

文章编号: 1674-5566(2012)01-0086-06

盐城海岸带表层土壤重金属潜在生态风险分析

方淑波^{1,2}, 叶属峰¹, 贾晓波³, 田 壮¹, 聂 耳², 郑 正²

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200433; 3. 中国环境科学研究院 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012)

摘 要: 以2007年9-10月间采集的106个表层土壤样品为基础, 分析了Cr、Cu、Ni、Zn、Cd等5种重金属元素的含量, 计算了盐城海岸带重金属的Hakanson生态风险指数, 研究了盐城海岸带的重金属生态风险格局。采用GS+软件, 对生态风险指数进行了空间插值。结果表明: 盐城海岸带的重金属生态风险呈现出明显的南北分异及海陆分异, 北部开发较久的区域、内陆区域的生态风险值较高。对比农田与水产养殖区域与整个区域的平均生态风险值, 农田区域的生态风险值接近整体的生态风险值, 而水产养殖区域的生态风险值低于整体的生态风险值。就人为活动引入的重金属生态风险管理而言, 盐城海岸带的重金属生态风险管理集中于人类活动较强和较弱的两个区域, 前者如北部射阳港、射阳电厂、大丰港等, 后者如射阳丹顶鹤自然保护区、大丰麋鹿自然保护区以及南部辐射沙洲区域等, 这些区域多数是生态价值较高的热点区域。

研究亮点: 采用Hakanson重金属潜在生态风险指数法对盐城海岸带的重金属生态风险进行了空间分析, 并结合该区域主要的人类活动, 包括农田种植和水产养殖区域的重金属生态风险分析, 评价了盐城海岸带的重金属潜在生态风险现状, 并对研究区域重金属生态风险的有效管理提出了建议。该研究所采用的方法适合于海岸带区域尺度上重金属生态风险的评价和管理。

关键词: Hakanson指数; 重金属; 空间格局; 潜在生态风险; 管理策略

中图分类号: X 131

文献标志码: A

Hakanson生态风险指数是一种常用的重金属潜在生态风险评价指数^[1], 目前被广泛运用于多类区域的重金属潜在生态风险评价, 如外秦淮河底泥疏浚后的重金属生态风险评价^[2], 县域重金属生态风险评价^[3], 泉州湾重金属生态风险评价^[4], 海岸带重金属生态风险评价^[5], 滇池外海底泥的重金属生态风险评价^[6], 煤矿的重金属生态风险评价^[7], 以及采用双层神经网络与GIS支持的农田重金属生态风险评价^[8]。生态风险指数能有效指示重金属的潜在生态风险, 并采用低、中、高几个等级进行表征, 有助于制定空间显性的生态风险管理策略。

人类活动成为目前海岸带区域重金属的一个主要来源。根据文献报道, 引入重金属的人类活动有城市化^[9]、农田种植、水产养殖^[10-12]、海岸带围垦^[13]和工业^[14]等。各区域由人类活动引

入的重金属元素如香港沿海滩涂的Cu、Pb和Zn^[9], 上海沿海滩涂的Cu、Ni、Pb和Cd^[15], 江苏沿海滩涂的Cu、Zn、Pb和Hg^[5,11], 胶州湾的Cu、Pb、Cd和Zn^[16], 珠江口滩涂的Cd、Zn和Ni^[13]等。

研究重金属的生态风险指数空间分布, 并通过与海岸带典型的人类活动相对比, 有助于制定空间明晰化的重金属风险管理策略^[17]。本文希望通过盐城海岸带生态风险指数的空间分析, 为盐城海岸带的重金属污染管理提供信息。

盐城海岸带是全球最大的海岸带滩涂湿地, 地处江苏中部沿海, 分布着盐城国家级珍禽自然保护区(图1), 是生物多样性保护的热点区域^[18]。1992年10月被联合国教科文组织纳入“世界生物圈保护网络”, 1996年被纳入“东北亚鹤类保护区网络”, 2002年被纳入国家重要湿地

收稿日期: 2011-09-24 修回日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(41101172); 国家水专项资金(2009ZX07106-04)

作者简介: 方淑波(1976—), 男, 讲师, 博士后, 研究方向为海岸带湿地生态学。E-mail: bsfang@shou.edu.cn

名录。其范围包括盐城市属响水、滨海、射阳、大丰及东台 5 个县市的东部沿岸,总面积为 $45.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中核心区达 $1.74 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

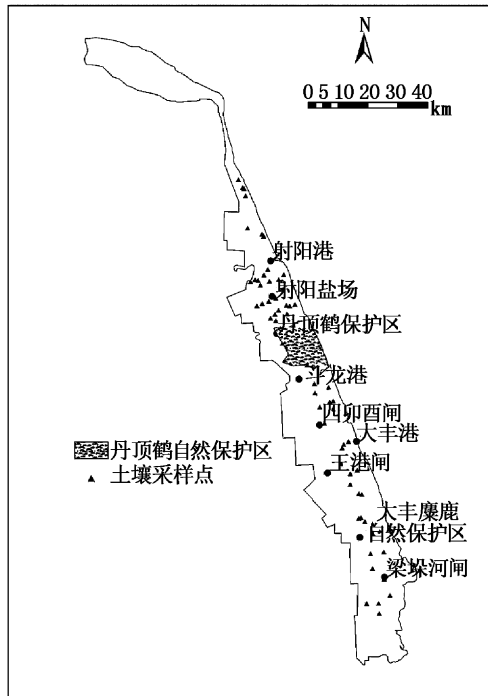


图 1 盐城海滨湿地研究区域图

Fig. 1 Study site along Yancheng coast, Jiangsu

研究区域的地貌类型主要属于江苏中部海积平原类型,是近千年来海岸不断淤长形成的滨海平原。该区以斗龙港为界,南高北低,斗北地面高程在 2 m 左右,斗南在 3 m 以上,地表组成物质南粗北细,南部梁垛河闸附近多粉砂,向北泥质成分增加。水文区系可分为陆地水文、近海和潮间带水文两类,陆地水文主要属于淮河流域,近海和潮间带水文以潮汐作用为主。盐城海岸湿地多为粉砂淤泥质滩涂。滩涂由陆向海,植被带可分为苇草带、盐蒿带、无植被带(光滩)和米草带。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

2007 年 9 - 10 月,自射阳苏北灌溉总渠到东台条子泥,以 20 世纪 50 年代的老海堤为界,自海向陆,采集了 106 个土壤样方,采用系统采样法,自南向北,每隔 2 km,自东向西,每隔 500 m 左右设置采样点。每个土壤样点 5 个重复,每个重复之间 50 m,以 W 形状采样。采用环刀和塑料铲,

采取表层 10 cm 范围的土壤样品,然后将土壤样品放置于塑封袋后带回实验室置于 4 ℃ 的冰箱中保存。

1.2 样品处理与测试

将取得的土壤样品风干后,混合,研磨,过 100 目筛。样品消煮过程为:称取 0.125 g 样品,加入 2 mL 盐酸及 1 mL 硝酸,60 ℃ 加热 30 min,然后加 6 mL 氢氟酸以及 0.5 mL 高氯酸以 120 ℃ 加热 3 h,余热蒸干后用 7% 硝酸定溶至 25 mL^[15]。在南京大学分析测试中心采用等离子光谱仪(J-A1100)测试 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、V、Zn、Co 和 Cd 共 9 种重金属元素,测量的精密度 RSD% < 2.0,回收率为 95% ~ 104%。

1.3 数据处理

1.3.1 生态风险指数的计算方法为:

$$R_1 = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times C_f^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \quad (1)$$

式中: R_1 为 Hakanson 指数; E_r^i 为某种重金属的潜在生态风险值; T_r^i 为某种重金属的毒性响应参数; C_f^i 为某种重金属的污染参数; C^i 为某种重金属的实测量; C_n^i 为重金属的背景值; m 为评价的重金属元素的数量; i 为某种重金属元素。

参考 Hakanson 的研究及其他案例的研究^[1-8],Cu、Zn、Ni、Cd 和 Cr 的 T_r^i 值确定为 5、1、5、30 和 2,其背景值 C_n^i 采用王计平^[19]通过柱状样分析确定的背景值,分别为 30,80,22,0.5 和 60 mg/L。

生态风险值小于 150,定义为低生态风险,150 ~ 300 定义为中生态风险,大于 300 则被定义为高生态风险^[1]。

1.3.2 生态风险指数的空间插值

采用 GS + 3.2 视窗操作软件(Gamma Design Software, Plainwell, MI, USA),106 个土壤样品的生态风险指数采用“2 × 2”块克里金计算方法计算其三维的空间分布格局。

然后,自陆向海,自南向北,分别沿着经度和纬度,计算重金属的海陆梯度分异和南北梯度分异,经度计算以区域最内陆的经度为起点,纬度计算以区域最南部的纬度为起点,在这两个方向上,采用 Origin 软件分析生态风险值自南向北和自海向陆的空间分布格局。

1.3.3 农田和水产养殖区域的生态风险指数聚类分析

采用聚类分析的方法,对农田和水产养殖区域的生态风险指数进行聚类,并对比农田和水产养殖区域的生态风险值与整个区域的生态风险值,以确定人类活动对生态风险值的影响。

2 结果

2.1 生态风险指数统计信息

5种元素的潜在生态风险除了Cd,其余的都呈偏正态分布(表1),变异系数较大,元素分布的空间异质性较强(表1)。5种元素的生态风险依次为: Cd > Ni > Cu > Cr > Zn。其中Cd的生态风险均值为170.88,大于150,为中度的生态风险,其他的为低生态风险。

2.2 生态风险指数空间格局

生态风险指数的三维空间格局如图2所示。

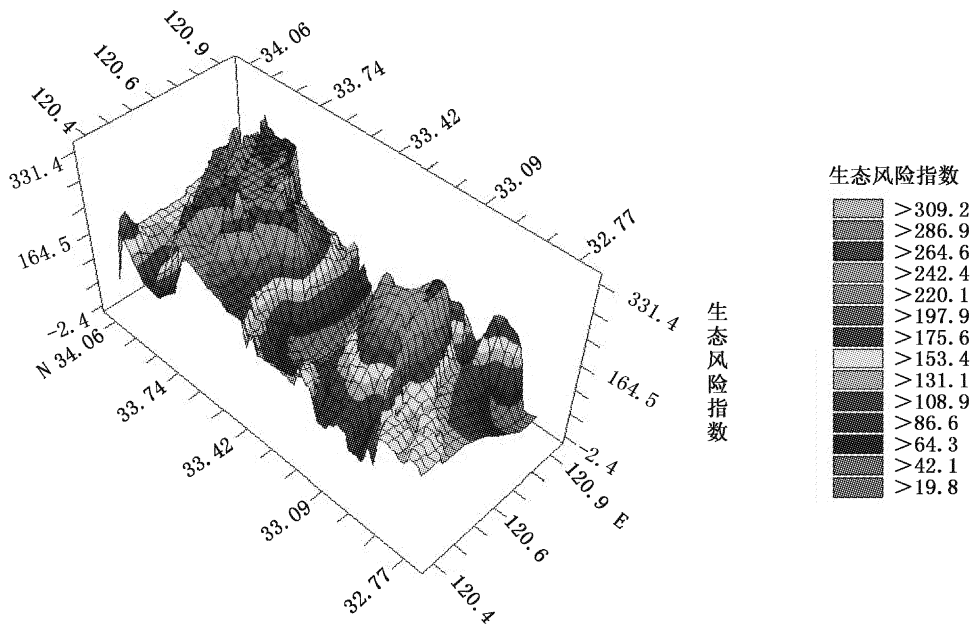


图2 生态风险指数值的三维空间格局

Fig.2 The 3-dimension spatial patterns of risk index

生态风险指数值自海向陆和自南向北的空间格局分析表明(图3),北部区域、内陆区域的生态风险值较高。盐城海岸带的重金属生态风险值与重金属的空间分布相似,自陆向海逐渐降低(图3)。

2.3 农田和水产养殖区域生态风险指数聚类分析及平均值

把农田和水产养殖区域土壤样品的生态风险值与所有土壤样品的生态风险值进行对比(表2)。农田区域的生态风险值与整体的平均值相

高的生态风险值主要分布于研究区域的北部、射阳港和射阳盐场附近。大丰港附近的生态风险值也较高。研究区域的两个国家级自然保护区,射阳丹顶鹤珍禽自然保护区和大丰麋鹿自然保护区的生态风险值相对较低。

表1 5种重金属元素生态风险指数统计信息

Tab.1 The statistical information of the potential risks of the 5 heavy metals

	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd
平均值	1.21	2.73	3.31	0.63	170.88
标准差	0.18	1.25	0.62	0.16	99.68
变异系数	0.03	1.57	0.38	0.03	9 936.25
峰度	-0.38	3.39	-0.06	3.05	-1.35
偏度	0.64	1.22	0.87	13.84	-0.42

当,水产养殖区域的生态风险值低于整体的平均值。

对所有农田和水产养殖区域的生态风险值进行聚类分析(图4)表明,水产养殖区域和农田的所有点都可以聚为2类。结合GPS定位的信息确定,斗龙港是将研究区域的农田、水产养殖划分为两类空间的界限。斗龙港正处于射阳丹顶鹤保护区的南面,是射阳进入大丰的地标。就地形而言,斗龙港也是研究区域地形高低的南北分界线。

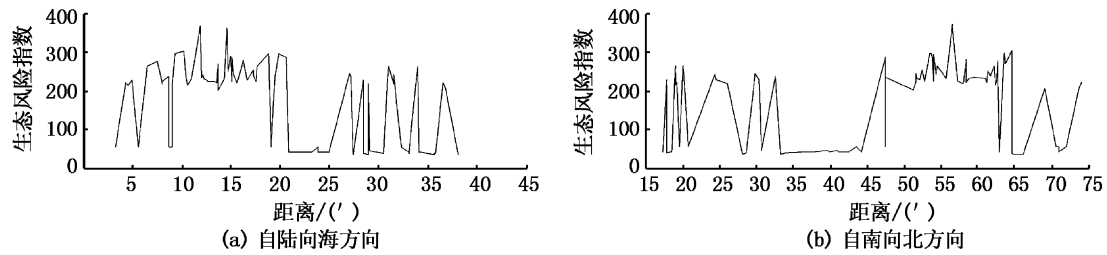


图3 生态风险指数值的一维空间格局

Fig.3 The 1-dimension spatial patterns of risk indices

表2 水产养殖和农田区域的重金属生态风险值及累计风险值
 Tab.2 The potential ecological risks calculated for individual metals and the risk indices in the agriculture and aquaculture landscapes

	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	生态风险指数
农田平均值	1.17	2.68	3.23	0.65	180.48	188.21
标准差	0.17	1.20	0.73	0.29	102.82	104.49
水产养殖平均值	1.14	2.56	3.01	0.60	143.80	151.12
标准差	0.11	1.58	0.32	0.15	100.23	101.41
所有样品均值	1.21	2.73	3.31	0.63	170.88	178.77

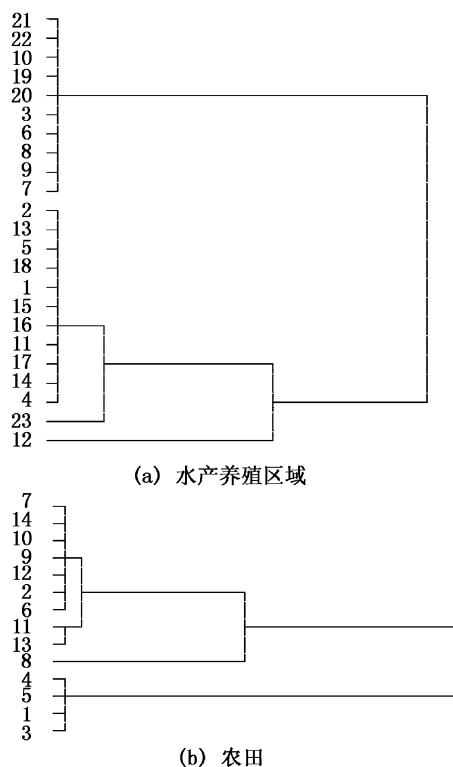


图4 研究区的生态风险指数聚类分析
 Fig.4 Cluster analysis of the risk indices

3 讨论

陆源污染排放、水动力作用、成岩母质以及潮汐作用等均影响重金属在海岸带滩涂的空间分布^[20-21]。在本研究中,土壤采样点远离受陆源输入河流水位变化影响大的区域,同时根据与

本地重金属背景值的对比研究^[19],成土母质的因素不足以解释本地重金属富集的程度。因此,本研究重金属的分布主要是本地人类活动的输入影响^[17]。

人文活动对海岸带地区重金属分布影响的研究已经有较多的报道,主要的人类活动包括工业污水排放、围垦、肥料使用、生活废水排放和水产养殖等。在盐城海岸带,典型的人类活动包括农业种植、晒盐、水产养殖、近年逐渐开始的湿地旅游、港口开发和风电场建设等活动。就人为开发的历史来看,北部的开发历史较为悠久,大型港口、电厂、企业及盐场都有较长的开发历史,而南部的开发时间相对短暂。开发历史的长短直接影响海岸带土壤性状的演替过程,如土壤有机质含量,开发的历史越久,有机质含量越高,而土壤有机质含量与重金属的分布有较高的相关性^[17],因此人为条件的南北差异是导致重金属南北分异的重要原因^[22-24]。

河口海岸带区域的重金属研究在世界其他区域也有较多报道。EMMERSON等^[25]报道了英国黑水河口滩涂的重金属富集自陆向海递减的趋势,由于人类活动,内陆区域的Pb, Zn, Cd和Cu含量增加;VISUTHISMAJAM等^[26]报道了虾田使用杀虫剂,抗生素,肥料等之后重金属Mn, Cd和Cu在虾肌体组织中的富集增加的情况;在葡萄牙的Sado河口,重金属Cd, As, Cu的富集导

致的生态风险呈增加的趋势^[27]; FIRAT 等^[28]报道了土耳其虾蟹田养殖由于使用 Iskenderum 湾的水而导致的虾蟹肌体组织中 Cr, Cd, Cu, Zn 和 Fe 富集增加的情况; NEMR 等^[29]报道了苏伊士湾沉积物中较高的 Cd, Ni 和 Pb 富集, 以及中等程度的 Zn 富集等现象。

因此, 控制人为引入的重金属污染成为海岸带区域重金属污染控制的重要研究内容^[23], 在盐城海岸带, 重金属生态风险的控制应该首先集中于北部生态风险值较高的地区, 如射阳港、射阳盐场等区域, 而南部、自然保护区等区域, 生态风险值较低, 由于其较高的自然价值和未来实现可持续发展的关键作用, 应该加强人类活动的合理调控, 维护生态健康。

此外, 通过合理的海岸带功能区划, 划分出保护区、生态修复区、轻度开发区和开发区等不同开发强度的区域, 不同区域对人类活动实行不同的管理措施, 以达到经济开发与生态保护兼顾的目标, 这对于海岸带区域的可持续发展具有重要意义^[23]。然后, 要回答如何从源头对重金属的风险进行规避, 还需要采用同位素标记、地理沉积测年等多种方法的结合来精确研究重金属在海岸带区域从“源”到“汇”的归趋过程, 这是本研究下一步要加强的工作。

4 结论

4.1 生态风险指数空间插值的有效性

生态风险指数空间插值方法是一种有效的将潜在生态风险空间明晰化的定量研究方法, 可以有有效的指示生态风险的空间分布格局, 并据此指定空间明细的管理策略, 盐城海岸带的重金属生态风险呈现出南北及海陆的空间差异性, 南低北高, 内陆高, 向海方向低。

4.2 人类活动及其调控

人为活动成为海岸带重金属元素引入的一个重要原因, 人为活动的合理调控是海岸带开发过程中的重点和难点; 与生态风险指数的空间格局相应, 盐城海岸带的重金属生态风险管理该集中于人类活动“较强的”区域和“较弱的”区域, 人类活动较强的区域, 如北部射阳港、射阳电厂和大丰港等, 往往是引入重金属元素的“源”, 人类活动较弱的区域如射阳丹顶鹤自然保护区、大丰麋鹿自然保护区以及南部辐射沙洲区域等, 这些

区域往往是生态价值较高的热点区域。

参考文献:

- [1] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14: 975 - 1001.
- [2] 汤莉莉, 牛生杰, 徐建强, 等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(3): 424 - 430.
- [3] 刘庆, 王静, 汪庆华, 等. 基于 GIS 的县域土壤重金属生态风险评价 [J]. *测绘科学*, 2008, 33(3): 90 - 93.
- [4] 于瑞莲, 胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险 [J]. *华侨大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(3): 419 - 423.
- [5] 乔磊, 袁旭音, 李阿梅. 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*, 2005, 24(s): 178 - 182.
- [6] 李梁, 胡小贞, 刘娉婷, 等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(s): 46 - 51.
- [7] MA X J, LU Z H, CHENG J L. Ecological risk assessment of open coal mine area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 147: 471 - 481.
- [8] 王芬, 彭国照, 蒋锦刚, 等. 基于双层神经网络与 GIS 可视化的土壤重金属污染评价 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 163 - 168.
- [9] OWEN R B, SANDHU N. Heavy metal accumulation and anthropogenic impacts on Tolo Harbour, Hong Kong [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 174 - 180.
- [10] 康勤书, 周菊珍, 吴莹, 等. 长江口滩涂湿地重金属的分布格局和研究现状 [J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(3): 44 - 47.
- [11] 王晓辉, 邹欣庆, 于文金. 江苏王港海岸带沉积物重金属污染研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 784 - 789.
- [12] 于文金, 邹欣庆. 王港潮滩重金属 Pb, Zn 和 Cu 积累规律及污染评价 [J]. *地理研究*, 2007, 26(4): 809 - 820.
- [13] 李取生, 楚蓓, 石雷, 等. 珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1422 - 1426.
- [14] 刘绿叶, 孙国铭, 刘培廷, 等. 应用主成分法和聚类分析法分析吕四渔场近岸海水水质 [J]. *海洋渔业*, 2006, 28(3): 217 - 221.
- [15] LI J L, HE M, HAN W, et al. Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164: 976 - 981.
- [16] DENG B, ZHANG J, ZHANG GR, et al. Enhanced anthropogenic heavy metal dispersal from tidal disturbance in the Jiaozhou Bay, North China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 161: 349 - 358.

- [17] 左平. 江苏盐城海滨湿地生态系统景观格局与景观要素变异研究[D]. 南京:南京大学,2005.
- [18] 朱洪光. 盐城自然保护区能值模型的研究[D]. 南京:南京大学,2003.
- [19] 王计平. 盐城市海岸带环境评价及预警研究[D]. 南京:南京大学,2005.
- [20] 陈振楼,许世远,柳林,等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报,2000,55(6): 641-651.
- [21] 毕春娟,陈振楼,许世远. 上海白龙港排污口附近潮滩沉积物中重金属总量及其化学形态分析[J]. 海洋环境科学,2002,21(4):1-5.
- [22] 江苏省海岸带和海涂资源综合考察队. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京:海洋出版社,1986: 141-163.
- [23] 江苏省海洋与渔业局. 江苏省大比例尺海洋功能区划报告[M]. 北京:海洋出版社,2002:1-5.
- [24] FANG S B, XU C, JIA X B, et al. Using heavy metals to detect the human disturbances spatial scale on Chinese Yellow Sea coasts with an integrated analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184: 375-385.
- [25] EMMERSON R, O' REILLY-WIESE S, MACLEOD C, et al. A multivariate assessment of metal distribution in intertidal sediments of the Blackwater Estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34: 960-968.
- [26] VISUTHISMAJAM P, VITAYAVIRASUK B, LEERAPHANTE N, et al. Ecological risks assessment of abandoned shrimp ponds in southern Thailand [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 104: 409-418.
- [27] CAEIRO S, COSTA M H, RAMOS T B, et al. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: an index analysis approach [J]. Ecological Indicators, 2005, 5:151-169.
- [28] FIRAT O, GOK G, COGUN H, et al. Concentrations of Cr, Cd, Cu, Zn and Fe in crab *Charybdis longicollis* and shrimp *Penaeus semisulcatus* from the Iskenderum Bay, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 147: 117-123.
- [29] NEMR A, KHALED A, SIKAILY, A. Distribution and statistical analysis of leachable and total heavy metals in the sediments of the Suez Gulf [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 118: 89-112.

Analysis of spatial heterogeneity of the ecological risks associated with heavy metals along Yancheng Coast

FANG Shu-bo^{1,2}, YE Shu-feng¹, JIA Xiao-bo³, TIAN Zhuang¹, NIE Er², ZHENG Zheng²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Environmental Science and Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental-Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Using the Hakanson Risk Index, the spatial patterns of potential heavy metal (HM) ecological risks were studied. 106 soil and sediment samples were collected from September to October, 2007 along the Yellow Sea Coast, and analyzed for the concentrations of heavy metals including metals of Cr, Cu, Ni, Zn, and Cd. By software of GS+, the RI indices were interpolated. Data analysis revealed a dichotomy of HM levels and the associated potential for ecological risk, with northern areas having higher HM concentrations and greater risk indices while southern areas having lower levels of HM and RIs. RIs were also higher in inland areas than near the coastal areas. Our data revealed that the average HM concentrations in agricultural areas were higher than the average value of all samples. In contrast, the average HM concentrations from aquaculture areas were lower than the overall average. These data suggest the need for two overall target areas for ongoing risk investigations, one centered on controlling HM sources and offsite transport at highly disturbed locations, such as Sheyang Harbor, Sheyang Power Plant, Dafeng Harbor, which are located in the north, and a second focused on the less disturbed southern areas, particularly nature reserves where maintenance of biological diversity and eco-integrity is paramount, including the Sheyang Red-Crown Crane Natural Reserved Areas, the Dafeng Moose Natural Reserved Lands, and the southern radiation sand areas.

Key words: Hakanson index; heavy metals; spatial patterns; potential ecological risks; management strategy