

唐山海岸带环境重金属含量特征及影响因素

常国民¹, 刘娜¹, 杨文杰¹, 钟冉¹, 任浩伟¹, 张振国^{2*}

¹华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

²辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新

Email: guominchangcn@163.com, *zgz0351@163.com

收稿日期: 2020年10月29日; 录用日期: 2020年11月16日; 发布日期: 2020年11月23日

摘要

唐山是我国北方重要的工业基地, 伴随近年来快速的工业化进程, 唐山海岸带区域成为承接京津和唐山市钢铁、化工等重点企业的重要场所。本文在详细野外踏勘的基础上, 在河流入海口、曹妃甸湿地、南堡、乐亭等工业区、京唐港等港口、祥云湾旅游区以及人工岛等不同部位, 采集了丰富的表层沉积物样品。利用XRF、AAS以及ICP-MS对样品进行主量、微量和稀土元素地球化学分析。研究显示, 由于人工岛、港口防波堤等大型海洋工程的建设, 改变了原有的沉积条件, 促使局部水动力条件发生改变, 造成冲淤条件失衡, 原本淤积海岸侵蚀加剧, 泥质沉积区沉积物粒度增大, 出现粉砂、砂质堆积。该特征在曹妃甸港、京唐港、打网岗等地表现最为明显。微观上, 工业化进程导致微量元素发生迁移或积聚, 重金属污染有加重的趋势, 其在滦河口、陡河口、曹妃甸港、京唐港等观测点偏高, 在湿地、围海造地区偏低。启示快速工业化进程可能造成某些元素在新的沉积环境条件下富集, 也有可能特定环境中因受到稀释而含量降低, 具有较大的随机性和不确定性。

关键词

唐山海岸带, 重金属, 含量特征, 响应

Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Tangshan Coastal Environment

Guomin Chang¹, Na Liu¹, Wenjie Yang¹, Ran Zhong¹, Haowei Ren¹, Zhenguo Zhang^{2*}

¹School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning

Email: guominchangcn@163.com, *zgz0351@163.com

Received: Oct. 29th, 2020; accepted: Nov. 16th, 2020; published: Nov. 23rd, 2020

*通讯作者。

文章引用: 常国民, 刘娜, 杨文杰, 钟冉, 任浩伟, 张振国. 唐山海岸带环境重金属含量特征及影响因素[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(11): 1042-1050. DOI: 10.12677/ag.2020.1011103

Abstract

Tangshan is an important industrial base in the north of China. With the rapid industrialization process in recent years, Tangshan coastal zone has become an important place to undertake key enterprises such as steel and chemical industry in Beijing, Tianjin and Tangshan. On the basis of detailed field survey, abundant surface sediment samples were collected from river estuary, Caofeidian wetland, Nanpu, Leting and other industrial areas, ports such as Jingtang Port, Xian-gyun Bay Tourist Area and artificial island. XRF, AAS and ICP-MS were used for the geochemical analysis of major, trace and rare earth elements in the samples. The study shows that due to the construction of large-scale marine engineering such as artificial island and port breakwater, the original sedimentary conditions have been changed, and the local hydrodynamic conditions have changed, resulting in the imbalance of scouring and silting conditions. The erosion of the original silted coast has been intensified, and the sediment particle size in the argillaceous deposition area has increased, resulting in the accumulation of silt and sand. This feature is most obvious in Caofeidian port, Jingtang Port and Daowanggang. On the micro level, the process of industrialization leads to the migration or accumulation of trace elements, and the pollution of heavy metals tends to aggravate, which is higher in Luanhe estuary, Douhekou, Caofeidian port, Jingtang Port and other observation points, while it is lower in wetlands and sea reclamation areas. It is suggested that the rapid industrialization process may lead to the enrichment of some elements in the new sedimentary environment, or the content of some elements may be reduced due to dilution in a specific environment, which is of great randomness and uncertainty.

Keywords

Tangshan Coastal Zone, Heavy Metal, Content Characteristics, Response

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海岸带通常由于优越的地理位置、良好的自然条件、丰富的自然资源以及典型的海陆交互作用特征，成为人类生产最为活跃，居住最为密集的区域。迄今为止，占全球陆地面积仅为 10% 的海岸带区域，生活着全世界近 60% 的人口[1]。在地质演化过程中，海岸带沉积物是诸多元素迁移转化、物质循环的载体和归宿。海岸带的发展变化除了受到陆地、海洋、气候等自然因素的制约之外，现代人类大规模的生产活动可对其产生更为直接、深远的影响。对海洋及海岸带的大规模开发利用，诸如港口航运、围海造地、海岸工程等施工与建设，均可破坏原有沉积条件之平衡，从而对海岸带资源环境产生重要的影响[2] [3] [4] [5]。Hornberger 等对旧金山湾不同时期沉积物的重金属含量研究显示，随着经济发展状况的改变重金属含量也表现出差异性[6]。Lee 等对 Humber 河口沉积物来源追踪显示沉积物的重金属垂向分布受污染物的历史输入、河口堆积与再悬浮的共同控制[7]。Palanques 综合对 Besos 河前三角洲地区近十年的沉积物重金属含量分析得出重金属含量变化与工业化、人口增长和能源消费相关联[8]。

唐山位于渤海西岸，是河北重要的能源、钢铁、港口、重化等工业集中分布区，也是国家级曹妃甸科学发展示范区重大工程项目的实施区域，目前仅曹妃甸工业区就已完成围海造地 310 km²。因城市、工业、农业的发展及人口的迅速增加，唐山海岸带因人为因素造成的影响已经远远超过自然因素[9]。尤其

渤海湾沉积物中 Cu、Cd 和 Pb 等重金属含量日益积聚，重金属污染形势日趋严重[10] [11] [12]。伴随着京津冀协同发展及唐山市产业调整的进程，唐山滨海区域承接了首钢、华润等来自京津的产业项目 100 余个，海岸带环境承载压力不断上升。海岸带复杂的海洋物理、化学和海洋动力条件，制约着水体中的悬浮颗粒物的沉积过程及重金属元素的迁移方式，因此，探讨快速工业化进程背景下海岸带沉积环境的变化，有助于实现研究区人与自然的和谐发展[13] [14] [15] [16] [17]。

2. 地质背景

区域上，唐山海岸带沿岸线呈带状分布，东起滦河口，西至洒金坨，陆地岸线长达 229.72 km (图 1)。由于处于构造运动活跃区，地壳破碎，全新世活动断裂发育，以沉降作用为主要构造背景。受控于全新世以来频繁的气候变化和海平面升降的影响，海陆交互沉积特征明显，在广泛发育冲积平原、冲积扇以及河流、湖泊等陆相沉积的基础上，又经历多次海水入侵，发育了厚度不等的三角洲相、浅海相与滨海潮滩相等海相沉积层。地貌类型以冲积、湖积、海积平原、三角洲、湿地、泥质岸滩、浅滩以及粉砂质沙洲为主[18]。海岸类型属于平原型淤泥质海岸。现代沉积速率湿地约为 0.1 cm/a、潟湖约为 0.5 cm/a、潮坪则高达约 1.3~3 cm/a [19] [20] [21] [22] [23]。



Figure 1. Location of study area and distribution of the observation points and sampling points

图 1. 研究区位置及观测点和采样点分布简图

Table 1. Geomorphology and sediment types in the study area

表 1. 研究区地貌与沉积物类型

三级地貌类型	四级地貌类型	微地貌类型	沉积物类型
潮上带 (沿海平原)	堆积平原	稻田、林地、工业用地	淤泥、黏土
	侵蚀洼地	湿地、盐田、虾池	淤泥、黏土
潮间带	潮滩	泥质潮滩、粉砂质潮滩、潟湖	淤泥、粉砂质黏土
潮下带	水下岸坡	砂泥质堆积体、侵蚀沟槽	淤泥、粉砂质黏土、粉砂
	水下阶地	侵蚀残余脊、冲刷沟槽	淤泥、粉砂质黏土、粉砂
浅海	出露水面堆积体	岛屿、沙洲、人工岛	淤泥、黏土、粉砂质黏土
	隐没水下堆积体	浅滩、沙脊、海釜、航道	淤泥、粉砂质黏土、粉砂

3. 研究方法与样品分析

本研究采取宏观和微观相结合的方法, 宏观方面通过详细的野外踏勘, 长期的现场观测, 记录海岸带自然景观的变化; 微观方面, 通过对观测点沉积物的地球化学采样分析, 解析快速工业化进程背景下海岸带沉积指标元素的变化, 探讨人类活动对海岸带环境产生的影响。

沿唐山海岸带以陡河口为起点, 滦河口为终点设计 31 个采样点位, 包含芦苇塘、养殖场、入海口、人工岛、港口、排污口、沼泽、华北理工大学和盐场等不同类型区域。利用特制的无扰动原位取样设备进行取样。每个点位采集表层 0~30 cm 沉积物样品 500 g, 样品装入聚乙烯袋中常温保存。在华北理工大学石油工程实验室进行自然风干, 除去杂草等杂质以二分法取样, 通过玛瑙研钵进行研磨, 再通过 200 目筛网进行分选, 最后把制好的样品粉末送至东北大学和中国地质大学(北京), 利用东北大学测试研究中心的 AB-104L、X 射线荧光光谱仪(PW2404)等设备进行常量元素分析, 利用中国地质大学(北京)的生物地质与环境地质国家重点实验室的 Optimass-9500 型 ICP-TOF-MS 等相关仪器进行微量和稀土元素的分析测试。

4. 微观变化

沉积物中元素的初始来源于母岩的风化, 人类强烈的生产活动可以导致自然环境本身的物质转移和元素循环, 必造成沉积环境中部分元素发生淋失、积累和重新分配, 使沉积环境的元素组成发生改变, 其中微量元素的变化尤其灵敏[24] [25]。人类活动可以促使某些元素累积, 甚至可以引起环境污染, 而重金属元素的增加就是一个非常主要的环境指标。Pb、Cr、Hg、As 等重金属元素, 主要是通过工业生产而发生迁移, 并最终在人类生活环境中富集[26] [27] [28] [29] [30]。

4.1. 指标元素含量特征

唐山海岸带沉积物指标性元素含量特征如表 2 所示:

Table 2. Content of index elements in coastal sediments ($\times 10^{-6}$)

表 2. 海岸带沉积物指标性元素含量表($\times 10^{-6}$)

	Fe*	Zn	Cu	Co	Cr	V	Mn	Nb	Sr	Y	Rb	Th
01	6.84	106.9	30.1	17.8	78.1	98.1	924.3	13.9	186.9	28.1	131.3	7.86
02	5.63	72.7	20.7	12.1	55.7	71.5	654.3	12.9	152.7	23.8	95.7	6.29
03	3.09	28.5	15.7	9.1	15.3	60.7	587.2	12.7	198.0	21.4	93.6	4.78
04	3.96	44.2	12.7	4.4	47.1	63.0	415.9	11.6	203.2	12.1	69.3	3.49
05	2.51	59.1	16.4	8.3	50.2	59.6	421.7	14.2	209.5	22.3	79.8	4.91
06	2.65	38.1	10.1	6.7	32.1	43.7	329.1	9.54	222.1	16.1	76.2	4.37
07	2.05	34.1	6.30	9.7	48.9	63.6	394.4	14.1	208.2	22.2	89.6	6.03
08	2.89	34.4	5.90	10.7	58.7	65.8	458.2	13.2	203.0	22.8	100.5	7.49
09	1.51	45.8	6.71	20.2	46.5	513.5	413.2	87.8	158.6	73.3	34.0	31.66
10	1.27	42.5	9.50	5.9	80.6	103.9	588.6	19.5	174.0	17.8	58.8	18.89
11	1.69	31.1	6.3	9.1	22.6	61.7	217.9	14.8	200.7	24.4	90.9	12.24
12	1.37	31.4	6.70	9.7	25.0	56.7	247.9	11.3	177.8	21.5	84.0	4.95
13	4.59	29.0	4.3	11.3	15.0	67.3	194.9	12.8	182.2	23.5	96.9	8.73
14	5.22	30.3	6.5	10.2	15.8	63.2	170.2	12.9	224.0	21.8	98.2	8.39
15	5.41	80.2	24.8	13.1	60.2	78.0	717.7	14.5	196.2	26.9	105.4	9.05
16	3.41	72.7	19.8	11.7	55.7	70.6	690.5	13.1	201.6	24.3	101.9	8.51
17	3.25	79.4	23.1	10.6	62.3	67.9	685.1	13.7	293.9	23.1	85.5	5.18

Continued

18	3.74	54.6	14.2	2.8	47.5	22.4	412.1	4.64	176.3	7.68	67.3	1.89
19	4.45	47.4	12.1	11.9	40.7	80.8	436.6	17.4	206.2	27.2	93.4	7.45
20	4.67	57.4	15.6	3.9	50.4	38.1	462.1	7.15	189.1	10.9	72.6	3.16
21	4.61	63.6	16.6	3.7	52.3	37.1	558.8	8.21	153.0	11.1	73.5	2.35
22	4.25	64.8	17.4	7.9	50.3	52.7	662.8	11.1	221.1	18.9	88.4	5.67
23	4.98	61.9	17.7	5.9	53.3	57.3	587.5	11.3	155.3	14.8	68.7	4.01
24	2.26	58.5	17.5	4.4	43.4	58.9	592.2	11.5	196.7	11.1	69.8	4.18
25	18.18	63.9	25.4	5.4	52.3	98.2	551.2	24.7	182.2	16.2	70.1	7.67
26	4.45	43.7	8.21	4.5	48.6	67.5	417.2	11.9	202.8	11.3	67.0	7.94
27	4.90	175.2	40.4	3.0	564.7	24.3	249.8	5.04	154.0	8.86	74.8	2.83
28	4.19	94.1	19.7	12.9	61.2	75.8	444.2	14.1	192.0	25.4	100.2	8.38
29	4.16	71.7	21.2	3.6	67.6	31.1	607.7	6.17	139.8	9.91	75.1	1.55
30	1.78	34.2	8.31	10.2	43.9	64.7	307.5	12.8	203.5	22.1	95.1	6.08
31	5.87	47.4	10.7	8.9	93.8	56.3	657.9	7.5	179.4	13.7	86.3	4.58
均值	4.19	58.1	15.2	8.7	65.8	76.6	558.3	14.7	191.7	20.5	83.7	7.11
文献	3.67	74.6	47.3	15.3	79.7	88.7	652.5	13.8	201.8	23.4	108.8	12.5

注：表中*代表%含量。

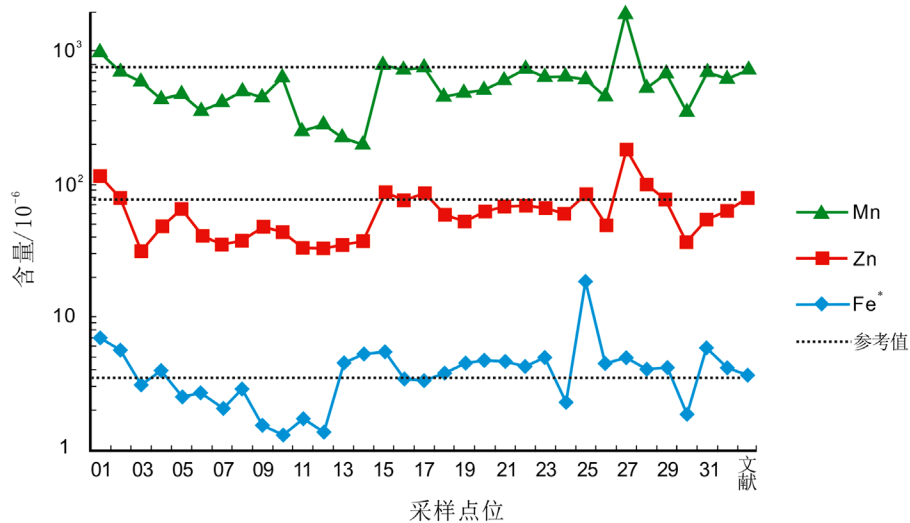


Figure 2. Accumulation curve of indicator elements Mn-Zn-Fe*
图 2. 指标性元素 Mn-Zn-Fe*堆积曲线图

从总体上看，除 Fe、Nb 均值高于 1993 年海岸带指标元素均值外[31]，其余均属于正常范围。其中 Mn、Zn 含量分别为 $(170.2\sim 924.3) \times 10^{-6}$ 、 $(28.5\sim 175.2) \times 10^{-6}$ ，其平均值分别为 558×10^{-6} 、 58.1×10^{-6} ，Fe*含量在 $(1.27\sim 18.18)\%$ ，平均值为 4.19%。由堆积曲线图(图 2)可见 Mn、Zn 和 Fe*三者之间呈正相关性，其曲线变化曲线较为一致，从沉积物粒度粗细变化推测为同一条件下沉积并积聚。随着入海口底部深水湍流作用以及 Fe、Mn 氧化物和黏土矿物的吸附作用，使得在入海口及岛屿(月坨岛和菩提岛)之间沉积物中 Mn、Zn 和 Fe 三者的含量显示高值。

4.2. 重金属元素含量特征

唐山海岸带沉积物重金属元素含量特征如表 3 所示：

Table 3. Contents of heavy metals in coastal sediments ($\times 10^{-6}$)
表 3. 海岸带沉积物重金属元素含量表($\times 10^{-6}$)

样号	As	Pb	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Mn
01	13.2	35.7	0.037	0.15	78.1	30.1	106.9	37.6	924.3
02	7.19	31.7	0.026	0.13	55.7	20.7	72.7	24.4	654.3
03	5.21	12.9	0.022	0.09	15.3	15.7	28.5	27.4	587.2
04	4.28	20.2	0.014	0.08	47.1	12.7	44.2	15.3	415.9
05	5.49	25.1	0.013	0.08	50.2	16.4	59.1	19.1	421.7
06	4.08	20.0	0.011	0.08	32.1	10.1	38.1	12.5	329.1
07	3.17	17.4	0.017	0.03	48.9	6.30	34.1	8.01	394.4
08	3.19	15.6	0.006	0.03	58.7	5.90	34.4	7.78	458.2
09	3.36	24.9	0.006	0.05	46.5	6.71	45.8	6.49	413.2
10	3.27	18.1	0.005	0.06	80.6	9.50	42.5	9.27	588.6
11	2.46	18.1	0.009	0.04	22.6	6.3	31.1	7.31	217.9
12	2.48	31.1	0.012	0.07	25.0	6.70	31.4	7.39	247.9
13	2.69	16.8	0.008	0.02	15.0	4.3	29.0	5.42	194.9
14	2.41	29.2	0.005	0.05	15.8	6.5	30.3	6.01	170.2
15	7.73	32.8	0.021	0.09	60.2	24.8	80.2	26.6	717.7
16	7.89	44.5	0.025	0.10	55.7	19.8	72.7	23.4	690.5
17	7.31	26.4	0.021	0.17	62.3	23.1	79.4	25.9	685.1
18	4.33	19.7	0.025	0.09	47.5	14.2	54.6	18.4	412.1
19	3.68	21.8	0.007	0.04	40.7	12.1	47.4	15.5	436.6
20	4.21	22.4	0.019	0.09	50.4	15.6	57.4	18.5	462.1
21	6.01	22.5	0.027	0.11	52.3	16.6	63.6	21.1	558.8
22	6.19	21.7	0.013	0.10	50.3	17.4	64.8	20.8	662.8
23	5.89	21.0	0.015	0.08	53.3	17.7	61.9	22.6	587.5
24	5.28	24.4	0.023	0.07	43.4	17.5	58.5	18.7	592.2
25	7.21	47.7	0.034	0.12	52.3	25.4	63.9	23.8	551.2
26	3.29	20.6	0.007	0.06	48.6	8.21	43.7	10.9	417.2
27	2.81	32.1	0.007	0.20	564.7	40.4	175.2	29.3	2498
28	5.79	38.0	0.024	0.19	61.2	19.7	94.1	22.9	444.2
29	6.61	26.8	0.017	0.08	67.6	21.2	71.7	23.5	607.7
30	3.59	33.8	0.008	0.06	43.9	8.31	34.2	8.39	307.5
31	3.01	17.4	0.009	0.06	93.8	10.7	47.4	10.1	657.9

5. 讨论

沉积响应是一个缓慢而长期的过程,有待持续的观察和研究。尽管唐山海岸带指标元素均值与 30 多年前变化不大,但落实到不同采样点,变化还是显而易见的。如 Fe 元素有 18 个采样点超过 1993 年均值,最高含量是其 4.95 倍;有 10 个采样点 Nb 含量超过均值,最高为其 6.36 倍;8 个采样点 Mn 超标,最高 3.83 倍。其余元素在不同的采样点也均有不同程度的超标现象。

从重金属含量特征看,唐山海岸带沉积物中 4 种常见重金属的采样结果为: Cu、Cd、Pb 和 Zn 的含量分别为 $(4.3\sim 40.4) \times 10^{-6}$ 、 $(0.02\sim 0.2) \times 10^{-6}$ 、 $(12.9\sim 47.7) \times 10^{-6}$ 、 $(28.5\sim 175.2) \times 10^{-6}$,其均值分别为 15.18×10^{-6} 、

0.086×10^{-6} 、 25.49×10^{-6} 、 58.03×10^{-6} ，均小于海洋沉积物一类标准值(表 4)，从变化趋势图(图 3)中可见 Cu、Cd、Pb 和 Zn 的含量分布趋势相近但具体到各采样点，变化特征更为明显。与 2009 年相同区域观测数据相比，12 个采样点 Pb 含量超过 2019 年均值；16 个采样点 Cu 超过 2019 年均值；14 个采样点 Zn 超过 2019 年均值。对应到具体观测点，滦河口、陡河口、唐山港及曹妃甸矿石码头周边重金属含量偏高；打网岗、月坨岛、菩提岛等与背景值相差不明显；曹妃甸湿地区域偏低，而在华北理工大学、人工岛、南堡工业区等围海造地区域也低于背景值。Cu 和 Zn 含量与沉积物中的有机质存在正相关性，两者被水体中可溶性有机质相结合，而其在河口、渔场和人工岛的含量较湿地、港口和曹妃甸矿石码头周边都高，Pb、Hg、As 与有机质赋存无相关性。4 种重金属的高值出现在陡河口和嘴东经济开发区沿线，该区域的多为淤泥和粉砂质黏土，受到水动力条件较弱和海水稀释作用不明显的影响，从河口到工业区的入海污染物中重金属元素易附着在细颗粒沉积物上造成重金属的积聚。

Table 4. Content characteristics of heavy metals in coastal zone ($\times 10^{-6}$)
表 4. 海岸带重金属含量特征($\times 10^{-6}$)

项目元素	As	Pb	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn
第一类	20.0	60.0	0.20	0.50	80.0	35.0	150.0
第二类	65.0	130.0	0.50	1.50	150.0	100.0	350.0
第三类	93.0	250.0	1.00	5.00	270.0	200.0	600.0
2009 年均值	5.21	28.41	/	/	25.86	15.80	49.68
2019 年均值	4.94	25.49	0.016	0.086	65.79	15.18	58.03
背景值	2	13.96	0.05	0.088	/	22.1	65.15

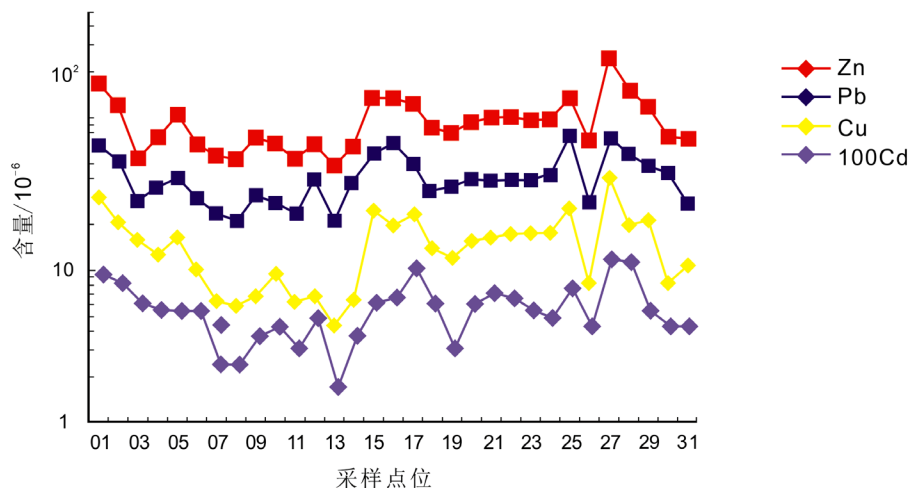


Figure 3. Change trend of heavy metal content
图 3. 重金属含量变化趋势图

有 14 个采样点 As 含量超过 2009 年和 2019 年均值；有 5 个采样点 Cr 含量超过 1993 年均值，最高为 7.09 倍，其高值区较为分散，存在于华北理工大学和港口边缘区，可能与大规模人工扰动有关。值得注意的是唐山海岸带沉积物中 Cd 的含量均值虽然在背景值($0.04\sim 0.136$) $\times 10^{-6}$ 范围内，但在临港工业区、嘴东经济开发区、陡河口和养殖区出现高值，Cd 毒性水平较高，对人体危害较大，此区域居住人口和水产养殖产品加工与农田较多，应在污染物排放予以重视。

6. 结论

1) 唐山海岸带区域近年来快速的工业化进程, 促使沉积条件发生改变, 海岸带局部冲淤条件变化, 造成打网岗、曹妃甸、京唐港、菩提岛等区域向海侧侵蚀加剧, 向陆侧淤积加快。

2) 快速的工业化进程导致沉积物中指标元素发生迁移和累积。Fe、Mn、Nb 等指标元素在不同采样点不同程度超过 1993 年观测值; 重金属元素在滦河口、陡河口、曹妃甸港、京唐港等观测点偏高, 在湿地、近年围海造地区域偏低。启示快速工业化进程可能造成某些元素在新的沉积环境条件下富集, 也有可能因受到稀释而含量降低。

致 谢

感谢审稿专家的辛勤工作, 感谢课题组参与野外取样、观测的所有的人员。

基金项目

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41972004)和河北省自然科学基金(编号: E2019209339, D2017209236)联合资助。

参考文献

- [1] Lakshmi, A. and Rajagopalan, R. (2000) Soci-Economic Implications of Coastal Zone Degradation and Their Mitigation: A Case Study from Coastal Villages in India. *Ocean and Coastal Management*, **43**, 749-762. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(00\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(00)00057-0)
- [2] 李凡, 张秀荣. 人类活动对海洋大环境的影响和保护策略[J]. 海洋科学, 2000, 24(3): 6-8.
- [3] 马龙, 于洪军, 王树昆, 等. 海岸带环境变化中的人类活动因素[J]. 海岸工程, 2006, 4(25): 29-34.
- [4] 聂红涛, 陶建华. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析[J]. 海洋工程, 2008, 26(3): 44-50.
- [5] 毛龙江, 张永战, 张振克, 等. 人类活动对海岸海洋环境的影响——以海南岛为例[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(7): 96-100.
- [6] Hornberger, M.I., Luoma, S.N., van Geen, A., et al. (1999) Historical Trends of Metals in the Sediments of San Francisco Bay, California. *Marine Chemistry*, **64**, 39-55. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)80083-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)80083-2)
- [7] Lee, S.V. and Cundy, A.B. (2001) Heavy Metal Contamination and Mixing Processes in Sediments from the Humber Estuary, Eastern England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **53**, 619-636. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0713>
- [8] Palanques, A., Sanchez-Cabeza, J.A., Masqué, P. and León, L. (1998) Historical Record of Heavy Metals in a Highly Contaminated Mediterranean Deposit: The Besòs Prodelta. *Marine Chemistry*, **61**, 209-217. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)00020-6)
- [9] 高莲凤, 张振国, 姚纪明, 等. 唐山滨海湿地退化影响因素及其保护对策[J]. 海洋湖沼通报, 2006(3): 103-108.
- [10] 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 等. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2359-2367.
- [11] 张效龙, 丁德文, 徐家声, 等. 渤海西部河口潮间带区海水及沉积物中重金属研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 276-280.
- [12] 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. 中国环境科学, 1994(5): 370-376.
- [13] Selvaraj, K., Mohan Ram, V. and Szefer, P. (2004) Evaluation of Metal Contamination in Coastal Sediments of the Bay of Bengal, India: Geochemical and Statistical Approaches. *Marine Pollution Bulletin*, **49**, 174-185. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.02.006>
- [14] Williams, S.C., Simpson, H.J., Olsen, C.R. and Green, P. (1978) Sources of Heavy Metals in Sediments of the Hudson River Estuary. *Marine Chemistry*, **6**, 195-213. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(78\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0304-4203(78)90030-0)
- [15] Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., et al. (2005) Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Ocean. *Science*, **308**, 376-380. <https://doi.org/10.1126/science.1109454>
- [16] Fanos, A.M. (1995) The Impacts of Human Activities on the Erosion and Accretion of the Nile Delta Coast. *Journal of Coastal Research*, **11**, 821-833.

- [17] Carriquiry, J.D., Sánchez, A. and Camacho-Ibar, V.F. (2001) Sedimentation in the Northern Gulf of California after Cessation of the Colorado River Discharge. *Sedimentary Geology*, **144**, 37-62.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00134-8)
- [18] 李建芬, 商志文, 王宏, 等. 渤海湾西部现代有孔虫群垂直分带的特征及其对全新世海面、地质环境变化的指示[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 650-659.
- [19] 徐亚, 郝天珧, 戴明刚, 等. 渤海残留盆地分布的综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 868-881.
- [20] 吉治平. 渤海残留盆地油气地球物理研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1039-1046.
- [21] 李军, 王燮培. 渤海湾盆地构造格架及演化[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 63-67.
- [22] 李伟, 吴智平, 赵文栋. 渤海湾盆地燕山期构造特征与盆地转型[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 2068-2077.
- [23] 郝天珧, 吴健生, 徐亚, 等. 综合地球物理方法在环渤海残留盆地分布研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 639-647.
- [24] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sediment to Logical Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [25] Tang, D.G., Kent, W.W. and Peter, H.S. (2002) Distribution and Partitioning of Trace Metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in Galveston Bay Waters. *Marine Chemistry*, **78**, 29-45. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(02\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(02)00007-5)
- [26] Kunwar, P.S., Dinesh, M., Vinod, K.S., *et al.* (2005) Studies on Distribution and Fractionation of Heavy Metals in Gomti River Sediments—A Tributary of the Ganges, India. *Journal of Hydrology*, **312**, 14-27.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.021>
- [27] 张振国, 刘长水, 李玲, 等. 滦河口 - 陡河口潮间带重金属分布特征及其环境效应[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(2): 145-149.
- [28] 王祖伟, 徐利森, 张文具. 土壤微量元素与人类活动强度的对应关系[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 303-305.
- [29] Dassenakis, M.I., Kloukiniotou, M.A. and Pavlidou, A.S. (1996) The Influence of Long Existing Pollution on Trace Metal Levels in a Small Tidal Mediterranean Bay. *Marine Pollution Bulletin*, **32**, 275-282.
[https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00162-G](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00162-G)
- [30] Jha, S.K., Chavan, S.B., Pandit, G.G., *et al.* (2003) Geochronology of Pb and Hg Pollution in a Coastal Marine Environment Using Global Fallout ^{137}Cs . *Journal of Environment and Radioactivity*, **69**, 145-157.
[https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00092-4)
- [31] 乔立新, 郭作金, 余国泰, 等. 渤海西岸微量元素表生地球化学特征[J]. 环境科学进展, 1993, 1(3): 62-73.