

doi:10.3799/dqkx.2014.043

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

赵广明^{1,2,3}, 叶思源^{1,2,3*}, 丁喜桂^{1,2,3}, 袁红明^{1,2,3}, 王锦^{1,2,3}

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. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071

3. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 为了研究黄河三角洲全新世不同古环境中的碳埋藏速率, 于2007年在研究区布设了一口30.3 m浅钻, 以对其进行了沉积学观测以及含水量、有机碳、总碳和营养成分测试分析。通过地层分析, 将其全新世地层划分为8种沉积环境。运用历史地理学和沉积地质学综合分析方法对现代黄河三角洲沉积环境中部分层位进行了精确的年代划分, 其他层位也进行了年代推测。同时利用确定的年代计算了不同沉积环境碳的埋藏速率。结果表明: 总碳和有机碳与各营养元素都呈很好的线性相关; 沉积物的沉积速率是有机碳和总碳埋藏速率的主控因素; 虽然沉积物 C_{org} 浓度相对较低, 但由于其高沉积速率, C_{org} 的平均埋藏速率达到 $1\ 331\ g/(m^2 \cdot a)$, 远高于世界其他高 C_{org} 浓度的湿地, 因此是很好的碳汇地质体。

关键词: 古环境演化; 碳埋藏速率; 沉积; 环境地质; 黄河三角洲。

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2014)04-0451-11

收稿日期: 2013-06-02

Sedimentary Environmental Partitioning of Holocene Strata and Assessment of Carbon Burial Rate of Various Paleo-Environments in the Yellow River Delta

Zhao Guangming^{1,2,3}, Ye Siyuan^{1,2,3*}, Ding Xigui^{1,2,3}, Yuan Hongming^{1,2,3}, Wang Jin^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geologic Survey, Qingdao 266071, China

2. The Key Laboratory Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: In order to study the carbon burial rate of various paleo-environments of Holocene strata in the Yellow River delta (YRD), one 30.3-meter-sediment core, obtained from YRD in 2007, is analyzed for sedimentary characteristics, water content, organic carbon, total carbon and nutritional components in this paper. By analyzing the strata sequence, the Holocene strata are divided into eight kinds of sedimentary environments. Comprehensive analysis method of historical geography and sedimentary geology is used to determine the precise depositional age of the modern Yellow River delta (MYRD) while pre-MYRD age is deduced. The carbon burial rates of various sedimentary environments are calculated based on the certain depositional age. The results show that the nutrient elements are well related to total carbon and organic carbon, and sediment rate is the main controlling factor of the accretion rate of organic carbon and total carbon. Although the carbon concentration is remarkably lower in the sediments, the average carbon accretion rate reaches $1\ 331\ g/(m^2 \cdot a)$ because of high sedimentation rate, which is significantly higher than that of the wetlands with high carbon concentration. It is concluded that the MYRD is likely the major sink of carbon.

Key words: paleoenvironment evolution; carbon burial rate; sedimentology; environmental geology; the Yellow River delta.

基金项目: 国土资源部公益性行业基金(No.201111023); 大地调查项目(No.1212010611402); 国家自然科学基金(No.41240022); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室基金(No.MRE2012030); 海洋地质保障工程项目(No.GZH201200503)。

作者简介: 赵广明(1984-), 男, 助理研究员, 硕士, 从事环境地质研究。E-mail: guangming_210@163.com

* 通讯作者: 叶思源, E-mail: siyuanye@hotmail.com

0 引言

沉积物对碳的扣留和埋藏是全球碳收支平衡预算以及在地质历史时期内碳循环研究的重要内容,并引起了全球科学家的广泛兴趣(郭志刚等,1999;Brevik and Homburg, 2004; Smith, 2004; Duan *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2010, 2011; Zhang *et al.*, 2011).河口沉积物是海岸带碳的重要贮存库之一,是全球碳循环的一个至关重要的子系统.由于人类活动的影响以及河流径流向其不断输送丰富的营养物质,河口地带具有很高的生产力,并通过水柱中浮游生物残体的沉降形成其内生有机碳.该内生有机碳很可能与来自流域沉积物中粉粘土矿物携带的碳一起汇聚于河口生态系统(丁玉蓉等, 2012).其中大部分有机碳通过生物地球化学过程由水柱释放返回大气中,只有较少部分的碳与沉积物一起被埋藏.河口碳的埋藏通量是生物地球化学作用与沉积作用竞争的结果.定量分析河口碳埋藏速率涉及到河口沉积环境的划分与年代的确定.

黄河三角洲古环境演化的研究很多(鲜本忠和姜在兴,2005;徐家声等,2006; Liu *et al.*, 2009),但对现代黄河三角洲的沉积环境划分还没有统一的方法.Bornhold *et al.*(1986)和 Prior *et al.*(1986)都将现代黄河三角洲的水下三角洲分为三角洲平台、三角洲前缘斜坡和三角洲隆起,这样的划分只反映了河口前方的地貌变化,而对两侧并不适用,很难将上述划分应用于钻孔岩心的沉积环境分析.成国栋和薛春汀(1997)根据河控三角洲传统的沉积环境划分并结合黄河三角洲河口侧部黏土质粉砂特别发育的特点对现代黄河三角洲沉积环境进行了划分,本研究采用该沉积环境划分模式对 ZK2 孔进行沉积层序分析.

虽然黄河三角洲地区全新世地层研究的成果很多,但现代黄河三角洲沉积物的年代研究不够详细,很多沉积年代的研究利用了现代的同位素方法,存在很多弊端(范德江等,2000).现代黄河三角洲是1855年以后形成的,至今也只有150多年的历史,这已经不在 ^{14}C 测年的有效范围之内.虽然 ^{210}Pb 是百年尺度内测年的一种好方法,但需要具有稳定的物源、稳定的沉积速率及沉积后未受改造.冰川和湖泊沉积更易满足这些条件,陆架沉积物只能基本满足(范德江等,2000),黄河三角洲分流河道频繁改动,在给定的区域内不能保持稳定连续地接受沉积物,常常出现沉积间断,沉积年代也不连续,无法满

足上述条件.然而,黄河分流河道摆动有清楚的历史记录,1934年以来的记录尤其清楚,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(2009)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.作者在此方法基础上,结合遥感影像和海平面变化等资料,来确定不同沉积环境的沉积年代.

本文根据2007年在黄河三角洲布设的一口30.3 m浅钻的沉积学观测,将其全新世地层自上而下划分为8个沉积环境单元,同时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不同沉积环境部分进行了精确的年代划分,对其他层位也进行了年代推测.在此基础上结合现代物理化学参数测试成果,计算了全新世不同古环境中的碳埋藏速率.

1 材料与方法

1.1 样品获取

研究所用 ZK2 孔沉积柱样,系中国地质调查局2007年执行“黄河三角洲滨海湿地综合地质调查与评价”项目所获样品,孔深30.3 m,岩心直径76 mm.钻机型号为 XY-100,为了确保有足够的动力进行较长的单回次取心,选择了100 m钻机.该孔位于东营黄河三角洲清水沟流路现行河口附近($119^{\circ} 13' 32''$, $37^{\circ} 42' 53''$)(图1),孔口高程2.53 m,室内对该岩心进行了详细的描述.

1.2 沉积学观测与年代确定方法

根据分流河道变迁图、不同年代的地形图和海区水深图,可判断沉积环境、追踪物质来源、判断沉积物是从哪一个分流河道输送来的,并确定该分流河道的活动年代就是该层沉积物的年代.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黏土质粉砂之上,年轻的三角洲侧缘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,根据历史上河口的位置及海区水深图可以准确确定沉积年代.高程是沉积环境和年代判断的另一个非常重要的影响因素(薛春汀等,2009).

1.3 原位密度

用黄河三角洲获得的70个钻孔样品的重量含水量与原位密度(BD)的值作拟合曲线,获得计算原位密度的拟合方程: $BD(\text{g}/\text{cm}^3) = 2.3111 - 0.0353[\text{含水量}(\%)]$, $R^2 = 0.888$, $p < 0.01$, $n = 70$.

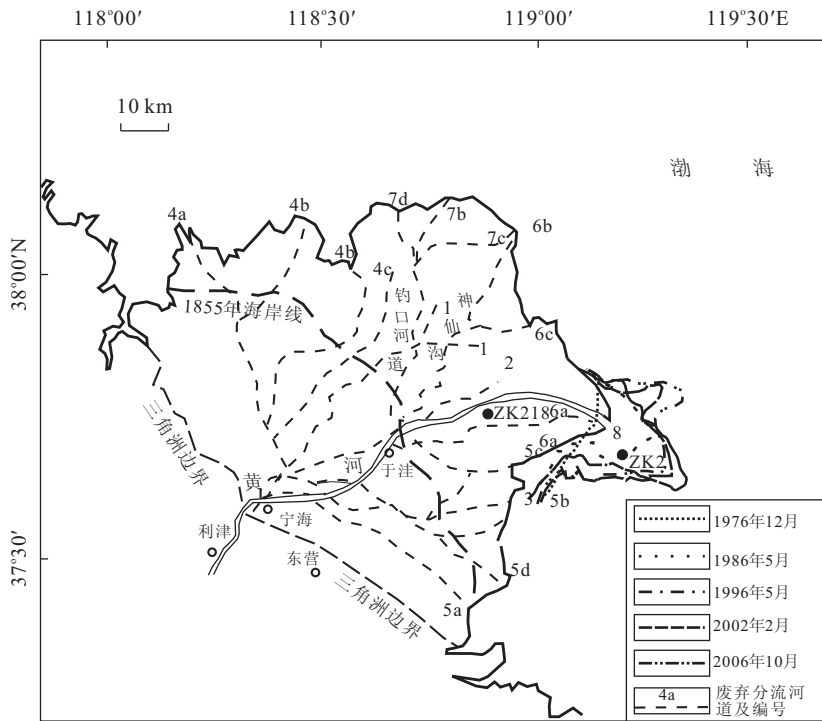


图 1 钻孔位置及现代黄河三角洲分流河道历史变迁

Fig.1 Location of the core and modern Yellow River channel variance history

分流河道时间顺序以阿拉伯数字表示,其后的英文字母表示分流河道活动的先后顺序.1.1855—1889年;2.1889—1897年;3.1897—1904年;4a.1904—1917年;4b.1917—1926年;4c.1926—1929年;5a-5d.1929—1934年;6a.1934—1953年;6b.1934—1960年;6c.1960—1964年;7a.1964—1966年,处于漫流和频繁改道状态,未标明具体位置;7b.1967—1972年;7c.1972—1974年;7d.1974—1976年;8.1976年至今.图中整个三角洲海岸线为1984年高潮线的位置,现行河口海岸线分别为1976年12月、1986年5月、1996年5月、2002年2月和2006年10月5个时期平均低潮线位置,数据是通过这5年的landsat卫星遥感图像解译所得

由于笔者研究的 ZK2 孔的含水量分布是实测值,根据上述拟合方程可计算出所需的 BD . 求出的原位密度将用于碳埋藏速率的计算.

1.4 碳埋藏速率

每个样品中碳的百分含量与该样品的密度和沉积速率的乘积便是该时段内碳的埋藏速率,计算公式为:

$$BF = C_i \times S \times BD \times 10,$$

式中: BF 为沉积物中研究对象的埋藏速率 ($g / (m^2 \cdot a)$); C_i 为沉积物中研究对象的含量 (mg / g); S 为沉积物的沉积速率 (cm / a); BD 为沉积物的原位密度 (g / cm^3).

1.5 总碳 (TC)、有机碳 (C_{org})、总氮 (TN) 及营养元素分析

样品经烘干 ($60^\circ C$)、研磨,分析 pH、TC、TN 及营养成分. pH 用电位法测定. TC 用非水容量法测定. 将少量样品在 $1000^\circ C$ 灼烧 1 h, 加入少量线性氧化铜为助溶剂, 经高温管式炉 $1100 \sim 1150^\circ C$ 分解, 产生的二氧化碳为样品中的全碳量, 经碳硫分析仪

非水滴定液吸收, 并根据试液颜色变化进行滴定测定全碳量. 测定沉积物样品中的有机碳 (C_{org}) 含量, 称取 $0.1500 \sim 0.3000 g$ 样品, 置于经 $1000^\circ C$ 灼烧 1 h 的瓷舟中, 先用 2% 稀磷酸处理, 烘箱 $80^\circ C$ 烘干, 再用 5% 稀磷酸处理, 烘箱 $80^\circ C$ 烘干, 反复处理至气泡冒尽, 除去样品中的无机碳, 然后用非水容量法测定. 营养成分 TN 用凯氏氮法测定; P 和 S 量及金属元素 Cu、Mn 和 Zn 均用粉末压片 X 射线荧光光谱法测定; Mg、Ca 和 K 量的测定, 先用粉末压片 X 射线荧光光谱法测定 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、MgO、CaO、 K_2O 的量, 再通过分子量计算金属元素的量; Mo 元素用电感耦合等离子体质谱法测定. 测试精度优于 5%.

1.6 数据处理与制图

数据的相关性分析采用 Person 相关系数评价. 遥感图像海岸线提取使用的是 ERDAS IMAGINE 9.1 软件, 图件采用 CorelDRAW、Mapinfo Professional 7.0、Grapher4.0 等绘图软件完成.

2 结果与讨论

2.1 ZK2 孔全新世以来的沉积环境与沉积年代确定

ZK2 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距今 9602 年前的河流沉积(U1)、距今 9602—距今 9402 年潮坪沉积(U2)、距今 9402—1855 年陆架沉

积(U3)、1889—1904 年;1931—1933 年前三角洲沉积(U4);1934—1938 年、1947—1953 年三角洲前缘沉积(U5);1960—1964 年三角洲侧缘沉积(U6);1976—1986 年三角洲前缘沉积(U7);1986 年以来三角洲平原沉积(U8)等 8 个沉积单元(图 2)。

2.1.1 距今 9602 年前的河流沉积(U1) 该层位于孔深 22.6~30.3 m、高程-20.07~-27.77 m 处,其厚 7.7 m,浅黄色粉砂,22.6~23.3 m 见大量生物扰动构造,虫孔及大量钙质结核;25.16~30.30 m 以下为黄色细砂,含水量较大,见大量锈斑,在 25.20 m

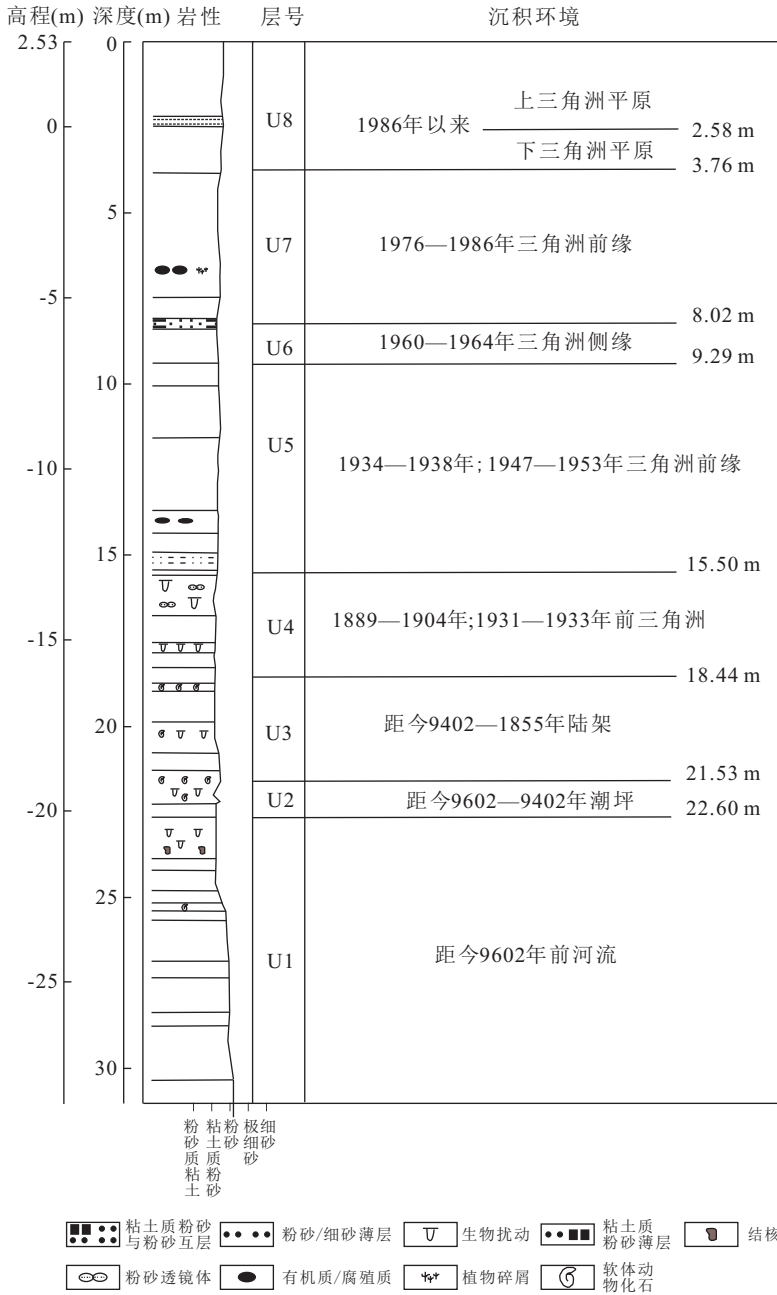


图 2 黄河三角洲北部 ZK2 孔全新世沉积环境及形成年代

Fig.2 Holocene depositional environment and age of ZK2 in the northern Yellow River delta

处见淡水螺、锈斑、钙质结核、淡水螺均是海侵前陆相沉积物中常见的物质,因此可推断本层为全新世早期的河流沉积。据与 ZK2 孔附近的 ZK218 孔河流沉积与上层潮坪沉积的界限处样品经校正后的¹⁴C 测年为 9602 a B.P. (王宏和范昌福, 2005), 笔者估算该层为距今 9602 年之前形成河流沉积。

2.1.2 距今 9602—距今 9402 年的潮坪沉积 (U2)

该层位于孔深 21.53~22.60 m、高程 -19.00~-20.07 m 处, 其厚 1.07 m, 深灰色粘土质粉砂, 见生物扰动构造, 22.15 m 处见贝壳碎片。本层生物扰动构造发育, 含贝壳及贝壳碎片, 属于海侵过程中形成的潮坪沉积。对于该层沉积物形成的年限, 笔者尝试用以下方法进行推算。Hanebuth *et al.* (2011) 通过收集分析南海南部巽他陆架 (Sunda Shelf) 的钻孔资料, 重建了距今 21000 年到现在海平面的变化历史, 从中笔者看到在此期间海平面基本在不断上升, 上升速率也相对比较均匀, 距今 20000 年海平面大约在 -125 m 左右, 到距今 7000 年左右, 海平面上升到 0 m 的位置, 笔者估算海平面上升的平均速率为 $12\ 500\text{ cm} \div 13\ 000\text{ a} = 0.96\text{ cm/a}$ 。渤海西部的平均潮差为 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 $200\text{ cm} \div 0.96\text{ cm/a} = 208\text{ a} \approx 200\text{ a}$, 即该层潮坪沉积形成的时间大约为距今 9602—距今 9402 年。

2.1.3 距今 9602—1855 年的陆架沉积 (U3)

该层位于孔深 18.44~21.53 m, 高程 -15.91~-19.00 m 处, 厚 3.09 m, 多见灰色粘土质粉砂, 在 18.74 m、20.20 m 及 20.50 m 处见贝壳碎片, 见生物扰动构造; 在 21.50 m 处见完整的红带纹织螺和扁玉螺。在 20.20 m 处取贝壳样品进行¹⁴C 测年, 结果显示年龄为 1 376 a B.P., 推测可能是老三角洲沉积, 然而考虑到 ZK2 孔所在位置距 1855 年海岸线较远, 位于现行河口附近, 内陆向潮坪沉积和陆架沉积厚度基本逐渐变小, 黄河三角洲沉积厚度逐渐变大, 老黄河三角洲沉积物越来越薄, 离 1855 年海岸线内侧数千米处三角洲的厚度也只有 12 m (薛春汀等, 2009), ZK2 孔距 1855 年海岸线约为 45 km, 老黄河三角洲的沉积物不会到达这里, 因此, 推断此层位为海侵体系域和高位体系域形成的陆架沉积, 其形成的年代范围为距今 9402—1855 年。该层陆架的沉积厚度为 3.09 m, 与位于黄河三角洲埕岛海域附近的 HB1 孔 (Liu *et al.*, 2009) 的 3.24 m 和离海更远的 ZK113 孔 (薛春汀等, 2008) 的 2.8 m 陆架沉积厚度相当。

2.1.4 1889—1904 年和 1931—1933 年的现代黄河三角洲的前三角洲沉积 (U4)

该层位于孔深 15.50~18.44 m、高程 -12.97~-15.91 m 处, 其厚 2.94 m, 土黄色粘土粉砂, 15.50~16.70 m 均一致密, 见多处灰黑色炭质夹层, 偶见透镜体和虫孔; 17.42~17.90 m 见棕色粘土质粉砂, 在 17.64 m 处夹灰黑色炭质层, 见大量生物扰动构造。该层位整体较上、下层沉积物都细 (是所列岩心中颗粒最细的), 颗粒如此细的沉积物在高程 -12.97~-15.91 m 的位置上出现只能是前三角洲的沉积。由图 1 可以看出, 1885—1889 年、1897—1904 年和 1904—1917 年黄河河口位置距离 ZK2 孔较远; 1904—1929 年黄河在西北部入海, 它们形成的水下三角洲不会到达这里; 1889—1904 年黄河河口位置距 ZK2 相对较近, 因此该层底部为 1889—1904 年的前三角洲沉积。1929 年 8 月, 黄河由支脉沟河口入海 (图 1 中 5a), 后在乱井子以南改东南行入海 (图 1 中 5b); 1931—1933 年黄河改道宋春荣沟入海 (图 1 中 5c); 1933—1934 年, 黄河再次改道在青坨子入海 (图 1 中 5d) (庞家珍和司书亨, 1979); 图 1 中 5a、5b、5d 河口都距 ZK2 孔位置太远, 只有 5c 河口距其相对较近, 因此, 该层顶部为 1931—1933 年的前三角洲沉积。另外, 参照王志豪和黄世光 (1988) 换算的 1934 年测量的歧口至龙口港 1:150 000 海图中 ZK2 孔位海底的高程大约是一 13 m (以平均海面为深度基准面, 水深为一 13 m), 与该层顶界高程 -12.97 m 接近。

2.1.5 1934—1938 年和 1947—1953 年的现代黄河三角洲的三角洲前缘沉积 (U5)

该层位于孔深 9.29~15.50 m、高程 -6.76~-12.97 m 处, 其厚 6.21 m, 以土黄色粉砂为主, 12.20 m 处见泥砾和红黄色粘土薄夹层, 在 12.48 m 及 12.73 m 处亦见粘土薄夹层; 13.78 m 处见黑色有机质, 14.44~15.40 m 土黄色粉砂均匀, 较密实; 在 15.10~15.20 m 处见粘土质粉砂薄夹层。该层位较下层前三角洲沉积相粒度变粗, 根据水下三角洲的上下叠置关系, 该层位应为三角洲前缘沉积。1934 年 8 月, 黄河形成甜水沟、神仙沟、宋春荣沟三股入海之势; 1947 年 3 月, 黄河入长江 (邹逸麟等, 1982); 1947 年 3 月, 黄河复归山东入渤海, 仍是甜水沟、神仙沟、宋春荣沟三条分流入海的形势; 1953 年 7 月, 开始神仙沟独流入海, 因此这段三角洲前缘沉积为距离 ZK2 孔位置较近的甜水沟流路 (图 1 中 6a) 形成的, 其形成的年代为 1934—1938 年和 1947—1953 年。

2.1.6 1960—1964 年的现代黄河三角洲的三角洲侧缘沉积(U6) 该层位于孔深 8.02~9.29 m, 高程 -5.49~-6.76 m 处, 厚 1.27 m, 多见灰色粘土质粉砂, 在 9.15~9.29 m 处, 含大量粘土薄夹层, 沉积物粒度较下层的三角洲前缘相变细, 黏土含量高, 且含水量大。1960 年形成神仙沟东分流(图 1 中 6c), 与老的北分流(图 1 中 6b)同时活动(庞家珍和司书亨, 1979); 1961 年 6 月~1964 年东分流汉道成为主道, 其在河口南侧形成的三角洲侧缘沉积能够到达 ZK2 孔位置, 因此, 该层为 1960—1964 年三角洲侧缘沉积。

2.1.7 1976—1986 年的现代黄河三角洲的三角洲前缘沉积(U7) 该层位于孔深 3.76~8.02 m、高程 -1.23~-5.49 m 处, 其厚 4.26 m, 在 6.3 m 处见一光滑蓝蛤, 6.67 m 处见黑色腐殖质, 土黄色粉砂与灰黑色粉砂混杂, 含粘土, 沉积物粒度较下层的三角洲侧缘变粗, 与第 U5 层相似。1976 年, 黄河东流经清水沟入海, 但由图 1 可知, 1976 年的海岸线并没有到达 ZK2 孔的位置, 1986 年的低潮线在 ZK2 附近, 所以该层为 1976—1986 年三角洲前缘沉积。

2.1.8 1986 年以来的现代黄河三角洲的三角洲平原沉积(U8) 该层位于孔深 0~3.76 m、高程 2.53~-1.23 m, 其厚 3.76 m, 该层以土黄色粉砂为主, 2.1 m 以上较松散, 含水量大; 3.30 m、3.76~4.60 m 处见大量气孔构造, 可能为决口扇的潮间带沉积。本层为 1986 年以来的三角洲平原沉积。据《中国海岸带和海涂资源综合调查图集山东省第一分册》黄河口潮汐资料, ZK2 孔所在位置平均潮差约为 1.18 m, 因此第 U8 层可分成两段, 即 2.58~3.76 m 为下三角洲平原, 0~2.58 m 为上三角洲平原。

2.2 TC 和 C_{org} 与其他元素的相关分析

ZK2 孔沉积物的有机碳(C_{org})、营养成分及 Al 的浓度见表 1。 C_{org} 、总氮(TN)在研究区的浓度较低, 比美国佛罗里达中部湿地的低 5~100 倍(Nair *et al.*,

2001), 其浓度范围分别为 0.87~13.06 mg/g、98~708 mg/kg; S 浓度为 215.58~1 638.82 mg/kg, 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(Craft and Richardson, 1998)。沉积物中其他营养元素中的常量元素 K、Ca 和 Mg 的浓度范围分别为 16.37~22.70 mg/g、29.97~72.59 mg/g、10.43~19.79 mg/g; 营养元素中的微量元素 P、Fe 和 Mn 浓度范围依次为 374.69~660.29 mg/kg、17.67~44.57 mg/g、318.56~984.35 mg/kg; 营养元素中的微量元素 Cu 和 Zn 的浓度范围分别为: 9.76~41.02 mg/kg、34.79~97.31 mg/kg。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外(Nair *et al.*, 2001), 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(Hatton *et al.*, 1982; Nair *et al.*, 2001)。Al 的浓度高于其他元素的浓度, 其值域分布范围为 53.36~73.62 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。

由表 2 可知, 营养成分除 P 和 S 外, K、Ca、Mg、Fe、Zn、Mn、Cu、TN 与 TC 呈极显著的线性相关($R^2 > 0.85$, $p < 0.01$) (进行相关性分析的各个元素样品个数都为 46 个), 与 K 呈显著线性相关($R^2 > 0.79$, $p < 0.01$)。各营养元素, 除 P 和 Ca 外, 与 C_{org} 呈显著线性相关($R^2 > 0.5$, $p < 0.01$), 这也证实了高的 TC 和 C_{org} 沉积物具有较高的营养元素吸附能力(Azevedo *et al.*, 2001), 然而 P 与各元素的相关性一般, 这说明该区沉积物 P 含量主要受沉积物母质决定, 土壤发育程度差。

2.3 TC 和 C_{org} 的垂向分布特征分析

ZK2 孔沉积物中营养元素的含量在剖面的变化趋势如图 3 所示。该孔沉积物 TC 是 C_{org} 的 2~10 倍。显然, 沉积物中碳的组成以无机碳为主, 应该是来自黄河流域的风化剥蚀产物。TN、TC 具有相似

表 1 黄河三角洲沉积物元素特征

Table 1 Element characteristics of the sediments in Yellow River delta

	Cu(mg/kg)	Mn(mg/kg)	TN(mg/kg)	P(mg/kg)	S(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Al(mg/g)
平均值	17.86	485.16	256.11	564.00	421.65	51.98	59.16
STDEV	7.094	152.808	153.473	60.812	278.550	15.668	5.854
	Fe(mg/g)	Mg(mg/g)	Ca(mg/g)	K(mg/g)	TC(mg/g)	C_{org} (mg/g)	pH
平均值	25.41	13.15	43.60	18.27	13.08	2.68	8.66
STDEV	6.551	2.335	8.482	1.642	4.236	2.013	0.119

注: STDEV. 标准偏差。

表 2 沉积物碳、Al 及营养元素浓度的相关性分析
Table 2 Correlations between carbons, Al and nutrients of the sediments

	Cu	Mn	TN	P	S	Zn	Al	Fe	Mg	Ca	K	TC	C _{org}
Cu	1	0.961(**)	0.883(**)	0.493(**)	0.300(*)	0.971(**)	0.910(**)	0.960(**)	0.931(**)	0.815(**)	0.860(**)	0.899(**)	0.506(**)
Mn		1	0.887(**)	0.443(**)	0.280	0.978(**)	0.925(**)	0.977(**)	0.952(**)	0.884(**)	0.873(**)	0.935(**)	0.495(**)
TN			1	0.580(**)	0.384(**)	0.914(**)	0.843(**)	0.919(**)	0.899(**)	0.763(**)	0.782(**)	0.903(**)	0.575(**)
P				1	0.201	0.555(**)	0.403(**)	0.548(**)	0.471(**)	0.238	0.317(*)	0.447(**)	0.279
S					1	0.376(*)	0.497(**)	0.390(**)	0.499(**)	0.132	0.552(**)	0.349(**)	0.622(**)
Zn						1	0.946(**)	0.995(**)	0.970(**)	0.821(**)	0.893(**)	0.926(**)	0.550(**)
Al							1	0.946(**)	0.956(**)	0.721(**)	0.972(**)	0.856(**)	0.590(**)
Fe								1	0.974(**)	0.837(**)	0.891(**)	0.938(**)	0.558(**)
Mg									1	0.834(**)	0.903(**)	0.932(**)	0.639(**)
Ca										1	0.640(**)	0.914(**)	0.439(**)
K											1	0.791(**)	0.566(**)
TC												1	0.576(**)
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。

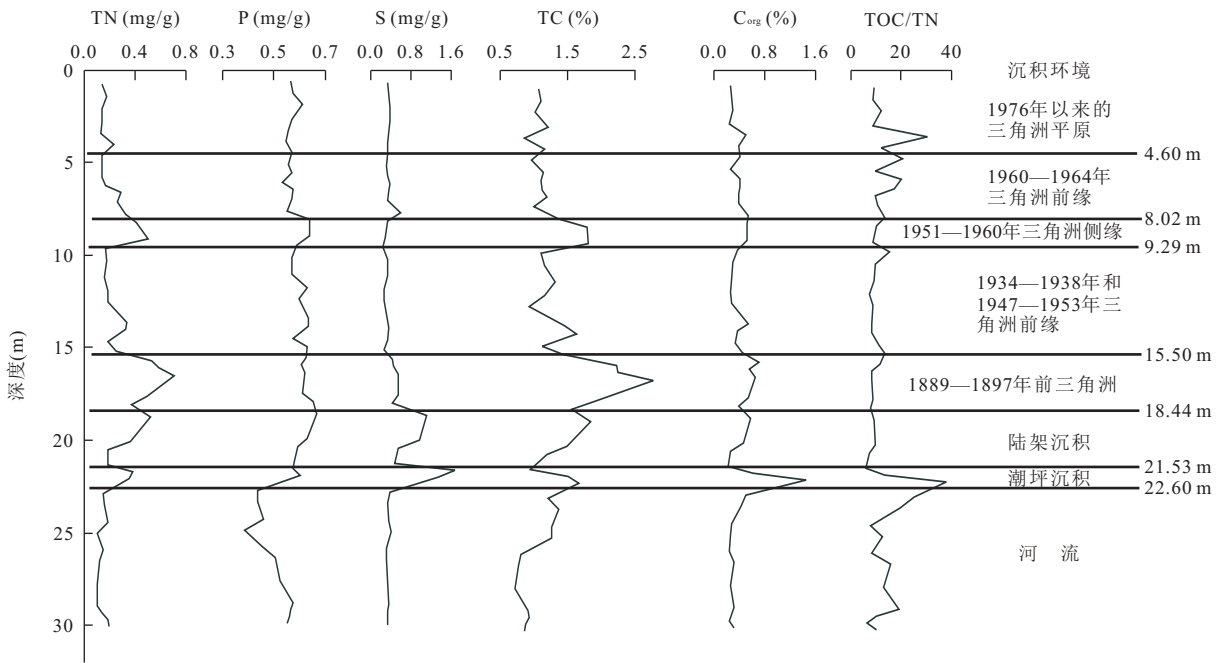


图3 碳氮及P、S含量垂向分布

Fig.3 Vertical distribution map of C, TN, P, S concentration

的剖面变化趋势,都是在 18.78 m 外的陆架沉积出现峰值,在 9.13 mm 处出现次峰值,18.78 m 以上含量随深度增加逐渐增大,而 18.78 m 以下含量呈逐渐减少的趋势.S 和 C_{org} 含量在 21.5~22.5 m 层位出现一个极值,其他层位含量在剖面上基本比较稳定,含量变化不大.P 在 21.5~22.5 m 层面以上含量基本稳定,但下层含量变化剧烈.

TC、TN 含量的高值出现在沉积物以细颗粒为主的三角洲侧缘和前三角洲,这是由于细颗粒黏土表面积大,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,在低能环境下则与细粒沉积物一起沉淀.TOC/TN 也是在 21.5~22.5 m 层位出现最大值,在 2.5~7.5 m 处含量变化剧烈,其他层位含量都比较稳定.TOC/TN 出现的高值是由于海侵过程中形成的潮坪以及三角洲进积过程中形成的潮坪(下三角洲平原)更易形成泥炭层,从而使 C_{org} 含量增加,TOC/TN 出现高值.有关 C_{org}/N 比值对环境的指示意义,目前比较统一的认识是:该比值小于 8 是典型的海洋物质,该比值大于 12 指示沉积物有机质是陆源成因(Prahl *et al.*, 1980).P 在全新世早期河流沉积层含量变化剧烈可能反映其来源复杂性,含量低说明当时的植被对沉积物的影响并不深入.S 在陆架沉积和海侵时期形成的潮坪沉积含量高,主要是由于

S 是海水主要化学组分之一,而陆架和海侵时期形成的潮坪沉积主要来源于海洋沉积物,海洋沉积物在早期成岩过程中 S 含量高.

2.4 碳的埋藏速率

由表 3 可知,ZK2 孔平均沉积速率为 24.49 cm/a,最大值为 42.60 cm/a,沉积环境为三角洲前缘,最小值为 0.03 cm/a,沉积环境为陆架沉积.总碳的平均埋藏速率为 4 981.32 g/($m^2 \cdot a$),埋藏速率范围为 6.87~12 549.73 g/($m^2 \cdot a$).有机碳的平均埋藏速率为 961.95 g/($m^2 \cdot a$),埋藏速率范围为 1.19~2 073.52 g/($m^2 \cdot a$),总碳和有机碳的埋藏速率都是在三角洲前缘沉积环境中最大,在陆架沉积环境中最小.

ZK2 孔的沉积速率,三角洲前缘>三角洲侧缘>前三角洲,这是由于河口附近水面变宽,黄河携泥沙能力变弱,大量泥沙沉积在河口,所以三角洲前缘的沉积速率最大,与此同时,在黄河口外三角洲前缘区有流场切边带(李广雪等,1994),切边带对河口射流起着水墙的阻挡作用,同时使沉积物在河口两侧沉积,所以三角洲侧缘的沉积速率>前三角洲.碳的埋藏速率(或扣留率)是碳循环研究的一个重要内容, C_{org} 和 TC 的埋藏速率主要取决于沉积速率、沉积物的 BD、TC 和 C_{org} 的含量.分析结果发现, C_{org} 、TC 和沉积速率都呈极显著正相关($R^2 = 0.9682, p < 0.01$)和($R^2 = 0.9877, p < 0.01$),因此,

表3 黄河三角洲不同沉积环境垂向沉积速率与C的埋藏速率计算

Table 3 Vertical sediment rate and accretion rate of carbon of different sediment environments in Yellow River delta

沉积层位	沉积厚度 (m)	沉积时间 (a)	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)	沉积环境
U8	3.76	22.00	17.09	1.48	10.64	1.75	2 691.34	442.65	三角洲平原
U7	4.26	10.00	42.60	1.59	11.45	2.57	7 755.54	1 740.76	三角洲前缘
U6	1.27	4.00	31.75	1.23	18.10	3.77	7 068.50	1 472.28	三角洲侧缘
U5	6.21	10.00	62.10	1.59	12.71	2.10	12 549.73	2 073.52	三角洲前缘
U4	2.94	17.00	17.29	1.25	21.54	4.28	4 656.44	925.24	前三角洲
U3	3.09	8 787.00	0.03	1.50	13.80	2.39	6.87	1.19	陆架
U2	1.07	200.00	0.54	1.64	16.05	8.89	140.82	78.00	潮坪

沉积物的沉积速率是有机碳和总碳埋藏速率的绝对主控因素。由表3可知,现代黄河三角洲(图2中U4-U8)C_{org}的平均埋藏速率1 331 g/(m²·a)高于美国的佛罗里达湿地的320 g/(m²·a)和路易斯安娜湿地的300 g/(m²·a),更高于其他文献报道的C_{org}的累积速率100~200 g/(m²·a)(Turner *et al.*, 2002; Chmura *et al.*, 2003; Bridgham *et al.*, 2006; Craft, 2007),从而表明黄河三角洲虽然沉积物C_{org}浓度低,但由于沉积速率较高使得C_{org}的埋藏速率较高,因而黄河三角洲有很好的固碳能力。

3 结论

(1)ZK2孔全新世以来的古环境自下而上可分为距今9602年前的河流沉积、距今9602—距今9402年潮坪沉积、距今9402—1855年陆架沉积、1889—1904年和1931—1933年前三角洲沉积、1934—1938年和1947—1953年三角洲前缘沉积、1960—1964年三角洲侧缘沉积,1976—1986年三角洲前缘沉积、1986年以来三角洲平原沉积。

(2)总碳和有机碳与各营养元素都呈很好的线性相关。

(3)总碳和有机碳的埋藏速率都是在三角洲前缘沉积环境中最大,在陆架沉积环境中最小,沉积物的沉积速率是有机碳和总碳埋藏速率的主控因素。

(4)虽然现代黄河三角洲C_{org}浓度相对较低,但由于其高沉积速率,C_{org}的平均埋藏速率达到1 331 g/(m²·a),远高于世界其他高C_{org}浓度的湿地,有更好的固碳能力。

致谢:特别感谢薛春汀教授在钻孔分样和论文写作过程中给予的指导和帮助!

References

Azevedo, W. R., Faquin, V., Fernandes, L. A., 2001. Boron Ad-

sorption in Lowland Soils from Southern of the State of Minas Gerais, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36 (7): 957 - 964. doi: 10.1590/S0100 - 204X2001000700005

Bornhold, B. D., Yang, Z. S., Keller, G. H., et al., 1986. Sedimentary Framework of Modern Huanghe (Yellow River) Delta. *Geo-Marine Letters*, 6 (2): 77 - 83. doi: 10.1007/BF02281643

Brevik, E. C., Homburg, J. A., 2004. A 5 000 Year Record of Carbon Sequestration from a Coastal Lagoon and Wetland Complex, Southern California, USA. *Catena*, 57 (3): 221 - 232. doi: 10.1016/j.catena.2003.12.001

Bridgham, S. D., Magonigal, J. P., Keller, J. K., et al., 2006. The Carbon Balance of North American Wetlands. *Wetlands*, 26 (4): 889 - 916. doi: 10.1672/0277 - 5212 (2006)26[889:TCBONA]2.0.CO;2

Cheng, G. D., Xue, C. T., 1997. Sedimentary Geology on the Yellow River Delta. Geological Publishing House, Beijing, 48 - 55 (in Chinese).

Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., et al., 2003. Global Carbon Sequestration in Tidal, Saline Wetland Soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17 (4): 1111 - 1120. doi: 10.1029/2002GB001917

Craft, C., 2007. Freshwater Input Structures Soil Properties, Vertical Accretion, and Nutrient Accumulation of Georgia and U.S. Tidal Marshes. *Limnol. Oceanogr.*, 52 (3): 1220 - 1230. doi: 10.4319/lo.2007.52.3.1220

Craft, C. B., Richardson, C. J., 1998. Recent and Long-Term Organic Soil Accretion and Nutrient Accumulation in the Everglades. *Soil Science Society of American Journal*, 62 (3): 834 - 843. doi: 10.2136/sssaj1998.03615995006200030042x

Ding, Y. R., Ye, S. Y., Zhao, Q. S., 2012. Nutrients and Carbon Sequestration in the Newly Created Wetlands of Yellow River Delta. *Geological Review*, 58 (1): 183 - 189 (in Chinese with English abstract).

Duan, X. N., Wang, X. K., Fei, L., et al., 2008. Primary Evalua-

- tion of Carbon Sequestration Potential of Wetlands in China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 463–469. doi: 10.1016/S1872-2032(08)60025-6
- Fan, D. J., Yang, Z. S., Guo, Z. G., 2000. Review of ^{210}Pb Dating in the Continental Shelf of China. *Advance in Earth Sciences*, 15(3): 297–302 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Qu, Y. H., et al., 1999. Distribution Pattern of Carbon Storage in the Surficial Sediments in the Middle Continental Shelf Mud Area and Its Adjoining East China Sea Areas. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 30(4): 421–426 (in Chinese with English abstract).
- Hanebuth, T. J. J., Voris, H. K., Yokoyama, Y., et al., 2011. Formation and Fate of Sedimentary Depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the Past Sea-Level Cycle and Biogeographic Implications. *Earth-Science Reviews*, 104(1–3): 92–110. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.09.006
- Hatton, R. S., Patrick, W. H., DeLaune, R. D., 1982. Sedimentation Nutrient Accumulation and Early Diagenesis in Louisiana Barataria Basin Coastal Marshes. In: Kennedy, V. S., ed., *Estuarine Comparisons*. Academic Press, New York, 255–267.
- Li, G. X., Cheng, G. D., Wei, H. L., et al., 1994. Shear Zone of Flow Field in the Modern Yellow River Estuary. *Chinese Science Bulletin*, 39(10): 928–932 (in Chinese).
- Liu, J., Saito, Y., Wang, H., et al., 2009. Stratigraphic Development during the Late Pleistocene and Holocene Offshore of the Yellow River Delta, Bohai Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(4–5): 318–331. doi: 10.1016/j.jseas.2009.06.007
- Nair, V. D., Graetz, D. A., Reddy, K. R., et al., 2001. Soil Development in Phosphate-Mined Created Wetlands of Florida, USA. *Wetlands*, 21(2): 232–239. doi: 10.1672/0277-5212(2001)021[0232:SDIPMC]2.0.CO;2
- Pang, J. Z., Si, S. H., 1979. The Estuary Changes of Huanghe River—I. Changes in Modern Time. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 10(2): 136–141 (in Chinese).
- Prahl, F. G., Bennett, J. T., Carpenter, R., 1980. The Early Diagenesis of Aliphatic Hydrocarbons and Organic Matter in Sedimentary Particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(12): 1967–1976. doi: 10.1016/0016-7037(80)90196-9
- Prior, D. B., Yang, Z. S., Bornhold, B. D., et al., 1986. The Subaqueous Delta of the Modern Huanghe (Yellow River). *Geo-Marine Letters*, 6(2): 65–75. doi: 10.1007/BF02281642
- Smith, P., 2004. Carbon Sequestration in Croplands: The Potential in Europe and the Global Context. *European Journal of Agronomy*, 20(3): 229–236. doi: 10.1016/j.eja.2003.08.002
- Turner, R. E., Swenson, E. M., Milan, C. S., 2002. Organic and Inorganic Contributions to Vertical Accretion in Salt Marsh Sediments. In: Weinstein, M., Kreeger, D. A., eds., *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 583–595. doi: 10.1007/0-306-47534-0_27
- Wang, H., Fan, C. F., 2005. The ^{14}C Database (II) on the Circum-Bohai Sea-Coast. *Quaternary Sciences*, 25(2): 141–156 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Huang, S. G., 1988. Study Change of the Huanghe River Delta by Means of Sea Charts Measured in the Recent and the Ancient Years. *Coastal Engineering*, 7(2): 47–58 (in Chinese with English abstract).
- Xian, B. Z., Jiang, Z. X., 2005. Environment Evolution and Eustatic Change of Holocene in the Yellow River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. S., Meng, Y., Zhang, X. L., et al., 2006. Palaeogeographic Environmental Evolution in the Huanghe River Estuary since Late Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 26(3): 327–333 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. T., Li, S. Q., Zhou, Y. Q., 2008. Sedimentary Record of Yellow River Delta Superlobe in 11–1099. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 804–812 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. T., Ye, S. Y., Gao, M. S., et al., 2009. Determination of Depositional Age in the Huanghe Delta in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(1): 117–124 (in Chinese with English abstract).
- Ye, S. Y., Laws, E. A., Wu, Q., et al., 2010. Pyritization of Trace Metals in Estuarine Sediments and the Controlling Factors: A Case in Jiaojiang Estuary of Zhejiang Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 61(5): 973–982. doi: 10.1007/s12665-009-0416-7
- Ye, S. Y., Laws, E. A., Zhong, S. J., et al., 2011. Sequestration of Metals through Association with Pyrite in Subtidal Sediments of the Nanpaishui Estuary on the Western Bank of the Bohai Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 62(5): 934–941. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.02.052
- Zhang, S. P., Wang, L., Hu, J. J., et al., 2011. Organic Carbon Accumulation Capability of Two Typical Tidal Wetland Soils in Chongming, Dongtan, China. *Journal of Environmental Sciences*, 23(1): 87–94. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60377-4

Zou, Y. L., Tan, Q. X., Shi, N. H., 1982. River System Change of Historical Period, Huanghe. In: Chinese Science Bulletin, ed., Physical Geography of China. Science Press, Beijing, 33-86 (in Chinese).

附中文参考文献

成国栋, 薛春汀, 1997. 黄河三角洲沉积地质学. 北京: 地质出版社, 48-55.

丁玉蓉, 叶思源, 赵全升, 2012. 黄河三角洲新生湿地土壤对营养成分和碳的扣留. 地质论评, 58(1): 183-189.

范德江, 杨作升, 郭志刚, 2000. 中国陆架 ^{210}Pb 测年应用现状与思考. 地球科学进展, 15(3): 297-302.

郭志刚, 杨作升, 曲艳惠, 等, 1999. 东海中陆架泥质区及其周边表层沉积物碳的分布与固碳能力的研究. 海洋与湖沼, 30(4): 421-426.

李广雪, 成国栋, 魏合龙, 等, 1994. 现代黄河口区流场切变带. 科学通报, 39(10): 928-932.

庞家珍, 司书亨, 1979. 黄河河口演变: I. 近代历史变迁. 海洋

与湖沼, 10(2): 136-141.

王宏, 范昌福, 2005. 环渤海海岸 ^{14}C 数据集(II). 第四纪研究, 25(2): 141-156.

王志豪, 黄世光, 1988. 利用近年施测海图及古海图研究黄河三角洲变迁. 海岸工程, 7(2): 47-58.

鲜本忠, 姜在兴, 2005. 黄河三角洲地区全新世环境演化及海平面变化. 海洋地质与第四纪地质, 25(3): 1-7.

徐家声, 孟毅, 张效龙, 等, 2006. 晚更新世末期以来黄河口古地理环境的演变. 第四纪研究, 26(3): 327-333.

薛春汀, 李绍全, 周永青, 2008. 西汉末—北宋黄河三角洲(公元11—1099年)的沉积记录. 沉积学报, 26(5): 804-812.

薛春汀, 叶思源, 高茂生, 等, 2009. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定. 海洋学报, 31(1): 117-124.

邹逸麟, 谭其骧, 史念海, 1982. 历史时期的水系变迁, 黄河. 见: 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会编, 中国自然地理. 北京: 科学出版社, 33-86.