

连云港田湾海域沉积物中放射性核素分布与沉积速率

左书华¹, 韩志远¹, 李为华², 谢华亮¹, 李怀远¹

(1.交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程实验室 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 2.华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 本文基于连云港田湾海域沉积物中放射性核素含量的测定结果, 分析了表层沉积物中放射性核素含量的平面分布和柱状沉积物中放射性核素含量及垂向分布特征, 并讨论了核素之间的内在关联和田湾近岸区的沉积速率。结果显示: (1) 田湾海域表层沉积物类型基本为粉砂质黏土和黏土质粉砂, 其中值粒径约为 0.006 mm, 平均黏土含量约为 45%, 属典型淤泥质海岸沉积物特征; (2) 表层沉积物中某一放射性核素 (^{210}Pb , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{137}Cs) 比活度变化较大, 但总体上处于相同水平; (3) ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{238}U 和 ^{228}Th 垂向比活度范围分别为 32.6 ~ 48.8 Bq/kg, 17.6 ~ 33.3 Bq/kg, 15.1 ~ 40.8 Bq/kg 和 40.31 ~ 86.9 Bq/kg, 各核素含量随深度增加的变化规律有所不同; (4) 柱状样中垂向上 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 活度比值为 1.2 ~ 2.6, 均值为 1.5, ^{210}Pb 明显过剩, 且其过剩量与埋深有较明显的关系; (5) 田湾附近 50 多年来的平均沉积速率为 2.3 cm/a, 60 cm 以浅的沉积速率约为 3.0 cm/a, 60 cm 以深的沉积速率约为 1.0 cm/a; 60 cm 以浅的沉积速率较快, 可能与近年来周边工程较多 (田湾跨海大桥、取排水口、港区扩建等) 有关。
关键词: 沉积物; 放射性核素; 高纯锗 γ 能谱仪; 连云港; 田湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)05-0745-07

Radionuclide distribution in sediments and sedimentary rates in the Tianwan sea area of Lianyungang

ZUO Shu-hua¹, HAN Zhi-yuan¹, LI Wei-hua², XIE Hua-liang¹, LI Huai-yuan¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Radionuclides in sediments of the Tianwan sea area were measured using the HPGe γ spectrum method. Based on the data of sediments' radionuclide content, the horizontal distribution of radionuclide content in surface sediments and the vertical distribution of radionuclide content in columnar sediments were analyzed, and the intrinsic correlation between the nuclides and the deposition rate in the near shore area of Tianwan were also discussed. The results showed that the surface sediments in the Tianwan sea area were basically silty clay and clayey silty sand, with an average median particle size of about 0.006 mm and an average clay content of about 45%, which are typical silty coastal sediments. Although the radioactive nuclide specific activities of ^{210}Pb , ^{238}U , ^{228}Ra , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th , and ^{137}Cs in surface sediment varied greatly, the horizontal level of individual radionuclide was similar. The range of vertical specific activity of ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{238}U and ^{228}Th was 32.6 ~ 48.8 Bq/kg, 17.6 ~ 33.3 Bq/kg, 15.1 ~ 40.8 Bq/kg and 40.3 ~ 86.9 Bq/kg, and each nuclide content changing with depth increase volatility rule was different. In the columnar

收稿日期: 2020-03-18, 修订日期: 2020-12-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (TKS170202, TKS180101, TKS180405); 上海市科技创新行动计划项目 (19DZ1204300); 国家自然科学基金项目 (51509120, 51779112)

作者简介: 左书华 (1979—), 男, 河北邱县人, 研究员, 博士, 主要从事河口海岸动力沉积与动力地貌研究, E-mail: zsh0301@163.com

sample, the vertical activity ratio of $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ was between 1.2 and 2.6, with the mean value of 1.5. Excess of ^{210}Pb was obvious in comparison with ^{226}Ra and the excess was significantly related to the buried depth. Over the past 50 years, the average deposition rate near Tianwan was 2.3 cm/a, the deposition rate of column samples less than 60 cm was about 3.0 cm/a, and that of column samples greater than 60 cm was about 1.0 cm/a. deposition rate from 0 cm to 60 cm was relatively fast, which may be related to the influence of surrounding projects (Tianwan Cross-sea Bridge, drainage outlet, port expansion, etc.), and the deposition rate from 60 m to 100 cm was relatively slow and stable.

Key words: sediments; radioactive nuclide; γ energy disperse spectroscopy; Lianyungang; Tianwan

近岸海洋环境中存在着大量的天然和人工放射性核素。海洋沉积物作为放射性核素的载体,记录了它们随海洋动力迁移转化等环境变化的信息,其中的放射性核素分布可以反映和佐证海域的泥沙来源,推求海域沉积速率和建立年代序列等,是研究海洋环境变化的良好工具^[1-6]。天然放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{40}K 以及人工放射性核素 ^{137}Cs 是海洋沉积过程的良好示踪剂,特别是 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs ,其半衰期适中,是研究近海沉积过程和沉积速率最常用的核素^[1]。许多学者针对近海表层沉积物、沉积物岩心、潮间带和周围陆地沉积物中放射性核素分布特征开展了大量研究,如杜金秋等^[1]对大连近海海域、李培泉等^[2]对渤海近岸区域、刘广山等^[3]对胶州湾海域、李冬梅等^[4-5]对福建兴化湾和广东大亚湾海域、林武辉等^[6]对北部湾海域中若干表层沉积物和沉积岩心中的放射性核素含量分布与沉积环境等特征以及与海洋环境之间的关系进行了研究。

连云港位于江苏省北部海州湾西南岸,海岸带资源丰富,沿海分布着连云港港和田湾核电站等重要设施,是我国沿海中部能源外运和对外贸易运输的重要口岸^[7]。连云港海域一直以来都是我国河口海岸研究学者的重点研究海域。就目前而言,多数研究成果集中在海域的水沙环境^[7-8]、沉积物分布特征^[9-10]和工程建设对海域水沙环境影响等方面^[11-12]。然而,在滨海核电快速发展的背景下,对田湾核电站附近海域海洋沉积物中放射性核素的分布却鲜有报道。目前的文献中,仅有彭俊等^[9]采用 ^{210}Pb 测年法对连云港近岸海域的表层沉积物和柱状样进行了分析,研究了表层沉积物的粒度参数特征和近岸沉积速率的变化;刘哈哈等^[13]对田湾核电站附近海域

海水中 ^{137}Cs 活度浓度进行了监测与分析,并对其含量进行了评价。近年来,随着连云港主港区扩建、田湾核电站取排水口工程与连云港徐圩港区的建设等,沉积环境受到的影响也越来越严重,并且核素含量分布特征不仅可以用来评价核电站液态排出物对环境的影响,也可以反映我国典型海域的放射性核素含量水平。

本研究基于连云港田湾海域48个表层沉积物和1个柱状沉积物样品,利用高纯锗(HPGe) γ 能谱仪的测定结果,全面分析田湾附近表层沉积物和柱状沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Th 等天然放射性核素和人工放射性核素(^{137}Cs)的含量水平与垂向分布特征,探讨沉积物的物源和沉积速率,为连云港海域的放射性核素含量水平和海洋沉积过程的示踪应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究海域概况

田湾是位于连云港主港区与徐圩港区之间的水域,田湾核电站工程是依据中俄两国政府协议合作建设的大型核能项目。该海域潮汐特征主要受控于南黄海驻波系统,属非正规浅海半日潮型,多年实测资料显示其平均潮差为3.64 m^[7],属于中强度潮汐海区。近岸区潮流多为往复流,呈南北向,与等深线走向基本一致,外海深水区为逆时针旋转流。大潮全潮平均流速一般为0.20~0.40 m/s,最大流速为0.50~0.70 m/s。波浪以风浪为主,常浪向为NE向和E向,出现频率分别为26.41%、18.40%,平均 $H_{1/10}$ 波高分别为0.7 m和0.5 m;强浪向为NNE向和NE向,最大波高分别为5.0 m、4.2 m^[7]。田湾附近海域的平均含沙量为0.10~0.20 kg/m³,外海域一般为0.1 kg/m³以下。台风期间,田湾海域近底层含沙量达到5.0 kg/m³以上^[7]。

田湾核电站附近有排淡河、烧香河等小型河流输入,并无流量记录,再向南有灌河口。灌河是一条较大的入海河流,年均径流量为15亿 m^3 ,平均流量为50 m^3/s 。

1.2 样品采集与预处理

2017年12月在连云港田湾海域采集了48个海床表层沉积物样品(图1)。样品为采用蚌式抓斗采样器采集表层以下5~10 cm的泥样,采样点覆盖整个研究海域。每次采样前后清洗采样器,以防样品污染,每个采样点分别采集两次(分别用于粒度分析和放射性核素测量分析),样品采集后充分搅拌混合,经现场描述后装袋标识,运回实验室以备分析。

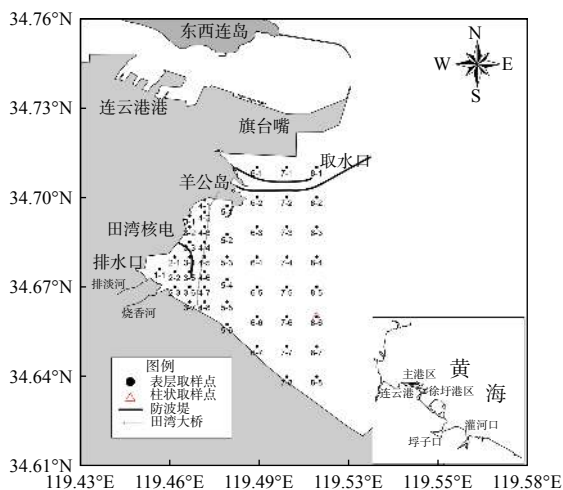


图1 研究区取样点位

Fig. 1 Sampling point of the study area

同时在8-6#站位进行柱状样采样,取样深度为1 m。所取柱状样密封后送实验室,按照2 cm间隔分样,对样品进行烘干、研磨,再进行粒度和核素含量测定。

1.3 粒度参数与核素含量的测定

(1)所采样品经实验室处理后,采用英国马尔文公司的MS2000激光粒度分析仪进行粒度测试,然后根据《海洋调查规范》(GB/T 12763.8-2007)^[14]对粒度参数(中值粒径、分选系数、偏度、组分含量等)进行计算,并划分分级标准和进行沉积物命名。

(2)将沉积物样品放入烘箱内,在110 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干、研磨,装入 $\phi 75\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的聚乙烯塑料样品盒封装20天,使用高纯锗(HPGe) γ 谱仪(美

国Canberra公司出品,探测器为BE5030型,晶体尺寸为 $\phi 80.5\text{ mm}\times 31.0\text{ mm}$,可测量 γ 射线能量范围为3 keV~3 MeV),测定放射性核素含量。操作过程严格按照相关规范执行^[15-16]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物粒度特征

连云港海域海岸类型丰富多样,由北向南依次分布有砂质海岸、基岩海岸及淤泥质海岸,其中田湾所在海域以淤泥质海岸为主。

由图2可以看出,田湾海域表层沉积物类型以粉砂质黏土和黏土质粉砂为主,仅田湾大桥下有一个中细砂样品;表层沉积物中值粒径为0.0023~0.027 mm;表层沉积物黏土含量,基本为26.8%~70.2%,平均值为45%,属典型淤泥质海岸沉积物特征。

2.2 表层沉积物中放射性核素平面分布

田湾海域表层沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{137}Cs 几种核素的比活度变化范围分别为43.9~54.2 Bq/kg、36.7~47.9 Bq/kg、45.2~49.0 Bq/kg、876~905 Bq/kg、19.5~29.9 Bq/kg、46.0~55.7 Bq/kg和1.37~2.99 Bq/kg;平均值分别为50.9 Bq/kg、40.0 Bq/kg、46.7 Bq/kg、899 Bq/kg、25.2 Bq/kg、51.7 Bq/kg、2.01 Bq/kg。各断面核素活动水平如表1所示。本研究海域沉积物中放射性核素 ^{238}U 、 ^{210}Pb 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 总体呈现“内高外低”向外散射状的空间分布, ^{228}Ra 则总体呈现“内低外高”的空间分布。 ^{228}Th 活度含量较大的区域主要集中在田湾跨海大桥沿线。各核素平面分布如图3所示。各点某一核素含量虽然有一些变化,但总体上均处于相同水平。每个站点各核素出现的极大值不一样,与离岸距离并没有明显的关系。

根据本文的研究结果,结合其他文献报道的数据^[17],田湾海域表层沉积物中 ^{40}K 含量明显高于我国其他海域; ^{238}U 含量与胶州湾相当,高于渤海湾和珠江口,低于兴化湾、大亚湾和黄茅海海域; ^{210}Pb 含量与长江口崇明东滩接近,高于胶州湾而明显低于南海海域诸湾; ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Th 含量与其他海域总体处于相同水平; ^{137}Cs 含量明显低于渤海湾,总体高于其他南部海域。

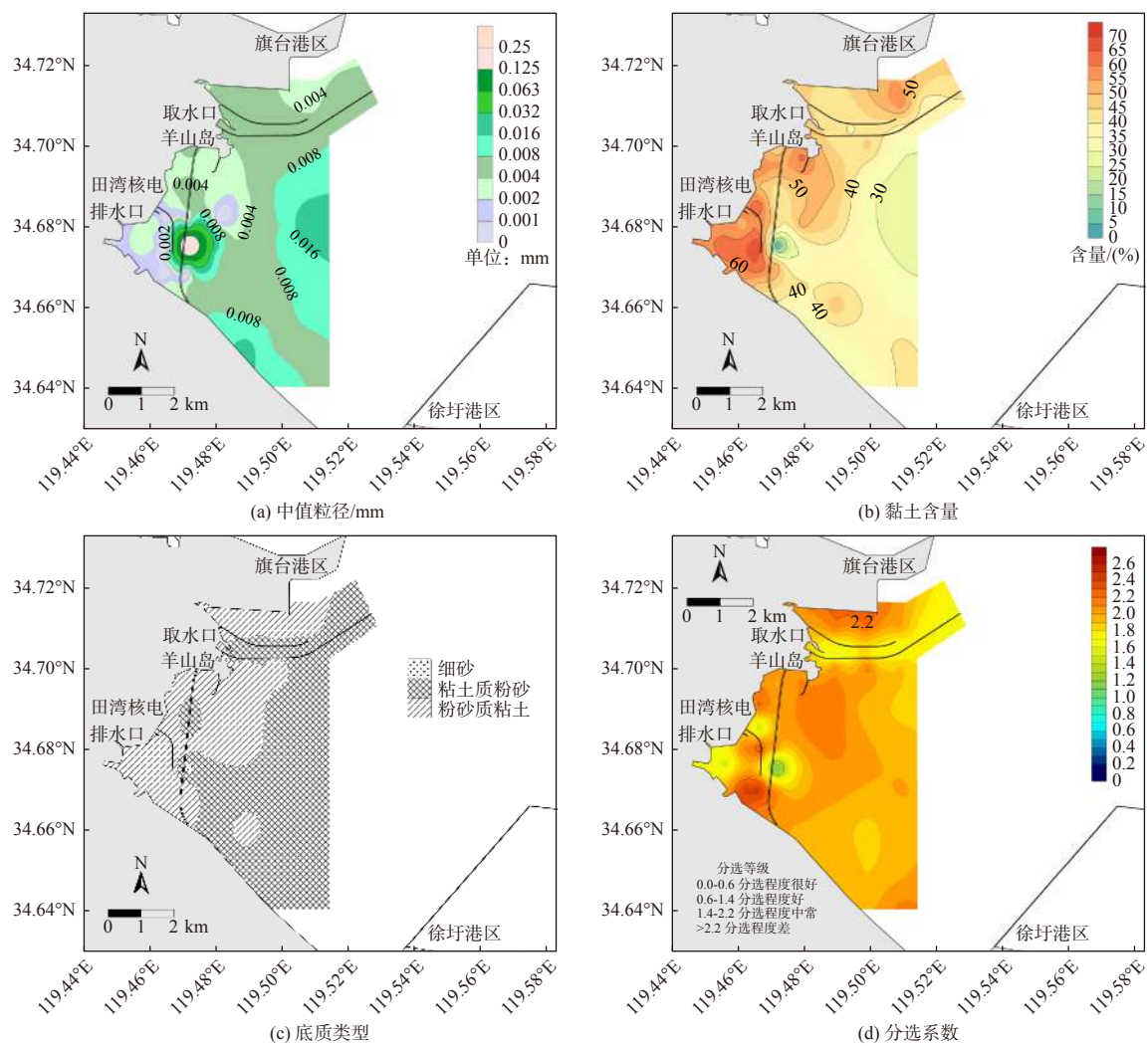


图 2 田湾海域表层沉积物特征

Fig. 2 Surface sediment characteristics of Tianwan sea area

表 1 各断面放射性核素平均比活度(Bq/kg)

Tab.1 Average radioactivity of nuclides in each section

断面号	²¹⁰ Pb	²³⁸ U	²²⁸ Ra	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Th	¹³⁷ Cs
1#	55.3±6.24	45.1±6.12	44.1±2.42	920±10.2	28.9±0.99	54.1±1.42	1.42±0.57
2#	53.6±7.21	38.0±8.14	46.2±3.78	895±14.6	21.3±0.98	52.2±2.16	1.31±0.56
3#	50.7±7.06	41.5±7.05	47.9±3.80	914±15.2	24.4±1.11	53.4±1.88	1.16±0.60
4#	47.3±7.36	41.8±6.48	47.7±3.64	915±15.4	24.6±0.91	55.1±1.87	1.08±0.58
5#	49.1±6.25	40.4±6.28	47.5±3.95	907±14.7	26.6±0.85	52.4±1.87	1.05±0.51
6#	51.0±6.37	41.2±6.50	47.5±4.01	904±14.6	27.4±0.87	50.9±1.84	1.06±0.45
7#	53.8±5.96	42.9±6.21	47.6±3.63	876±14.5	26.6±0.94	50.9±1.91	1.06±0.45
8#	52.9±5.69	38.5±6.17	47.4±3.49	875±13.1	27.4±0.90	49.7±1.70	1.06±0.37

2.3 柱状沉积物中放射性核素垂向分布

在 8-6# 站位采样的柱状沉积物中²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²³⁸U 和²²⁸Th 4 种核素的垂向分布如图 4 所示。²¹⁰Pb 垂向比活度范围为 32.6 ~ 48.8 Bq/kg, 平均值为

40.2 Bq/kg, 从表层以下总体呈减小的趋势。²²⁶Ra 垂向比活度范围为 17.6 ~ 33.3 Bq/kg, 平均值为 26.6 Bq/kg, 20 cm 以浅该核素含量波动较大, 20 cm 以深波动较小, 且总体随深度增加呈略有增加的

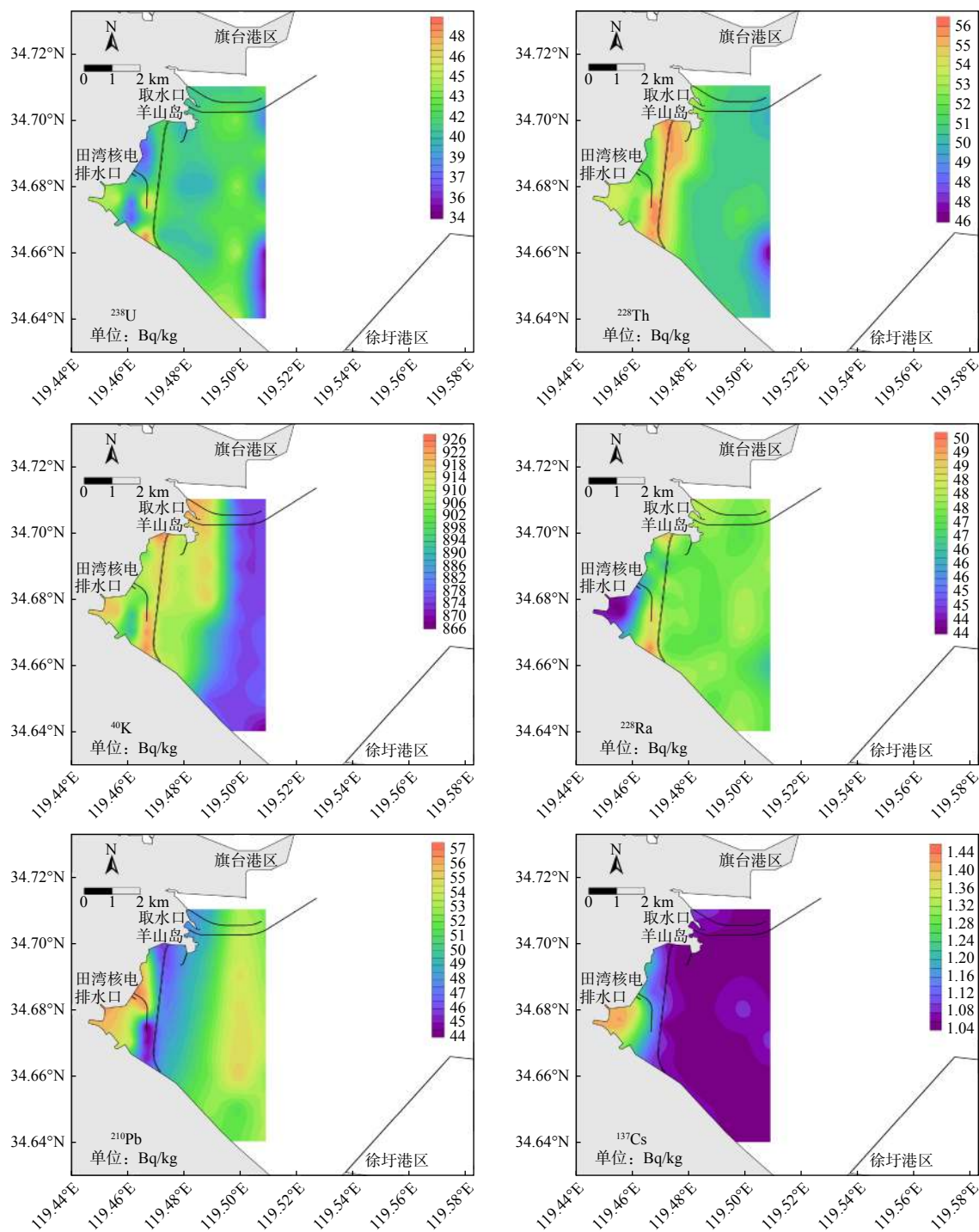


图3 表层沉积物中放射性核素平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of radionuclides in surface sediment

趋势。 ^{238}U 垂向比活度范围为15.1~40.8 Bq/kg, 平均值为27.1 Bq/kg, 总体随深度增加呈减小趋势。 ^{228}Th 垂向比活度范围为40.3~86.9 Bq/kg, 平均值为59.7 Bq/kg; 20 cm以浅比活度没有变化, 20 cm以深波动变化较大, 且总体呈增加趋势。柱状样中垂向上 ^{210}Pb / ^{226}Ra 的活度为1.2~

2.6, 均值为1.5, 这表明该海域沉积物中 ^{210}Pb 过剩明显, 且其过剩量与埋深有较明显的关系。

2.4 核素之间的联系

田湾表层沉积物中放射性核素的水平分布总体上呈现出由陆向海降低的趋势, 表明陆源物质(河流汇入、雨水汇入等)的输入是其近海沉

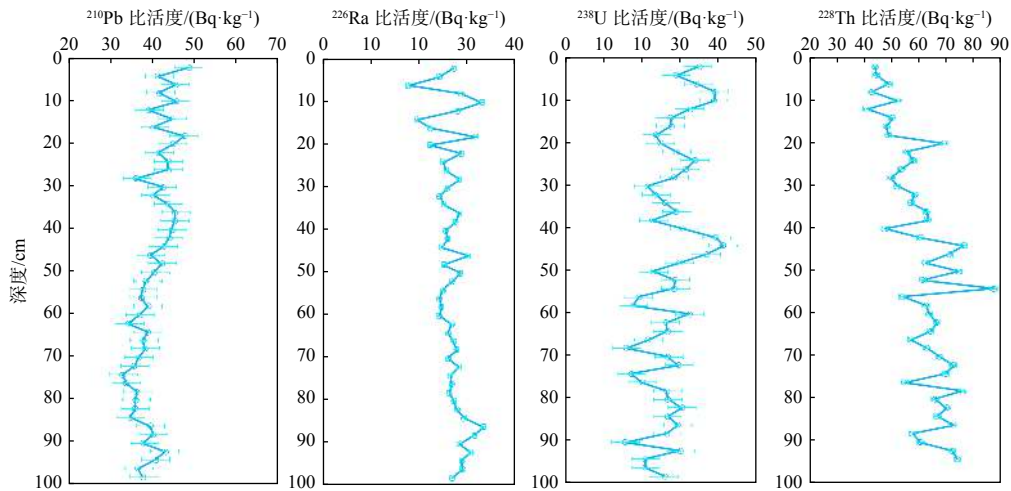


图4 柱8-6#放射性核素比活度垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of radionuclide content in Columnar sample 8-6#

积物的主要来源。核素含量分布水平除了受到物源影响外,各放射性核素的空间分布也存在一定的内在联系。 ^{238}U 、 ^{226}Ra 和 ^{210}Pb 同属铀系衰变系列核素,其核素比活度之间的关系与衰变平衡程度(物理过程)密切相关。然而,地表过程中存在活跃且复杂的物理-生物地球化学过程,使其放射性呈衰变不平衡性^[6]。该海域 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 、 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 的比活度变化范围分别为0.53~0.87和1.62~2.70,平均值分别为0.64和2.08; $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 大于0.5而小于1,即 ^{226}Ra 和 ^{238}U 处于放射性不平衡状态。该结果与文献^[6]中报道的“大部分情况下海洋沉积物中 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值一般为0.5~1.0”的结果相一致。 ^{210}Pb 一部分来源于 ^{226}Ra 衰变,这部分 ^{210}Pb 通常与 ^{226}Ra 达到衰变平衡,另一部分来源于大气沉降,被称作过剩的 ^{210}Pb ^[4]。 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 的比活度均大于1.5,均值为2.08,即该海域表层沉积物中 ^{210}Pb 过剩明显,且其过剩量与离岸距离没有明显的关系。该结果表明,大气来源的 ^{210}Pb 随颗粒物的沉降富集于沉积物中的量明显大于母体 ^{226}Ra 的衰变量。

^{228}Ra 和 ^{228}Th 均属钍系核素, ^{228}Th 主要来源于母体 ^{228}Ra 的衰变,该海域 $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$ 的变化范围为0.99~1.17,平均值为1.11。该结果表明,田湾海域中 ^{228}Th 相对于 ^{228}Ra 的含量水平在实验测定下总体略有过剩。

^{210}Pb 、 ^{228}Th 均是颗粒活性较强的核素,能够强烈吸附在颗粒物上。连云港田湾海域属于淤泥质海岸,海床表层沉积物富有黏性和较好的附

着力,使活性较强的核素附着于水体颗粒物中,在沉积环境中富集于海床上。而 ^{228}Ra 则易于从颗粒物或沉积物中释放到海水中,造成了颗粒物或沉积物中 ^{228}Th 相对于 ^{228}Ra 略有过剩而不明显^[18]。过剩的 ^{210}Pb 一部分来源于大气中的 ^{222}Rn 衰变后吸附于颗粒物上进入海洋,与其他由海水中的 ^{226}Ra 衰变产生的部分一起随颗粒物进入沉积物,从而造成沉积物中 ^{210}Pb 相对于 ^{226}Ra 明显过剩。

2.5 沉积速率

沉积物柱状岩心能够记录海床沉积过程和环境变化信息。基于岩心计算的沉积速率则能反映沉积记录的环境信息,揭示沉积动力过程^[1-2,5]。 ^{210}Pb 被认为是百年尺度内沉积测年的核元素,它常被用于沉积过程相对较稳定且沉积环境较封闭的连续沉积中^[19],在近海环境沉积速率研究中应用最为广泛。

^{210}Pb 测年的基本原理:首先测出各深度沉积物 ^{210}Pb 活度,再减去 ^{226}Ra 得到过剩 ^{210}Pb 值($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)的剖面分布。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法测定沉积速率要求柱状沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直分布呈指数衰减形式^[1,20],采用常量初始浓度模式(constant initial concentration,简称CIC模式)。CIC模式计算公式^[20]如下:

$$S = \lambda \times H / \ln(A_0/A_i)$$

式中: S 为沉积速率(cm/a); λ 为 ^{210}Pb 衰变常数(0.031/a); A_0 、 A_i 分别为表层与深度 H 层的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$,其中, $H/\ln(A_0/A_i)$ 由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 取自然对数后与深度线性拟合直线的斜率求出。

图5为8-6#柱状样的过剩 ^{210}Pb 垂向分布情况。从图5可以看出 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的分布随沉积深度的变化,上层波动较大,可能是受到周围环境(工程建设、水动力变化等)扰动的影响;中、下层则相对稳定。总的来说, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度的增加而降低。根据上述计算方法,计算出60 cm以浅的沉积速率约为3.0 cm/a,60 cm以深的沉积速率约为1.0 cm/a,50多年来平均沉积速率为2.3 cm/a。60 cm以浅的沉积速率较快,可能与近年来周边工程较多(田湾跨海大桥、取排水口、港区扩建等)有关,60 cm以深的沉积则较为缓慢和稳定。

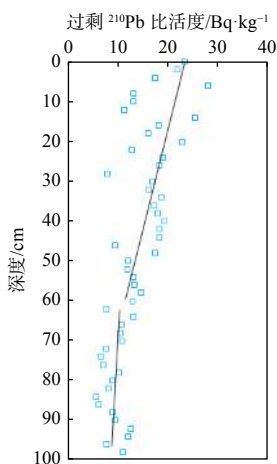


图5 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of excess ^{210}Pb

3 结论

(1)田湾海域表层沉积物类型基本为粉砂质黏土和黏土质粉砂,其中值粒径约为0.006 mm,平均黏土含量约为45%,属典型淤泥质海岸沉积物特征。

(2)表层沉积物中某一放射性核素(^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{137}Cs)比活度变化较大,但总体上处于相同水平。表层 ^{210}Pb 过剩明显,其过剩量与离岸距离没有明显关系。 ^{228}Th 相对于 ^{228}Ra 含量水平略有过剩。

(3) ^{10}Pb 、 ^{226}Ra 、 ^{238}U 和 ^{228}Th 垂向比活度范围分别为32.6~48.8 Bq/kg、17.6~33.3 Bq/kg、15.1~40.8 Bq/kg和40.3~86.9 Bq/kg,各核素含量随深度增加其波动变化规律有所不同。柱状样中垂向 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 活度比值为1.2~2.6,均值为1.5,沉积物中 ^{210}Pb 过剩明显,且其过剩量与埋深有较

明显关系。

(4)田湾海域近50年的平均沉积速率为2.3 cm/a,60 cm以浅的沉积速率约为3.0 cm/a,60 cm以深的沉积速率约为1.0 cm/a。60 cm以浅的沉积速率较快,可能与近年来周边工程较多(田湾跨海大桥、取排水口、港区扩建等)有关,60 cm以深的沉积则较为缓慢和稳定。

参考文献:

- [1] 杜金秋,关道明,姚子伟,等.大连近海沉积物中放射性核素分布及环境指示[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1889-1895.
- [2] 李培泉,刘志和,卢光山,等.渤海近岸区表层沉积物中U, Ra, Th, ^{40}K , ^{137}Cs 的Ge(Li) γ 谱仪测定及地球化学研究[J]. *海洋与湖泊*, 1983, 14(4): 333-341.
- [3] 刘广山,李冬梅,易勇,等.胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率[J]. *地球学报*, 2008, 29(6): 769-777.
- [4] 李冬梅,徐茂泉,刘广山,等.福建兴化湾外近海沉积物岩心中放射性核素分布[J]. *地球学报*, 2005, 26(S1): 220-223.
- [5] 李冬梅,周鹏,陈嘉辉,等.大亚湾核海域沉积物岩心中放射性核素的垂向分布及其对沉积环境的示踪[J]. *海洋通报*, 2013, 23(S1): 108-114.
- [6] 林武辉,冯禹,余克服,等.北部湾沉积物中放射性核素的分布特征与控制因素[J]. *海洋学报*, 2020, 42(2): 143-154.
- [7] 左书华,杨华,张娜,等.连云港徐圩港区航道大风天强淤可能性分析[J]. *水道港口*, 2013, 34(1): 26-32.
- [8] 赵洪波,王广聚.连云港海域波浪场数学模型研究[J]. *水道港口*, 2007, 28(5): 322-324.
- [9] 彭俊,陈沈良.连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境分析[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(4): 445-454.
- [10] 项立辉,安成龙,张晓飞,等.连云港近岸海域表层沉积物沉积特征及粒径趋势分析[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(3): 317-325.
- [11] 李孟国,李文丹.连云港港扩建对田湾核电站取水影响及措施研究[J]. *水道港口*, 2008, 29(4): 239-246.
- [12] 张世奇,张燕菁,陈金荣.连云港核电站附近海域泥沙冲淤计算研究[J]. *泥沙研究*, 2004, 2(2): 27-32.
- [13] 刘哈哈,姜孔华,王志兵,等.田湾核电站附近海域海水中 ^{137}Cs 活度浓度分析与评价[J]. *辐射防护*, 2017, 37(5): 369-373.
- [14] GB/T 12763.8-2007,海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查[S].
- [15] HY/T 003.8-1991,海洋环境监测规范 放射性核素测定[S].
- [16] GB/T 7167-2008,锗 γ 射线探测器测试方法[S].
- [17] 左书华,韩志远,谢华亮,等.连云港田湾海域表层沉积物中放射性核素含量水平[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 42-45.
- [18] 吴梅桂,周鹏,赵峰,等.阳江核电站附近海域表层沉积物中 γ 放射性核素含量水平[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(1): 43-47.
- [19] 段凌云,王张华,李茂田,等.长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 514-522.
- [20] 万国江.现代沉积的 ^{210}Pb 计年[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(3): 230-239.