

丁喜桂, 王吉松, 赵广明, 等. 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, 2016, 43(1): 319–328.

Ding Xigui, Wang Jisong, Zhao Guangming, et al. Accretion rate and controlling factors of carbon and nutrients during coastal wetland evolution in Yellow River Delta[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 319–328(in Chinese with English abstract).

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

丁喜桂^{1,2} 王吉松³ 赵广明^{1,2} 袁红明^{1,2} 王 锦^{1,2} 叶思源^{1,2}

(1. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;
3. 青岛地矿岩土工程有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 2007 年在黄河三角洲布设了一口浅钻 ZK4, 孔深 28.3 m, 对获取的岩心样品进行了详细的沉积学观测及含水量、有机碳、总碳和营养成分的实验室分析测试。通过 ZK4 孔的地层分析, 将其划分为 7 种沉积环境, 揭示了滨海湿地地质演化过程。并利用 AMS¹⁴C 测年方法, 结合黄河改道的历史记录, 运用历史地理学和沉积地质学综合分析的方法对黄河三角洲沉积环境进行了年代划分, 并计算了黄河三角洲不同沉积环境沉积物的沉积速率和碳的加积速率。结果表明: 总碳和有机碳与除硫和磷元素以外的各营养成分都呈良好的线性相关; 碳、氮、磷的加积速率与沉积物的沉积速率呈极显著正相关关系 ($R > 0.89, p < 0.01$), 沉积物的沉积速率是碳、氮、磷的加积速率的主控因素; 虽然现代黄河三角洲沉积物有机碳浓度较低 ($< 1\%$), 但由于沉积物的高沉积速率, 现代黄河三角洲沉积物有机碳的平均加积速率达到 $2878.23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 远高于世界其他高有机碳浓度的湿地, 因此是很好的碳汇地质体。

关键词: 黄河三角洲; 滨海湿地; 有机碳; 埋藏效率

中图分类号: P343.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)01-0319-10

Accretion rate and controlling factors of carbon and nutrients during coastal wetland evolution in Yellow River Delta

DING Xi-gui^{1,2}, WANG Ji-song³, ZHAO Guang-ming^{1,2},
YUAN Hong-ming^{1,2}, WANG JIN^{1,2}, YE Si-yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China;
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao Geological and Mineral Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, Shandong, China)

收稿日期: 2014-11-27; 改回日期: 2015-02-06

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项基金(201111023)、中国地质调查局地质大调查项目(1212010611402、12120115053901)、海洋地质保障工程项目(GZH201200503)、国家自然科学基金项目(41240022)、科技部支撑项目(2012BAC07B01)联合资助。

作者简介: 丁喜桂, 1979 年生, 女, 高级工程师, 海洋环境地质专业, 主要从事海岸带环境地质研究; E-mail: xigui_ding@126.com。

通讯作者: 叶思源, 1963 年生, 女, 研究员, 生物地球化学专业, 主要从事环境地球化学研究; E-mail: ye_siyuan@sina.com。

Abstract: Core ZK4 with a shallow depth of 28.3 m was drilled in the Yellow River Delta in 2007. Samples from the core were used in the laboratory to make detailed sedimentological observations and perform analysis of water content, organic carbon (Corg), total carbon (TC), and nutrient compositions. According to the stratigraphic analyses of core ZK1, seven sedimentary environments were recognized, and the historical evolutions of coastal wetlands were revealed. Chronologies, sedimentation rates and carbon accretion rates of the environments were revealed from AMS¹⁴C dating method, historical records of the Yellow River diversions, and comprehensive analyses by means of historic geography and sedimentary geology. The results show that total carbons, organic carbons and nutrients (except for element S) are all in good linear correlations, the accretion rates of Corg, TC, N and P have very significantly positive correlations with sedimentation rates shown as $R>0.89$, $p<0.01$, and the sedimentation rates are the main factor controlling accretion rates of Corg, TC, N and P. Although Corg concentrations are low ($<1\%$) in the modern Yellow River Delta sediments, the high sedimentation rates have made the average accretion rate of Corg in the sediments come up to $2878.23\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, much higher than the values in other high-Corg wetlands in the world, and thus the modern Yellow River Delta can be considered to be a very good carbon sink due to its high sedimentation rate.

Key words: coastal wetland; organic carbon; accretion rate; Yellow River Delta

About the first author: DING Xi-gui, female, born in 1979, senior engineer, master, doctor candidate, mainly engages in the study of marine geology and environmental geology; E-mail: xigui_ding@126.com.

About the corresponding author: YE Si-yuan, female, born in 1963, professor, majors in the study of biogeochemistry; E-mail: ye_siyuan@sina.com.

Fund support: Supported by Public Welfare Industry Scientific Research Projects of Ministry of Land and Resources (No. 201111023), China Geological Survey Program (No. 1212010611402, 12120115053901), Marine Geological Protection Project (No. GZH201200503), National Natural Science Foundation of China (No. 41240022), Projects in the National Science & Technology Pillar (No. 2012BAC07B01).

1 引言

有关沉积物碳埋藏效率的研究是碳循环研究的重要内容,受到全球科学家的广泛关注^[1-10]。一方面,河流不断携带大量有机物质和营养成分进入湿地,使湿地生态系统和河口生产力不断增加;另一方面,早期成岩作用对沉积物中碳形态与碳总量有很大的控制作用^[10]。当湿地表面无水时,大部分新沉积的营养成分会发生矿化作用,并向沉积物中的孔隙水中释放,最终释放到上覆地表水中^[5-7],同时有机物质会被分解,以 CO_2 的形式释放到空气中,只有一部分细颗粒沉积物中的有机物质和营养成分与沉积物颗粒相结合并一起被埋藏。埋藏较深的有机碳及营养成分多以较稳定的矿物形态存在,不易转化迁移。相关研究表明,高有机碳浓度的土壤具有更强的营养物质吸附能力,更能影响湿地系统的生产力^[7]。滨海湿地碳埋藏通量与沉积物演化过程中的生物地球化学行为有很大关系,研究沉积物有机碳埋藏效率,首先要弄清沉积物的沉积环境和年代。

对于较老历史时期形成的滨海湿地的年代确定,可以采用现代AMS¹⁴C方法。然而,现代黄河三

角洲形成于1855年以后,至今只有一百多年的历史,这已经不在¹⁴C测年的有效范围之内,而²¹⁰Pb测年法则要求具有稳定的沉积环境(稳定的物源和稳定的沉积速率)并且沉积后未受改造^[10]。黄河三角洲分流河道频繁改动,沉积与侵蚀交替运行,常常出现沉积间断,沉积年代也不连续,显然无法满足上述条件。幸运的是黄河分流河道摆动有清楚的历史记录,三角洲的沉积物空间分布有明显的规律可循。为此,薛春汀等^[13]提出应用历史地理学和沉积地质学综合分析确定年代的科学方法。本文采用该方法对黄河三角洲ZK4钻孔1855年后的沉积年代进行了划分,并以此为时间标,研究黄河三角洲滨海湿地沉积物中有机碳及营养成分的垂向加积速率;对于1855年以前形成的湿地沉积物采用现代AMS¹⁴C测年方法确定其沉积年代。

2 材料和方法

2.1 样品采集

2007年8月在东营市河口区车子沟进行钻探取样,获取ZK4孔岩心样品24.92 m, ZK4钻孔地理坐标: $38^{\circ}02'23.79''\text{N}$, $118^{\circ}25'32.09''\text{E}$ (图1),孔深28.3

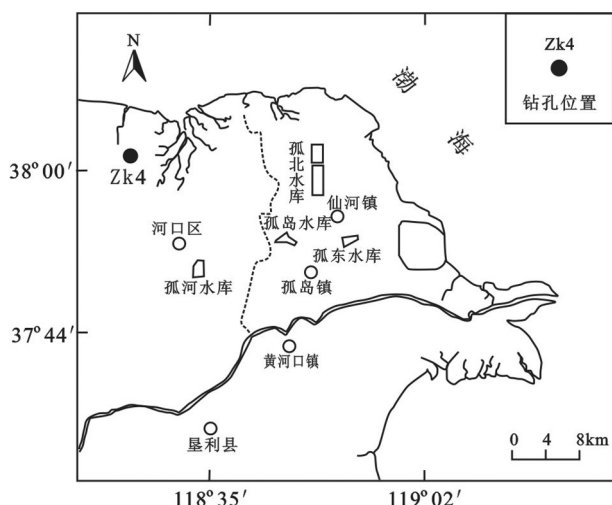


图1 ZK4钻孔位置图

Fig.1 Location of drill hole ZK4

m, 孔口高程 1.12 m。在室内对该岩心进行了详细描述, 按 30 cm 间距取样, 在部分岩性明显无变化、质地均匀处放宽至 50 cm, 对人为扰动强烈的岩心不取样, 共获取沉积物样品 46 个。

2.2 样品处理与测试

样品经自然风干, 研磨, 过筛后, 分析总碳 (TC)、有机碳 (Corg)、总氮 (N) 及 P、CaO、MgO、K₂O、Zn、Cu、Mn、Fe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O 等元素及组分的含量。样品分析测试由河北省中化地质矿山总局地质研究院完成。采用粉末压片 X 射线荧光光谱法测定样品中 P、Ca、Mg、K、Zn、Cu、Mn、Fe 等元素的含量; 用电感耦合等离子体质谱法测定 Mo 元素含量; 用非水容量法测定土壤样品中 TC 量; 测试土壤样品中的有机碳 (Corg) 含量时, 先对样品进行预处理, 除去样品中的无机碳, 然后用非水容量法测定; 用凯氏氮法测定 N 含量; 用电位法测定地球化学调查土壤样品的 pH 值; 用环刀法测定土壤原位密度; 有孔虫鉴定前处理依照标准处理方法^[14], 筛选出粒径 > 63 μm 的沉积物置于镜下鉴定, 有孔虫种类和丰度换算为每 50 g 干重的量成。

2.3 加速器质谱 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)¹⁴C 测年方法

使用全样进行 ¹⁴C 年龄测定。样品前处理步骤如下: 加入 2 N HCl 煮沸, 除去无机碳酸盐, 弃去溶液。加入 2% 的 NaOH 溶液对沉淀物进行碱洗, 去除腐殖酸, 再加入 2 N 的 HCl 对不溶部分进行酸洗, 然

后将沉淀物洗至中性, 即获得胡敏酸。为将分离出的胡敏酸转化为可供 AMS 测量用的石墨样品, 先将其置于真空系统中燃烧并收集 CO₂ 气体。石墨合成采用氢法, 将纯化的 CO₂ 气体送入合成装置中, 用氢气为还原剂, 铁粉为催化剂, 使 CO₂ 还原为碳, 即石墨, 最后压制 AMS 测量用的靶物质, 在北京大学加速器质谱实验室的加速器质谱计上进行 ¹⁴C 测量。

2.4 沉积环境划分和与湿地形成年代分析

对于没有 ¹⁴C 测年的湿地或水生系统沉积的年代确定, 应用历史地理学和沉积地质学综合分析确定沉积年代^[13]。根据沉积物的性质、厚度、高程来判断沉积环境, 追踪其物质来源, 判断沉积物是从哪一条分流河道输送来的, 那么这一条分流河道的活动年代就是这层沉积物形成的年代。分流河道改道后, 新河口沉积物位于老河口的侧部或两个老河口之间, 年轻的三角洲前缘粉砂覆盖在老三角洲侧缘 (或分流间湾) 黏土质粉砂之上, 年轻的三角洲侧缘 (或分流间湾) 黏土质粉砂覆盖在老三角洲前缘粉砂之上, 这是在黄河三角洲常见的沉积层序, 然后利用分流河道变迁图、不同年代的地形图和海区水深图, 应用历史地理学和沉积地质学综合分析就可以准确地确定沉积年代。

2.5 数据处理与制图

(1) 碳和营养成分的埋藏速率是指每年每单位面积土壤中埋藏的碳或营养成分的量, 采用如下公式计算: $A = BD \times C \times DR$, 式中:

A 表示埋藏速率, 单位 g/(m²·a), 即每年每单位面积土壤中埋藏的碳或营养成分的量;

BD 表示土壤密度, 单位 g/cm³, 即每单位体积土壤的量;

C 表示土壤中碳或营养成分的浓度, 单位 mg/g;

DR 表示沉积物的沉积速率, 单位 cm/a, 即每年沉积的沉积物厚度。

(2) 数据的相关性分析采用 Person 相关系数评价。图件采用 CorelDraw 12.0 和 Graph1.2 等绘图软件完成。

3 结果和讨论

3.1 ZK4 孔沉积环境分析、沉积年代确定

ZK4 孔整个岩心以土黄色粉砂、灰色粘土质粉砂为主, 局部见粘土薄夹层、黑色腐殖质, 部分层位

见大量生物扰动构造,其层序自下而上可分为7个沉积单元(图2):

U1 位于孔深 19.06~28.3 m, 高程 -17.94~-27.18 m, 厚 9.24 m, 在 19.06~19.4 m 及 19.85~20.47 m 处见致密灰色粘土质粉砂与灰色粉砂互层, 含铁红色锈斑; 20.8~24.5 m 黄色细砂, 含水量大, 偶见黑色有机质; 24.8~26.04 m 黄色粘土质粉砂, 略见红色, 非常致密, 极干, 偶见结核, 在 25.34 m 处见细砂透镜体, 可见灰黑色致密粉砂质粘土夹层; 铁红色锈斑、结核均为典型的陆相物质, 且该段未见有孔虫, 综上推断该层为末次冰期的陆相沉积。

U2 位于孔深 17.90~19.06 m, 高程 -16.78~

-17.94 m, 厚 1.16 m, 灰褐色粘土质粉砂, 见大量生物扰动构造, 见两个碳酸钙结核, 应为陆相冲击而来形成的。在 18.94 m 处见贝壳碎片, 并进行了 ^{14}C 测年, 测年结果为距今 7036 aBP, 该层属于海侵过程中形成的潮坪沉积。此外, 末次冰期后, 海平面上升的平均速率为 $0.96 \text{ cm/a}^{[15]}$, 根据黄河口综合调查报告^[16], 推算该孔所在位置(车子沟)的平均潮差大约为 2 m 左右, 因此海侵过程中形成的这层潮坪沉积物形成年限 = 平均潮差/海平面上升平均速率, 即 $200 \text{ cm} \div 0.96 \text{ cm/a} = 208 \text{ a} \approx 200 \text{ a}$, 而该层的沉积厚度为 1.16 m ($19.06 \text{ m} - 17.90 \text{ m} = 1.16 \text{ m}$), 其沉积速率应该为 $116 \text{ cm}/200 \text{ a} = 0.58 \text{ cm/a}$ 。推算该层顶界约为 6856 aBP。

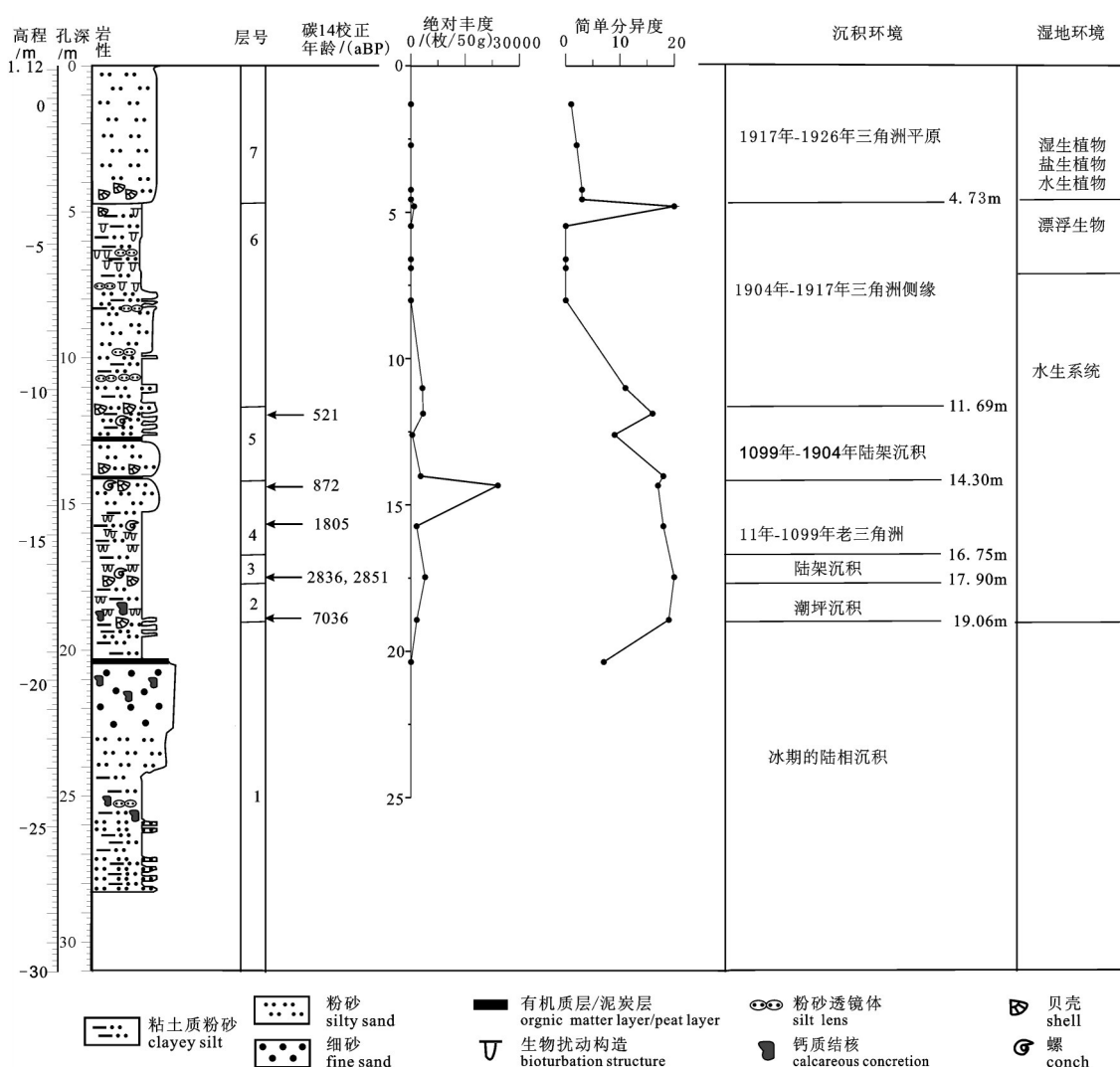


图2 黄河三角洲 ZK4 孔沉积环境及形成年代(图中及文中所用的 ^{14}C 年龄为 Calib501 软件校正后的日历年龄)

Fig.2 Depositional environment and age of sediment core ZK1 from Yellow River Delta

U3 位于孔深 16.75~17.90 m, 高程 -15.63~-16.78 m, 厚 1.15 m, 以灰褐色粘土质粉砂为主, 致密, 均一, 见大量生物扰动构造, 在 17.46 m 处见大量贝壳碎片及 2 个完整的直径约 3 mm 的螺, 贝壳 ^{14}C 校正年龄为 2851 aBP、2836 aBP (计算沉积速率时取值 2851 aBP)。该层生物扰动构造发育、含大量贝壳碎片、软体动物含量丰富, 有孔虫属种也表现为接近正常盐度的环境, 即滨海至浅海的过渡环境, 受黄河淡水的影响较小, 有孔虫的种数和丰度均较其他层位高, 指示水动力条件较为稳定、沉积速率低的陆架环境, 属于海侵过程中及海面稳定后形成的陆架沉积 (公元 11 年之前)。该层以 17.46 m 为界分为两段, 上段为 16.75~17.46 m, 沉积厚度约为 71 cm, 形成时间为 2851 aBP~公元 11 年, 即 867 年 (2851-1995+11=867 年), 其沉积速率为 71 cm/867 a=0.08 cm/a; 下段为 17.46~17.90 m, 沉积厚度仅为 44 cm, 形成时间为 2851 aBP~6856 aBP, 即 4005 年, 沉积速率为 44 cm/4005 a=0.011 cm/a, 本沉积单元的平均沉积速率为 0.045 cm/a, 可见当时的陆架沉积非常缓慢。

U4 位于孔深 14.3~16.75 m, 高程 -13.18~-15.63 m, 厚 2.65 m, 在 15.28~16.2 m 处见大量虫孔构造和贝壳碎片, 岩心致密均一, 在 15.73 m 处见一扁玉螺; 16.41~16.75 m 灰褐色黏土质粉砂, 颗粒较第 3 层更细; 该层有孔虫含量丰富; 对 14.33 m、15.73 m 处的贝壳进行 ^{14}C 测年分析, 结果显示 14.33 m 处贝壳 ^{14}C 校正年龄为 872 aBP, 即公元 1083 年, 15.73 m 处的贝壳 ^{14}C 校正年龄为 1805 aBP, 即公元 150 年, 因此推断该层为公元 11 年~1099 年的老三角洲沉积。本沉积单元的沉积速率分两段计算, 分别为 14.30~15.73 m 和 15.73~16.75 m, 计算为 (1573-1433) cm/(1805-872) a=0.15 cm/a 和 (1675-1573) cm/(150-11) a=0.73 cm/a。本沉积单元的平均沉积速率为 0.44 cm/a。

U5 位于孔深 11.69~14.30 m, 高程 -10.57~-14.16 m, 厚 3.59 m。以灰色、深灰色粉砂为主, 均匀致密, 其中 11.69~11.89 m 为土黄色粉砂, 均一, 含水量大, 在 11.88 m 处见两个毛蚶贝壳单片和碎屑; 11.89~13 m 深灰色、灰色粉砂夹大量粘土质粉砂薄夹层, 在 12.67~12.7 m 见黑色有机质; 在 14 m 处见大量贝壳碎片, 在 14.27~14.31 m 处见棕黑色有机质夹

层, 见云母; 14.33 m 处见毛蚶贝壳及织纹螺; 14.52~15.28 m 处灰色粉砂, 含水量大; 该层含大量贝壳碎片, 软体动物含量丰富, 指示该层属于 1099~1904 年陆架沉积, 底部相当于改造层; 取 11.88 m 处的毛蚶贝壳进行 ^{14}C 年龄测试, 结果显示, 11.88 m 处贝壳 ^{14}C 年龄为 521 aBP, 即公元 1434 年。推算该层的沉积速率为 (1430-1188) cm/(1434-1099) a=0.72 cm/a。

U6 位于孔深 4.73~11.69 m, 高程 -3.61~-10.57 m, 厚 6.96 m, 多见黄褐色粘土质粉砂, 4.73~4.87 m 含大量贝壳碎片和黑色有机质; 5.25~5.5 m 及 6.3~6.68 m 处多见粘土质粉砂, 黏土含量较大, 均匀密实, 见生物扰动构造; 7.45~8.5 m、10.73~11.04 m 及 11.6~11.69 m 处见灰色粉砂透镜体, 见虫孔构造; 7.9~7.96 m 处见粉砂夹层和透镜体; 4.73~5 m 有孔虫丰度和简单分异度较大, 主要的优势属种为 *A. beccarii* vars.、*A. compressiuscula*、瓷质壳和 *C. subincertum*, 平均含量分别为 47.10%、29.62%、7.54% 和 6.26%, 其中 *A. compressiuscula* 含量尚可, 说明有一定的水深, 但是样品中仍然含有大量双壳类贝壳碎片和黑色炭质木屑, 5~11.69 m 则未见有孔虫化石。根据黄河河道历史变迁记录, 推断本段为 1904~1917 年三角洲侧缘沉积^[13], 其沉积速率为 696 cm/(1917-1904) a=53.5 cm/a。根据钻孔高程推算, 在该层约 7.12 m 处水深为 -6 m, 该层见大量贝壳碎片和黑色有机质, 推测 1904—1917 年三角洲侧缘沉积为水生系统阶段末期并过渡至湿地漂浮生物生长阶段。

U7 位于孔深 0~4.73 m, 高程 1.12~-3.61 m, 厚 4.73 m, 土黄色粉砂为主, 偶见黏土质粉砂, 含水量大, 在 4.24 m 以下见大量贝壳单片, 有孔虫丰度和简单分异度非常低, 同时样品中含有大量黑色炭质木屑及贝壳碎片。根据黄河河道历史变迁记录^[13], 推断本段属于 1917—1926 年三角洲平原沉积, 沉积速率为 473 cm/(1926-1917) a=52.6 cm/a。根据野外调查发现, ZK4 孔所在区域为潮滩, 生长少量碱蓬、怪柳等植物。自本层开始, 漂浮生物生长环境结束, 进入滨海湿地环境演化阶段。

3.2 沉积物有机碳和营养成分的总体特征及相关性分析

3.2.1 总体特征

黄河三角洲 ZK4 孔沉积物的有机碳 (Corg)、营

营养成分及Al的浓度见表1。Corg、总氮(N)浓度较低,分别为0.577~8.904 mg/g、70~931 $\mu\text{g/g}$,远低于美国佛罗里达中部湿地沉积物中同名组分含量^[17];S浓度为145~1648 $\mu\text{g/g}$,远低于美国南部 Everglades 国家野生生物保护区沉积物的同名组分^[18]。沉积物中其他营养成分中的常量元素K、Ca和Mg的浓度范围分别为22.8~34.5 mg/g、51.7~177 mg/g、16.3~56.5 mg/g;营养成分中的微量元素P、Fe和Mn浓度范围依次为267~697 $\mu\text{g/g}$ 、24.9~97.5 mg/g、284.4~965.5 $\mu\text{g/g}$;营养成分中的痕量元素Cu和Zn的浓度范围分别为:7.69~40.23 $\mu\text{g/g}$ 和22~99.7 $\mu\text{g/g}$ 。这些营养成分中除P的浓度与美国佛罗里达中部湿地同名组分相当^[17],其他浓度均远高于美国佛罗里达中部湿地和路易斯安那滨海湿地的同名组分的Mehlich提取分量^[17,19]。Al的浓度高于其他元素的浓度,其值域分布范围为166~272 mg/g,研究区Al值比美国密西西比三角洲沉积物的同名组分浓度值(均值为20 mg/g)高。

3.2.2 相关性分析

对沉积物中碳、Al及营养成分浓度的相关性进行了分析,如表2所示,Corg与N的浓度呈良好的线性相关($R=0.769, p<0.01$),证实了有机质对改善土壤结构和营养成分状况方面具有重要作用^[13]。营养成分中大多数元素与Corg和Al的浓度呈显著线性相关。这也证实了高有机质土壤具有较高的营养成分吸附能力^[20]。营养成分P和S与各元素的相关性一般,这说明该区沉积物P和S含量主要受沉积物母质决定,沉积物发育程度差。

3.3 原位密度(BD)、C、N、P和S的垂向分布

ZK4孔沉积物中营养成分含量的垂向分布如图3所示。BD(原位密度)的分布范围为1.02~1.82 g/cm^3 总体变动幅度较小,11.45 m是一个明显的分界点,其以上BD随深度增大而减小,以下BD随深度增大而增大。TC、Corg、N、P、S的分布规律相似,以19.06 m为界,下层总体低于上层,19.06 m以上层位无明显变化,以下层位呈递减趋势,其峰值

表1 黄河三角洲ZK4孔岩心沉积物特征

Table 1 Element characteristics of the sediments core ZK4 from Yellow River Delta

参数	Cu	N	Mn	P	S	Zn	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	TC	Corg	pH
	μg/g					mg/g									
最大值	40.23	931	965.5	697	1648	99.7	272	97.5	56.5	177	38.9	34.5	22.9	8.904	8.8
最小值	7.69	70	284.4	267	145	22	166	24.9	16.3	51.7	18.76	22.8	6.2	0.577	7.92
平均值	23.34	353.35	583.1	560.6	536.5	60.8	222	59.45	39	96.2	28.20	28.36	14.76	3.99	8.45
标准偏差	9.19	198.38	196.8	119.7	346.6	21.3	29.95	19.12	10.2	24.25	5.42	2.99	4.33	1.83	0.195
变异系数	0.394	0.561	0.337	0.214	0.646	0.35	0.135	0.322	0.261	0.252	0.192	0.105	0.293	0.459	0.023

表2 沉积物碳、Al及营养成分浓度的相关系数

Table 2 Correlations between carbons, Al and nutrients of the sediments

	Cu	N	Mn	P	S	Zn	Al	Te	Mg	Ca	Na	K	TC	Corg
Cu	1	0.685**	0.876**	0.560**	0.116	0.942**	0.869**	0.905**	0.880**	0.690**	-0.839**	0.753**	0.764**	0.560**
N		1	0.711**	0.606**	0.573**	0.772**	0.756**	0.769**	0.799**	0.476**	-0.554**	0.721**	0.772**	0.769**
Mn			1	0.539**	0.089	0.949**	0.926**	0.967**	0.929**	0.842**	-0.925**	0.821**	0.908**	0.583**
P				1	0.366*	0.668**	0.635**	0.652**	0.727**	0.261	-0.329*	0.373*	0.495**	0.671**
S					1	0.203	0.300*	0.208	0.291*	-0.002	0.029	0.340*	0.219	0.468**
Zn						1	0.959**	0.989**	0.976**	0.717**	-0.864**	0.833**	0.852**	0.673**
Al							1	0.973**	0.964**	0.688**	-0.843**	0.893**	0.820**	0.648**
Te								1	0.980**	0.754**	-0.884**	0.850**	0.875**	0.661**
Mg									1	0.727**	-0.816**	0.794**	0.874**	0.705**
Ca										1	-0.856**	0.564**	0.874**	0.350*
Na											1	-0.775**	-0.837**	-0.414**
K												1	0.688**	0.597**
TC													1	0.582**
Corg														1

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

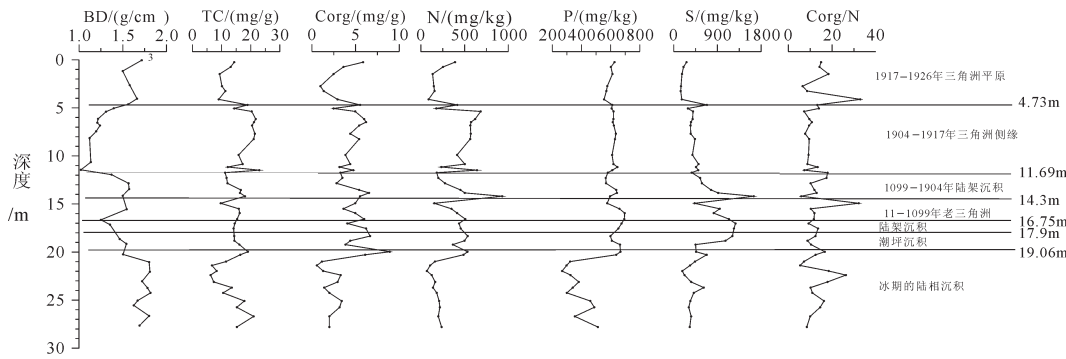


图3 C、N及P、S含量垂向分布图
Fig.3 Vertical distribution map of C, N, P, S concentrations

均出现在沉积物粒度较细的陆架沉积环境和三角洲侧缘,这是由于细颗粒沉积物所占表面积大,可以吸附大量的有机质,同时粗颗粒沉积物往往在 高能水动力环境下沉积,而颗粒较小的有机物密度较小,在高能环境下容易遭受侵蚀再搬运而迁移,在低能环境下则与细粒沉积物一起沉淀。Corg/N 比值的峰值也出现在 11.69~15.28 m 的陆架沉积环境中。Corg/N 比值被广泛用于区分沉积物有机质来源于海洋藻类还是来源于陆地^[21-27]。Bordovsky^[28]认为 Corg/N 比值<8 是典型的海洋物质;Prah^[29]给出了比值>12 代表沉积物陆源有机质的值。Corg/N 比值在 ZK4 孔沉积物中的变化,符合该孔沉积环境由陆相向海相的过渡,海侵过程中,沉积物中有机质主要来源于黄河流域,当地植被的贡献较小,进入陆架、三角洲侧缘的海相沉积环境中,海洋物质对沉积物中有机质贡献较大,Corg/N 比值<8。

3.4 碳、氮、磷的加积速率

Zk4 孔的平均沉积速率为 18.0 cm/a,三角洲侧缘的沉积速率最大,为 53.5 cm/a,海侵过程形成的陆架(老陆架)的沉积速率最小,为 0.045 cm/a。总碳的加积速率范围为 9.8~17847.86 g/(m²·a),平均加积速

率为 6834 g/(m²·a);有机碳的加积速率范围为 2.8~4599.22g/(m²·a),平均加积速率为 1711.7 g/(m²·a);氮的加积速率范围为 0.3~502.5 g/(m²·a),平均加积速率为 167 g/(m²·a);磷的加积速率范围为 0.45~502.6 g/(m²·a),平均加积速率为 254.3 g/(m²·a)。总碳、有机碳、氮和磷的加积速率都是在三角洲侧缘沉积环境中最大,在老陆架沉积环境中最小。总碳和磷的加积速率在不同沉积环境中的大小顺序均为:三角洲侧缘>三角洲平原>新陆架>潮坪>老三角洲>老陆架,有机碳和氮的加积速率在不同沉积环境中的大小顺序为:三角洲侧缘>三角洲平原>潮坪>新陆架>老三角洲>老陆架。

碳的加积速率是湿地生态系统碳循环研究的一个重要内容^[30],碳、氮、磷的加积速率与沉积速率、沉积物的 BD 以及碳、氮、磷在沉积物中的含量的相关分析结果发现(表 4),碳、氮、磷的加积速率与其在沉积物中的含量相关性并不显著,而与沉积物的沉积速率呈极显著正相关关系($R>0.89, p<0.01$),可见,沉积物的沉积速率是碳、氮、磷加积速率的主控因素。

黄河三角洲 Corg 的平均加积速率为 1711.7 g/

表 3 黄河三角洲不同沉积环境垂向沉积速率与 C 的加积速率计算
Table 3 Vertical sediment rate and accretion rate of carbon of different sediment environments in Yellow River Delta

沉积层位	沉积速率 /(cm/a)	原位密度 /(g/cm ³)	TC 含量 /(mg/g)	Corg 含量 /(mg/g)	N 含量 /(mg/g)	P 含量 /(mg/g)	TC 加积速率 /(g/(m ² ·a))	Corg 加积速率 /(g/(m ² ·a))	N 加积速率 /(g/(m ² ·a))	P 加积速率 /(g/(m ² ·a))	沉积环境
U7	52.6	1.60	12.29	3.25	0.23	0.59	8603.96	2268.35	158.97	415.61	三角洲平原
U6	53.5	1.20	18.93	4.63	0.51	0.62	14261.16	3488.11	380.6	469.05	三角洲侧缘
U5	0.72	1.50	14.30	4.51	0.42	0.60	152.52	48.11	4.54	6.39	新陆架
U4	0.44	1.40	14.28	4.87	0.36	0.66	95.31	32.54	2.39	4.39	老三角洲
U3	0.045	1.35	14.3	5.13	0.45	0.66	9.90	3.55	0.31	0.46	老陆架
U2	0.58	1.46	14.35	5.52	0.52	0.60	129.53	49.82	4.68	5.45	潮坪

表4 加积速率与其他参数的相关性分析

Table 4 Correlations between carbon accretion rate, sediment accretion rate, BD, TC and Corg of the sediments

	沉积 速率	原位 密度	TC 含量	Corg 含量	N 含量	P 含量	TC 加积速率	Corg 加积率	N 加积 速率	P 加积 速率
沉积速率	1	-0.111	0.256	-0.714	-0.358	-0.421	0.959**	0.970**	0.896*	0.998**
原位密度		1	-0.929**	-0.484	-0.751	-0.466	-0.367	-0.332	-0.508	-0.170
TC 含量			1	0.349	0.681	0.345	0.505	0.473	0.637	0.315
Corg 含量				1	0.899*	0.402	-0.524	-0.553	-0.385	-0.676
N 含量					1	0.283	-0.106	-0.141	0.054	-0.304
P 含量						1	-0.328	-0.345	-0.261	-0.402
TC 加积 速率							1	0.999**	0.985**	0.975**
Corg 加积速率								1	0.977**	0.983**
N 加积 速率									1	0.922**
P 加积 速率										1

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

($\text{m}^2 \cdot \text{a}$),而1904年以来黄河三角洲Corg的平均加积速率高达 $2878.23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (表3),远高于美国的佛罗里达湿地的 $320 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和路易斯安娜湿地的 $300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,更高于其他文献报道的Corg的累积速率 $100\sim 200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[31-34],从而表明:虽然黄河三角洲沉积物中Corg浓度较低,但由于较高的沉积速率,使Corg的加积速率较高,具有很好的固碳能力。

4 结 论

(1)ZK4孔岩心的沉积环境自下而上可分为7个沉积单元,分别是末次冰期的陆相沉积、距今约6856年以前海进时的潮坪湿地、公元11年以前的湿地边界陆架沉积、公元11年—1099年的老三角洲沉积、公元1099—1904年陆架沉积(底部相当于改造层)、1904—1917年湿地形成的初期的三角洲侧缘沉积、1917—1926年形成的湿地三角洲平原沉积。

(2)湿地在地质演化历史过程中,其沉积物总碳和有机碳与除S和P元素外的各营养成分都呈很好的线性相关。

(3)总碳、有机碳、氮和磷的加积速率都是在三角洲侧缘沉积环境的湿地中最大,在老陆架沉积环境中最小,且碳、氮、磷的加积速率与沉积物的沉积速率呈极显著正相关关系($R>0.89, p<0.01$),说明沉积物的沉积速率是碳、氮、磷的加积速率的主控因素。

(4)虽然现代黄河三角洲湿地,由于其气候干燥、降水少,Corg浓度相对较低,但由于沉积物的高沉积速率,使现代黄河三角洲Corg的平均加积速率达到 $2878.23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,远高于世界其他高Corg浓度

的湿地,使该地质体保存了巨大的碳库。

致谢:本文在写作过程中得到了薛春汀教授的指导和帮助,审稿专家和编辑部李亚萍老师提出了宝贵修改意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Fei Lu et al. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 463-469.
- [2] Brevik E C, Homburg J A. A 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex[J]. Southern California, USA. Catena, 2004, 57(3): 221-232.
- [3] Peter Smith. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context[J]. Agronomy, 2004, 20 (3): 229-236.
- [4] Shiping Zhang, Lei Wang, JiaJun Hu et al. Organic carbon accumulation capability of two typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(1): 87-94.
- [5] Ye S Y, Law E A, Wu Q et al. Pyritization of trace metals in estuarine sediments and the controlling factors: a case in Jiaojiang Estuary of Zhejiang Province, China [J]. Environ. Earth Sci., 2010, 61(5): 973-982.
- [6] Ye S Y, Laws E A, Zhong S et al. 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, 2011, 62(5): 934-941.

- [7] 余雪洋, 叶思源, Nicholas Lawrence Yuknis, 等. 辽河三角洲翅碱蓬湿地不同植被覆盖度下的土壤对碳的扣留[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 648–657.
- Yu Xueyang, Ye Siyuan, Nicholas Lawrence Yuknis, et al. Carbon sequestration along vegetation coverage gradient in the Suaeda salsa marsh from the Liaohe Delta[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 648–657(in Chinese with English abstract).
- [8] 赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 181–185.
- Zhao Yiyang, Wu Mingcai, Li Anchun, et al. Geochemistry of muds along the coast of China and their significance[J]. Geology in China, 2002, 29(2): 181–185(in Chinese with English abstract).
- [9] 文冬光, 郭建强, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存研究进展[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1716–1723.
- Wen Dongguang, Guo Jianqiang, Zhang Senqi, et al. The progress in the research on carbon dioxide geological storage in China[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1716–1723(in Chinese with English abstract).
- [10] 范德江, 杨作升, 郭志刚. 中国陆架 ^{210}Pb 测年应用现状与思考[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 297–302.
- Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. Review of ^{210}Pb dating in the continental shelf of China[J]. Advance In Earth Sciences, 2000, 15(3): 297–302(in Chinese with English abstract).
- [11] 丁玉蓉, 叶思源, 赵全升. 黄河三角洲新生湿地土壤对营养成分和碳的扣留[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 183–189.
- Ding Yurong, Ye Siyuan, Zhao Quansheng. Nutrient sand carbon sequestration the newly created wetland of Yellow River Delta[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 183–189(in Chinese with English abstract).
- [12] Berner R A. Sedimentary pyrite formation. Am. J. Sci., 1970, 268: 1–23.
- [13] 薛春汀, 叶思源, 高茂生, 等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(1): 117–124.
- Xue Chunting, Ye Siyuan, Gao Maosheng, et al. Determination of depositional age in the Huanghe Delta in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(1): 117–124(in Chinese with English abstract).
- [14] 汪品先, 闵秋定, 卞云华. 南黄海西北部底质中有孔虫、介形虫分布规律及其地质意义[M]//汪品先. 微体古生物论文集. 北京: 海洋出版社, 1985: 61–83.
- Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua. Distribution of foraminifera and ostracoda in bottom sediments of the northwestern oart of the southern yellow sea and its geological significance[M]//Wang Pinxian. Proceedings of Micropaleontology. Beijing: Oceanic Press, 1985: 61–83. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hanebuth Till J J, Harold K. Voris, Yusuke Yokoyama et al. Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications[J]. Earth- Science Reviews, 2011, 104(1–3): 92–110.
- [16] 山东省科学技术委员会. 黄河口调查区综合调查报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 25–26.
- Shandong Province Science and Technology Committee. Investigation Report of Yellow River Estuary[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 25–26 (in Chinese).
- [17] Nair V D, Graetz D A, Reddy K R et al. Soil development in Phosphate-mined Created Wetlands of Florida, USA[J]. The Society of Wetland Scientists, Wetlands, 2001, 21(2): 232–239.
- [18] Craft C B, Richardson C J. Recent and long-term organic soil accretion and nutrient accumulation in the Everglades[J]. Soil Science Society of American Journal, 1998, 62(3): 834–843.
- [19] Hatton R S, Patrick W H, DeLaune R D. Sedimentation, nutrient accumulation, and early diagenesis in Louisiana Barataria Basin coastal marshes in V. S. Kennedy (ed.). Estuarine Comparisons[M]. Academic Press, New York, NY, USA, 1982: 255–267.
- [20] Azevedo W R, Faquin V, Femandes L A. Boron absorption in lowland soils flux southern of the state of Minas Gerais, Brazil[J]. Pesquisa AgTopecuaria Brasileira, 2001, 36(7): 957–964.
- [21] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. Organic Geochemistry, 1997, 27(5–6): 213–250.
- [22] Prah F G, Ertel J R, Goni M A, et al. Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(14): 3035–3048.
- [23] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 1994, 38(3): 219–233.

- [24] Rittenberg K C, Goni M A. Phosphorus distribution, C:N:P ratios, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in arctic, temperate, and tropical coastal sediments: Tools for characterizing bulk sedimentary organic matter[J]. *Marine Geology*, 1997, 139:123–145.
- [25] Andrews J E, Greenaway A M, Dennis P F. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica, Estuarine[J]. *Coastal and Shelf Science*, 1998, 46:743–756.
- [26] Muller A, Mathesius U. The paleoenvironments of coastal lagoons in the southern Baltic Sea, I. The application of sedimentary Corg/N ratios as source indicators of organic matter[J]. *Palaeogeography. Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 145: 1–16.
- [27] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114:289–302.
- [28] Bordovsky O K. Accumulation and transformation of organic substances in marine sediments[J]. *Marine Geology*, 1965, 3:3–114.
- [29] Prahl F G, Bennett J T, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44:1967–1976.
- [30] 叶思源, 丁喜桂, 袁红明, 等. 我国滨海湿地保护的地质问题与研究任务[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(2):1–7.
- Ye Siyuan, Ding Xigui, Yuan Hongming, et al. Coastal wetland protection in China: Geological issues and research tasks[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(2):1–7 (in Chinese with English abstract).
- [31] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. *Global Biogeochem*, 2003, 17:1111–1121.
- [32] Turner R E, Swenson E M, Milan C S. Organic and inorganic contributions to vertical accretion in salt marsh sediments[C]// Weinstein M, Kreeger D A (eds.). *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 2000:583–595.
- [33] Bridgman S D, Megonigal J P, Keller J K, et al. The carbon balance of North American wetlands[J]. *Wetlands*, 2006, 26:889–916.
- [34] Craft C B. Freshwater input structures soil properties, vertical accretion, and nutrient accumulation of Georgia and U.S. tidal marshes[J]. *Limnol Oceanogr*, 2007, 52:1220–1230.