

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.05.2016102801

李红军, 刘月, 程岩. 鸭绿江口与邻近海岸沉积物的重金属背景值[J]. 环境化学, 2017, 36(5): 1047-1055.

LI Hongjun, LIU Yue, CHENG Yan. Background values of heavy metals in the sediments of Yalu River estuary and its adjacent coasts[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(5): 1047-1055.

鸭绿江口与邻近海岸沉积物的重金属背景值*

李红军 刘月** 程岩

(辽东学院城市建设学院, 丹东, 118003)

摘 要 海洋区域环境背景值具有很强的地域性特点, 在评价人为污染强度时, 使用全球页岩或其他大范围的地球化学背景值, 会使得判断结果出现较大偏差. 本文针对鸭绿江口前期重金属研究中因背景值选择差异化造成的评价结果失真的问题, 从已发表的鸭绿江的重金属数据中选取²¹⁰Pb 测年数据较为可靠、沉积环境相对稳定的 4 个柱状样用于区域重金属背景值的确定. 通过筛选未受人类污染影响和自然强烈干扰的段落, 计算获得鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属元素的背景值为: Cu 10.9 mg·kg⁻¹、Pb 23.2 mg·kg⁻¹、Zn 72.9 mg·kg⁻¹、Cd 0.203 mg·kg⁻¹、Cr 49.8 mg·kg⁻¹、Ni 21.6 mg·kg⁻¹. 这一背景值与工业化前全球沉积物重金属最高值相比普遍偏低, 与中朝地台页岩重金属背景值相比相对偏高, 与其他大范围的重金属背景值的差距也较大; 但与中国海域的重金属背景值接近, 说明可信度较高. 影响鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属背景值的主要因素是粒度、物源和总有机碳(TOC), 这一背景值更具有自然性和地域性.

关键词 鸭绿江口, 重金属, 沉积物, 背景值.

Background values of heavy metals in the sediments of Yalu River estuary and its adjacent coasts

LI Hongjun LIU Yue** CHENG Yan

(Urban Construction College, Eastern Liaoning University, Dandong, 118003, China)

Abstract: Background values of heavy metals in marine areas differ extremely among regions. Thus, the results of pollution assessment will be quite different if different background values are used. It is more credible to choose background values within a study area as references. In early studies on the pollution evaluation of the Yalu River estuary and adjacent coasts, incorrect background values of heavy metals were used, therefore, in this study, values that are more appropriate were defined for the first time for the given area. These basic data were collected from the published research results on the contents of heavy metals in four cores with reliable ²¹⁰Pb dating and a stable sedimentary environment. Background values were determined from sediments that suffered no anthropogenic or natural disturbance. The results showed that background values of the heavy metals in the sediments of the Yalu River estuary and adjacent coasts were: Cu 10.9 mg·kg⁻¹, Pb 23.2 mg·kg⁻¹, Zn 72.9 mg·kg⁻¹, Cd 0.203 mg·kg⁻¹, Cr 49.8 mg·kg⁻¹, and Ni 21.6 mg·kg⁻¹. Compared with preindustrial global maximum values, the background values in the study area were generally low. Compared with background values in the Sino-Korean platform shale, they were relatively high.

2016 年 10 月 28 日收稿(Received: October 28, 2016).

* 国家自然科学基金(41271028) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41271028).

** 通讯联系人, E-mail: moonliudd@126.com

Corresponding author, E-mail: moonliudd@126.com

Compared with background values in other larger regions, they were also very different. However, they were close to background values in the waters in China, which indicated that these data were more credible. The main factors affecting background values of heavy metals in sediments of the Yalu River estuary and adjacent coasts were grain size, provenance, and total organic carbon (TOC). Therefore, the identified background values had more characteristics of naturality and territoriality.

Keywords: Yalu River estuary, heavy metals, sediment, background value.

工业革命以来,人类活动排放的重金属大量释放到环境中,河口及海湾沉积物被认为是这些重金属的主要归宿^[1].对于河口及海湾沉积物中重金属问题已经做过大量研究,其生态环境危险(或潜在生态风险)评价,大都采用各种评价方法与某种背景值进行比较完成的^[2-6].这说明河口及邻近海岸沉积物重金属的背景值研究是衡量环境质量的基本数据之一,也是海洋环境可持续发展的重要依据^[7].

对于鸭绿江口及邻近浅海沉积物重金属的研究日见增多.高建华等就鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属进行潜在生态风险评价,指出整个鸭绿江河口总的潜在生态风险程度为严重^[8].但是,程岩等在相同地点、用相同的潜在生态风险方法进行的研究,得出的结论刚好相反,指出鸭绿江口及近岸地区沉积物的潜在生态风险属于低风险(轻微)等级^[9].产生这种较大偏差的原因是高建华等采用中朝地台页岩作为背景值,而程岩等采用工业化前全球沉积物重金属最高值作为背景值.由此可见,采用不同的背景值对评价结果的影响是极大的.采用中朝地台页岩作为背景值不一定很合适,不仅因为鸭绿江流域的页岩面积太小,岩浆岩和变质岩面积过大,而且受地貌、气象、水文、生物等因素的影响,海域与陆域的重金属背景值往往具有很大差异.采用工业化前全球沉积物重金属最高值作为背景值进行评价同样也存在较大的问题,因为评价结果体现不出地域性的特点.

显然,环境背景值的研究和确定是一项基础性工作,是使用各种评价方法的基本前提.纯粹意义上的环境背景值是指在未受污染下环境要素的正常含量,又称本底值.在全球海洋环境中,由于人类活动的影响,已经很难找到不受污染影响的海域,特别是毗邻陆地海域的表层沉积物,重金属的实测含量往往是天然本底值与人为影响的叠加,在缺乏环境背景值的情况下评价河口及邻近海区的污染是难以令人信服的^[10].为此,20 世纪 80 年代以来,各地开展了典型海域的元素背景值的调查与研究.如辽东湾^[11]、葫芦岛湾^[12]、中国台湾海峡南部^[13]、湄洲湾^[14]、珠江口^[15]、巴西 Parnaíba 河口^[16]、地中海^[17]等.而作为中朝两国的界河,鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属的背景值研究不仅关系到当地的经济发展和海洋环境保护,还涉及到边境的稳定和发展,甚至牵涉到更多的国家利益.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 研究区域

研究区范围选择在鸭绿江西汉道及其邻近的北黄海淤泥质海岸.鸭绿江流域面积 6.45 万 km²,年迳流量 266.8×10⁸ m³,年入海沙量 159.1×10⁴ t.入海口是一个漏斗状的河口湾.绸缎岛是最大的河口江心岛(属朝鲜),以绸缎岛为界分为西汉道(向海延伸转化为西水道)和东汉道,东汉道又进一步被水下浅滩分割为中水道和东水道.现状的西汉道基本脱离了径流影响,靠人工清淤维持通航;东汉道在鸭绿江径流与海洋潮流两股水动力的作用下,主槽摆动频繁^[18].

北黄海淤泥质海岸是指从鸭绿江口至大洋河口的 93 km 的海岸,是典型的平原型潮滩海岸.潮滩宽度一般在 3—5 km 之间,最宽达到 8 km 以上,滩面平均坡度 0.13% 左右,平均高低潮之间滩涂面积近 700 km²,海拔高程(黄海基面)在 0.5 m 以上的滩涂面积就超过 240 km².沉积物以黏土质粉砂和粉砂质黏土为主,是鸭绿江、大洋河等诸多入海河流泥沙充填与潮流共同作用的结果^[19].

1.2 实验方法

确定区域环境元素背景值的常用方法有 2 种:(1)寻找未受人类活动影响的区域,测量其沉积物细颗粒物(<63 μm 粒径)的重金属含量作为背景值^[20].(2)获取工业化以前(或当地大规模人类活动以前)的沉积物样品,测定其沉积物细颗粒物(<63 μm 粒径)的重金属的含量作为背景值^[21].获取工业化

以前(或当地大规模人类活动以前)的沉积物样品的方法是采集柱状样,并通过²¹⁰Pb 测年验证其年代^[12, 22-24].

鸭绿江口与邻近海岸未受人为污染的区域现已很难找到,基于此,选取鸭绿江流域大规模人类活动以前未受污染的底层样品来计算各重金属元素的区域背景值成为唯一选择.

1.3 样品选择

为了能够更好地与前期研究相衔接和比对,避免新数据对原有研究成果的干扰,而使这一问题变得复杂化,本研究回避使用新采集的数据.所使用的柱状样数据均是从王应飞等^[25]、刘月等^[26]已发表的文献中获取.这些数据均是从南京大学与辽东学院共同组成的鸭绿江研究团队,在 2006 年 6 月至 2013 年 9 月期间采集的 30 多个柱状样中选取的,用作本次研究的 4 个柱状样编号分别为 DD1、DD2、DD3、YLJ40.选取的原则是²¹⁰Pb 测年数据较为可靠、沉积环境相对稳定、且公开发表了环境评价结果的数据,相关样品的采样位置见图 1.

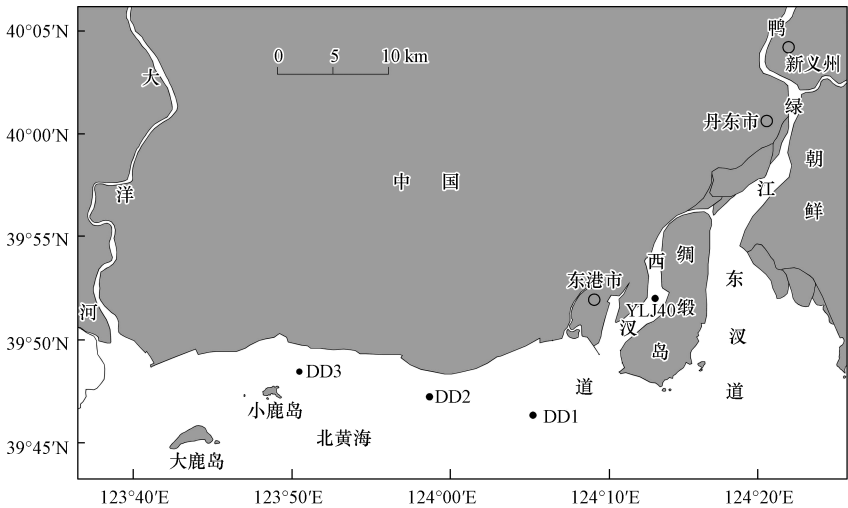


图 1 研究区位置及采样点站位示意图

Fig.1 Location of study area and sampling sites

1.4 数据处理

首先处理所选数据中的异常值.通常方法是用 Grubbs 法或平均值加 3 倍标准偏差法检验,剔除异常值^[5].本研究采用第一种方法,并继以类似检验,直到无异常值,再进行正态分布检验.根据检验结果,确定背景值的计算方式和背景值范围表达式.在沉积物中含量呈正态分布的元素,其含量背景值由其算术平均值($\bar{X}$)获得,背景值取值范围为 $\bar{X} \pm S$ (S 为算术标准偏差),在沉积物中含量呈对数正态分布的元素,其背景值由几何均值($\bar{X}_g$)获得,背景值取值范围为 $\bar{X}_g \pm S_g$ (S_g 为几何标准偏差).

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 重金属垂直分布特征及样品选取范围的确定

柱状样 DD1、DD2、DD3、YLJ40 各层重金属含量变化趋势见图 2.

对于柱状样中未受人类污染影响的时间段(时间节点),主要根据研究区沉积环境、重金属的垂直分布特征和当地经济社会发展历史来判定^[27].为保障本次研究选取的柱状样分层样品是鸭绿江流域大规模人类活动以前未受污染的、并在自然演变中未受到强烈沉积事件干扰的沉积物,选取前有必要对重金属垂直分布特征重新做进一步的分析和判断.

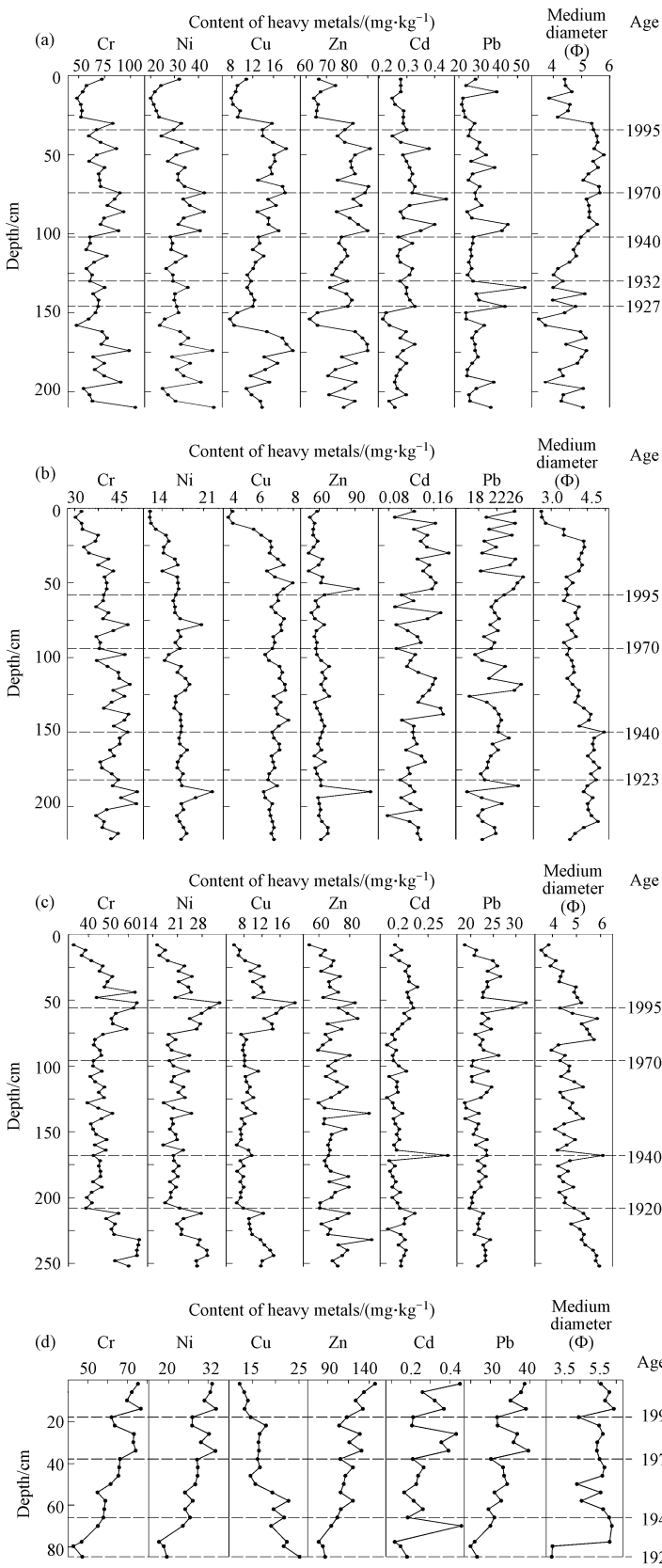


图 2 柱状样 DD1(a)、DD2(b)、DD3(c)、YLJ40(d) 重金属的垂直分布及沉积年代
(注:据王应飞等^[25]、刘月等^[26]综合编绘,沉积年代是根据²¹⁰Pb 分析结果推断得出的参考年代)

Fig.2 Vertical distribution and sedimentary age of Core DD1(a), DD2(b), DD3(c), YLJ40(d) for heavy metals
(Note: Compiled based on the figures from Wang Yingfei et al.^[25] and Liu Yue et al.^[26].
The sedimentary ages were deduced based on ²¹⁰Pb.)

由图 2 可以看出,DD1 柱状样各重金属含量随深度有递减态势的剧烈波动,在 105 cm(相当于 1940 年前后)深度形成明显的拐点.随后各层重金属含量除 Pb 外,都几乎没有太大变化,在 145 cm(相当于 1927 年前后)以下又开始剧烈变动,没有递增或递减趋势.DD2 柱状样各重金属含量随深度剧烈波动,上部有递减的趋势,在 150 cm(相当于 1940 年前后)深度形成一个拐点.随后各层重金属含量基本稳定,在 180 cm(相当于 1923 年前后)以下深度又开始剧烈变动,没有递增或递减趋势.DD3 柱状样各重金属含量随深度剧烈波动,在 180 cm 以上先是递增,近地表时又递减.但在 180 cm(相当于 1940 年前后)深度形成拐点.随后各层重金属含量除 Cd、Zn 有些变化外,其他没有太大变化,在 210 cm(相当于 1923 年前后)以下深度又开始剧烈波动,没有递增或递减趋势.YLJ40 柱状样 Cr、Ni、Zn、Cd、Pb 含量随深度增加而呈波状递减趋势(Cu 为波状递增),并在 68 cm 深度(相当于 1940 年前后)形成一个不是很显著的拐点,其下各层重金属含量变动很小.

前期的研究表明^[25,28],上世纪 20 年代以前,鸭绿江口的河势与今天完全不同,当时主汉道是西汉道,暴涨暴落的鸭绿江径流,使重金属含量随沉积物中值粒径在一定范围内剧烈波动.20 年代初,主流东移,泥沙改由中水道和东水道向外运移,随着绸缎岛不断向海延伸,泥沙越过绸缎岛向东南扩散,西汉道与邻近海岸进入半封闭状态,所以才有了 1923 年至 1940 年间的稳定沉积时段期.而 1940 年以后,受水丰水库建设的影响,致使鸭绿江入海的水沙通量及其季节分配发生了巨大变化.以东汉道和中水道为主要径流的河势得到进一步强化,泥沙需要越过绸缎岛向更远的东南扩散后,才能随沿岸流向西搬运.显然,西水道和邻近海岸半封闭状态没有改变,但重金属含量却产生了剧烈波动,这已经不是单纯的自然作用,应该是受到了各种人类活动影响的结果^[8,25].在对鸭绿江口与邻近西海岸沉积记录的耦合特征的研究中,也发现鸭绿江口发生重大地貌格局变化的年代是在 1960 年前后^[29],1940 年前位于鸭绿江主汉道的 YLJ40 柱状样的沉积可以代表鸭绿江河口稳定状态的自然沉积.这与各柱状样重金属含量在图 2 中垂向变化的表现也是基本一致的.

根据史料记载^[30],1940 年以前鸭绿江流域尚未大规模开发,人类活动的干扰极其有限,自然特征明显.但是,更早的 1923 年以前的沉积(DD1 为 1927 年以前),虽然也来自自然界,但沉积类型多变,重金属含量随粒径变化而产生剧烈波动,说明当时沉积环境动荡、物质来源复杂,不是现在这种具有半封闭的沉积环境,也不宜做为确定背景值的样品使用.因此,选取各柱状样 1940—1923 年间(DD1 为 1927 年)的沉积物重金属样品来计算研究区的背景值,可以确保用于确定重金属背景值的样品具有相同的来源、类似的沉积特征和基本一致的沉积速率^[31].类似的研究还可见于希腊的 Euvoikos 海湾^[21]、美国的 Galveston 湾和 Tampa 湾^[23]等多个区域.

2.2 背景值的估算结果

鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属背景值计算结果见表 1.由表 1 可看出,柱状样沉积物中重金属含量的统计分布特征较好,均为正态分布.用各重金属测定值的平均值加 3 倍标准偏差法检验,没有异常值,都在置信范围内.

表 1 鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属环境背景值
Table 1 Background values of heavy metals in sediments of the Yalu River estuary and adjacent coasts

重金属 Heavy metals	样本数 Numbers of samples	算术平均值 Arithmetic mean/ (mg·kg ⁻¹)		几何平均值 Geometric mean/ (mg·kg ⁻¹)		分布类型 Distribution pattern	背景值范围 Range of background values/(mg·kg ⁻¹)		背景值 Background values/ (mg·kg ⁻¹)
		均值 Mean ($\bar{X}$)	标准差 Standard deviation	均值 Mean ($\bar{X}_g$)	标准差 Standard deviation		$\bar{X} - S$	$\bar{X} + S$	
Cr	33	49.82	11.72	48.64	11.78	正态分布	61.54	38.10	49.8
Ni	33	21.62	5.47	21.03	31.49	正态分布	27.10	16.15	21.6
Cu	33	10.87	5.57	9.76	5.68	正态分布	16.44	5.31	10.9
Zn	33	72.93	11.86	72.02	11.89	正态分布	84.79	61.08	72.9
Cd	33	0.203	0.082	0.189	0.090	正态分布	0.285	0.122	0.203
Pb	33	23.20	2.84	23.04	2.85	正态分布	26.05	20.36	23.2

由此表 1 可得出鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属背景值为: Cu 10.9 mg·kg⁻¹、Pb 23.2 mg·kg⁻¹、Zn 72.9 mg·kg⁻¹、Cd 0.203 mg·kg⁻¹、Cr 49.8 mg·kg⁻¹、Ni 21.6 mg·kg⁻¹。

2.3 与其它大范围的重金属背景值的对比

鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属区域背景值与其他背景值的对比见表 2。与工业化前全球沉积物重金属最高背景值相比,研究区的普遍偏低。Cd、Cu 只有其 1/5 左右,Cr、Zn、Pb 在其 1/2 到 1/3 之间;与中朝地台页岩重金属背景值相比,则普遍偏高 20%以上,尤其是 Cd 和 Cr 偏高了 2 倍多;与中国陆壳页岩、全球页岩重金属背景值相比也有很大差距,Cu、Ni 只有其 1/4,Cr、Zn 降低了 20%,而 Pb 升高了 20%,Cd 的相差值也很大。相比较而言,鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属背景值与中国海域的重金属背景值最为接近。

表 2 鸭绿江口与邻近海岸重金属背景值与其他大区域重金属背景值的对比

Table 2 Comparison of background values of heavy metals in the Yalu River estuary and adjacent coasts with those in larger areas

区域 Areas	重金属元素背景值 Background values of heavy metals/(mg·kg ⁻¹)					
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni
中朝地台页岩 ^[8] Sino-Korean platform shale ^[8]	8	17	54	0.065	21	—
中国陆壳页岩 ^[32] Chinese crustal shale ^[32]	38	15	86	0.055	63	—
全球页岩 ^[33] Global shale ^[33]	45	20	95	0.3	68	90
工业化前全球沉积物重金属最高值 ^[34] Pre-industrial global maximum values ^[34]	50	70	175	1	90	—
中国海域 ^[5,35] Chinese waters ^[5,35]	15	20	65	0.065	60	24
鸭绿江口及邻近海岸地区 Yalu River estuary and adjacent coasts	10.9	23.2	72.9	0.203	49.8	21.6

利用中国海域重金属背景值检验鸭绿江口及邻近海岸沉积物的重金属背景值范围(见表 2),结果除了 Cd 外,中国海域其他重金属的背景值都落在鸭绿江口及邻近海岸沉积物重金属背景范围之内。这个结果反过来证明了本次研究选取柱状样在 1940—1923 年间(DD1 为 1927 年)的沉积物样品来计算背景值是适宜的,所估算的背景值接近于自然本底状况,能够代表鸭绿江河口及邻近海岸沉积物的重金属背景状况。

2.4 影响重金属背景值的主要因素

2.4.1 粒度对背景值的影响

鸭绿江西汉道及邻近海岸的沉积物,粉砂质黏土或黏土质粉砂占 90%以上,这种以黏土占优势的组成特点,造成鸭绿江口西水道及邻近海岸沉积物中的重金属含量丰富,尤其是对粒度影响敏感的 Cr、Cu、Ni、Zn 元素^[25]。所以,造成使用中朝地台页岩重金属背景值进行的潜在生态风险评价^[8]等级有些偏高;但若使用工业化前全球沉积物重金属最高背景值做潜在生态风险评价,等级则很低^[9]。这进一步说明重金属背景值具有很强的区域性,使用区域重金属背景值进行的评价结果才是可信的。

2.4.2 物源对背景值的影响

物源是影响鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属背景值的另一个因素,Cd、Pb 受粒度控制不是很明显^[25],极有可能受控于区域地质背景。鸭绿江流域的华西期、印支期和燕山期的岩浆岩侵入,使内生矿床十分丰富。华西期以铁、铜、铅、钨等内生矿床为主;印支期以金、钨、萤石、铅、锌、黄铁矿为主;燕山期以钼、铜、铅、锌矿为主^[36]。这些元素促使区域重金属背景值,尤其是 Cd、Pb 背景值比其他陆域重金属背景值偏高。但是区域地质与背景值之间的相关程度,有待深入研究。

2.4.3 TOC 对背景值的影响

前期的研究表明^[25,37],鸭绿江河口及其邻近海岸沉积物的重金属含量与 TOC 的相关系数在 0.6 以

上的占 71%,密切相关.鸭绿江流域地处东北暴雨中心,属于湿润性温带季风气候,植被茂盛,森林覆盖率达到 68%,许多地方保持着针阔混交林的原始森林景观^[27].尤其工业化前,植被覆盖率更高,在几乎没有受到人类活动的影响下,受径流作用,流域的部分腐殖质会在河口沉积,使得沉积物中 TOC 含量也处于较高水平,增加了沉积物中重金属的背景值,这可能是鸭绿江口与邻近海岸沉积物中重金属元素背景值高于中朝地台页岩重金属背景值的另一重要原因.

3 结论 (Conclusion)

研究结果表明,鸭绿江口与邻近海岸沉积物重金属的区域背景值: Cu 10.9 mg · kg⁻¹、Pb 23.2 mg · kg⁻¹、Zn 72.9 mg · kg⁻¹、Cd 0.203 mg · kg⁻¹、Cr 49.8 mg · kg⁻¹、Ni 21.6 mg · kg⁻¹.

本研究提供的重金属背景值与中国海域的重金属背景值最为接近.除 Cd 外,重金属背景值都落在中国海域的重金属背景值范围之内,说明这一背景值能够代表鸭绿江河口及邻近海岸沉积物的重金属本底状况.

本研究的重金属背景值远低于工业化前全球沉积物重金属最高背景值,明显高于中朝地台页岩的重金属背景值,与其他的陆域重金属背景值也没有可比性.

粒度是影响沉积物重金属背景值大小的主要因素,区域地质背景对部分重金属背景值的取值有深刻影响,有机质对沉积物重金属背景值影响也不容忽视.这些因素的叠加,构成了本研究区域的重金属背景值地域属性和自然属性.

参考文献 (References)

[1] 姚书春,薛滨.东太湖钻孔揭示的重金属污染历史[J].沉积学报,2012,30(1):158-164.
YAO S C, XUE B. Heavy metal pollution history inferred from East Taihu Lake cores sediment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30 (1): 158-164 (in Chinese).

[2] 张瑞,张帆,刘付程,等.海州湾潮滩重金属污染的历史记录[J].环境科学,2013,34(3):1044-1054.
ZHANG R, ZHANG F, LIU F C, et al. History of heavy metal pollution from tidal flat in Haizhou Bay[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1044-1054 (in Chinese).

[3] 胡睿,刘健,仇建东.南黄海西部中陆架区近 50 年来沉积物重金属元素地球化学特征[J].海洋地质前沿,2012,28(11):31-37.
HU R, LIU J, QIU J D. Geochemical characteristics of heavy metal elements in the sediments of last 50 years in the western middle shelf of South Yellow Sea[J]. Marine Geology Letters, 2012, 28(11): 31-37 (in Chinese).

[4] 滕德强,吕颂辉,郭福星,等.长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(2):11-19.
TENG D Q, LV S H, GUO F X, et al. Distribution pattern of heavy metals in surface sediments of the Yangtze estuary and adjacent areas and its ecological risk[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(2): 11-19 (in Chinese).

[5] 刘珊珊,张勇,龚淑云,等.长江三角洲经济区海域沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(5):63-71.
LIU S S, ZHANG Y, GONG S Y, et al. Distribution pattern of heavy metals in surface sediments of the Yangtze estuary and adjacent pattern area and its ecological risk[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(5): 63-71 (in Chinese).

[6] 张现荣,张勇,叶青,等.辽东湾北部海域沉积物重金属环境质量和污染演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(2):21-29.
ZHANG X R, ZHANG Y, YE Q, et al. Environment quality of Liaodong Bay and pollution evolution of heavy metals[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(2): 21-29 (in Chinese).

[7] 林曼曼,张勇,薛春汀,等.环渤海海域沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(6):41-46.
LIN M M, ZHANG Y, XUE C T, et al. Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments of the area of circum-bohai bay and ecological environment assessment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(6): 41-46 (in Chinese).

[8] 高建华,李军,王珍岩,等.鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属分布的影响因素分析[J].地球化学,2008,37(5):4391-4398.
GAO J H, LI J, WANG Z Y, et al. Heavy metal distribution and their influence factors in sediments of Yalu River estuary and its adjacent sea area[J]. Geochimica, 2008, 37(5): 4391-4398 (in Chinese).

[9] 程岩,刘月,李富祥,等.鸭绿江口及毗邻浅海沉积物重金属富集特征与潜在生态风险比较[J].环境科学研究,2011,24(5):516-525.

- CHENG Y, LIU Y, LI F X, et al. Comparative study of enrichment features and potential ecological risks of heavy metals in sediments of the Yalu River estuary and its adjacent shallow sea area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(5): 516-525 (in Chinese).
- [10] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 161-166.
- ZHANG Y H, DU J M. Background values of pollutants in sediments of the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4): 161-166 (in Chinese).
- [11] 郝静, 李淑媛, 周永芝. 渤海辽东湾沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 环境背景值初步研究[J]. *海洋学报*, 1989, 11(6): 742-748.
- HAO J, LI S Y, ZHOU Y Z. Preliminary study on the background value of Cu, Pb, Zn, Cd in the sediments of Liaodong bay of Bohai[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(6): 742-748 (in Chinese).
- [12] 鲍永恩, 刘娟. 葫芦岛湾沉积物中重金属集散特征及环境背景值[J]. *海洋环境科学*, 1995, 14(1): 2-8.
- BAO Y E, LIU J. The feature of concentration and dispersion of the heavy metals and the environmental background values in the sediments of Liaoning Hulushan bay[J]. *Marine Environmental Science*, 1995, 14(1): 2-8 (in Chinese).
- [13] 杨慧辉. 台湾海峡南部沉积物中某些重金属元素的背景值[J]. *台湾海峡*, 1997, 16(1): 28-36.
- YANG H H. A background survey on heavy metal elemental in sediment of southern Taiwan strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1997, 16(1): 28-36 (in Chinese).
- [14] 胡晴晖. 湄洲湾海域底质重金属环境背景值研究[J]. *中国环境监测*, 2001, 17(3): 19-21.
- HU Q H. A study on the environmental background values of heavy metals in the sediments of Meizhou Bay[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2001, 17(3): 19-21 (in Chinese).
- [15] 马玉, 李团结, 高全洲, 等. 珠江口沉积物重金属背景值及其污染研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 712-719.
- MA Y, LI T J, GAO Q Z, et al. Background values and contamination of heavy metals in sediments from the Pearl River Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 712-719 (in Chinese).
- [16] FRANCISCO J P F, ROZANE V M, LUIZ D L, et al. Background values for evaluation of heavy metal contamination in sediments in the Parnaíba River Delta estuary, NE/Brazil[J]. *Marin Pollution Bulletin*, 2015, 91(2): 424-428.
- [17] HERNÁNDEZ-CRESPO C, MARTÍN M. Determination of background levels and pollution assessment for seven metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) in sediments of a Mediterranean coastal lagoon[J]. *Catena*, 2015, 133(10): 206-214.
- [18] 程岩, 毕连信. 鸭绿江河口浅滩的基本特征和动态变化[J]. *泥沙研究*, 2002, 27(3): 59-63.
- CHENG Y, BI L X. Primary character and motive change of shallow beach in Yalu River mouth[J]. *Journal of Sediment Research*, 2002, 27(3): 59-63 (in Chinese).
- [19] 李雪铭, 程岩. 北黄海淤泥质海岸滩涂资源的开发利用[J]. *国土与自然资源研究*, 1994, (4): 14-18.
- LI X M, CHENG Y. Exploitation and utilization of tidal flat resources in muddy coast of the northern Yellow Sea[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 1994(4): 14-18 (in Chinese).
- [20] HANSON P J, EVENS D W, COLBY D R. Assessment of elemental contamination in estuarine and coastal environments based on geochemical and statistical modeling of sediments[J]. *Marine Environmental Research*, 1993, 36: 237-266.
- [21] DASSENAKIS M, ANDRIANOS H, DEPIAZI G, et al. The use of various methods for the study of metal pollution in marine sediments, the case of Euvoikos Gulf, Greece[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(6): 781-794.
- [22] 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, 14(5): 370-376.
- LI S Y, LIU G X, MIAO F M. The distribution and environmental background values of the heavy metals in sediment of the heavy metals in sediment of the Bohai Sea[J]. *Chinese Environmental Science*, 1994, 14(5): 370-376 (in Chinese).
- [23] SANTOSCHI P H, PRESLEY B J, WADE T L, et al. Historical contamination of PAHs, PCBs, DDTs, and heavy metals in Mississippi River delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediment cores[J]. *Marine Environmental Research*, 2001, 52: 51-79.
- [24] COBELO-GARC A, PREGO R. Heavy metal sedimentary record in a Galician Ria (NW Spain): Background values and recent contamination[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46: 1253-1262.
- [25] 王应飞, 高建华, 石勇, 等. 鸭绿江河口西岸潮间带柱状沉积物中重金属的分布特征及其对流域变化的响应[J]. *地球化学*, 2014, 43(1): 64-76.
- WANG Y F, GAO J H, SHI Y, et al. Distribution characteristics of intertidal sediment heavy metal of the western bank of the Yalu River, and its responses to catchment changes[J]. *Geochimica*, 2014, 43(1): 64-76 (in Chinese).
- [26] 刘月, 程岩, 李富祥, 等. 鸭绿江口近百年来重金属垂向沉积的污染评价[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(5): 489-495.
- LIU Y, CHENG Y, LI F X, et al. Pollution evaluation of vertical sediments in the Yalu River estuary over the past century[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 489-495 (in Chinese).
- [27] 乔永民, 黄长江, 杨扬. 粤东柘林湾沉积物重金属背景值初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 81-85.
- QIAO Y M, HUANG C J, YANG Y. A preliminary study of heavy metal background values in Zhelin Bay of eastern Guangdong Province[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(2): 81-85 (in Chinese).
- [28] 程岩, 刘月, 高建华, 等. 近百年来人类活动对鸭绿江口河床演变的影响[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 609-619.
- CHENG Y, LIU Y, GAO J H, et al. Influence of human activities on the riverbed evolution in Yalu River estuary during recent one century[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 609-619 (in Chinese).

- [29] 刘月, 程岩, 李红军, 等. 鸭绿江口与邻近西海岸沉积记录的耦合[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 76-88.
LIU Y, CHENG Y, LI H J, et al. The coupling of the sedimentary records in the Yalu River estuary and the adjacent western coasts[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(1): 76-88 (in Chinese).
- [30] 程岩, 张毅. 鸭绿江下游河道演变及其对港口的影响[J]. 泥沙研究, 1990 (2): 77-84.
CHENG Y, ZHANG Y. Evolution of the lower reaches of the Yalu River and its influence on the port[J]. Journal of Sediment Research, 1990 (2): 77-84 (in Chinese).
- [31] 李淑媛, 郝静. 渤海湾及其附近海域沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 环境背景值的研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(1): 39-48.
LI S Y, HAO J. The study of environment background concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd in the sediment of the Bohai bay and adjacent sea area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(1): 39-48 (in Chinese).
- [32] ZHANG J C. Geography to learn basic manual data[M]. Beijing: Ocean Press, 1986: 50-86.
- [33] LI T. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. Geochimica, 1994, 23(2): 40-145.
- [34] WU G Y. South of the Yangtze River estuary south coast tidal flat substrate metal pollution and evaluation[J]. Marine Environmental Science, 1994, 13(2): 45-51.
- [35] 蔡海清, 杜琦, 钱小明, 等. 福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素的来源分析[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1444-1448.
CAI H Q, DU Q, QIAN X M, et al. Analysis on source of heavy metals and transitional element in marine sediment in the Sansha bay of Fujian[J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(10): 1444-1448 (in Chinese).
- [36] 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 273-280.
Z Q, ZHAO T P, WANG Y, et al. A discussion on the Yanshanian magmatism in eastern China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 273-280 (in Chinese).
- [37] 李富祥, 李雪铭, 高建华, 等. 基于垂向沉积的近百年来鸭绿江河口环境演变分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 1-5, 10.
LI F X, LI X M, GAO J H, et al. Analysis of environmental evolution during last hundred years according to vertical sediment in the Yalu River estuary[J]. Environmental Pollution and Control, 2012, 34(10): 1-5, 10 (in Chinese).