

温州南部海域表层沉积物重金属水平及其生态风险

陈军¹, 陈德慧², 王小华¹, 金矛¹, 周青松¹

(1. 杭州希澳环境科技有限公司, 浙江杭州 310011; 2. 杭州海蛞蝓生态科技有限公司, 浙江杭州 310023)

摘要 通过对温州南部海域 13 个沉积物站位 6 种重金属元素含量进行测定, 分析了沉积物重金属污染状况和潜在生态风险。结果表明, 所有监测点位的沉积物重金属含量均达到国家海洋沉积物一类标准, 重金属单因子污染指数均小于 1, 单因子污染指数平均值由大到小依次为 Zn、Cu、As、Pb、Cr、Hg, 各监测点位综合污染指数在 1.82~2.05, 平均值为 1.93, 总体污染程度为低污染。地质累积指数评价结果表明重金属元素平均值由大到小依次为 Cu、Zn、As、Pb、Hg、Cr。潜在生态风险评价结果表明, 单因子生态风险指数由高到低依次为 Hg、Cu、As、Pb、Zn、Cr, 综合生态风险指数为 21.938~28.157, 平均 24.912, 总体处于低生态风险水平。

关键词 沉积物; 重金属; 生态风险

中图分类号 X55 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)23-0055-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.23.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Levels of Heavy Metals in Surface Sediments and Their Ecological Risks in the Southern Seas of WenzhouCHEN Jun¹, CHEN De-hui², WANG Xiao-hua¹ et al (1. Hangzhou Xiao Environmental Sci-tech Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310011; 2. Hangzhou Sea Slug Ecological Sci-tech Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310023)

Abstract By measuring the contents of 6 heavy metal elements in 13 sediment sites in the southern seas of Wenzhou, the pollution status and potential ecological risks of heavy metals in the sediments were analyzed. The results showed that the concentrations of heavy metals in sediment were less than first-class of Chinese marine sediment quality criteria. The heavy metal single factor pollution index was less than 1, and the average value of the single factor pollution index was Zn, Cu, As, Pb, Cr, Hg in descending order, the comprehensive pollution index of each monitoring point was 1.82-2.05, the average was 1.93, and the overall pollution level was low pollution. The evaluation results of the geological accumulation index showed that the average values of heavy metal elements in descending order were Cu, Zn, As, Pb, Hg, and Cr. The result of potential ecological risk assessment indicated that the single-factor ecological risk coefficient from high to low was Hg, Cu, As, Pb, Zn, Cr, and the comprehensive ecological risk index was between 21.938 and 28.157, with an average of 24.912, which was generally at the low ecological risk level.

Key words Sediment; Heavy metals; Ecological risk

近年来,随着温州沿岸城镇化建设、化工、船舶业、养殖业等的快速发展,大量未经处理或处理不完全的污染物通过废水排放、废气沉降、固废倾倒等途径进入瓯江、飞云江、鳌江等河流,最终汇入近岸海域,极大降低了温州近岸海域环境质量,危害了海洋生态系统健康稳定。

重金属被认为是沿海地区重要的污染物之一,具有持久性、蓄积性、生物毒性三大特征^[1],可通过吸附、絮凝、沉降等物理和化学过程将海水中大部分重金属转移为颗粒态而沉降至海底。重金属在沉积物中不断地累积、释放,不仅影响海水水质的变化,对海洋生物产生毒害作用,还会被海洋生物吸收后沿着食物链富集^[2-3],最终进入人体影响人们身体健康。因此,了解近岸海域沉积物中重金属水平、空间分布、来源、生态风险等具有一定的社会意义,可为海洋环境保护和海洋开发利用提供科学指导。

根据 2018 年温州南部海域表层沉积物调查数据,笔者分析了该海域表层沉积物 6 种重金属的水平分布特征,并运用污染指数法^[4]、地质累积指数法^[5]和潜在生态风险评价法^[6]等方法进行重金属污染评价,分析该海域沉积物重金属含量水平,进行潜在生态风险评价,为温州近岸海域环境保护提供一定的基础资料。

1 材料与与方法**1.1 样品的采集与预处理** 2018 年 11 月在温州南部海域

设置 13 个采样站位(图 1)。表层沉积物采用抓斗式采泥器采集,用木勺从采泥器耳盖挖取表层 0~5 cm 厚的泥样置于聚乙烯封口袋中,冷藏保存。

从样品袋中取约 20 g 的泥样,在 50 °C 的烘箱中烘干至恒重,然后用玛瑙研钵研磨、过筛,处理好的粉末样品置于干燥器中备用。

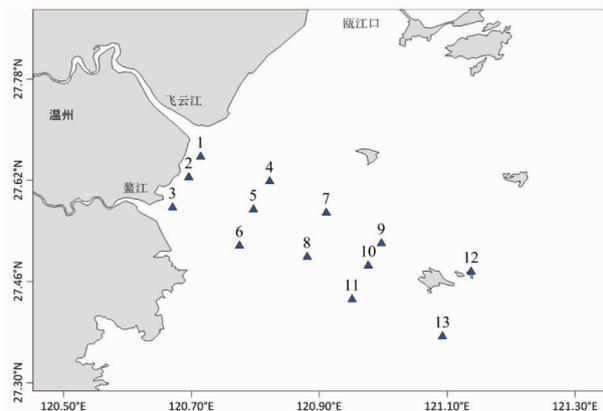


图 1 温州南部海域表层沉积物采样站位

Fig. 1 Location of surface sediment sampling station in the southern seas of Wenzhou

1.2 仪器与方法 Milli-Q 超纯水机(美国 Millipore 公司);原子吸收分光光度计(美国 PE 公司);原子荧光分光光度计(北京海光公司);微波消解仪(奥地利安东帕公司);消解环节涉及的酸均为优级纯级别。

作者简介 陈军(1982—),男,浙江杭州人,工程师,硕士,从事海洋环境影响评价、海洋环境监测研究。

收稿日期 2021-03-02

样品的消解采用微波消解法,消解步骤见《海洋沉积物与海洋生物体中重金属分析前处理 微波消解法(HYT 132—2010)》。铜、铅、锌、铬采用火焰原子吸收法测定,汞和砷采用原子荧光法测定。

分析过程中同步加测空白样和质控样(近海海洋沉积物标准物质),对检测结果进行质量评价。各检测元素的检出限和质控结果见表1。6种元素的标准样测定值均在标准值范围内。

表1 方法的检出限和认证标准物质检测结果

Table 1 Detection limits of the method and test results of certified reference materials mg/kg

元素 Element	检出限 Detection limit	标准值 Standard value	检测值 Detection value
Cu	2.0	28±2	26.4
Pb	3.0	23±4	23.8
Zn	6.0	77±6	78.6
Cr	2.0	46±8	41.5
Hg	0.002	0.048±0.012	0.039
As	0.06	10.3±1.4	9.6

1.3 评价方法 采用单因子污染指数法、综合污染指数法、地质累积指数法和潜在生态风险指数法4种评价方法对温州南部海域沉积物中重金属现状进行评价。各种计算公式如下:

(1) 单因子污染指数计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{C_{io}}$$

式中, P_i 为第*i*项因子(不包括pH、DO)的标准指数,即单因子标准指数; C_i 为第*i*项因子的实测浓度; C_{io} 为第*i*项因子的评价标准值。

(2) 综合污染指数法计算公式:

$$P = \sum_i^n P_i$$

式中, P 为综合污染指数。

(3) 地质累积指数法计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{1.5B_i}$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数; B_i 为黏质沉积岩(即普通页岩)中该金属的地球化学背景值,由于背景值无统一标准,文中选择与 C_n 相同的背景值作为参考值。

(4) 潜在生态风险指数法计算公式:

$$RI = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n T_r^i \times \frac{C_i}{C_n}$$

式中,RI为重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属毒性响应系数; C_n 为重金属的评价背景值,采用王菊英等^[7]研究的东海表层沉积物重金属背景值。

各海洋沉积物重金属评价背景值及毒性响应参数见表2,地质累积指数与污染程度之间的关系见表3,表4为污染指数评价标准和潜在生态风险指数污染程度划分。

表2 沉积物重金属背景值与毒性响应参数^[8-9]

Table 2 Background values and toxicity response parameters of heavy metals in sediments

重金属元素 Heavy metals	一类标准值 First-class standard value//mg/kg	背景值 Background value//mg/kg	毒性响应参数 Toxicity response parameter
Cu	35.00	10.52	5
Pb	60.00	20.27	5
Zn	150.0	66.1	1
Cr	80.0	67.4	2
Hg	0.200	0.092	40
As	20.0	16.6	10

表3 地质累积指数与污染程度分级^[10]

Table 3 Geological accumulation index and pollution degree classification

I_{geo}	污染程度 Pollution degree	污染等级 Pollution level
<0	无	0
0~<1	轻度	1
1~<2	偏中度	2
2~<3	中度	3
3~<4	偏重	4
4~<5	重	5
≥5	严重	6

表4 污染指数评价与潜在生态风险指数污染程度划分^[11]

Table 4 Pollution index evaluation and pollution degree classification of potential ecological risk index

P_i	单因子污染物污染程度 Single factor pollutant pollution degree	P	综合污染程度 Comprehensive pollution degree	E_r^i	单因子污染物生态风险程度 Ecological risk degree of single factor pollutants	RI	总的潜在生态风险程度 Total potential ecological risk
<1	低	<6	低	<40	低	<150	低
1~<3	中等	6~<12	中等	40~<80	中等	150~<300	中等
3~<6	重	12~<24	重	80~<160	较重	300~<600	重
≥6	严重	≥24	严重	160~<320	重	≥600	严重
				≥320	严重		

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中重金属的水平分布特征含量 表5表明,温州南部13个近岸海域沉积物监测点位中,重金属Cu含量为14.6~18.1 mg/kg,平均值为15.97 mg/kg;Zn含量为81.5~101.0 mg/kg,平均值为90.99 mg/kg;Pb含量为6.8~15.4 mg/kg,平均值10.22 mg/kg;Cr含量为8.7~

12.4 mg/kg,平均值为10.37 mg/kg;Hg含量为0.014~0.023 mg/kg,平均值为0.019 mg/kg;As含量为7.65~9.34 mg/kg,平均值为8.41 mg/kg。所有监测站点重金属含量均符合《海洋沉积物质量标准》(GB 18668—2002)第一类标准。结合监测站位图2,6种重金属元素的含量波动较小,无明显空间分布规律。

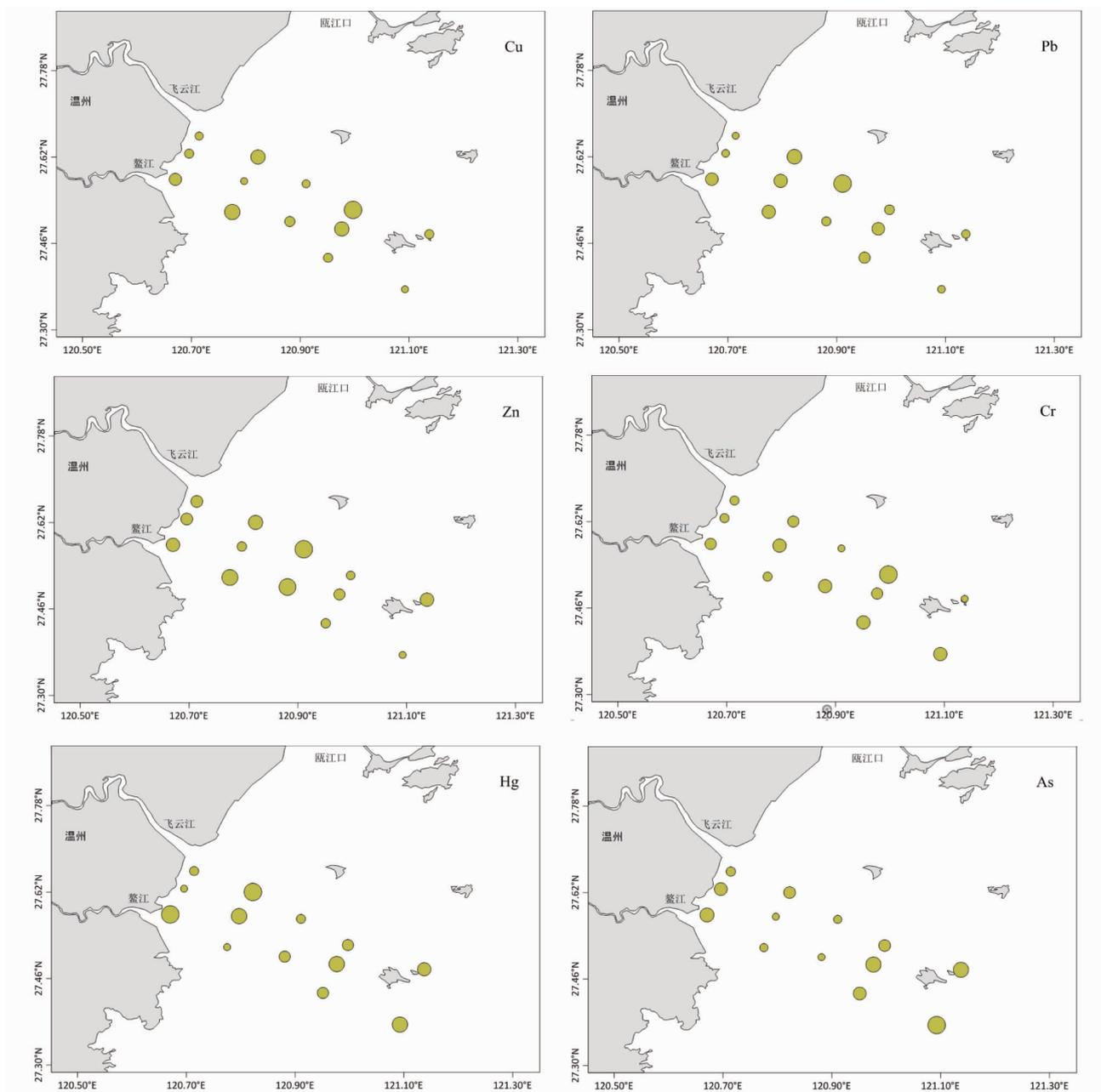


图2 温州南部海域重金属平面分布

Fig. 2 Plane distribution of heavy metals in the southern seas of Wenzhou

我国浅海沉积物重金属背景值见表6^[12]。由表5和表6可知,温州南部海域重金属元素Pb、Zn、Cr、Hg均未超过中国浅海沉积物重金属背景值,重金属元素Cu、As超过了我国浅海沉积物重金属背景值,超标6.5%、9.2%。国内海湾重金属含量数据见表7。由表5和表7可知,与国内海湾重金属含量均值相比,温州南部海域重金属元素Cu超过大亚湾,重金属元素As超过大亚湾、胶州湾,说明Cu、As这两类重金属在温州南部海域沉积物中有一定的富集。

重金属的变异程度反映了其空间分布的差异程度,一般情况下,小于15%的变异系数称为小变异,变异系数15%~36%称为中等变异,变异系数大于36%称为高度变异。表5表明,温州南部海域重金属Pb、Hg属于中等变异,其余5种重金属均为小变异。变异程度由高到低依次为Pb、Hg、Cr、

Cu、As、Zn,说明重金属Pb受人类活动影响最大。

表5 温州南部海域沉积物重金属含量统计

Table 5 Statistics of heavy metal content in sediments in the southern seas of Wenzhou

元素 Element	重金属含量 Heavy metal content			变异系数 Coefficient of variation %
	变化范围 Variation range//mg/kg	均值 Average value//mg/kg	标准差 Standard deviation	
Cu	14.6~18.1	15.97	1.14	7.14
Pb	6.8~15.4	10.22	2.68	26.22
Zn	81.5~101.0	90.99	5.83	6.41
Cr	8.7~12.4	10.37	1.04	10.03
Hg	0.014~0.023	0.019	0.003	15.79
As	7.65~9.34	8.41	0.55	6.54

表6 中国浅海沉积物重金属背景值

Table 6 Background values of heavy metals in shallow sea sediments of China

重金属 Heavy metal	背景值 Background value	重金属 Heavy metal	背景值 Background value
Cu	15.00	Cr	61.00
Pb	17.00	Hg	0.025
Zn	65.00	As	7.70

2.2 沉积物重金属风险评价

2.2.1 污染指数法评价。温州南部海域沉积物重金属污染指数及综合污染指数计算结果及污染程度见表8,单因子污染指数中,各站位6种重金属单因子污染指数均小于1,单因

表8 温州南部近岸海域沉积物重金属污染指数及污染程度

Table 8 Heavy metal pollution index and pollution degree of sediments in coastal waters of southern Wenzhou

站位 Station	单因子污染指数 Single factor pollution index						综合污染指数 Comprehensive pollution index	总体污染程度 Overall pollution level
	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As		
1	0.43	0.11	0.60	0.12	0.08	0.40	1.82	低
2	0.44	0.12	0.60	0.12	0.07	0.43	1.82	低
3	0.47	0.19	0.62	0.13	0.12	0.44	2.01	低
4	0.49	0.22	0.63	0.13	0.12	0.42	2.05	低
5	0.42	0.20	0.57	0.14	0.11	0.38	1.90	低
6	0.50	0.20	0.65	0.12	0.07	0.39	1.97	低
7	0.43	0.26	0.67	0.11	0.08	0.39	2.04	低
8	0.45	0.14	0.66	0.14	0.09	0.38	1.90	低
9	0.52	0.15	0.56	0.16	0.09	0.42	1.98	低
10	0.49	0.19	0.59	0.13	0.11	0.45	2.00	低
11	0.44	0.17	0.57	0.14	0.09	0.43	1.88	低
12	0.44	0.13	0.62	0.11	0.10	0.45	1.89	低
13	0.42	0.12	0.54	0.14	0.11	0.47	1.84	低
平均值 Average value	0.46	0.17	0.61	0.13	0.10	0.42	1.93	低

2.2.2 地质累积指数法评价。在沉积物重金属污染评价指标中,地质累积指数已广泛应用^[17]。重金属元素地质累积指数见表9,重金属Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As的重金属地质累积指数平均值分别为0.043、-1.571、-0.128、-3.283、-2.943、-1.559,沉积物重金属地质累积指数平均值由大到小依次为Cu>Zn>As>Pb>Hg>Cr。所有监测点位重金属元素地质累积指数均小于1,属于无污染或轻度污染。

表9 温州南部近岸海域沉积物重金属地质累积指数

Table 9 Geological accumulation index of heavy metals in sediments in coastal waters of southern Wenzhou

元素 Element	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	污染程度 Pollution degree
Cu	0.198	-0.112	0.043	轻度
Pb	-0.981	-2.161	-1.571	无
Zn	0.027	-0.283	-0.128	无
Cr	-3.027	-3.539	-3.283	无
Hg	-2.585	-3.301	-2.943	无
As	-1.415	-1.703	-1.559	无

2.2.3 潜在生态风险指数评价。瑞典地球化学家 Hakanson 于1980年建立了潜在生态风险指数法,该方法既可评价某一特定环境中的每种污染物的影响,又可反映多种污染物的综合影响,并且定量划分出潜在的生态风险程度^[18]。海域沉积物重金属潜在生态风险指数计算结果见表10。表10表

子污染指数平均值由大到小依次为 Zn > Cu > As > Pb > Cr > Hg,污染程度均为低污染。各监测站位综合污染指数在1.82~2.05,平均值为1.93,总体污染程度为低污染。

表7 国内海湾沉积物重金属均值

Table 7 Average values of heavy metals in domestic bay sediments

区域 Area		Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As
三门湾 ^[13]	Sanmen Bay	31.0	24.00	98.00	78.00	0.109	10.00
乐清湾 ^[14]	Yueqing Bay	37.3	27.00	127.10	64.40	0.044	9.90
大亚湾 ^[15]	Daya Bay	11.0	34.50	101.00	81.20	0.070	5.94
胶州湾 ^[16]	Jiaozhou Bay	37.6	40.66	158.06	78.41	0	7.74

明,单因子潜在生态风险指数中,单个重金属平均值范围在0.308~9.060,均小于40,属于低风险水平,6种重金属单因子潜在生态风险指数平均值从大到小依次为Hg>Cu>As>Pb>Zn>Cr。

从多元素潜在生态风险指数来看,各监测点位潜在生态风险指数范围为21.938~28.157,平均值24.912,参照分级标准,所有监测点位处于低生态风险水平。与张树刚等^[19]报道的2014年温州近岸海域沉积物潜在生态风险程度为低生态风险结果相一致。

3 结论

(1)温州南部海域13个点位沉积物6种重金属含量均达到《海洋沉积物质量标准》(GB 18668—2002)第一类标准,6种重金属元素的含量波动较小,无明显空间分布规律。根据重金属的变异系数可知,重金属Pb、Hg属于中等变异,其余4种重金属均为小变异。变异程度由高到低依次为Pb、Hg、Cr、Cu、As、Zn。重金属元素Cu、As超过了我国浅海沉积物重金属背景值,超标6.5%、9.2%。

(2)污染指数法评价结果表明,温州南部海域沉积物重金属总体污染程度为低污染水平;地质累积指数评价结果表明,沉积物重金属地质累积指数平均值由大到小依次为Cu、Zn、As、Pb、Hg、Cr,所有监测点位重金属元素地质累积指数均小于1。

表 10 温州南部海域沉积物重金属的 E_r^i 和 RITable 10 E_r^i and RI of heavy metals in sediments in the southern seas of Wenzhou

站位 Station	E_r^i 元素 Element						RI	分级 Classification
	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As		
1	7.224	1.677	1.363	0.291	6.522	4.861	21.938	低
2	7.272	1.825	1.354	0.282	6.087	5.193	22.013	低
3	7.842	2.812	1.398	0.312	10.000	5.343	27.707	低
4	8.080	3.305	1.439	0.309	10.000	5.024	28.157	低
5	7.034	2.985	1.304	0.320	9.130	4.608	25.381	低
6	8.365	2.985	1.464	0.291	6.087	4.717	23.909	低
7	7.082	3.799	1.528	0.258	6.957	4.723	24.347	低
8	7.414	2.121	1.489	0.332	7.826	4.627	23.809	低
9	8.603	2.195	1.275	0.368	7.391	5.096	24.928	低
10	8.222	2.837	1.346	0.315	9.565	5.367	27.652	低
11	7.319	2.541	1.292	0.338	7.826	5.139	24.455	低
12	7.272	1.875	1.410	0.261	8.261	5.434	24.513	低
13	6.939	1.801	1.233	0.323	9.130	5.627	25.053	低
平均 Average value	7.590	2.520	1.377	0.308	9.060	5.058	24.912	低

(3)潜在生态风险评价结果表明,重金属单因子生态风险指数由高到低依次为 Hg、Cu、As、Pb、Zn、Cr。重金属综合生态风险指数 RI 范围为 21.938~28.157,平均值 24.912,总体处于低生态风险水平。

参考文献

- [1] BASTAMI K D, BAGHERI H, KHEIRABADI V, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along south-east coast of the Caspian Sea[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 81(1): 262-267.
- [2] 丰卫华, 陈立红, 宋伟华, 等. 象山港及其邻近海域表层沉积物中重金属的水平分布特征及其污染评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 71-78.
- [3] FORSTNER U, WITTMAN G T W. Metal contamination in aquatic environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 197-270.
- [4] 叶敏强, 季相星, 李婷婷, 等. 江苏省近岸海域沉积物重金属分布及风险评价[J]. 污染防治技术, 2019, 32(2): 33-38.
- [5] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 109-118.
- [6] HAN D M, CHENG J P, HU X F, et al. Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. Marine pollution bulletin, 2017, 115(1/2): 141-148.
- [7] 王菊英, 马德毅, 鲍永恩, 等. 黄海和东海海域沉积物的环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 21-24.
- [8] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性

系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.

- [9] LU S Y, ZHU M Y. The background value of chemical elements in the Huanghai Sea sediment [J]. Acta oceanologica sinica, 1987, 6(4): 558-567.
- [10] 刘解答, 郭亮, 柯志新. 珠江口表层沉积物中重金属污染及生态风险评价[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(1): 46-53.
- [11] 杨玉峰, 梁浩亮, 范开文, 等. 2016 年惠州海域表层沉积物重金属污染分析[J]. 海洋湖沼通报, 2018(3): 88-94.
- [12] 段一明, 张戈, 于大涛. 辽东湾西北部海域沉积物重金属含量分析及污染评价[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(1): 39-45.
- [13] 李铁军, 刘士忠, 郭远明, 等. 三门湾沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(4): 318-321, 335.
- [14] 亚茵, 崔灵周, 王传花, 等. 乐清湾滩涂沉积物重金属含量垂向分布及污染评价[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 299-303.
- [15] 李学杰. 广东大亚湾底质重金属分布特征与环境质量评价[J]. 中国地质, 2003, 30(4): 429-435.
- [16] 郭军辉, 殷月芬, 陈发荣, 等. 胶州湾表层沉积物重金属污染分布特征及其生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(3): 13-21.
- [17] 李飞, 徐敏. 江苏港口海域沉积物重金属污染状况[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1275-1282.
- [18] 时运红, 李明远, 李波, 等. 深圳湾沉积物重金属污染时空分布特征[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 186-191, 208.
- [19] 张树刚, 吕宝强, 马志凯, 等. 温州近岸海域沉积物中重金属生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 437-443.

(上接第 36 页)

3 结论

该试验的目标是利用宜春天然富硒土壤, 筛选出适应宜春市种植的富硒水稻品种, 以促进宜春市富硒产业, 同时改善和提高人体的硒营养水平。研究表明, 供试的 26 个水稻品种均达富硒低镉标准, 综合来看, 从土壤中吸收和累积硒能力强的天然富硒低镉品种有黄华占、中百优华占、银两优 851、荃优 123、徽两优粤农丝苗、银丰优华占、晶两优 1468。

该研究利用田间天然富硒环境进行富硒水稻的筛选, 由于自然生产环境比较复杂, 很难保证水稻材料种植的完全均一性, 其结果的准确性较差; 要获得准确鉴定结果可能还需要进行多年多点筛选^[11]。因此, 该研究结果只能用于初步筛选, 如需高效准确地对水稻富硒能力进行鉴定并筛选出高富硒的水稻种质资源, 还需要结合分子手段进行定向选择。

参考文献

- [1] RAYMAN M P. The importance of selenium to human health[J]. Lancet,

2000, 356(9225): 233-241.

- [2] 关玉群, 朱磊, 王充, 等. 硒与人体健康[J]. 现代预防医学, 2003, 30(5): 700-702.
- [3] 张明刚. 富硒农业种植发展前景[J]. 农民致富之友, 2017(15): 54.
- [4] 吴得峰. 喷施硒肥对水稻产量及硒含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(24): 108-110.
- [5] 刘宪虎, 许明子, 李范洙, 等. 黑稻育成品系的 20 种矿质元素的含量分析[J]. 延边大学农学学报, 1997, 19(4): 215-218.
- [6] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112-115.
- [7] 蒋彬. 水稻富硒基因型品种筛选[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2002, 30(S1): 152-156.
- [8] YE X X, LI H Y, MA Y B, et al. The bioaccumulation of Cd in rice grains in paddy soils as affected and predicted by soil properties[J]. Journal of soils and sediments, 2014, 14(8): 1407-1416.
- [9] ZHAO K L, ZHANG W W, ZHOU L, et al. Modeling transfer of heavy metals in soil-rice system and their risk assessment in paddy fields[J]. Environmental earth sciences, 2009, 59(3): 519-527.
- [10] ZENG F R, ALI S, ZHANG H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental pollution, 2011, 159(1): 84-91.
- [11] 一种富硒水稻品种的筛选方法与流程 [EB/OL]. [2020-10-15]. http://www.xjshu.com/zhuanti/01/201810433294.html.