

海洋沉积物重金属污染评价方法研究

刘超, 刘淑君, 孟莎, 李超, 周斌

国家海洋局北海海洋工程勘察研究院, 山东 青岛

Email: 15854280019@163.com

收稿日期: 2020年11月15日; 录用日期: 2020年12月15日; 发布日期: 2020年12月22日

摘要

随着经济的快速发展, 水体沉积物中的重金属污染越来越严重, 对于重金属污染的研究也成为热点。对于水体沉积物中的重金属污染的评价方法有很多种, 本文主要介绍了水体沉积物重金属污染评价具有代表性的方法, 包括综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法、生物效应浓度法、沉积物富集系数法、尼梅罗综合污染指数法。以上方法各有优点和不足, 在实际应用评价的过程中, 应尽可能地采用多种方法相结合的方式对重金属污染进行评价, 使评价结果更加准确, 具有可信度。

关键词

沉积物, 重金属, 评价方法

Assessment Methods of Heavy Metal Pollution in Marine Sediment

Chao Liu, Shujun Liu, Sha Meng, Chao Li, Bin Zhou

Beihai Offshore Engineering Survey Institute, SOA, Qingdao Shandong

Email: 15854280019@163.com

Received: Nov. 15th, 2020; accepted: Dec. 15th, 2020; published: Dec. 22nd, 2020

Abstract

With the rapid development of economy, heavy metal pollution in water sediments is becoming more and more serious. Therefore, study on heavy metal pollution evaluation becomes a hot topic. There are many kinds of evaluation methods about heavy metal pollution including comprehensive methods of pollution assessment, method of geoaccumulation index, potential ecological risk index method, biological effect concentration method, and Nemerow comprehensive pollution index method. Each method has advantages and disadvantages. In the process of practical applica-

tion evaluation, multiple methods should be used to evaluate heavy metal pollution as much as possible, so as to make the evaluation result more accurate and reliable.

Keywords

Marine Sediment, Heavy Metal, Evaluation Methodology

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

近年来, 经济快速发展, 尤其是沿海地区工农业、养殖业以及港口的快速发展, 大量携带重金属的生产生活污水直接或间接地排入近海海域, 对近海造成污染[1] [2]。重金属污染物进入近海水体后, 在水沙之间发生迁移, 通过一系列的物理化学过程, 使得重金属污染物在近岸沉淀, 给沿岸海域生态环境带来了很大的压力, 进一步威胁人们的健康[3]-[8]。因此, 对海洋沉积物中重金属的环境质量评价方法的研究成为近年来的研究重点。目前, 海洋沉积物中重金属环境质量评价方法有很多种, 如综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法、生物效应浓度法、尼梅罗综合指数法、沉积物富集系数法等。

2. 评价方法

2.1. 综合污染指数法

1) 单因子指数法

单因子指数法又称质量标准法, 是基于沉积物样品中重金属污染因子含量的多少提出的。

其具体计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1-1)$$

其中, P_i 为重金属元素 i 污染指数, C_i 为某站点的重金属元素 i 的实测含量, S_i 为重金属元素 i 评价的标准含量。若 P_i 小于 1, 则评定为低污染, 若 P_i 大于 6, 则评定为高污染, 若 P_i 介于 1 到 3 之间则评定为中度污染, 若 P_i 介于 3 到 6 之间则评定为较高污染[9]。

国家海洋局于 2002 年颁布实施了海洋沉积物质量标准(GB18668-2002) [10], 如表 1, 按照海域的不同功能将海洋沉积物质量标准分为三类, 第一类为海洋自然保护区, 海水浴场等, 第二类为海洋工业用水区, 第三类为海洋港口水域, 海洋特殊作业区等。常用于工程类环境影响评价。

Table 1. Quality standard for marine sediment (GB18668-2002)/mg·kg⁻¹

表 1. GB18668-2002 海洋沉积物质量标准/mg·kg⁻¹

分级	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
第一类	≤35	≤60	≤150	≤80	≤0.5	≤0.2	≤20
第二类	≤100	≤130	≤350	≤150	≤1.5	≤0.5	≤65
第三类	≤200	≤250	≤600	≤270	≤5	≤1.0	≤93

周笑白等利用单因子污染指数法对渤海湾表层沉积物中重金属的含量进行了评价, 结果表明铜、铅、

锌、镉、铬、汞、砷均符合国家海洋沉积物质量标准一级标准[11]。王胜强等利用单因子污染指数法对海河 5 个断面的沉积物中重金属的含量进行了分析评价,结果表明,铜、铅、锌、镉属于重要污染因子[12]。于瑞莲利用单因子污染指数法对泉州湾潮间带沉积物中重金属进行评价,结果表明,各重金属元素不符合国家海洋沉积物质量标准的一类标准,符合二类标准。并说明该区域已经遭受明显的重金属污染[13]。霍素霞采用单因子指数法和多因子指数法对渤海沉积物中重金属污染状况进行评价,结果表明,渤海湾、辽东湾、莱州湾的主要污染因子有所不同[14]。

2) 多因子指数法

多因子指数法采用的是加权评价的方式,即把各污染因子的分指数乘以各因子的权重值,综合成沉积物的环境质量总指数,再加以评价。

其具体计算公式为:

$$I_{SQI} = \sum W_i P_i \quad (1-2)$$

其中, I_{SQI} 为底质的环境质量总指数; W_i 为重金属元素 i 的权重值,见表 2; $\sum W_i = 1$ 。 P_i 为 i 污染因子的质量分指数。 I_{SQI} 分级见表 3。

Table 2. Evaluation weight distribution of each pollution factor

表 2. 各污染因子的评价权重分配[15]

项目	Cu	Pb	Hg	Cd	As
W_i	0.306	0.138	0.036	0.023	0.017

Table 3. Total quality index classification by multi-factor index method

表 3. 多因子指数法质量总指数分级[15]

质量指数 I_{SQI}	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
污染程度	允许	影响	轻污染	污染	重污染

单因子指数法方法简单,易于推广,但仅是对多个元素进行逐一评价,缺乏对于海洋沉积物重金属污染的综合认知。多因子指数法在综合了各污染因子的综合影响,与单因子污染指数法相比更加全面,弥补了单因子指数法单一逐个元素进行评价的不足。

总体来说,海洋沉积物中重金属污染不是简单的各因子污染指数的叠加,综合污染指数法未考虑生态毒性、重金属敏感性以及海洋生态危害等因素,所能提供的信息有限。然而由于方法简单,易操作,综合污染指数法仍被很多研究者所采用。罗先香等利用单因子评价、综合因子评价和潜在生态风险评价对莱州湾表层沉积物重金属污染状况进行了评价。结果表明,重金属含量较低,大部分低于国家海洋沉积物一类标准,主要属于低污染水平,潜在生态风险评估总体处于低风险等级[16]。

2.2. 地累积指数法

地累积指数法(Geoaccumulation Index)是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Müller 于 1969 年提出,是一种沉积物重金属评价的定量方法[17],以沉积物中重金属含量高低反映其污染水平,反映了重金属分布的自然变化特征,与综合污染指数法不同的是,地累积指数法可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数。因此,该方法被广泛用于沉积物中重金属污染的评价[18]-[24]。数学表达式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{(k \times B_n)} \right] \quad (1-3)$$

其中, I_{geo} 为地累积指数, C_n 是指重金属元素在粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 沉积物中的质量分数; B_n 是粘质沉积(即普通页岩)中该元素的地球化学背景值; k 为考虑各地岩石的差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。

根据地累积指数的不同, 可以将污染等级分为七级, 污染程度由无至极强污染, 如表 4 所示。

Table 4. Relationship between classification standard of Geoaccumulation Index method and pollution degree
表 4. 水体沉积物地累积指数法分级标准与污染程度的关系

污染程度	极强污染	严重污染	较强污染	强污染	中等污染	轻度污染	无
I_{geo}	>5	5~4	4~3	3~2	2~1	1~0	0
I_{geo} 分级	6	5	4	3	2	1	0

地累积指数法可以在数据资料不充分的情况下用于水体沉积物重金属的污染状况的评价, 其不仅考虑了人为活动对环境的影响, 还考虑了自然成岩作用引起的背景值的变动, 但是并没有反应重金属的化学、生物等因素, 也没有涉及不同重金属的毒性效应的差别。地累积指数法中 C_n 是元素 n 在粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 沉积物中的质量分数, 若样品粒径大于 $2\ \mu\text{m}$, 直接引用会造成污染水平偏低。

陈江麟等采用地累积指数法和潜在生态风险因子法对渤海表层沉积物中重金属进行评价, 结果表明, 渤海各分区污染状况和污染因子明显不同, 北部辽东湾以 Hg 和 Cd 最为严重, 秦皇岛近岸以及莱州湾都有不同程度的 Hg 污染[25]。张雷等利用地累积指数法和潜在生态风险指数法对环渤海典型海域潮间带沉积物重金属进行污染评价, 结果表明, Cd 属于中度污染, 且为中度生态风险等级, 而其他元素属于轻度污染甚至清洁等级, 为轻度生态风险等级[26]。范文宏等以锦州湾沉积物重金属为研究对象, 分别利用地累积指数法和潜在生物毒风险评价法进行评价, 两种评价结果相一致[27]。

2.3. 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法(potential ecological risk index, RI)是由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出的评价方法[9]。该方法充分考虑了生物毒性、生态危害的影响, 以重金属含量、数量、毒性及评价区域对重金属的敏感性四个基本条件为原则。该方法的优点是消除了重金属污染的区域差异和异源污染的影响[28][29], 适合于大区域范围不同源沉积物之间进行评价比较, 成为国内外沉积物质量评价中应用最为广泛的方法之一[30][31][32][33][34]。

其数学表达式如下:

$$C_f^i = C_D^i / C_R^i; E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (1-4)$$

$$C_d = \sum_i^m C_f^i \quad (1-5)$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_D^i / C_R^i \quad (1-6)$$

C_f^i 、 E_r^i 分别是第 i 种重金属的污染系数和潜在生态危害系数, T_r^i 为毒性系数, 用于反映重金属的毒性水平和生物对重金属的敏感程度(见表 5)。潜在生态危害指数法分级标准见表 6。

C_d 表示重金属总体污染程度指数;

C_D^i 为重金属 i 的实测值;

C_R^i 为重金属 i 最高背景值;

E_r^i 为单一重金属潜在生态风险指数;

RI 为多种重金属的潜在危害指数。

Table 5. Toxicity coefficient of heavy metals and background values
表 5. 重金属毒性系数以及背景值

	Cu	Pb	Hg	Cd	Cr	Zn	As
C'_R (10^{-6})	25	25	0.025	0.5	90	175	6
T'_r	5	5	40	30	2	1	10

潜在生态危害指数法综合考虑了重金属在沉积物中的迁移转化、重金属污染的敏感性以及重金属生物毒性因素，并且加入了背景值比较，有效的消除了区域差异和异源污染的影响，缺少对于水动力、沉积物地质特征等因素对于水体沉积物重金属污染的影响。

周秀艳等采用潜在生态风险评估的方法对秦皇岛段潮间带沉积物中重金属进行了污染评价，结果表明，铜、铅、锌属于轻微生态风险程度，镉属于强生态风险等级，会影响到近岸水体和海洋生物质量[35]。王小静等利用潜在生态风险评估法对渤海西南部近岸功能区表层沉积物重金属潜在生态危害程度进行评价，结果表明，Cd 是最主要的生态风险因子，其他重金属元素均属于轻微生态风险等级[36]。李云海等利用潜在生态风险评估法对泉州湾沉积物重金属进行环境质量评价，结果表明，镉为强污染强生态风险等级，其他元素均为中度污染和轻微生态风险等级[37]。董爱国等采用潜在生态风险指数法对长江口海域表层沉积物重金属元素进行潜在生态风险评价，结果表明，表层沉积物的潜在生态风险程度为“轻度” [38]。

Table 6. Classification standard of potential ecological risk index method
表 6. 潜在生态污染指数法分级标准

C'_j 所对应的 阈值区间	单因子污染物污 染程度	C'_d 所对应的 阈值区间	总体污染程度	E'_r 对应的 阈值区间	风险因子程度分 级	RI 对应的 阈值区间	风险指数 程度分级
≤1	低	≤8	低	≤40	I (低值)	≤135	A (低值)
1~3	中等	8~16	中等	40~80	II (中等)	135~265	B (中等)
3~6	重	16~32	重	80~160	III (可观)	265~525	C (高值)
≥6	严重	≥32	严重	160~320	IV (高值)	≥525	D (极高)
/	/	/	/	≥320	V (极高)	/	/

2.4. 生物效应浓度法

生物效应浓度评价方法是由 Long 等提出的[39]，该评价方法是在建立生物效应数据库的基础上完成的。生物效应数据库是通过收集、整理和分析水体沉积物重金属的含量和生物效应数据建立起来的。

生物效应浓度法确定了引发生物毒性效应和其他生物效应的重金属浓度的阈值，即水体沉积物重金属的质量基准，分为“确定产生效应的临界浓度”(Threshold Effect Level, TEL)“必然产生效应的浓度”(Probable Effect Level, PEL) [40]。如果水体沉积物重金属的浓度小于 TEL，那么说明重金属对生物体的负面效应几乎不会发生；如果重金属的浓度大于 PEL，那么说明重金属对生物体的负面效应经常会发生；如果重金属的浓度介于 TEL 和 PEL 之间，那么重金属对生物体的负面效应偶尔会发生[41] [42]。各种金属元素的 TEL 和 PEL 值见表 7。

水体沉积物质量基准评价方法综合考虑了重金属浓度与生物毒性、生物效应的关系，但是，该方法需要建立生物效应数据库，需要大量的数据作为支撑，一味的采用同样的标准值会带来很大的不确定性，所以需要其他的方法配合使用进行验证。盛菊江等利用单因子指数法与沉积物质量基准(SQGs)法对长江

口及其邻近海域沉积物重金属进行环境质量评价, 结果表明, 除镉是轻度污染外, 其他元素均处于中度污染等级[44]。

Table 7. Contents of heavy metals TEL and PEL in water and sediment

表 7. 水体沉积物重金属 TEL 和 PEL 含量(单位: 10^{-6}) [43]

	Cu	Pb	Cd	Hg	As
TEL	18.7	30.2	0.68	0.13	7.24
PEL	108.2	112.2	4.2	0.7	41.6

2.5. 沉积物富集系数法

沉积物富集系数法是 1979 年 Buat-Menard P 和 Chesselet R 提出的[45], 其数学表达式如下:

$$K_{SEF} = (S_n / S_{ref}) / (a_n / a_{ref}) \quad (1-7)$$

其中, K_{SEF} 表示重金属富集系数; S_n 为沉积物中重金属的含量; S_{ref} 为沉积物重金属中参比元素的含量; a_n 为重金属的背景值, 即未受污染的沉积物重金属的含量; a_{ref} 为未受污染沉积物中参比元素的含量, 即参比元素的背景值。

参比元素一般选择在迁移过程中性质比较稳定的元素。

根据富集系数的大小可将重金属污染等级相应的分为 5 级, 见表 8。

Table 8. Standard for sediment concentration coefficient and pollution classification

表 8. 沉积物富集系数与污染等级划分标准

K_{SEF}	<2	2~5	5~20	20~40	>40
污染程度	无~轻	中等	强	较强	极强

沉积物富集系数法进行了有关沉积物粒度的校正, 充分考虑沉积物粒度效应, 回避了由于黏土含量的不同造成沉积物重金属浓度的差别, 但并未反映重金属来源、化学活性和生物可利用性。

2.6. 尼梅罗综合污染指数法

尼梅罗综合污染指数法也是利用多因子对重金属环境污染进行评价的一种方法[46]。其数学表达式为:

$$P = \sqrt{\frac{(P_{imax})^2 + (P_{iavr})^2}{2}} \quad (1-8)$$

其中, P 为尼梅罗综合污染指数; P_{imax} 为各重金属污染因子单因子污染指数的最大值; P_{iavr} 为各重金属污染因子单因子污染指数的平均值。单因子污染指数的计算按本文 1.1 进行。

根据尼梅罗综合污染指数的大小可将污染等级分为四级, 如表 9。

Table 9. Nemerow comprehensive pollution index and pollution level classification standard

表 9. 尼梅罗综合污染指数和污染程度分级标准

尼梅罗综合指数	污染等级	污染
$P < 1$	I	无
$1 \leq P < 2.5$	II	轻
$2.5 \leq P < 7$	III	中
$7 \leq P$	IV	重

3. 结论

本文介绍了水体沉积物中的重金属污染的评价方法, 包括综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法、生物效应浓度法、沉积物富集系数法、尼梅罗综合污染指数法。上述方法虽有对水体重金属的综合评价, 但多为对每一种元素的逐个评价, 缺乏对于重金属污染整体上的综合认知, 可见上述方法既有优势又有不足, 在实际应用评价的过程中, 应根据评价区域的特点以及评价目的, 采取合理的评价方法, 通常需要采用多种方法相结合的方式对重金属污染进行评价, 取长补短, 达到更好的评价效果, 使评价结果更加准确, 具有可信度。

基金项目

山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室基金资助项目: 渤海湾潮间带表层沉积物重金属潜在风险评价(201507)。

参考文献

- [1] 彭士涛, 胡焱弟, 白志鹏. 渤海湾底质重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 水道港口, 2009, 30(1): 57-60.
- [2] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口地质现状的调查研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 58-63.
- [3] Williams, T.M. and Smith, B. (2000) Hydrochemical Characterization of Acute Acid Mine Drainage at Iron Duke Mine, Mazowe, Zimbabwe. *Environmental Geology*, **399**, 272-278. <https://doi.org/10.1007/s002540050006>
- [4] Marco, G., Francesco, S., Maria, L., et al. (2001) Temporal Distribution of Trace Metals in Antarctic Coastal Waters. *Marine Chemistry*, **76**, 189-209. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(01\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(01)00063-9)
- [5] Tang, D.G., Kent, W.W. and Peter, H.S. (2002) Distribution and Partitioning of Trace Metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in Galveston Baywater. *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)
- [6] Shum, M. and Lavkulich, L. (1999) Speciation and Solubility Relationships of Al, Cu and Fe in Solutions Associated with Sulfuric Acid Leached Mine Waste Rock. *Environmental Geology*, **38**, 59-68. <https://doi.org/10.1007/s002540050401>
- [7] Holmstrom, H., Ljungberg, J. and Olander, B. (1999) Role of Carbonates in Mitigation of Metal Release from Mining Waste: Evidence from Humidity Cells Tests. *Environmental Geology*, **38**, 267-280. <https://doi.org/10.1007/s002540050384>
- [8] Kunwar, P.S., Dinesh, M., Vinod, K.S., et al. (2005) Studies on Distribution and Fractionation of Heavy Metals in Gomti River Sediments Tributary of the Ganges, India. *Journal of Hydrology*, **312**, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.021>
- [9] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sediment to Logical Approach. *Water Research*, **14**, 975-986. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [10] 国家海洋局, 国家海洋环境监测中心. GB18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [11] 周笑白, 梅鹏蔚, 彭露露, 等. 渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 452-456.
- [12] 王胜强, 孙津生, 丁辉. 海河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2005, 23(2): 62-64.
- [13] 于瑞莲. 泉州湾潮间带沉积物中重金属元素的环境地球化学研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2009.
- [14] 霍素霞. 渤海沉积物重金属分布特征及生态风险研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [15] 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉, 等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 28-33.
- [16] 罗先香, 张蕊, 杨建强, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269.
- [17] Müller, G. (1969) Index of Geo-Accumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, **2**, 108-118.
- [18] 尚英男, 倪师军, 张成江. 应用地质累积指数评价成都市河流表层沉积物重金属污染[J]. 微量元素科学, 2005, 12(10): 12-16.
- [19] 王国平, 刘景双, 汤洁. 无尾河下游湿地重金属污染评价[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2): 50-54.
- [20] Zhang, L.P., Ye, X., Feng, H., et al. (2007) Heavy Metal Contamination in Western Xiamen Bay Sediments and Its Vi-

- cinity, China. *Marine Pollution Bulletin*, **54**, 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.010>
- [21] Alessandro, B., Giovanni, B., Nicola, C., *et al.* (2006) Heavy Metals in Marine Sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Marine Chemistry*, **99**, 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.09.009>
- [22] Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F., *et al.* (2007) Distribution and Accumulation of Heavy Metals in the Sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, **66**, 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>
- [23] Chatterjee, M., Silva Filho, E.V. and Sarkar, S.K. (2007) Distribution and Possible Source of Trace Elements in the Sediment Cores of a Tropical Macrotidal Estuary and Their Ecotoxicological Significance. *Environment International*, **33**, 346-356. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.11.013>
- [24] Abraham, G.M.S. and Parker, R.J. (2008) Assessment of Heavy Metal Enrichment Factors and the Degree of Contamination in Marine Sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, **136**, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
- [25] 陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 16-21.
- [26] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1676-1684.
- [27] 范文宏, 张博, 陈静生, 等. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1000-1005.
- [28] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究(I)C-B-T 质每: 二合一方法(Triad) [J] 环境科报, 1999, 19(2): 120-126.
- [29] 甘居利, 贾晓平, 林钦, 等. 近岸海域底质重金属生态风险评价初步研究[J]. 水产学报, 2000, 24(6): 533-538.
- [30] 陈静生, 王忠, 刘玉机. 水体金属污染潜在危害应用沉积学方法评价[J]. 环境科学, 1989, 9(1): 16-25.
- [31] 刘芳文, 颜文, 王文质, 等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(3): 34-38.
- [32] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37.
- [33] 崔毅, 辛福言, 马绍赛, 等. 乳山湾沉积物重金属污染及其生态危害评价[J]. 中国水产科学, 2005, 12(1): 83-89.
- [34] Vladimir, D. and Sigurd, R. (2001) Heavy Metal Pollution in Sediments of the Pasvik River Drainage. *Chemosphere*, **42**, 9-18. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00094-1)
- [35] 周秀艳, 薛向欣, 冷文芳, 等. 渤海湾秦皇岛段潮间带表层沉积物重金属污染分析[J]. 东北大学学报, 2010, 31(10): 1437-1440.
- [36] 王小静, 李力, 高晶晶, 等. 渤海西南部近岸功能区表层沉积物重金属形态分析及环境评价[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 517-525.
- [37] 李云海, 陈坚, 黄财宾, 等. 泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 931-938.
- [38] 董爱国, 翟世奎, 于增慧, 等. 长江口海域表层沉积物重金属元素的潜在生态风险评价[J]. 海洋科学, 2010, 34(3): 69-75.
- [39] Long, E.R. and Morgan, L.G. (1990) The Potential for Biological Effects of Sediment-Sorbed Contaminants Tests in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum, NOSOMA 52, 8-60.
- [40] Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S.L., *et al.* (1995) Incidence of Adverse Biological Effects within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments. *Environmental Management*, **19**, 81-97. <https://doi.org/10.1007/BF02472006>
- [41] Long, E.R. and Morgan, L.G. (1998) Predicting the Toxicity of Sediment-Associated Trace Metals with Simultaneously Extracted Trace Metal: Acid-Volatile Sulfide Concentrations and Dry Weight-Normalized Concentrations: A Critical Comparison. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **17**, 972-974. <https://doi.org/10.1002/etc.5620170529>
- [42] 王立新, 刘文新, 等. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究——以渤海锦州湾海洋沉积物为例[J]. 内蒙古大学学报, 2004, 35(4): 467-471.
- [43] Macdonald, D.D., *et al.* (1996) Development and Evaluation of Sediment Quality Guidelines for Florida Coastal Waters. *Ecotoxicology*, **5**, 253-278. <https://doi.org/10.1007/BF00118995>
- [44] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2405-2412.
- [45] Buat-Menard, P. and Chesselet, R. (1979) Variable Influence of the Atmospheric Flux on the Trace Metal Chemistry of Oceanic Suspended Matter. *Earth and Planetary Science Letters*, **42**, 398-411. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90049-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90049-9)
- [46] 陆书玉. 环境影响评价[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 163-164.