

doi: 10.12029/gc20210608

彭博,王继龙,同萌,武彬,刘晓强,牛淑杰,林沐东,张华,李茂田,于俊杰. 2021. 人类活动影响下福建三都澳近百年来重金属沉积记录及其对生态环境的影响[J]. 中国地质, 48(6): 1759–1769.

Peng Bo, Wang Jilong, Tong Meng, Wu Bin, Liu Xiaoqiang, Niu Shujie, Lin Mudong, Zhang Hua, Li Maotian, Yu Junjie. 2021. Heavy metal deposition and its impact on ecological environment in Sanduao Bay of Fujian Province during the past century under the influence of human activities [J]. *Geology in China*, 48(6): 1759–1769(in Chinese with English abstract).

人类活动影响下福建三都澳近百年来重金属沉积记录及其对生态环境的影响

彭博¹,王继龙¹,同萌²,武彬¹,刘晓强²,牛淑杰²,林沐东²,张华¹,李茂田²,于俊杰¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室,上海 201100)

摘要:因重金属难以被生物降解,易形成毒害环境因子,沉积物中的重金属污染演变是工业化以来全球共同面临的生态环境问题。为揭示福建三都澳地区人类活动与重金属沉积的关系,对采集自三都澳海域的 6 根岩心柱进行了系统的粒度分析、²¹⁰Pb 测年以及重金属元素测试。研究结果表明:(1)近百年来,三都澳海域沉积物重金属含量呈现显著增加趋势,顶部比底部增加 1.01~2.8 倍,并表现出 3 个明显演变阶段:1900—1950 年,沉积物中的重金属含量相对稳定;1950—2000 年,重金属含量开始缓慢增加;2000 年以来,远岸区重金属含量急剧增加。这种变化趋势与人口、经济发展密切相关。(2)三都澳近岸区沉积物重金属含量总体大于远岸区,自 2000 年以来,近岸区和远岸区沉积物重金属含量的演变趋势呈现差异性,表现为近岸区重金属含量有所降低,远岸区重金属含量急剧升高,这种时空差异与沉积物粒度变化及地区产业分布有密切关系。(3)重金属对三都澳海洋生态环境影响较大,在湾内渔业养殖强度越来越高的背景之下,应对近期以来湾内重金属含量的快速升高给予足够重视,提高保护和修复治理力度,避免海洋生态破坏。

关键词:重金属;海域沉积物;生态环境;人类活动;环境地质调查工程;三都澳;福建省

中图分类号:P736.21³;X171.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)06-1759-11

Heavy metal deposition and its impact on ecological environment in Sanduao Bay of Fujian Province during the past century under the influence of human activities

PENG Bo¹, WANG Jilong¹, TONG Meng², WU Bin¹, LIU Xiaoqiang², NIU Shujie², LIN Mudong², ZHANG Hua¹, LI Maotian², YU Junjie¹

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 201100, China)

收稿日期:2021-03-08;改回日期:2021-06-21

基金项目:中国地质调查局项目(DD20189505)资助。

作者简介:彭博,男,1986 年生,助理研究员,从事水工环地质、第四纪地质方面的调查与研究;E-mail:pengboc@163.com。

通讯作者:于俊杰,男,1983 年生,高级工程师,从事第四纪地质、水工环地质调查与研究;E-mail:yjunjie@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: Heavy metals are difficult to be biodegraded, meanwhile easy to form toxic environmental factors. The evolution of heavy metals pollution in sediments is a common global ecological environmental problem since industrialization. To reveal the relationship between human activities and heavy metals deposition in Sanduao Bay of Fujian Province, 6 sediment cores were collected in the Bay for grain size testing, ^{210}Pb dating and assay of Cu, Pb, Zn, Cr, As, Cd and Hg contents. The results show that over the past century, heavy metal contents in sediments of Sanduao Bay exhibit a significant increase trend. The top is 1.01–2.8 times higher than the bottom, and the evolution process can be divided into three stages, relatively stable period during 1900–1950s, slowly increasing during 1950–2000s, and sharply increasing since the 2000s. Those changes are closely related to population and economic development. The content of heavy metals in landward zone is generally higher than that in seaward zone, and the evolution trend of sediments in landward zone has been different from the sediments in seaward zone since 2000s. The heavy metals content of sediments in landward zone has decreased, while the heavy metals content of sediments in seaward zone has increased sharply in Sanduao Bay. This spatial difference is closely related to the change of grain size and regional industry distribution. Heavy metals have a great impact on the marine ecological environment of Sanduao Bay. As the increasing intensity of fish farming in the Bay, enough attention should be paid to the rapid increase of heavy metal contents in the Bay in recent years, so as to improve the management and remediation to avoid marine ecological damage.

Key words: heavy metals; marine sediments; ecological environment; human activities; environment geological survey engineering; Sanduao Bay; Fujian Province

About the first author: PENG Bo, male, born in 1986, assistant researcher, engaged in hydrogeological engineering and environmental geology; E-mail: pengbocc@163.com.

About the corresponding author: YU Junjie, male, born in 1983, senior engineer, engaged in Quaternary geology, hydrogeological engineering and environmental geology; E-mail: yjunjie@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20189505).

1 引 言

重金属难以被生物降解,且易通过食物链的传递和累积作用在人体内富集,当超过一定限度会导致蛋白质和酶失去活性形成毒害,因此重金属污染成为工业化进程中全球共同面临的重要生态环境问题之一(Mahler et al., 2006)。由于沉积物是重金属污染物的源和汇,因此,沉积物重金属污染已经成为当今生态环境必要评价因子之一,也是全球沉积环境研究的关键内容和热点问题(Youssef et al., 2015; Xu et al., 2017)。以往研究表明陆域排放、养殖、洋流和沿岸流等因素都对沉积物重金属过程有重要影响(黄标等, 2002; 赵卫红, 2006; Du et al., 2013; Lu et al., 2019)。

三都澳位于福建省宁德市,是由东冲半岛、鉴江半岛组成的一个海湾,海域面积达 570 km²,水域辽阔,区域人口达 200 多万(郑钦华, 2010)。源起于西部鹞峰山脉,宁德境内有交溪、霍童溪和大金溪等 3 条相对较大的独流诸河呈西北–东南走向汇入三都澳。前人对三都澳湾内水体和沉积物的生态环境进行了大量研究,但多集中于质量现状、特征

分析及综合评价(黄标等, 2002; 王宪等, 2002; 刘家富等, 2003)。对于湾内重金属沉积历史演化过程,及其与人类活动的关系探索尚未见报道,从而影响区域内重金属污染治理效率和针对性防治工作的开展。本文通过对采集自三都澳海域的 6 根沉积物岩心展开粒度、 ^{210}Pb 测年和重金属测试,揭示本海域重金属含量状况、垂直分布特征与来源,为探究湾内沉积物重金属污染与人类活动、生态环境的相互关系及响应机制提供参考,同时也为相关自然资源管理部门制定海洋生态环境保护的规划、政策和法规提供依据。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

2018 年 6—7 月,南京地质调查中心承担的海岸带地质调查工程项目对三都澳进行了综合调查和采样,利用重力取样器在三都澳湾内采取 6 根柱状岩心(站位号:Z30、Z26、Z31、Z10、Z06 和 Z21),其长度分别为 53 cm、113 cm、49 cm、94 cm、111 cm 和 125 cm。根据 6 根柱状岩心采集站位相对于汇入三都澳的 3 条主要河流的河口位置,将本次研究区划

分为近岸区和远岸区两个区域,以代表陆源沉积物接受水流搬运距离的相对长短(图1)。在野外现场将沉积物岩心装入PVC管中密封,整体带回实验室,再按照1 cm间隔分样。根据岩性挑选部分岩心样品进行粒径、 ^{210}Pb 年代和重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cr、As、Cd和Hg)含量测试。粒度、 ^{210}Pb 年代和重金属含量测试样品数量分别为183件、73件和217件。

2.1 实验测试

粒度测试:将样品烘干并混合均匀,取出80 mg左右(粗颗粒150 mg左右)置入干净的100 mL烧杯;加入10%的双氧水20 mL,搅拌使其充分反应以便去除样品中的有机质;而后再加入稍过量的10%的盐酸,搅拌使其充分反应以除去样品中的碳酸盐;加超纯水静置24 h后弃掉上清液保留10~20 mL,以去除残留盐酸;加入10 mL的10%六偏磷酸钠溶液,超声波震荡10~20 min;最后,对已处理好的样品使用激光衍射粒度分析仪(LS 13 320系列)测试粒度。所有粒度测试在华东师范大学河口海岸国家重点实验室进行。

^{210}Pb 测年: ^{210}Pb 是一种半衰期为22.3 a的天然放射性核素,已被广泛用于沉积年龄、沉积速率和沉积通量的测定(陈诗越等,2009;王小雷等,2011;刘

永等,2012;柴社立等,2013;郑煌等,2016;孙德尧等,2018)。根据沉积连续、岩性均一、颗粒较细、生物扰动较少的测年要求,选取6根不同深度的沉积柱样品73件。样品经低温烘干、研磨并过100目筛分选,称取5 g放入测试管,并将开口封蜡处理,放置3周,使放射能量达到平衡。随后,样品被送到中国科学院南京地理与湖泊研究所,利用高纯锗井型探测器(Ortec HPGe GWL) γ 谱仪进行测定。其中, ^{210}Pb 标准样品由英国利物浦大学提供, ^{226}Ra 标准样品由中国原子能研究院提供。

重金属测试:将样品低温烘干,人工剔除贝壳、石块等杂物,研磨至粉末并过200目筛进行前处理。使用北京海光仪器有限公司的AFS-9600原子荧光光度计分析As和Hg,分析方法参照DZ/T0279.13-2016、DZ/T0279.17-2016;使用赛默飞公司的Icap Q电感耦合等离子体质谱仪分析Cu、Pb、Zn、Cr和Cd,分析方法参照GB/T14506.30-2010。试剂空白和重复样也随机插入分析过程中,结果表明分析过程无污染,所有重复样的相对标准偏差都小于10%。所有重金属测试在国土资源部华东矿产资源监督检测中心进行。

相关性分析:利用SPSS分析每根沉积物岩心

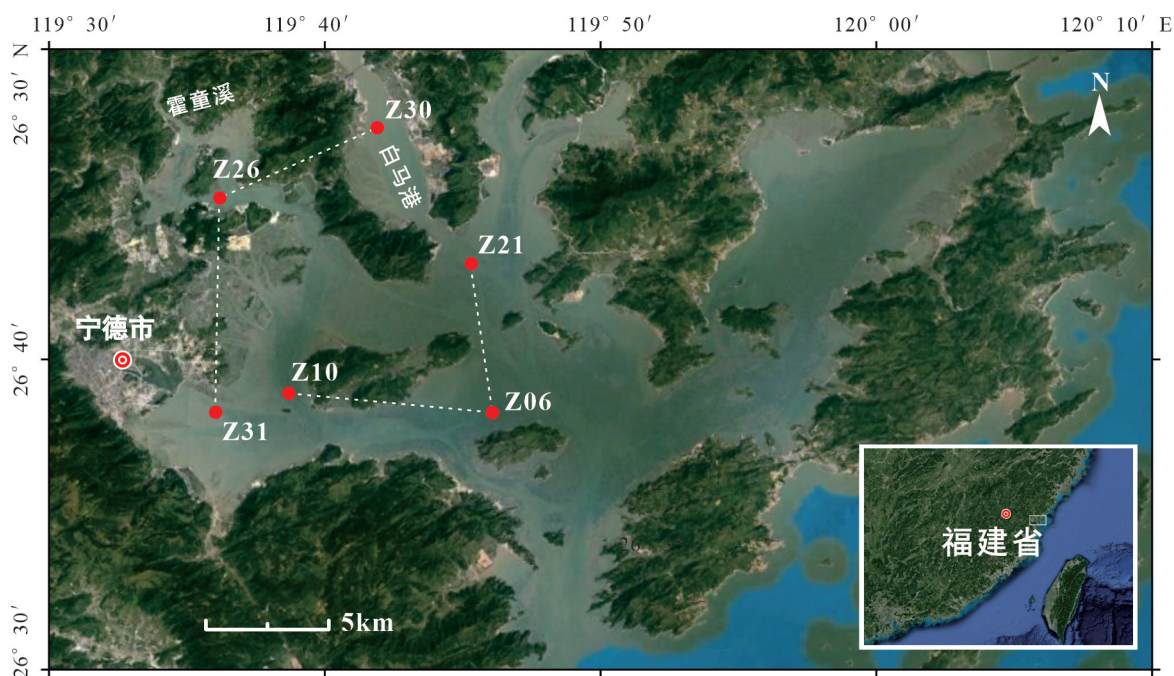


图1 三都澳及沉积柱站位分布图

Fig.1 Map of the sampling stations in Sanduao Bay

重金属含量与粒度的相关系数。

3 实验结果与分析

3.1 粒度分析

粒度测试数据表明,6根柱状岩心组成成分均以粉砂和黏土为主。基于取样站位位置,三都澳沉积物总体分布特征为:近岸航道内沉积主要以粉砂质砂(如白马港内的Z30)、砂质粉砂和黏土质粉砂为主(如霍童溪入湾航道内的Z26),近岸潮滩沉积主要以黏土质粉砂为主(如大金溪口外潮滩Z31)。湾内航道内沉积主要以黏土质粉砂(如Z10和Z21)和砂质粉砂为主(如Z06)。另外,各沉积柱从底部到顶部,除Z26有向上变粗趋势、Z06有向上变细趋势之外,黏土、粉砂和砂的组份含量基本稳定(图2)。

3.2 沉积速率和年代序列

因被潮流搬运来的沉积物更容易满足常量初始浓度(constant initial concentration,简称CIC)模式所要求的前提条件,在海岸带地区对 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 数据分段采用CIC模式获取的结果较恒定补给速率

(constant rate of supply,简称CRS)模式计算获得的结果更可靠(王福等,2016)。本次研究选用CIC模式计算沉积物岩心沉积速率并建立年代序列(Appleby et al., 1978),得出Z30、Z26、Z31、Z10、Z06和Z21等6根岩心平均沉积速率分别为0.84、1.32、1.24、0.94、0.77和1.03 cm/a(图2)。其中,近岸浅水区域3站位(Z30、Z26和Z31)的沉积速率平均值为1.13 cm/a,大于沉积速率平均值为0.91 cm/a的远岸区3站位(Z10、Z06和Z21)。根据各站位岩心长度、采样时间(2018年)和沉积速率,得出Z30、Z26、Z31、Z10、Z06和Z21等6根岩心的沉积初始年代分别为1955年、1932年、1978年、1918年、1874年和1897年。虽近岸浅水区域岩心沉积历史短于远岸区岩心,但6根岩心整体上记录了三都澳湾内不同地区近百年来重金属沉积历史。

3.3 三都澳近百年来沉积物中重金属变化阶段

近百年来,三都澳海湾沉积物重金属含量呈现总体上升趋势,依据Cu、Pb、Cr和As等主要金属元素含量变化,可划分3个明显演变阶段。第一阶段

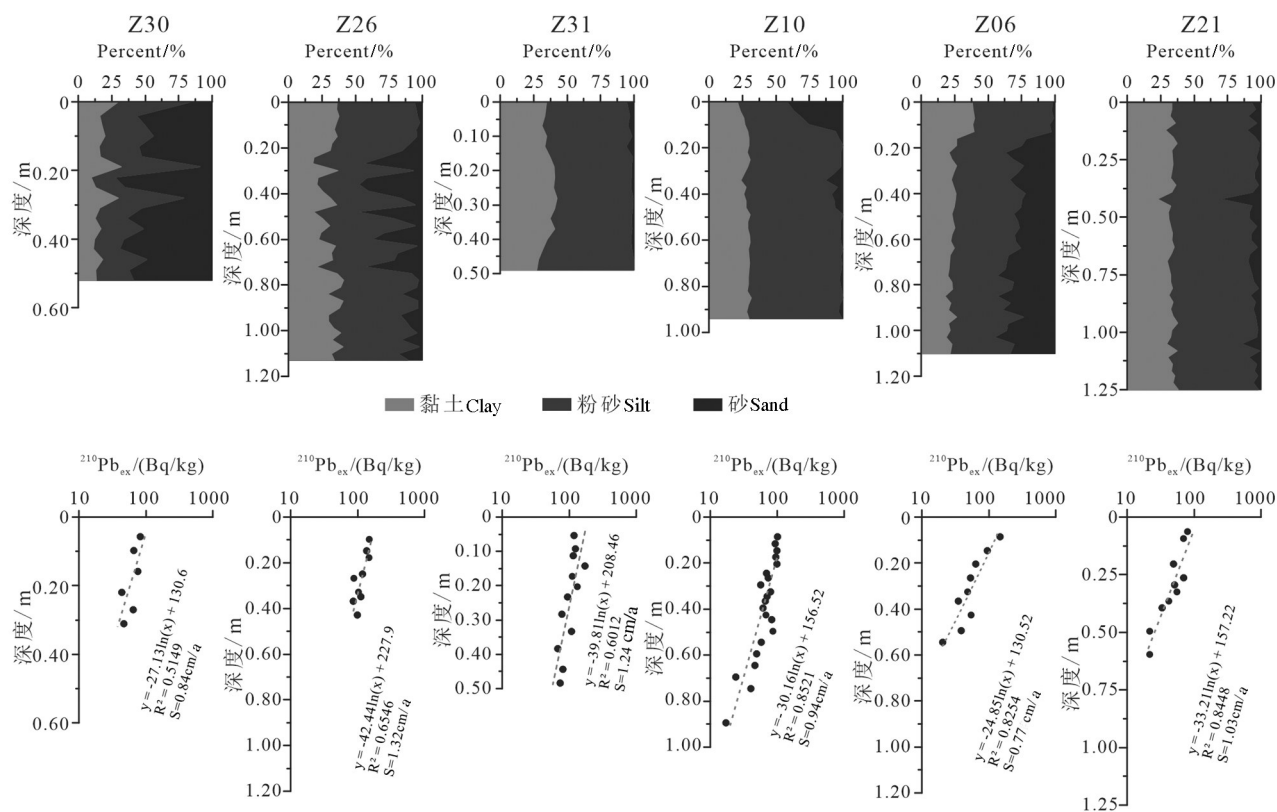


图2 岩心柱粒度组分和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 变化

Fig.2 Changes of the particle sizes and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ of the sediment cores

(L1)为1900—1950年,重金属含量相对较为稳定,无明显增加或减少趋势,如远岸区Z10、Z06和Z21等3根岩心(图3)。第二阶段(L2)为1950—2000年,重金属含量开始缓慢增加(图3,图4)。其中,远岸区Z10岩心的Cr和As,Z06岩心的Zn、Cr、Cu和As,Z21岩心的Zn和As,以及近岸区Z30岩心的Zn、Cr、Cu和Cd,Z26岩心的Zn、Pb、Cu、As和Cd,Z31岩心的Pb、Cu、As和Hg等元素增加趋势较为明显。第三阶段(L3)为2000年以来,三都澳沉积物重金属含量总体快速上升,如远岸区岩心柱中的Cu、Cr、As和Hg,但是不同区域的部分重金属含量也发生差异性变化,近岸区重金属含量有所减少(图4)。

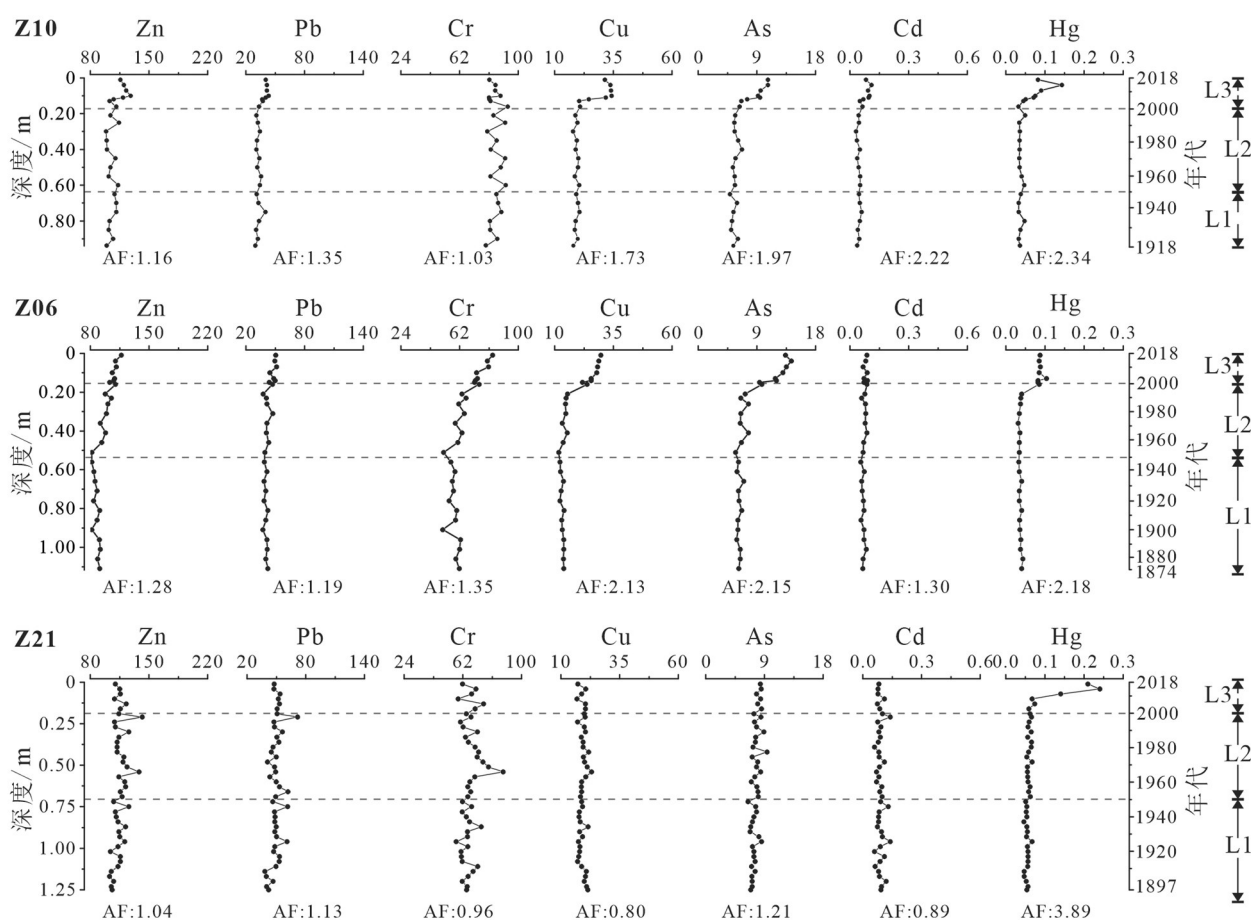
总体上,7种重金属元素在6根岩心顶部的含量是底部的1.01~2.8倍,尤其是远岸区Z10、Z06和Z21岩心中Hg含量的增幅最大,增加倍数分别为

2.34、2.18和3.89(图3)。

3.4 三都澳沉积物重金属含量在空间上的分布规律

近岸区沉积物重金属含量平均值总体大于远岸区(图3,图4,表1)。Zn、Pb、Cr、Cu、As、Cd和Hg等7种重金属在近岸区平均值为:131.14、65.81、64.91、25.27、11.28、0.17和0.09 mg/kg;在远岸区平均值分别为:106.78、42.8、72.18、19.72、7.53、0.07和0.05 mg/kg。7种重金属在近岸区的含量分别是远岸区的1.23、1.55、0.90、1.28、1.50、2.35和1.59倍。

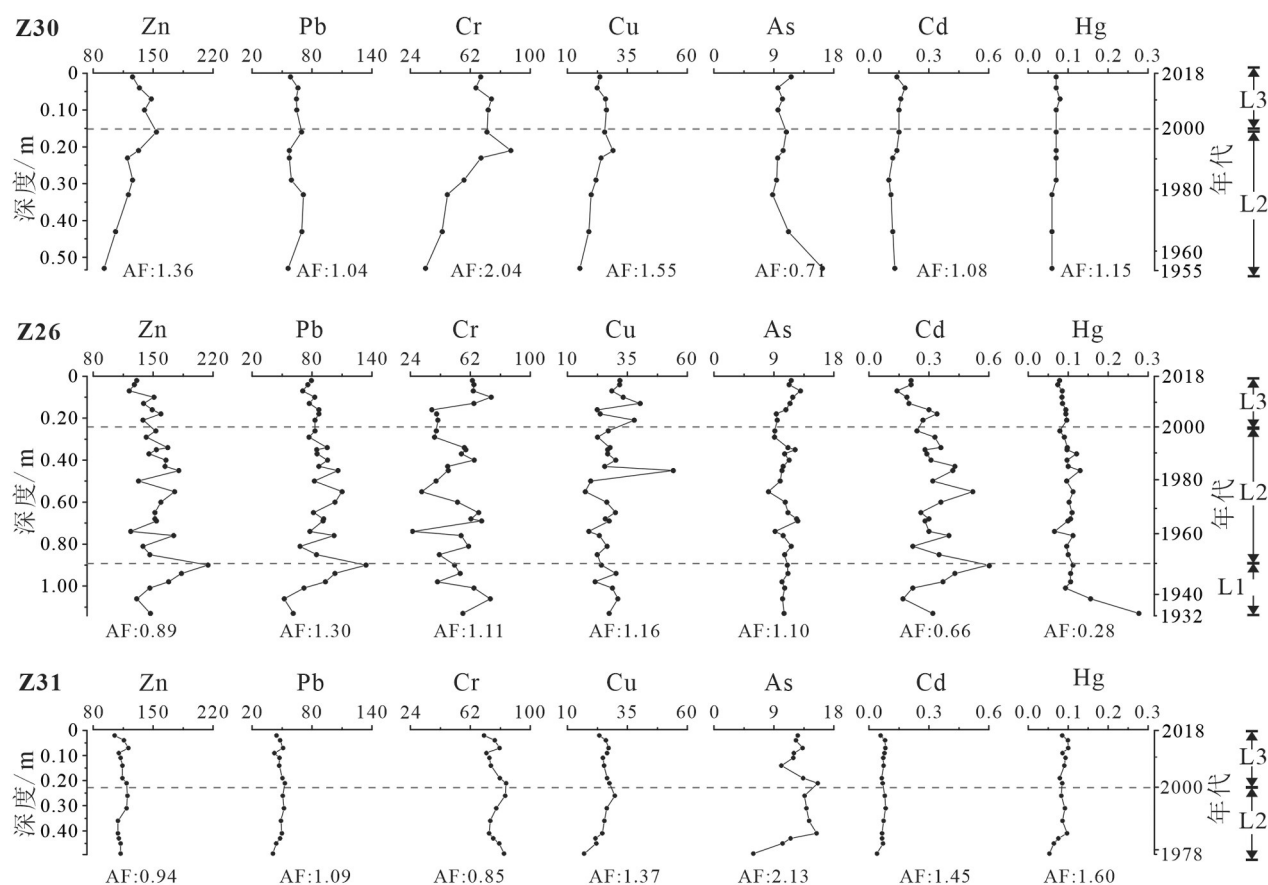
如上所述,三都澳远岸区和近岸区的沉积物部分重金属含量在2000年以来的变化趋势呈现差异性,即远岸区沉积物重金属含量呈急剧增加趋势,近岸区的重金属含量呈略微减少趋势。其中,远岸区岩心Z10中Cu、As和Hg,岩心Z06中Cr、Cu、As和Hg,岩心Z21中的Hg等元素含量增加趋势十分



注: 重金属元素含量单位为 mg/kg。

图3 三都澳远岸区岩心重金属沉积记录

Fig.3 Heavy metals deposition records of cores in seaward zone of Sanduao Bay



注: 重金属元素含量单位为 mg/kg。

图4 三都澳近岸区岩心重金属沉积记录

Fig.4 Heavy metals deposition records of cores in landward zone of Sanduao Bay

明显;但近岸区中岩心 Z30 中 Zn、Pb、Cr 和 Cu, 岩心 Z26 中 Zn、Pb、Cd 和 Hg, 岩心 Z31 中 Cr、Cu 和 As 元素含量呈现减少趋势。

4 讨论

4.1 重金属沉积受人类活动的影响

自然流域表生地质过程中,水或沉积物中的重金属主要来源于岩石风化和土壤淋滤,其含量的年际变化,在长期演变中基本处于相对平衡稳定状态,即不再有短期内显著增加或者减少的趋势(朱青青等,2012)。然而,三都澳海域沉积物主要重金属含量在近百年来却呈现出总体升高的三阶段演化趋势(图3,图4),表明除自然风化因素外,已经有其他因素驱动流域外源输入或者湾内内源输入的不断增加,致使湾内沉积物重金属含量发生变化。

为分析自然风化和人类活动之间的关系,本文

收集宁德市人口、地区 GDP,以及第一、二、三产业值等数据(宁德市统计局,2018),作为人类活动和经济生产的代用指标,并分析其 1950—2018 年的变化趋势(图5)。1950 年以来宁德地区人类活动和经济生产可以明显划分为两个阶段:第一阶段为 1950—2000 年,人类活动和经济生产缓慢增加阶段,表现为人口明显增长,GDP 和第一、二、三产业值缓慢增长。第二阶段为 2000 年以来,人类活动和经济生产急剧增加阶段,表现为人口缓慢增长,但 GDP 和第一、二、三产业值急剧增加。

海域沉积物重金属含量第二、三阶段变化趋势与地区人类活动两阶段变化具有高度相似性,表明海域沉积物重金属含量变化与人口、经济发展密切相关。在 1950 年以前阶段,7 种重金属元素多以自然沉积为主,含量保持相对稳定,人类对海湾重金属含量影响较为微弱。在 1950—2000 年阶段,以

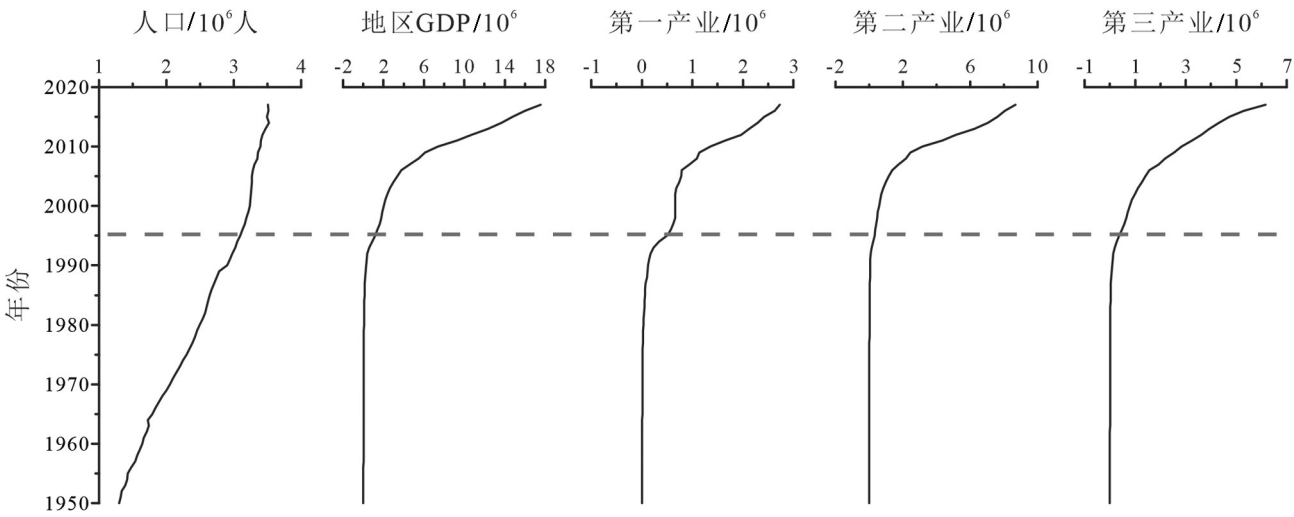


图5 宁德市近50年来人口、GDP和产业发展趋势
Fig.5 Population, GDP and industrial development trend of Ningde in the recent 50 years

Zn(如岩心柱 Z06 和 Z30)、Cr(如岩心柱 Z06 和 Z30)、Cu(如岩心柱 Z06、Z30 和 Z31)和 As(如岩心柱 Z10、Z06 和 Z21)等为代表的重金属元素含量开始缓慢升高,此阶段内地区人口大量增长,农业生产中农药、化肥的使用以及居民生活污水的排放导致 Zn、Cr、Cu 和 As 等重金属含量逐年缓慢升高。在 2000 年以后阶段,远岸区中 Pb(如岩心柱 Z10 和 Z06)、Cr(如岩心柱 Z06)、Cu(如岩心柱 Z10 和 Z06)、As(如岩心柱 Z10 和 Z06)和 Hg(如岩心柱 Z10、Z06 和 Z21)等重金属含量急剧升高,此阶段人类经济生产活动能力大幅增强,第二、三产业增长十分快速。相较于第二阶段中人口增长和农业生产带来的重金属含量缓慢升高,工业化发展导致的 Cr、Cu、As 和 Hg 等重金属污染程度更加严重和快速。

另一方面,近岸区沉积物重金属含量总体大于

湾内的结果(表 1),说明重金属污染源来自人类活动产生的重金属排放,并由近岸向湾内输送,这与 1950 年以来三都澳沿岸工业、产业发展布局相吻合。尤其是 2000 年以来,环三都澳地区基本构建霍童溪河口钢铁汽车产业区(岩心柱 Z26 区域),白马港船舶、电机、新能源产业区(岩心柱 Z30 区域),溪南石化、能源和临港产业区(岩心柱 Z21 东部半岛区域),城澳出口加工与旅游区和飞鸾湾现代物流区(岩心柱 Z31 区域)等沿岸产业区划与布局。上述密集多样的临港工业与各类产业,容易产生大量生活污水和工业废水,其不合理排放造成近岸区沉积物重金属含量高于远岸区。

4.2 重金属沉积受沉积环境的影响

一般而言,近岸的临港工业及产业在近年来的密集快速发展应该导致湾内近岸区重金属含量逐

表 1 近岸区和远岸区岩心重金属含量(mg/kg)平均值差异
Table 1 Differences in heavy metals average contents (mg/kg) from cores in landward zone and cores in seaward zone

区域	岩心编号	Zn	Pb	Cr	Cu	As	Cd	Hg
近岸	Z30	127.35	63.16	63.25	22.99	10.70	0.14	0.07
	Z26	152.59	86.38	53.68	27.88	10.72	0.31	0.10
	Z31	113.47	47.89	77.80	24.95	12.41	0.07	0.08
湾内	Z10	109.00	34.95	85.23	22.50	6.68	0.06	0.05
	Z6	96.06	42.90	64.39	17.28	8.12	0.07	0.05
	Z21	115.30	49.60	66.92	19.37	7.78	0.09	0.06
近岸平均值		131.14	65.81	64.91	25.27	11.28	0.17	0.09
湾内平均值		106.78	42.48	72.18	19.72	7.53	0.07	0.05
倍数		1.23	1.55	0.90	1.28	1.50	2.35	1.59

渐增加,然而实测数据表明,2000年以来近岸区重金属含量却有所减少,近岸区和远岸区沉积物重金属含量呈现出差异变化,与上述环三都澳产业空间布局有所矛盾(图4,图5)。

以往研究表明,沉积物的重金属含量除了与输入量有关以外,受沉积物粒度的控制十分明显,粒度是影响重金属含量的最重要控制参数之一(De Groot et al., 1971;陈静生等,1994)。由于大部分微量元素以吸附态赋存于细颗粒组分,其含量高低与沉积物粒度也有密切关系,一般表现为粒度越小,吸附效应越强,重金属的含量越高,即沉积物重金属含量与粒度呈负相关性(Whitney, 1975; Helmke et al., 1977; Presley et al., 1980; Zhang et al., 2002; 乔磊等, 2005; 张远等, 2013; 石勇等, 2015)。为进一步揭示近期驱动三都澳重金属变化的原因,本文利用SPSS分析了每个沉积柱的粒度与重金属的相关性,其结果可以分为两类(表2):一类是Z06和Z31柱,其重金属含量与粒度相关性为负,且相关性显著,随粒度增加,重金属含量减少。具体表现为随着粒度增大,近岸区Z31近期重金属含量有所减少,这种粒度的增加可能与航道冲刷和水动力增强有关;随着粒度减小,远岸区Z06近期重金属含量的增加(图2~图4,表2)。另外一类是Z21、Z10、Z26和Z30柱,其重金属含量与粒度相关性为正,大部分相关性差,这类沉积柱的重金属含量基本不受沉积物粒度影响。尤其是Z10柱,重金属含量表现出随粒度增大而增加,这说明包括人类活动和经济生产在内的其他原因导致此处重金属含量的增加。

表2 三都澳沉积物岩心重金属与中值粒径的相关性系数

Table 2 Correlation coefficient of the heavy metals contents in sediment cores and the median grain sizes from Sanduao Bay

柱状岩心	重金属受粒度影响		重金属不受粒度影响			
	Z06	Z31	Z21	Z10	Z26	Z30
Zn	-0.644**	-0.192	0.060	0.448*	0.021	-0.412
Pb	-0.674**	-0.588*	-0.071	0.821**	0.127	0.189
Cr	-0.647**	-0.274	0.295	-0.784**	-0.081	-0.239
Cu	-0.650**	-0.550	0.222	0.832**	-0.092	-0.217
As	-0.450*	-0.742**	0.394**	0.839**	-0.162	0.072
Cd	-0.653**	0.001	-0.145	0.817**	-0.003	-0.185
Hg	-0.583**	-0.073	-0.066	0.859**	-0.051	-0.404

注:**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

综上所述,2000年以来远岸区重金属含量急剧增加主要是人类活动和经济生产的快速发展所致,而近岸重金属含量有所减少的原因主要受粒度变粗的影响所致,但总体上人类生产与生活排放量增加仍是三都澳沉积物重金属含量变化的主要驱动力。

4.3 对生态环境的危害及建议

重金属是目前环境中广泛存在的典型的持久性无机污染物,具有不降解、易在生物体内蓄积的特性和致癌、致畸、致死等毒性效应,在一定条件下,甚至能够与某些有机物发生反应并转化成毒性更大的金属-有机复合污染物(傅海霞等,2016)。重金属等污染物在海洋环境中浓度累计达到一定程度后,主要被水生生物以呼吸、摄食及皮下层吸收等3种途径进入生物体内,并易在动物肝肾等器官内富集,影响生物体的正常生长发育,进而对生物种群乃至整个生态系统的结构产生不可逆的破坏作用,尤其是近年来海洋生态环境恶化加剧,海洋生态系统平衡被打破,海洋环境状况堪忧,重金属污染已成为严峻的环境问题之一,引发社会广泛关注并开展有关毒性效应、环境行为、污染防治及生态环境管理等研究(洪亚军等,2019;徐英江等,2020)。

海洋沉积物作为底栖生物生活的主要场所,所含重金属污染物会直接或间接地对海洋生物体产生毒性,并且会通过生物食物链富集(Luo et al., 2018)。根据中国海洋生态环境状况公报显示,中国监测的河口和海湾附近海域部分生物体内Cd、Pb和As残留水平较高,鱼卵、仔鱼密度总体偏低(国家海洋局,2018)。参照《国家海洋沉积物质量》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2002)中对海洋沉积物质量的分类与指标,在三都澳湾内采取的6根柱状岩心中,岩心Z06和Z10顶部的Cr含量、岩心Z21顶部的Hg含量、岩心Z26顶部的Pb含量处于第一类和第二类标准值之间(表3),根据沉积物质量综合等级等同于单指标划分出的最差等级的原则,岩心Z06、Z10、Z21和Z26顶部所代表的沉积物质量处于第二类。综上,三都澳海域沉积物重金属含量已存在部分超标,整体质量一般,并有污染程度加速的趋势。

然而,三都澳又是中国重要的海洋渔业养殖基地。宁德地区海产养殖面积和海产品产量持续增

表3 三都澳沉积物岩心顶部重金属含量(mg/kg)质量等级
Table 3 The quality grade of the heavy metals contents (mg/kg) at the top of sediment cores in Sanduao Bay

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg	质量等级(据GB18668-2002)
第一类质量标准	35	60	150	80	0.5	20	0.2	
Z06	29.6	50.4	117	83.3	0.086	13.4	0.087	第二类
Z10	31.4	40.2	116	81.2	0.082	10.7	0.082	第二类
岩心	Z21	17.2	47.7	110	0.082	8.37	0.209	第二类
编号	Z26	31.9	79.3	131	0.21	11.6	0.078	第二类
	Z30	23.6	58.6	126	0.14	11.6	0.069	第一类
	Z31	23.3	44.6	105	0.058	12.6	0.085	第一类

长,至2018年达到了43733 hm²和920599 t,约为1985年的10倍(宁德市统计局,2018)。三都澳湾内水产养殖密度及强度持续提升的同时,在人类活动影响下,湾内沉积物重金属含量也持续升高。鉴于此,建议采取严格的管控措施,加强污染源处理,控制污染排放,并科学合理选择恢复手段,保护与修复湾内海洋和渔业生态环境,避免重金属在内的持续性污染物从海水或沉积物转移到海洋生物体内,最终对人类生命健康造成威胁。

5 结 论

(1)近百年来,三都澳海域沉积物重金属含量呈现显著增加趋势,并明显呈现出3个演化阶段:在1900—1950年阶段中,重金属含量稳定;1950—2000年阶段中,重金属含量开始缓慢升高;2000年以来阶段中,远岸区重金属含量急剧升高。

(2)三都澳近岸区沉积物重金属含量总体大于远岸区。自2000年以来,随着人类活动的快速发展和影响,近岸和湾内沉积物重金属含量的演变趋势呈现差异性,表现为近岸区重金属含量有所降低,远岸区重金属含量急剧升高,这种差异可能是沉积物粒度变化造成的。

(3)三都澳沉积物重金属的变化特征反映了其来源和富集程度的变化,记录了宁德海岸带地区人类活动对海洋生态环境的影响进程。在湾内渔业养殖密度和强度越来越高的背景之下,重金属对生态环境的影响必然随之逐渐增强,应对近期以来湾内Cu、Cr、As和Hg含量的快速升高给予足够重视,加强海域重金属污染的管控及修复治理力度,以保护和维系绿色、健康的渔业生态。

References

Appleby P G, Oldfield F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment[J]. Catena, 5(1):1-8.

Chai Sheli, Gao Lina, Qiu Dianming, Chai Yuan, Guo Jia, Xu Xuechun. 2013. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating of the sediment core and its recent accumulation rates in Yueliang Lake in West Jilin Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 43 (1): 134-141(in Chinese with English abstract).

Chen Jingsheng, Wang Feiyue, Chen Jianglin. 1994. Relation of aquatic particulate grain size to heavy metals concentrations in Eastern Chinese Rivers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 14(4): 419-425(in Chinese with English abstract).

Chen Shiyue, Wang Sumin, Chen Yingying, Zhang Enlou, Chen Yongjin, Zhu Yuxin. 2009. Vertical distribution and chronological implication of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in sediments of dongping lake, Shandong Province[J]. Quaternary Sciences, 29(5): 981-987(in Chinese with English abstract).

De Groot A J, De Goeij J J M, Zegers C. 1971. Contents and behaviour of mercury as compared with other heavy metals in sediments from the rivers Rhine and Ems[J]. Geologie en Mijnbouw, 50: 393-398.

Du Rongbin, Liu Liming, Wang Aimin, Wang Yongqiang. 2013. Effects of temperature, algae biomass and ambient nutrient on the absorption of dissolved nitrogen and phosphate by rhodophyte gracilaria asiatica[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 31(2): 353-365.

Fu Haixia, Liu Yi, Dong Zhiying, Li Ye. 2016. Progress in research on ecological toxicity of combined pollution of antibiotics and heavy metals[J]. Environmental Engineering, 34(4): 60-63(in Chinese with English abstract).

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2002. Marine Sediment Quality (GB 18868-2002) [S]. Beijing: China Standards Press, 242-245(in Chinese).

- Helmke P A, Koons R D, Schomberg P J, Iskandar I K. 1977. Determination of trace element contamination of sediments by multielement analysis of clay-size fraction[J]. *Environmental Science and Technology*, 11(10): 984–989.
- Hong Yajun, Feng Chenglian, Xu Zuxin, Liao Wei, Yan Zhenfei, Liu Daqing, Fu Zhiyou. 2019. Advances on ecotoxicity effects of heavy metals to aquatic organisms and the mechanisms[J]. *Environmental Engineering*, 37(11): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Huang Biao, Qian Lumin, Liu Jiafu. 2002. Nutrient salts content and eutrophication assessment for Sanduao Sea Area, Fujian[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 21(4): 411–415(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiafu, Zheng Qinhua, Chen Hongqing, Yu Zuojian, Lin Yongtian. 2003. Water quality condition in Sansha Bay[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 22(2): 201–204(in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Yu Junqing, Zhang Lisha, Gao Chunliang, Cheng Aiying. 2012. Heavy metal pollution record of Xingyun Lake in the past 60 years[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 20(2): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaotian, Lu Yonglong, Chen Deliang, Su Chao, Song Shuai, Wang Tiewu, Tian Hanqin, Liang Ruoyu, Zhang Meng, Khan Kifayatullah. 2019. Climate change induced eutrophication of cold-water lake in an ecologically fragile nature reserve[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 75(1): 359–369.
- Luo Wei, Lu Yonglong, Wang Tiewu, Kong Peiru, Jiao Wentao, Hu Wenyou, Jia Junmei, Naile J E, Khim J S, Giesy J P. 2013. Environmental concentrations and bioaccumulations of cadmium and zinc in coastal watersheds along the Chinese northern Bohai and Yellow Seas[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32(4): 831–840.
- Mahler B J, Van Metre P C, Callender E. 2006. Trends in metals in urban and reference lake sediments across the United States[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(7): 1698–1709.
- Ningde Municipal Statistical Bureau. 2018. Ningde Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1–535(in Chinese).
- Presley B, Trefry J, Shokes R. 1980. Heavy metal inputs to Mississippi Delta sediments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 13(4): 481–494.
- Qiao Lei, Yuan Xuyin, Li A'mei. 2005. Heavy metals in littoral zone of Jiangsu Province and an ecological risk evaluation of heavy metals to this zone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 24(supp.): 178–182(in Chinese with English abstract).
- Shi Yong, Liu Zhishuai, Gao Jianhua, Wang Xiaoyong. 2015. An approach for correcting "grain size effect" base on the size-frequency distribution[J]. *Marine Environmental Science*, 34(4): 606–610(in Chinese with English abstract).
- State Oceanic Administration. 2018. Bulletin of China Marine Ecological Environment Status[R]. (in Chinese).
- Sun Deyao, Zang Shuying, Sun Huajie, Zhang Nannan, Zhang Ke, Sun Li. 2018. Pollution history and potential ecological risk assessment of heavy metals in core sediments in Hulun Lake during the past 150 years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(1): 137–147(in Chinese with English abstract).
- Wang Fu, Yang Biao, Tian Lizhu, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Chen Yongshen, Jiang Xinyu, Yang Jilong, Wang Hong. 2016. The choice of CIC and CRS models of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dating for tidal flat area[J]. *Earth Science*, 41(6): 971–981(in Chinese with English abstract).
- Wang Xian, Li Wenquan, Zhang Fan. 2002. Assessment on present status and quality of sediment in Fujian shore bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(4): 127–131(in Chinese with English abstract).
- Wang XiaoLei, Yang Hao, Ding ZhaoYun, Yang Benjun, Zhang Mingli. 2011. Modern sedimentation rates of Fuxian Lake by ^{210}Pb and ^{137}Cs dating[J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(11): 1551–1561(in Chinese with English abstract).
- Whitney P R. 1975. Relationship of manganese-iron oxides and associated heavy metals to grain size in stream sediments[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 4(2): 251–263.
- Xu Fangjian, Liu Zhaoqing, Cao Yingchang, Qiu Longwei, Feng Jianwei, Xu Feng, Tian Xu. 2017. Assessment of heavy metal contamination in urban river sediments in the Jiaozhou Bay catchment, Qingdao, China[J]. *Catena*, 150: 9–16.
- Xu Yingjiang, Liu Ge, Cui Yanmei, Jiang Fang, Cao Wei, Wang Minglei, Len Nan, Yang Yufang, Gong Xianghong, Tian Xiuhui. 2020. Application of omics in marine ecotoxicology: A Review[J]. *Modern Food Science and Technology*, 329–336(in Chinese with English abstract).
- Youssef M, EL-Sobogy A, Kahtany K AL, Otiaby N A L. 2015. Environmental assessment of coastal surface sediments at Tarut Island, Arabian Gulf (Saudi Arabia)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 96: 424–433.
- Zhang Chaosheng, Wang Lijun, Li Guosheng, Dong Shuangshuang, Yang Jingrong, Wang Xiuli. 2002. Grain size effect on multi-element concentrations in sediments from the intertidal flats of Bohai Bay, China[J]. *Applied Geochemistry*, 17(1): 59–68.
- Zhang Yuan, Tao Ran, Yu Tao, Zhang Yan. 2013. Sediment particle size and the distribution of heavy metals in the typical districts of Dianchi Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 26(4): 370–379(in Chinese with English abstract).
- Zhao Weihong. 2006. The current situation of water quality of the sea areas adjacent to the coast in Fujian Province and pollution-prevention countermeasures[J]. *Fujian Geography*, 21(2): 107–109(in Chinese with English abstract).
- Zheng Huang, Yang Dan, Xing XinLi, Zhang Zezhou, Shu Quanlai. 2016. Historical records, distribution characteristics and sources of heavy metals from sediment core in Honghu Lake, China[J]. *China Environmental Science*, 36(7): 2139–2145(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Zheng Qinhu. 2010. Water environment monitoring and evaluation of fisheries waters of Sandu Bay[J]. Journal of Ningde Teachers College(Natural Science), 22(3): 250–254(in Chinese with English abstract).
- Zhu Qingqing, Wang Zhongliang. 2012. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China[J]. Earth and Environment, 40(3): 305–313(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴社立, 高丽娜, 邱殿明, 柴源, 郭佳, 徐学纯. 2013. 吉林省西部月亮湖沉积物的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年及沉积速率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(1): 134–141.
- 陈静生, 王飞越, 陈江麟. 1994. 论小于 $63\mu\text{m}$ 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转化模型研究[J]. 环境科学学报, 14(4): 419–424.
- 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 张恩楼, 陈永金, 朱瑜馨. 2009. 东平湖沉积物 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 垂直分布及年代学意义[J]. 第四纪研究, 29(5): 981–987.
- 傅海霞, 刘怡, 董志英, 李烨. 2016. 抗生素与重金属复合污染的生态毒理效应研究进展[J]. 环境工程, 34(4): 60–63.
- 国家海洋局. 2018. 2017年中国海洋生态环境状况公报[R].
- 洪亚军, 冯承莲, 徐祖信, 廖伟, 闫振飞, 刘大庆, 符志友. 2019. 重金属对水生生物的毒性效应机制研究进展[J]. 环境工程, 37(11): 1–9.
- 黄标, 钱鲁闽, 刘家富. 2002. 福建三沙湾水产养殖区水体氮磷含量及潜在性富营养化程度分析[J]. 台湾海峡, 21(4): 411–415.
- 刘家富, 郑钦华, 陈洪清, 余祚溅, 林永添. 2003. 三沙湾的水质状况[J]. 台湾海峡, 22(2): 201–204.
- 刘永, 余俊清, 张丽莎, 高春亮, 成艾颖. 2012. 近60年来星云湖沉积物中重金属污染记录[J]. 盐湖研究, 20(2): 1–10.
- 宁德市统计局. 2018. 宁德统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1–535.
- 乔磊, 袁旭音, 李阿梅. 2005. 江苏海岸带的重金属特征及生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 24(增刊): 178–182.
- 石勇, 刘治帅, 高建华, 汪小勇. 2015. 一种基于粒度频率分布的“粒度效应”校正方法[J]. 海洋环境科学, 34(4): 606–610.
- 孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 张囡囡, 张科, 孙丽. 2018. 近150年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险[J]. 农业环境科学学报, 37(1): 137–147.
- 王福, 杨彪, 田立柱, 李建芬, 商志文, 陈永胜, 姜兴钰, 杨吉龙, 王宏. 2016. 开放潮坪地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 测年CIC和CRS计算模式的选择[J]. 地球科学, 41(6): 971–981.
- 王宪, 李文权, 张钊. 2002. 福建省近岸港湾沉积物质量状况[J]. 海洋学报, 24(4): 127–131.
- 王小雷, 杨浩, 丁兆运, 杨本俊, 张明礼. 2011. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究[J]. 地理学报, 66(11): 1551–1561.
- 徐英江, 刘鸽, 崔艳梅, 姜芳, 曹伟, 王明磊, 冷男, 杨玉芳, 宫向红, 田秀慧. 2020. 组学技术在海洋生态毒理学研究中的应用[J]. 现代食品科技, 36(5): 329–336.
- 张远, 陶然, 于涛, 张彦. 2013. 滇池典型湖区沉积物粒径与重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 26(4): 370–379.
- 赵卫红. 2006. 福建近岸海域水质现状及污染防治对策[J]. 福建地理, 21(2): 107–109.
- 郑煌, 杨丹, 邢新丽, 张泽洲, 舒全来. 2016. 洪湖沉积柱中重金属的历史分布特征及来源[J]. 中国环境科学, 36(7): 2139–2145.
- 郑钦华. 2010. 福建三都澳渔业水域水环境监测与评价[J]. 宁德师专学报(自然科学版), 22(3): 250–254.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 海洋沉积物质量(GB 18868–2002)[S]. 北京: 中国标准出版社, 242–245.
- 朱青青, 王中良. 2012. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 40(3): 305–313.