

盐城海岸带土壤重金属潜在生态风险 控制优先格局

方淑波^{1,2}, 贾晓波³, 安树青⁴, 郑 正¹

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

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;

4. 南京大学生命科学院湿地生态研究所, 南京 210093)

摘要: 采用GS+软件, 分析了盐城海岸带106个土壤采样点的表层土壤样品中Cr、Cu、Ni、Zn、Cd共5种重金属元素的地统计特征, 计算了重金属元素的Hakanson潜在生态风险指数并采用ArcGIS软件对其进行空间插值, 结合NDVI及距离海岸带主要干扰源的欧氏距离分析, 以及土地利用分析, 研究了盐城海岸带区域的生态热点地区, 分析了海岸带具有不同生态风险水平的生态热点区域, 并以此对盐城海岸带的重金属生态风险控制提出了空间策略。结果表明: Cr、Cu、Cd的空间相关性强, Ni的空间相关性为中, Zn不具有空间相关性; 半方差函数模型模拟分析表明, 指数模型可以很好的模拟Cr、Ni的空间分布, 而Cu、Cd的较优模拟模型是球状模型; 插值的结果表明, Hakanson指数的空间分布异质性较强, 南部靠近大丰麋鹿自然保护区和梁垛河闸、中部大丰港和四卯酉闸之间, 以及北部射阳港以北几个区域的HRI值较低, 而射阳港周边、射阳盐场周边的HRI值较高。通过计算, 给出了一个优先的具有较高生态价值并具有中度和低度重金属生态风险的生态保护格局。

关键词: 重金属; 半方差函数模型; Hakanson指数; 生态热点地区; 优先管理区域

重金属污染日益成为海岸带及河口区域一个潜在的生态风险^[1]。目前, 我国海岸带的重金属污染呈现出来源广、局部恶化、区域潜在生态风险加剧的态势^[2-6]。重金属污染的潜在生态风险评价、地球化学循环、人为干扰评价以及其生物累积毒理学研究成为我国海岸带重金属研究的重点^[3, 7-10]。

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^[11], 农田种植及水产养殖^[2-3, 5], 海岸带围垦^[6], 以及工业^[4, 12]等。引入的重金属元素如香港海滩的Cu、Pb和Zn^[11], 上海海滩的Cu、Ni、Pb和Cd^[13], 江苏海滩的Cu、Zn、Pb和Hg^[2, 4], 胶州湾的Cu、Pb、Cd和Zn^[14], 珠江口滩涂的Cd、Zn和Ni^[6]等。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^[15]; Visuthismajarn等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^[16]; 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^[17]; Firat等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^[18]; Nemr等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Zn富集现象^[19]。

收稿日期: 2011-08-11; 修订日期: 2011-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101172) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41101172]

作者简介: 方淑波 (1976-), 河南孟州人, 博士后, 主要从事海陆交错带研究。E-mail: bsfang@fudan.edu.cn

通讯作者: 安树青, 男, 河北张北人, 教授, 博士生导师, 从事湿地生态学及水域生态修复研究。

Email: anshq@nju.edu.cn

Hakanson 生态风险指数 (HRI) 是一种常用的重金属潜在生态风险评价指数^[20], 目前被广泛运用于多个区域的重金属潜在生态风险评价, 例如: 外秦淮河底泥疏浚后的重金属生态风险评价^[21], 县域重金属生态风险评价^[22], 泉州湾重金属生态风险评价^[23], 海岸带重金属生态风险评价^[4], 滇池外海底泥的重金属生态风险评价^[24], 煤矿^[25], 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^[26]。HRI 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。

研究重金属的地球化学循环过程对重金属污染的有效控制具有重要意义^[8-9], 而有效的重金属元素空间分布形态的研究有助于重金属元素地球化学循环过程的解析^[7]。本研究以盐城海岸带为对象, 采用地统计分析的方法研究重金属元素分布的空间异质性, 并结合遥感以及土地利用的分析, 筛选海岸带区域的生态热点地区, 在分析生态热点地区所面临的重金属潜在生态风险的基础上, 提出一个生态风险控制的空间格局, 以期为重金属污染的生态风险控制和人类活动调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

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, 是生物多样性保护的热点区域, 总面积 $45.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中核心区 $1.74 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 因其生物多样性保护的重要性和湿地资源的多样性, 被誉为“东方湿地之都”。

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 (图 1)。气候类型以季风气候为主, 处于暖湿带向北亚热带过渡的过渡地带, 是一个受海洋性、大陆性气候双重影响的狭长地带。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)、米草带。

1.2 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, 采用系统采样法^[7-9], 确定多个断面, 断面设置方法为: 沿着老海堤, 每隔 3 km 设置断面, 每个断面自陆向海, 每隔 1 km 布置样方点, 每个土壤样点 5 个重复, 每个重复之间 50 m 左右, 以 W 形状采样。采集了 106 个土壤样方 (图 1)。

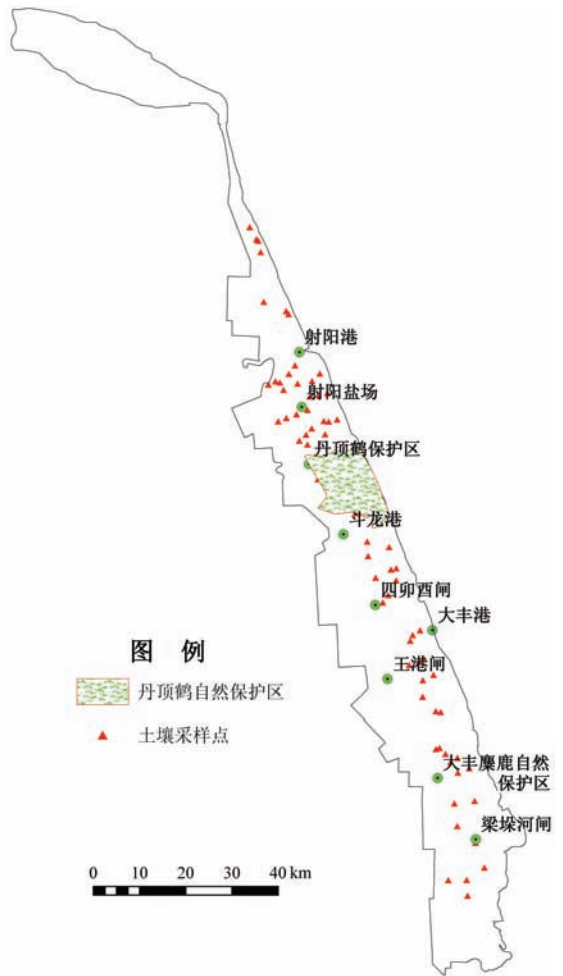


图 1 盐城海岸带土壤采样点位置图

Fig. 1 Soil samplings site on Yancheng coast

对比其他的研究报道^[13-18], 表层 10 cm 的范围土壤重金属的富集浓度最高, 能反映较近时间段内的土壤重金属污染状况, 故本研究采取表层 10 cm 的土壤样品。

1.3 样品处理与测试

将采集的土壤样品风干后, 混合, 研磨, 过 0.15 mm 筛。样品消煮过程为: 称取 0.125 g 样品, 加入 2 ml 盐酸及 1 ml 硝酸分别 60°C 加热半小时, 然后加氢氟酸 6 ml 以及 0.5 ml 高氯酸以 120°C 加热 3 小时, 余热蒸干后用 7% 硝酸定溶至 25 ml。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、Ni、Zn、Cd 共 5 种重金属元素, 测量的精密度 RSD% < 2.0, 回收率 95%~104%。由于 Hg 和 As 的含量达不到检出限的精度要求, 含量较低, 故在本文中不对 Hg 和 As 进行分析。

1.4 数据分析方法

1.4.1 半变异函数分析 采用 GS+ 软件, 分析 5 种重金属元素的平均值、标准差、变异系数、分布的峰度及偏度值等统计信息; 然后, 分析最优的半变异函数理论模型, 判断重金属元素分布的空间相关性大小。

1.4.2 HRI 的计算及空间插值 HRI 指数的计算方法为:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times C_f^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}$$

式中: RI 是 Hakanson 指数 (HRI), E_r^i 是某种重金属的潜在生态风险值, T_r^i 是某种重金属的毒性相应参数, C_f^i 是某种重金属的污染参数, C^i 是某种重金属的实测量, C_n^i 是重金属的背景值。 m 表示评价的重金属元素的数量, i 表示某种重金属元素。

参考 Hakanson 的研究, Cu、Zn、Ni、Cd 和 Cr 的 T_r^i 值确定为 5、1、5、30、2^[20-25], 其背景值 C_n^i 采用王计平等确定的背景值^[27], 分别为 30、80、22、0.5 和 60 mg/l。

RI 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^[20]。

然后, 用 ArcGIS9.2 软件在研究区域范围内对 HRI 进行插值, 得到整个区域 HRI 分布的栅格图。

1.4.3 生态热点地区的分析 生态热点地区 (Ecological Hotspots) 是生物多样性较为丰富的地区, 对生物多样性的保护具有关键意义^[28-30]。本研究首先采用 7-8 月间的 Landsat TM 遥感影像分析研究区的 NDVI, 然后, 以主要的港口、电厂、工业区为人为活动压力源, 将 NDVI 的值分为 20 个等级, 等级越高, 受人为压力的影响越小。盐城海岸带地区有较多的互花米草的分布, 互花米草是 20 世纪 60-70 年代从国外引入的一种潮滩耐盐植物, 初期起到了很好的防风固堤作用, 但是对本土生物多样性的胁迫作用也较强,

本研究把米草分布区用掩膜的方法去除。同时, 为了降低生长季节农田较高 NDVI 但实际对生物多样性保护价值不高的假象, 对各个等级的 NDVI 用研究区域的土地利用图进行“降噪”处理。具体就是, 把研究区域的各种土地利用类型按照其人为活动强度的大小, 分别赋值, 人为活动强度越大, 赋值越高。然后, 用各个等级的 NDVI 值除以土地利用人类活动强度值, 其结果作为修正的反映生物多样性保护价值大小的值。然后, 对修正的 NDVI 值进行空间分析的重分类 (reclassification), 共分为 4 个等级。等级越高, 生物多样性保护的价值越大。

1.4.4 应对重金属潜在生态风险的优先生态热点地区确定 以第二和第三步分析确定的 HRI 值和生态热点地区, 采用 ArcGIS9.2 软件进行逻辑运算, 筛选出有较高生态价值, 同时具有中到低度重金属生态风险的空间区域, 作为应对重金属潜在生态风险的优先区域。

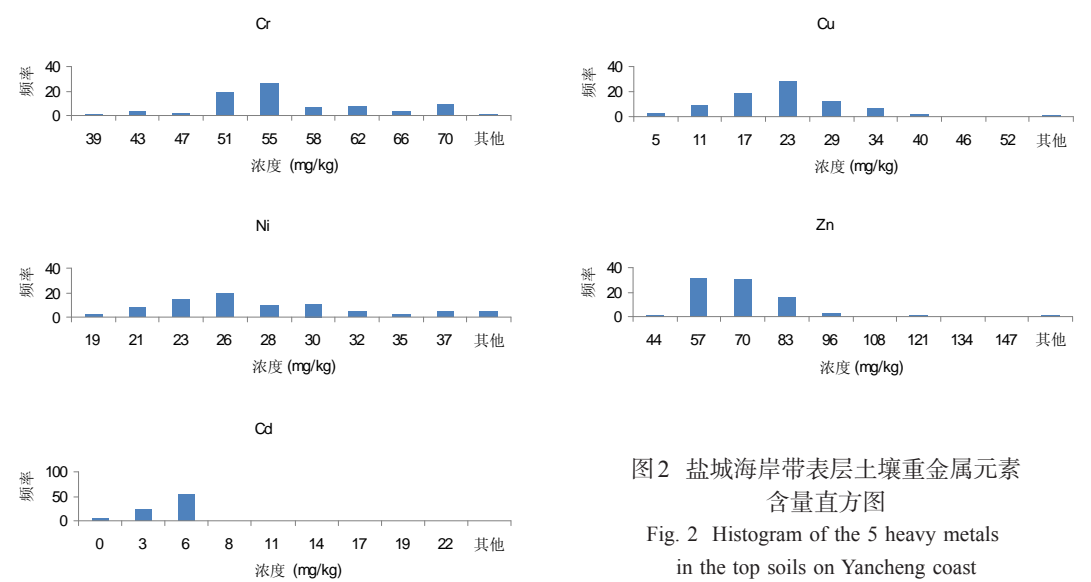


图2 盐城海岸带表层土壤重金属元素含量直方图

Fig. 2 Histogram of the 5 heavy metals in the top soils on Yancheng coast

2 结果

2.1 重金属元素的统计特征

5种元素除了Cd, Zn, 其余的都呈偏正态分布(表1, 图2)。变异系数较大, 元素分布的空间异质性较强(表1)。Cd, Zn经过对数变换, 也呈正态分布(图2)。

对比元素的背景值, 5种元素都受到外源输入的影响, 其中Cd超标较为严重。海洋及河流带来的重金属成分的不同、人文活动的空间分异等都会影响到沉积物重金属含量的空间变异, 因此元素的分布与外源输入的空间分异性有较大关系^[7]。

2.2 重金属元素的半变异函数理论模型

5种元素的最优半方差函数理论模型如表2所示(表中所列模型均是软件自动选择的最优拟合模型)。Cr, Ni, 用指数模型模拟的效果最好, Cr不需对数变换即可有较好的模拟效果。Cd, Cu的最优模拟模型是球状模型。Zn虽然也呈正态分布, 但是无法用半变异函数进行模拟(R²值接近于0)。

结构系数(C)与基台值(C₀+C)的比值≥75%时, 其空间相关性为强, <25%时, 空间相关性为弱, 25%~75%时, 其空间相关性为中^[21-23]。根据半变异函数的模拟结果, Cr、

表1 盐城海岸带5种重金属元素的统计信息
Tab. 1 The statistical information of the 5 heavy metals on Yancheng coast

金属元素	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd
平均值 (mg/kg)	54.52	19.14	26.49	62.95	2.87
背景值(mg/kg)	46.71	20.22	21.68	60.69	0.2*
标准差	8.02	8.77	4.93	16.55	3.12
变异系数 (%)	14.71	45.82	18.61	26.29	108.71
峰度	-0.39	3.4	-0.06	13.95	28.8
偏度	0.64	1.22	0.87	3.06	4.19

*此处 Cd 的背景值采取 GB 15618-1995 的值

表2 盐城海岸带土壤各向同性重金属半方差函数理论模型及其参数

Tab. 2 Theoretical models and corresponding parameters for isotropic semivariogram of heavy metals on Yancheng coast

元素	理论模型	C ₀	C ₀ +C	C/C ₀ +C (%)	A ₀	R ²	RSS	变换	空间相关性
Cr	指数	43.10	206.60	79.1	2.76	0.629	1502.00	——	强
Cu	球状	0.02	0.99	98.3	2.72	0.715	0.11	对数	强
Ni	指数	0.02	0.09	71.9	2.97	0.566	2.57E-04	对数	中
Cd	球状	0.05	0.61	92.6	0.34	0.667	0.09	对数	强

注: C₀块金值, C₀+C 为基台值, A₀为变程。

Cu、Cd的空间相关性为强，Ni为中，Zn由于其决定系数接近于0，其空间相关性的判别不具有意义。

Cr、Cu、Ni的变程 (A_0) 比较相近，大于2.5，Cd的变程小于0.5。变程的差异反映了各重金属元素空间相关性变化范围的大小，这反映重金属在海岸带的迁移、转化机制的差异，Cr和Cu几种元素则具有较为相似的空间分布规律。

同时，对5种元素的各向异性半变异函数也进行了分析。由于研究区域是狭长的海岸带区域，元素在东西方向 (0°) 和沿海岸带的方向 (135°) 表现为各向异性，在其他方向无差异，因此只需进行各向同性的分析。

2.3 HRI空间插值

HRI的空间分布为：南部靠近大丰麋鹿自然保护区和梁垛河闸、中部大丰港和四卯西闸之间，以及北部射阳港以北几个区域的HRI值较低，而射阳港周边、射阳盐场周边的HRI值较高 (图3)。

值得注意的是，射阳丹顶鹤自然保护区周边的HRI值较高，这对自然保护区生态健康的维持有何警示意义，值得研究。

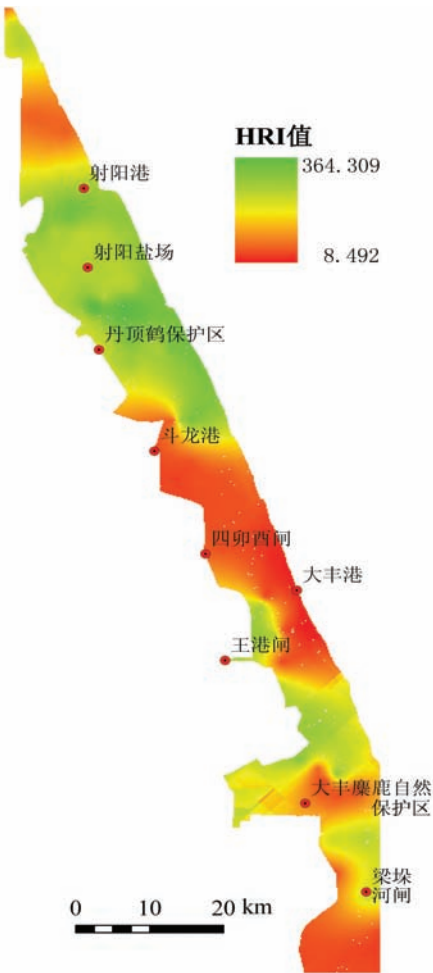


图3 盐城海岸带 HRI 值的空间格局
Fig. 3 The spatial patterns of the HRI on Yancheng coast



图4 盐城海岸带生态热点地区的优先保护格局
Fig. 4 The priority patterns for the conservation of Ecological Hotspots (EH) on Yancheng coast

2.4 生态热点地区的优先保护格局

绿色标志的区域具有较高的生态价值,同时有着低到中度的重金属生态风险(图4)。对于有较高生态价值,同时有较高生态风险的区域,往往是海岸带区域开发的历史较为悠久,有较多配套的大型产业,如火力发电、造纸、晒盐等行业,其管理面临着产业转移、结构调整等难题,代价较大。而中低度重金属生态风险、同时具有较高生态价值的区域,则管理的难度要小得多,比较容易实现,因此在本研究中被作为优先的管理区域(图4)。

该优先区域包括了射阳丹顶鹤自然保护区、大丰麋鹿自然保护区这两大国家级自然保护区,同时,保护区周边的区域,以及南部梁垛河闸以南的区域也被作为优先区域。这使得生态保护的区域形成一个网络,利于实现生态系统管理和以栖息地为导向的生态保护目标^[31]。

3 讨论

如何精确表达重金属元素在河口海岸区域的空间分布及分析其地球化学循环过程对维护海岸带生态热点地区的生态安全以及相关行业的生产安全具有重要意义^[7-9]。我们报到了盐城海岸带表层土壤重金属分布的空间特征^[32],指出重金属元素在盐城海岸带表现为明显的海陆梯度分异和南北梯度分异,自海向陆重金属元素表现为逐渐减少的趋势,自南向北,表现为在北部富集的趋势。这种分布格局与陈振楼等^[7],毕春娟等^[9]在上海潮滩的研究相似。

影响重金属元素空间分布的因素有陆源污染排放、水动力作用、成岩母质以及潮汐作用等^[27]。近年来,海岸带区域的人为活动成为重金属元素引入的一个主要原因。如何廓清哪些重金属元素是由何种人类活动引入,对重金属的控制具有关键作用。目前由于成本以及方法的限制,主要的方法依然是通过主成分分析,与元素背景值的对比,生产过程的生产资料元素定性分析,以及文献的综合来确定哪些人为活动引入了哪些重金属元素^[32-34]。例如,我们通过主成分分析以及与元素背景值的对比,认为盐城海岸带,Cr、Co、Fe、Ni、V5种元素总体上接近背景值,但是在研究区域内的空间分布不均匀,在局部区域,表现为外源输入的明显增加。

盐城海岸带的重金属HRI值与重金属的空间分布相似,自陆向海逐渐降低。HRI值自南向北逐渐增加的特征,与整个研究区域南高北低的地形条件导致的水动力作用有较强的关系。此外,研究区域的海岸带淤长情况有较大的差异,射阳河以南的区域整体上属于淤长性的海岸,射阳河以北则属于侵蚀性的海岸。就人为开发的历史来看,北部的开发历史较为悠久,分布着射阳港、射阳电场、射阳盐场、双灯纸业公司等大型的企业。而南部的开发历史相对短暂。人为条件的南北差异也是导致重金属南北分异的一个重要原因^[35]。

5种重金属元素的空间相关性有较大的差异,变程的值差别较大。这需要有更精确的技术手段去理解重金属在海岸带区域的归趋过程,从而理解其迁移、络合、转化的过程机制。此外,为了有效控制重金属元素的引入,量化重金属输入通量与相应的人类活动之间的定量关系有助于重金属生态风险的控制。我们曾以土地利用数据为基础,以研究区域典型的人类活动即水产养殖,农田种植以及晒盐为核心,构建了一个人类压力指数,然后,以不同尺度的样圆代表不同尺度的压力,计算以土壤采样点为圆心的样圆范围内的人类压力指数值。最后,计算人类压力指数值与土壤样品中的重金属含量之间的拟合曲线,试图发现人类活动影响的空间尺度^[35]。我们的工作初步揭示了1000 m这个尺度是海岸带人类活动控制的关键尺度。但是,定量拟合的精度较低。这需要精确理解重金属的归趋过程。

本研究给出了一个由多步计算构成的探测生态热点区域的方法。本研究推荐的优先保护区域包括了目前该区域的两个国家级自然保护区的核心区,同时也有试验区及缓冲区的

优先保护区域。这为自然保护区的优先保护范围提供了一个新的思考模式。目前在該区域,实际上只有两个国家级自然保护区的核心区得到了有效保护,而核心区外围的试验区和缓冲区实际上都被大规模的开发了,这使得不易保护空间连续的生态过程,而生态保护的關鍵是维护生态过程的完整和统一^[28-30],建立一个空间链接的连续的网络目前被多数生态保护学家所重视,认为其可以更有效的维护生态过程^[31]。根据我们推荐的优先保护区域,目前該区域形成了以两个国家级自然保护区为核心的南北两个保护体系,这与目前該区域开发的现实状况吻合。

需要说明的是,结合重金属的不同价态以及pH值,加上土壤有机质含量等的空间分析,对重金属的生态风险进行分析有更多的合理性和现实意义^[2-3, 7-9],这是該研究需要进一步加强的工作。

4 结论

(1) 5种元素的空间自相关性有较大差别,Cr、Cu、Cd的空间自相关性为强,Ni为中,Zn由于其决定系数接近于0,其空间自相关性的判别不具有意义。Cr、Cu、Ni的变程(A_0)大于2.5,Cd的变程小于0.5。变程的差异反映了各重金属元素空间相关性变化范围的大小,这反映重金属在海岸带的迁移、转化机制的差异,Cr、Cu、Ni几种元素则具有较为相似的空间分布规律。重金属元素这些地统计分布特征的差别反映了重金属多样化的输入、迁移、转化机制。

(2) 潜在生态风险的分布与重金属元素的空间分布较为类似,自陆向海降低,自南向北升高;HRI值自南向北逐渐增加的特征,与整个研究区域南高北低的地形条件导致的水动力作用有较强的关系。就人为开发的历史来看,北部的开发历史较为悠久,而南部的开发历史相对短暂。人为条件的南北差异也是导致重金属南北分异的一个重要原因。

(3) 本文提出的优先格局探测方法包括NDVI分析,距离海岸带主要干扰源的欧氏距离分析,以及土地利用分析等步骤组成。通过分析,盐城海岸带应对重金属潜在生态风险的优先区域包括射阳丹顶鹤自然保护区、大丰麋鹿自然保护区这两大国家级自然保护区,同时,保护区周边的区域,以及南部梁垛河闸以南的区域也被作为优先区域。这使得生态保护的区域形成一个网络,利于实现生态系统管理和以栖息地为导向的生态保护目标。

参考文献 (References)

- [1] Ramesh R, Purvaja R, Lakshmi A et al. South Asia Basins: LOICZ Global Change Assessment and Synthesis of River Catchment: Coastal Sea Interaction and Human Dimensions. LOICZ Research & Studies No.32. GKSS Research Center, Geesthacht, 2009, 121.
- [2] Wang Xiaohui, Zou Xinqing, Yu Wenjin. Heavy metal contamination in coastal sediments of Wanggang, Jiangsu Province. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 784-789. [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. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 784-789.]
- [3] Yu Wenjin, Zou Xinqing. The accumulation law and pollution estimation of heavy metals of Pb, Cu and Zn from Wanggang tidal flat. Geographical Research, 2007, 26(4): 809-820. [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. 地理研究, 2007, 26(4): 809-820.]
- [4] Qiao Lei, Yuan Xuyin, Li Amei. Heavy metals in littoral zone of Jiangsu Province and an ecological risk evaluation of heavy metals to this zone. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(Suppl.): 178-182. [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. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 178-182.]
- [5] Kang Qinsu, Zhou Juzhen, Wu Ying et al. Distribution and research situation of heavy metals in tidal wetlands of Changjiang Estuary. Marine Environmental Science, 2003, 22(3): 44-47. [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. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 44-47.]
- [6] Li Qusheng, Chu Bei, Shi Lei et al. Heavy metal distribution in tidal wetland soils and its effect on reclamation in the Pearl River Estuary. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(4): 1422-1426. [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. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1422-1426.]

- [7] Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, Liu Lin et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone. *Acta Geographica Sinica*, 55(6): 641-651. [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. *地理学报*, 2000, 55(6): 641-651.]
- [8] Zhao Jian, Bi Chunjuan, Chen Zhenlou. Spatial variation of active heavy metals in intertidal sediments of the Yangtze Estuary. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(11): 1020-1025. [赵健, 毕春娟, 陈振楼. 长江口潮滩沉积物中活性重金属的空间分异及其控制机制. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(11): 1020-1025.]
- [9] Bi Chunjuan, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan. Chemical species of heavy metals in sediments near Bailonggang sewage-discharging port, Shanghai. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(4): 1-5. [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. *海洋环境科学*, 2002, 21(4): 1-5.]
- [10] Zhao Weihong, Chen Xiangao, Fei Zhenghao et al. Preliminary study on ability of accumulation of heavy metals in different mollusk and their different tissues and organs from Yancheng seashore bottomland. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2009, 27(1): 76-79. [赵卫红, 陈献稿, 费正皓 等. 盐城滩涂贝类及其不同组织器官对重金属富集能力的初步研究. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2009, 27(1): 76-79.]
- [11] Owen R B, Sandhu N. Heavy metal accumulation and anthropogenic impacts on Tolo Harbour, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 174-180.
- [12] Liu Lvyue, Sun Guoming, Liu Peiting et al. An analysis on the inshore water quality on the Lusi fishing grounds by principal component analysis (PCA) and cluster analysis. *Marine Fisheries*, 2006, 28(3): 217-221. [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. *海洋渔业*, 2006, 28(3): 217-221.]
- [13] 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. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164: 976-981.
- [14] Deng B, Zhang J, Zhang G R et al. Enhanced anthropogenic heavy metal dispersal from tidal disturbance in the Jiaozhou Bay, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 161: 349-358.
- [15] Emmerson R H C, O'reilly-Wiese S B, Macleod C L et al. A multivariate assessment of metal distribution in inter-tidal sediments of the Blackwater Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, 34: 960-968.
- [16] Visuthismajarn P, Vitayavirasuk B, Leeraphante N et al. Ecological risks assessment of abandoned shrimp ponds in southern Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 104: 409-418.
- [17] Caeiro S, Costa M H, Ramos T B et al. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecological Indicators*, 2005, 5: 151-169.
- [18] Firat O, Gok G, Cogun H Y et al. Concentrations of Cr, Cd, Cu, Zn and Fe in crab *Charybdis longicollis* and shrimp *Penaeus semisulcatus* from the Iskenderum Bay, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 147: 117-123.
- [19] Nemr A E, Khaled A, Sikaily A E. Distribution and statistical analysis of leachable and total heavy metals in the sediments of the Suez Gulf. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 118: 89-112.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [21] Tang Lili, Niu Shengjie, Xu Jianqiang et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal in sediment of Qinhuai River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(3): 424-430. [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. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(3): 424-430.]
- [22] Liu Qing, Wang Jing, Wang Qinghua et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal in soils based on GIS. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(3): 90-93. [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. *测绘科学*, 2008, 33(3): 90-93.]
- [23] Yu Ruilian, Hu Gongren. Speciation and ecological risk of heavy metals in sediments from Quanzhou Bay. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 2008, 29(3): 419-423. [于瑞莲, 胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险. *华侨大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(3): 419-423.]
- [24] Li Liang, Hu Xiaozhen, Liu Pingting et al. Heavy metals distribution characteristics and potential ecological risk evaluation in the sediment of outer area of Lake Dianchi. *China Environmental Science*, 2010, 30: 46-51. [李梁, 胡小贞, 刘婷婷 等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价. *中国环境科学*, 2010, 30: 46-51.]
- [25] Ma X J, Lu Z H, Cheng J L. Ecological risk assessment of open coal mine area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 147: 471-481.
- [26] Wang Fen, Peng Guozhao, Jiang Jingang et al. Pollution assessment of heavy metals based on double-layer BPNN and GIS visualization. *Transaction of the CSAE*, 2010, 26(4): 162-168. [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. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 162-168.]
- [27] Wang Jiping. Study on coastal environmental evaluation and early warning system, Yancheng, Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing University, 2005. [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.]
- [28] Myers N. Threatened biotas: 'Hotspots' in tropical forests. *Environmentalist*, 1988, 8: 187-208.

- [29] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403 (24): 853-858.
- [30] Myers N. Biodiversity hotspots revisited. *Bioscience*, 2003, 53(10): 916-917.
- [31] Bruinderink G G, van der Sluis T, Lammertsma D et al. Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe. *Conservation Biology*, 2003, 17: 549-557.
- [32] Fang Shubo, Jiao Xiaobo, An Shuqing et al. Analysis of the spatial distribution and the influence factors of the heavy metals in the top soil layer of the Yancheng coast. *Marine Science*, 2011, 35(5): 1000-3096(2011)05-0000-07. [方淑波, 贾晓波, 安树青 等. 盐城海岸带湿地表层土壤重金属的多元统计分析. *海洋科学*, 2011, 35(5): 1000-3096(2011) 05-0000-07.]
- [33] Chen Jinghui, Lu Xinwei, Zhai Meng. Sources and potential risk of heavy metals in roadside soils of Xi'an City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1810-1816. [陈景辉, 卢新卫, 翟萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1810-1816.]
- [34] Jiangsu Ocean and Fisheries Bureau. The big scale function zoning report of the sea in Jiangsu Province. Beijing: China Ocean Press, 2002: 1-5. [江苏省海洋与渔业局. 江苏省大比例尺海洋功能区划报告. 北京: 海洋出版社, 2002: 1-5.]
- [35] 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. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184: 375-385.

The Priority Pattern for Managing the Potential Ecological Risks Associated with Heavy Metals of the Top Soil on Yancheng Coast

FANG Shubo^{1,2}, JIA Xiaobo³, AN Shuqing³, ZHENG Zheng¹

(1. *Environmental Science and Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

2. *College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

3. *Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;*

4. *The Institute of Wetland Ecology, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)*

Abstract: The spatial geostatistical characteristics of the 5 heavy metals (Cr, Cu, Ni, Zn and Cd) of the top 106 soil samples on Yancheng coast, were studied with the aid of GS+ software. With ARCGIS 9.2, the Hakanson risks index (HRI), which was a synthetic reflection of the potential ecological risks of heavy metals, was interpolated. A computational approach, including NDVI, determining Euclidean Distance to the main anthropogenic impact sources, and land use reclassification, was proposed to detect the ecological hotspots, with clarification of different levels of potential ecological risks through integrating the Hakanson index computing. The conclusions can be drawn as follows. Metals (Cr, Cu and Cd) had strong spatial autocorrelations, while Ni had modest spatial autocorrelations, and the spatial autocorrelation of Zn could not be modeled. Through the semivariogram functions analysis, the exponential model could best model the spatial autocorrelations of Cr and Ni, while spherical model could best model Cu and Cd. There was a high heterogeneity of HRI, and areas including the Dafeng Natural Reserve areas, near the Liangduo River Gate, the areas between Dafeng Harbour and Simaoyou Gate, and areas north to the Sheyang Harbour, had a relatively low HRI, while areas including areas neighboring Sheyang Harbour and Sheyang Salt Field had a high HRI. The priority ecological hotspots with medium and low heavy metal ecological risks were finally proposed.

Key words: heavy metals; semivariogram model; Hakanson index; ecological hotspots; priority management areas