的影响, 因此要用有机碳埋藏速率来评价研究区的固碳能力。由表 3 可知, 滦河三角洲有机碳平均埋藏速率 45.67 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 障壁沙坝(三角洲前缘)下部有机碳平均埋藏速率最大, 其平均值为 71.95 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 低于中国现代黄河三角洲的 961.95 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、美国佛罗里达湿地的 320 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和路易斯安娜湿地的 300 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 高于中国辽河三角洲的 17.87 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和海南岛沙美湖 42.96 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Hatton et al., 1982; Jia et al., 2012; 赵广明等, 2014; Liu et al., 2017), 虽然障壁沙坝(三角洲前缘)有机碳浓度不高, 但由于该沉积阶段较高的沉积速率, 使得滦河三角洲具有不错的固碳能力。

5 结 论

(1) BXZK03 孔的地层沉积序列从下往上可以划分为晚更新世的陆相泛滥平原沉积, 之上的全新世的海相—海陆交互地层, 依次历经海滩沙脊—浅海—障壁沙坝(三角洲前缘)—潟湖的沉积过程。大约 8700 cal a BP 研究区开始海侵, 障壁沙坝

(三角洲前缘)主体沉积年龄大致可以推测在 6500~3500 cal a BP, 3500 cal a BP 之后, 河道迁移, 本孔开始形成潟湖相泥沙互层的沉积。

(2) 滦河三角洲在地质演化过程中, TC 整体与 Ca 的浓度呈极显著线性相关 ($r=0.960, P<0.01$), 与 Mn、Na、K 的浓度呈显著线性相关 ($r>0.641, P<0.01$)。C_{org} 整体与 N 和 S 的浓度呈良好的线性相关 ($r>0.63, P<0.01$), 在各个层位不同常量元素也具有比较好的相关性 ($P<0.01$)。

(3) 有机碳埋藏速率在障壁沙坝(三角洲前缘)下部最高为 71.95 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在潟湖最低为 8.33 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。总碳埋藏速率在海滩沙脊最高为 220.78 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在潟湖最低为 4.66 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。碳的埋藏速率大小的主要影响因素为沉积速率和碳含量。虽然滦河三角洲晚更新世以来 C_{org} 浓度相对较低, 但是由于全新世早期较高的沉积速率, 使滦河三角洲 C_{org} 平均埋藏速率达到 45.60 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 使该地质体具有一定的碳储存能力。

致谢: 感谢项目组成员赵广明、杨士雄、谢柳娟、丁喜桂、王锦、余雪洋以及中国地质大学(武汉)博士生裴理鑫, 山东科技大学研究生雷雁翔和中国地质大学(北京)研究生周攀在野外取样、室内分样和论文写作过程中给予的帮助。

References

- Berner R A. 1992. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(8): 3225–3231.
- Brevik E C, Homburg J A. 2004. 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, Southern California, USA[J]. *Catena*, 57(3): 221–232.
- Chen Zhongliang, Zhang Jinzhe, Shen Shihao, Huang Meng, Xu Jinglong, Ge Haiying, Simon M. Jowitt. 2022. Multi-stratigraphic study and response to sea-level fluctuations since the last deglaciation detected from BZK0402 core in the Shuiyang River basin, Yangtze River[J]. *Geology in China*, 49(2): 655–666(in Chinese with English abstract).
- Dagang Oilfield Geology Research Institute. 1985. The Luanhe River Alluvial Fan—Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ding Xigui, Wang Jisong, Zhao Guangming, Yuan Hongming, Wang Jin, Ye Siyuan. 2016. Accretion rate and controlling factors of carbon and nutrients during coastal wetland evolution in Yellow River Delta[J]. *Geology in China*, 43(1): 319–328(in Chinese with English abstract).

- Ding Xigui, Ye Siyuan, Zhao Guangming, Yuan Hongming, Wang Jin. 2014. Accumulation of carbon and nutrients in coastal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 45(1): 96–104(in Chinese with English abstract).
- Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Fei Lu, Ouyang Zhiyun. 2008. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 463–469.
- Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. 2000. Review of ^{210}Pb dating in the continental shelf of China[J]. *Advances in Earth Science*, 15(3): 297–302(in Chinese with English abstract).
- Feng Jinliang, Zhang Wen. 1998. The evolution of the modern Luanhe River delta, north China[J]. *Geomorphology*, 25(3): 269–278.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26.
- Gao Shanming. 1981. Depositional Model of Luanhe River Delta[J]. *Chinese Science Bulletin*, (14): 65–66(in Chinese).
- Gao Shanming. 1985. Structures and sedimentary environments of the alluvial fan of the Luan River[J]. *Geographical Research*, (1): 56–64 (in Chinese with English abstract).
- Guo Liangtian, Wang Ping, Zhang Ke, Sheng Qiang, Zhao Hua, Wang Chengmin. 2013. OSL and ^{14}C ages of the Late Quaternary sediments in the east Pearl River Delta[J]. *Geology in China*, 40(6): 1842–1849(in Chinese with English abstract).
- Guo Wenying, Fan Cheng. 1989. Historical migration and hydrological characteristics of the lower reaches of Luanhe River[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 5(4): 45–51(in Chinese).
- Hatton R S, Patrick W H, DeLaune R D. 1982. Sedimentation, Nutrient Accumulation, and Early Diagenesis in Louisiana Barataria Basin Coastal Marshes[M]. *Estuarine Comparisons*, 255–267.
- Hu Guangyuan, Zhuang Zhenye, Yin Ping, Zhao Dongbo, Liu Shuang, Wang Ling. 2017. The hole D219 and the Late Quaternary paleogeographic environments in the northern Bohai Bay, China[J]. *Marine Geology Frontiers*, 33(6): 16–23(in Chinese with English abstract).
- Huang Meng, Han Rongwen, Niu Yi, Xu Qinmian. 2021. Marine transgression since the MIS3 stage on the northwest coast of Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(5): 721–733(in Chinese with English abstract).
- Jia Jianjun, Gao Jianhua, Liu Yifei, Gao Shu, Yang Yang. 2012. Environmental changes in Shamei Lagoon, Hainan Island, China: Interactions between natural processes and human activities[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52(30): 158–168.
- Jiang Tailiang, Fang Xianying, Xu Hongda, Guo Wenying. 1986. Analysis of Luanhe River discharge and sediment transport at Luanhe Estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 4(4): 103–116(in Chinese).
- Jin Xiaofeng. 1984. The spore-pollen assemblages and the stratigraphy and palaeogeography in western Bohai sea since Late Pleistocene[J]. *Marine Sciences*, 8(3): 16–24(in Chinese with English abstract).
- Li Congxian, Chen Gang, Gao Manna. 1982. Sedimentation and development of the barrier-lagoon systems along the coastal zone of east China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2(1): 185–186(in Chinese with English abstract).
- Li Congxian, Chen Gang, Wang Chuanguang, Zhang Yumin. 1984. On the Luanhe River alluvial fan-delta complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 5(4): 27–36(in Chinese with English abstract).
- Li Congxian, Li Ping, Wang Li, Wang Chuanguang, Zhang Yumin. 1985. Facies assemblage of present Luanhe Delta[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, (2): 202–210(in Chinese with English abstract).
- Li Congxian, Li Ping, Wang Li. 1983. The deltaic area of the regressive sequence of some coast in the east coast of China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 5(2): 212–221(in Chinese).
- Li Gang, Yin Yong. 2010. Recent geomorphological evolution downstream channel and delta of Luanhe River[J]. *Geographical Research*, 29(9): 72–81(in Chinese with English abstract).
- Li Yuanfang, Gao Shanming, An Fengtong. 1982. A preliminary study of the Quaternary marine strata and its paleogeographic significance in the Luanhe Delta region[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 13(5): 47–53(in Chinese with English abstract).
- Liu Aiju, Huang Yichang, Lu Ming. 1986. Beach characteristics of Luanhe Estuary and its nearshore (Abstract) [J]. *Advances in Marine Science*, 4(3): 120–122(in Chinese with English abstract).
- Liu Jin, Ye Siyuan, Allen Laws E, Lu Qingyuan. 2017. Sedimentary environment evolution and biogenic silica records over 33,000 years in the Liaohe delta, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 62(2): 474–489.
- Liu Yufen. 2012. An analysis of the hydrology, geology and economic situation of Luanhe River basin[J]. *Journal of Hebei Normal University for Nationalities*, 32(2): 30–32(in Chinese with English abstract).
- Lu Qingwei, Guo Wei, Shi Wenxue, Wang Xiyu, Zhan Jian, Jia Chao. 2021. Study on the three stages of transgression and paleochannel of western Bohai Bay since the Late Pleistocene[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(4): 480–490(in Chinese with English abstract).
- Muller-Karger F E, Varela R, Thunell R, Luerssen R, Hu C M, Walsh J J. 2005. The importance of continental margins in the global

- carbon cycle[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(1): L01602.
- Nair V D, Graetz D A, Reddy K R, Olila O G. 2001. Soil development in phosphatemediated created wetlands of Florida, USA[J]. *Wetlands*, 21(2): 232–239.
- Pei Lixin, Ye Siyuan, Yuan Hongming, Pei Shaofeng, Xie Shucheng, Wang Jin. 2020. Glomalin-related soil protein distributions in the wetlands of the Liaohe Delta, Northeast China: Implications for carbon sequestration and mineral weathering of coastal wetlands[J]. *Limnology and Oceanography*, 65(5): 979–991.
- Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Ramsey C B, Buck C E, Cheng H, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hafliðason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton T J, Hoffmann D L, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F. 2013. Intcal 13 and Marine13 Radiocarbon age Calibration curves 0–50,000 years Cal BP[J]. *Radiocarbon*, 55(4): 1869–1874.
- Smith P. 2004. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. *European Journal of Agronomy*, 20(3): 229–236.
- Smith T M, Cramer W P, Dixon R K, Leemans R, Neilson R P, Solomon A M. 1993. The global terrestrial carbon cycle[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 70(1/4): 19–37.
- Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, Metivier B, Yim W W. 2002. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon* 44, (1): 167–180.
- Wang Risheng, Wang Shaowu. 1990. Reconstruction of winter temperature in East China during the last 500 years using historical documents[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 48(2): 180–189(in Chinese with English abstract).
- Wu Xiujie, Tian Suzhen, Guo Hongmei, Li Luping, Teng Xuechun. 1986. Analysis of coastal wave conditions in Hebei Province[J]. *Advances in Marine Science*, 4(3): 82–88(in Chinese with English abstract).
- Xu Qinmian, Meng Lishan, Yuan Guibang, Teng Fei, Xin Houtian, Sun Xiaoming. 2020. Transgressive wave- and tide-dominated barrier-lagoon system and sea-level rise since 8.2 ka record in sediments in northern Bohai Bay, China[J]. *Geomorphology*, 352(1): 106978.
- Xu Qinmian, Yuan Guibang, Qin Yafei, Yang Jilong, Yang Junquan. 2014. Magnetostratigraphy and discussion of coupling relationship between tectonic movement and climate change of MT04 borehole in southern Luanhe River Delta[J]. *Quaternary Sciences*, 34(3): 540–552(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting. 2014. 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*, 348(1): 52–62.
- Xue Chunting. 2016. Extents, type and evolution of Luanhe River Fan-Delta system, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 19–28(in Chinese with English abstract).
- Ye Siyuan, Laws E A, Wu Qiang, Zhong Shaojun, Ding Xigui, Zhao Guangming, Gong Shaojun. 2010. Pyritization of trace metals in estuarine sediments and the controlling factors: A case in Jiaojiang Estuary of Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 61(5): 973–982.
- Ye Siyuan, Laws E A, Zhong Shaojun, Ding Xigui, Pang Shouji. 2011. Sequestration of metals through association with pyrite in subtidal sediments of the Nanpaishui Estuary on the western bank of the Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(5): 934–941.
- Yuan Guibang, Xu Qinmian, Wang Yan, Yang Jilong, Qin Yafei, Du Dong. 2014. Magnetostratigraphy and tectonic significance of BG10 borehole in northern coast of Bohai Bay[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 285–298(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiafu, Mo Duowen, Xia Zhengkai, Qi Wuyun, Wang Hui, Wang Xinyuan, Zhou Liping. 2009. Optical dating of sediments from China and its implication for depositional processes[J]. *Quaternary Sciences*, 29(1): 23–33(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guangming, Ye Siyuan, Ding Xigui, Yuan Hongming, Wang Jin. 2014. Sedimentary environment partitioning of Holocene strata and assessment of carbon burial rate of various paleo-environments in the Yellow River Delta[J]. *Earth Science*, 39(4): 80–90(in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Quaternary Sciences*, 36(1): 196–207(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈忠良, 张晋喆, 沈仕豪, 黄蒙, 徐锦龙, 葛海影, Jowitt S M. 2022. 长江中下游水阳江流域BZK0402孔多重地层划分及其冰后期海面变化的沉积响应[J]. *中国地质*, 49(2): 655–666.
- 大港油田地质研究所. 1985. 滦河冲积扇—三角洲沉积体系[M]. 北京: 地质出版社.
- 丁喜桂, 王吉松, 赵广明, 袁红明, 王锦, 叶思源. 2016. 黄河三角洲滨海湿地演化过程中的碳埋藏效率及其控制因素[J]. *中国地质*, 43(1): 319–328.
- 丁喜桂, 叶思源, 赵广明, 袁红明, 王锦. 2014. 黄河三角洲滨海湿地演化及其对碳与营养成分的扣留[J]. *海洋与湖沼*, 45(1): 96–104.
- 范德江, 杨作升, 郭志刚. 2000. 中国陆架²¹⁰Pb测年应用现状与思考[J]. *地球科学进展*, 15(3): 297–302.
- 高善明. 1981. 滦河三角洲沉积模式[J]. *科学通报*, (14): 65–66.
- 高善明. 1985. 滦河冲积扇结构和沉积环境[J]. *地理研究*, (1): 56–64.
- 郭良田, 王萍, 张珂, 盛强, 赵华, 王成敏. 2013. 珠江三角洲晚第四纪

- 沉积的OSL和¹⁴C年龄探讨[J]. 中国地质, 40(6): 1842-1849.
- 郭文英, 范成. 1989. 滦河下游河道历史迁徙与相关河道水文特征[J]. 地理学与国土研究, 5(4): 45-51.
- 胡广元, 庄振业, 印萍, 赵东波, 刘爽, 王玲. 2017. D219孔和渤海湾北部晚第四纪地质环境[J]. 海洋地质前沿, 33(6): 16-23.
- 黄猛, 韩荣文, 牛毅, 胥勤勉. 2021. 渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的海侵特征[J]. 地质通报, 40(5): 721-733.
- 姜太良, 房宪英, 徐洪达, 郭文英. 1986. 滦河口径流量和滦河口输沙分析[J]. 海洋科学进展, 4(4): 103-116.
- 金小凤. 1984. 渤海西部及沿岸地区晚更新世以来孢粉组合及地层、古地理研究[J]. 海洋科学, 8(3): 16-24.
- 黎刚, 殷勇. 2010. 滦河下游河道及三角洲地貌的近期演化[J]. 地理研究, 29(9): 72-81.
- 李从先, 陈刚, 高曼娜. 1982. 砂坝-泻湖体系的沉积和发育[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2(1): 185-186.
- 李从先, 陈刚, 王传广, 张玉民. 1984. 论滦河冲积扇—三角洲沉积体系[J]. 石油学报, 5(4): 27-36.
- 李从先, 李萍, 王利, 王传广, 张玉民. 1985. 现代滦河三角洲沉积相组合[J]. 地质科学, (2): 202-210.
- 李从先, 李萍, 王利. 1983. 我国东部沿海一些海岸的海进海退序三角洲地区[J]. 海洋学报, 5(2): 212-221.
- 李元芳, 高善明, 安凤桐. 1982. 滦河三角洲地区第四纪海相地层及其古地理意义的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 13(5): 47-53.
- 刘爱菊, 黄易畅, 卢铭. 1986. 滦河口及其近海的海滩特征(摘要)[J]. 海洋科学进展, 4(3): 120-122.
- 刘玉芬. 2012. 滦河流域水文、地质与经济概况分析[J]. 河北民族师范学院学报, 32(2): 30-32.
- 鲁庆伟, 郭维, 石文学, 王西玉, 詹健, 贾超. 2021. 渤海湾西晚更新世以来3期海侵与古河道研究[J]. 地质通报, 40(4): 480-490.
- 王日升, 王绍武. 1990. 近500年我国东部冬季气温的重建[J]. 气象学报, 48(2): 180-189.
- 吴秀杰, 田素珍, 郭洪梅, 李陆平, 滕学春. 1986. 河北省海岸带波浪状况分析[J]. 海洋科学进展, 4(3): 82-88.
- 胥勤勉, 袁桂邦, 秦雅飞, 杨吉龙, 杨俊泉. 2014. 滦河三角洲南部 MT04 孔磁性地层研究及其构造与气候耦合关系的探讨[J]. 第四纪研究, 34(3): 540-552.
- 薛春汀. 2016. 滦河冲积扇—三角洲的范围和类型及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 19-28.
- 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构造意义[J]. 地质学报, 88(2): 285-298.
- 张家富, 莫多闻, 夏正楷, 齐乌云, 王辉, 王心源, 周力平. 2009. 沉积物的光释光测年和对沉积过程的指示意义[J]. 第四纪研究, 29(1): 23-33.
- 赵广明, 叶思源, 丁喜桂, 袁红明, 王锦. 2014. 黄河三角洲全新世以来沉积环境的划分及各环境中碳埋藏速率的评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(4): 80-90.
- 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[J]. 第四纪研究, 36(1): 196-207.