

长江三角洲农灌区沉积物中重金属的污染特征及生态评价

葛敏霞^{1,2}, 袁旭音^{1,2}, 叶宏萌^{1,2}, 李继洲^{1,2}, 李云峰², 肖俊清²

(1.教育部浅水湖泊综合治理与资源开发重点实验室, 南京 210098; 2.河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要:根据地质背景和人类活动方式,将整个长江三角洲地区划分为3个区域,探讨其区域特征和污染水平。利用多元统计方法,分析不同区域重金属分布及污染特征;应用主成分分析,剖析了引起污染差异的原因;运用综合生态风险评价方法,探讨了沉积物的生态风险。结果表明,重金属的分布和区域特征既有相似性又存在差异:元素的富集程度以浙江区较高,太湖平原较低;浙江区不同元素变化最大,而太湖流域元素的变化则较为均匀。主成分分析表明,不同区域重金属的主要来源有所不同:长江两岸的Hg、Cu、Pb、As污染严重,与城市污水的排放和农业化肥的利用关系密切;太湖流域的主成分因子出现Zn、Cr、Cu组合,体现出电镀、化工行业污染排放的特征;浙江区主成分因子复杂,反映污染物质的多来源。采用Hakanson潜在生态风险指数法对沉积物中重金属进行风险评价,其单因子生态危害程度为Cd>Hg>Pb>As>Cu>Zn>Cr,综合潜在生态风险指数表明,长江三角洲农灌区的污染总体轻微,浙江区北部污染达到中等。

关键词:重金属;常量元素;生态评价;农灌区;长江三角洲

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2398-08

Pollution Characteristics of Heavy Metals and Their Ecological Evaluations in Sediments from Agricultural Irrigation Area of the Yangtze River Delta Region, China

GE Min-xia^{1,2}, YUAN Xu-yin^{1,2}, YE Hong-meng^{1,2}, LI Ji-zhou^{1,2}, LI Yun-feng², XIAO Jun-qing²

(1.Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2.College of the Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On account of the deteriorating environment in agricultural ecologic system of the Yangtze River Delta Region with rapid economic development, we need a comprehensive evaluation of environmental quality for the system. The research area was divided into three regions based on the geological setting and anthropogenic activities, in order to characterize heavy metals and pollution level of different regions. Distribution and characteristics of heavy metals in irrigation regions were expatiated by utilization of the multiple statistical method. Through principal component analysis, we elucidated the cause of diversities for components and pollutants of sediments. The ecological risks of heavy metals were further evaluated by composite risk index. The results showed that similarities and differences in distribution and characteristics existed in distinctive regions. The enrichment coefficients of heavy metals in sediments showed a higher level in Zhejiang plain, and a lower level in Taihu drainage. The changes of coefficients were largest in Zhejiang plain, while those of Taihu drainage were relatively small. Principal component analysis showed that the various sources of heavy metals presented in the research district. Mercury, Cu, Pb, As comprised main elements in the area along two sides of Yangtze River, which was related to the use of agricultural fertilizers and the discharge of municipal sewage. The principal components of Zn, Cr, Cu in the Taihu drainage reflected the pollution of industrial inputs such as electroplating, chemical plants. The principal component scores in Zhejiang plain had a wide range of factor plots, indicating the complexity of metal sources. The ecological risks of these samples were evaluated with the Hakanson ecological risk index, and results were exhibited in map. It was concluded that the single factors of the ecological risks for irrigation regions metals declined with Cd>Hg>Pb>As>Cu>Zn>Cr. The poten-

收稿日期:2010-05-24

基金项目:中国地质调查局国土资源调查项目(GZTR20060201);河海大学自然科学基金项目(2008432511)

作者简介:葛敏霞(1984—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为水资源保护和水环境治理。E-mail:ge_min_xia_1984@126.com

通讯作者:袁旭音 E-mail:yxy_hjy@hhu.edu.cn

tial ecological risks of sediments from different irrigation regions manifested a slight level in most areas of the Yangtze River, but manifested a moderate level in the northern area of Zhejiang plain in view of the comprehensive risk index.

Keywords: heavy metals; major elements; ecological evaluation; agricultural irrigation areas; Yangtze River Delta Region

长江三角洲是我国经济最发达的地区之一,但是,随着经济的快速发展,该地区生态环境质量问题日益显现,而水环境的质量对社会的可持续发展起着重要的影响^[1-3]。

对水体沉积物中重金属污染的研究,国内外均开展了许多工作,研究的内容也比较深入,但这类工作基本上是以大型河道和大型湖泊为研究对象^[4-7],到目前为止,针对穿插于农田之间、直接对农田进行灌溉的沟渠、河流的底泥的重金属污染研究比较少。

农田周边的灌溉沟渠、河流一般水深较浅,水流缓慢,污染物质不易扩散。农作物中的重金属部分由农药、肥料直接带入,部分来源于灌溉用水,对土壤进行污水灌溉已经造成了严重的生态问题^[8],并对食品安全和人类健康造成了一定威胁。农田周围的灌溉沟渠、河流是最直接的作物供水水源,它的重金属水平与农产品的质量和农田生态安全有着密切的关系。

本文研究长江三角洲地区有代表性的灌溉河流、沟渠沉积物样品,根据地理位置和人类活动方式将研究区分类与对比,分析其重金属的组成特点及污染状况;结合地形与水系特点,探讨不同区域的重金属分布特点及影响因素,旨在为环境质量的综合评价及污染治理等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

2008 年 7—8 月的灌溉期,在长三角地区选择有代表性的基本农田灌溉区,采用 GPS 定位均匀布置 88 个采样点,包括了该地区 16 个地级市。

采样时尽量避开污染源,样点选择经过大片农田、直接用于农田灌溉的河流、沟渠水域。采集表层沉积物(10 cm),将其直接转装入聚乙烯塑料袋中,每份样品约 1 000 g。对装好的样品,当即做好记录,放好标签,严防混样,样品装箱并及时运至实验室。样品在 40 ℃恒温烘箱中烘干后,去除植物根系、底栖生物及石块等杂质后,常温常压避光条件下存放,装袋保存准备分析。由于长江三角洲不同地区存在差异,根据地理位置和人类活动方式的差别,我们将整个采样区划分为 A、B、C 3 个地区,其中 A 为沿江区,共有 28

个样品,B 为太湖区,共有 29 个样品,C 为浙江区,共有 31 个样品。沿江区属于长江冲积平原,地势相对低洼,易受潮汐运动的影响,该区域城市密集,船运交通发达,种植业也相对发达。太湖区河网密布,湖泊众多,水面率达 17%,乡镇工业发达,工业门类主要为电子、化工、纺织和机械。太湖区有发展农、林、牧、渔业的良好条件,区域内现有鱼塘面积 9.8 万 hm²,是水体污染的来源之一。浙江区多为丘陵地区,富碱岩岩浆比较发育,山地面积比例达到 70%,水系多发源于山区,流通性较差,同时,该区小作坊、小手工业发达,工业类型多样,农业发展更多地依赖于自然条件。

1.2 样品分析

样品分析由国土资源部合肥矿产资源监督检查中心实验室完成。沉积物常量元素分析项目有 Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、K₂O、CaO 和 Fe₂O₃,分析采用 X 荧光光谱仪,型号 ZSX100e(日本理学公司)。微量元素 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 的分析采用等离子质谱仪,型号 XSERIES ICP-MS(美国热电公司)。As、Hg 的分析采用原子荧光光谱仪,型号 AFS-230E。

为得到准确可靠的分析,测试中对每份样品平行测定,同批次样品设定空白样和标准物质(GBW07361)对照,标准物质分析结果与实际值相吻合,样品平行误差均小于 10%。微量元素检出限见表 1。

表 1 微量元素检出限(10⁻⁶)

Table 1 Detection limits of heavy metals(10⁻⁶)

元素	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
元素检出限	0.5	5	1	2	2	30	3

注:Hg、Cd 单位为 10⁻⁹。

1.3 数据分析方法

本研究中,采样点分布图和潜在生态危害程度分布图采用 CoreDRAW 13.0 软件制作,数据的统计和分析采用 SPSS 17.0 和 Excel 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 灌溉河流沉积物中常量元素的组成特征

常量元素即沉积物的主要物质组成,常量元素的含量可以反映沉积物的组成特点。在灌溉水系条件

下,常量元素在沉积物中的变化,一方面与农田系统中土壤或岩石的成分有关,另一方面与元素自身的迁移特性有关。不同区域沉积物中常量元素的分析结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,农灌区沉积物中 CaO、MgO、Na₂O 在沿江区最高,在河口地区尤为明显,该地区成土母质主要为长江冲积物,分布有大片的碳酸盐岩;Fe₂O₃、Al₂O₃ 在太湖区较高,且含量变化较小,因为该地区的成土母质主要是下蜀黄土,富含铁质和矿物粘土;而 SiO₂、K₂O 在浙江区最高,其他常量元素含量相对较低,该地区主要分布着酸性岩浆岩基底,高硅、富碱、贫钙镁是其化学成分特点。显而易见,不同区域常量元素含量有明显差别,显示出研究区域地质背景和物源的差异。

2.2 灌溉河流沉积物中重金属的空间分布

在自然因素中,成土母质和成土过程对重金属含量的影响很大;在各种人为因素中,则主要包括工业、农业和交通等来源引起的重金属污染。长三角的地区土地利用复杂,农田、城镇、村庄和工业用地交错分布,道路密集。因此,区内农田不仅受农业本身污染的影响,也受市政、工业、交通活动的污染影响。从表 3 可以看出,长三角不同区域沉积物中 7 种重金属含量的差异明显。

富集系数(*EF*)常用的参比元素为 Sc、Mn、Ti、Al、Fe、Ca。本文选择 Al 作为参比元素,主要考虑铝是沉积物中粘土矿物的主要组分,可以反映粒度的变化;生物利用度也低,性质较为稳定。富集系数的数学表达式为^[10-11]:

表 2 不同区域沉积物中常量元素的含量(10⁻²)
Table 2 Concentration of major elements of sediments from different regions(10⁻²)

区域	项目	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
沿江区	范围	0.86~1.96	0.68~2.30	9.30~15.30	59.47~76.52	1.52~2.79	0.67~6.56	2.88~6.22
	平均值	1.38	1.54	12.25	68.36	2.10	2.32	4.58
	<i>Cv</i>	0.23	0.32	0.12	0.07	0.16	0.65	0.18
太湖区	范围	0.75~1.66	0.57~2.05	9.70~15.51	63.35~77.05	1.26~3.20	0.73~5.63	3.18~5.89
	平均值	1.26	1.30	13.29	68.21	2.16	1.42	4.83
	<i>Cv</i>	0.16	0.27	0.11	0.04	0.19	0.67	0.14
浙江区	范围	0.32~1.66	0.28~1.71	8.98~15.65	64.85~80.08	1.61~3.50	0.27~1.99	1.30~5.59
	平均值	1.09	0.94	12.64	72.04	2.66	0.74	3.92
	<i>Cv</i>	0.35	0.46	0.13	0.06	0.17	0.57	0.29

表 3 长三角地区沉积物中重金属的空间分布特征(10⁻⁶)
Table 3 The special distributions of heavy metals in sediments of the Yangtze River Delta Region(10⁻⁶)

	项目	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
沿江区	范围	4.15~18.06	26.54~353.10	15.68~116.46	15.44~159.81	41.47~1 048.08	50.89~1 368.61	49.16~267.31
	均值	8.62	115.60	29.55	25.78	104.27	186.98	83.80
	<i>Cv</i>	0.38	0.80	0.76	1.10	2.26	1.64	0.50
	超标率	35.71%	46.43%	82.14%	71.43%	85.71%	32.14%	50.00%
太湖区	范围	3.69~12.51	84.15~473.99	16.67~118.40	16.34~126.30	50.71~587.52	59.64~495.45	55.07~164.56
	均值	8.37	199.11	31.91	30.63	99.61	156.27	88.25
	<i>Cv</i>	0.25	0.49	0.56	0.67	0.95	0.64	0.23
	超标率	31.03%	93.10%	96.55%	93.10%	96.55%	20.69%	79.31%
浙江区	范围	2.02~14.15	20.00~595.75	12.07~328.00	28.60~194.50	77.54~532.48	95.63~500.00	31.83~214.39
	均值	8.24	207.04	37.22	42.64	139.77	241.98	92.19
	<i>Cv</i>	0.36	0.61	1.67	0.71	0.61	0.59	0.46
	超标率	48.39%	96.77%	90.32%	100.00%	100.00%	48.39%	70.97%
背景值 ^①		9.40	110.00	18.90	19.50	59.20	270.00	79.30

注:Hg,Cd 单位为 10⁻⁹。

$$EF = \frac{C_n / B_n}{C_{ref} / B_{ref}}$$

式中: C_n 、 B_n 为某元素的测试和参照浓度; C_{ref} 、 B_{ref} 为参比元素的测试和参照浓度。

从地区分布来看,沿江地区沉积物中重金属的平均含量有高有低,但变化程度大,除 As 的含量与背景值相当之外,其他元素均超过了背景值,As、Zn、Cd、Cr 含量的最高点均出现在该地区(图 1)。沿江地区 Zn 的富集系数为 2.99,变异系数也达到了 2.26,其次为 Cu,它的富集系数为 2.06,当地农业的施肥活动及市政污水的排放导致了 Zn 和 Cu 的污染。沿江区的农田灌溉系统中出现较多 Cd 的异常点,可能与上游的高背景岩石和矿山开采的物质沿江而下有关。

太湖区沉积物中重金属的平均含量处于中等水平,且变化范围相对较小,As 和 Cd 的含量略小于背景值。整个太湖地区的农业、工业发展水平相当,水体的流通性相对好,故金属元素变异程度较小,分布较为相近,同时,这反映了土壤在长期历史中均匀化作用的特征。整个地区富集程度相对较高的元素是 Pb,可能与该地区发达的公路交通有关。

浙江区重金属的含量差异很大,Cu、Hg、Pb、Zn 的富集程度明显高于其他地区,As、Cd、Cr 的富集程度略低于沿江地区,但高于太湖区。Hg、Cu、Pb 的最高点均出现在该区域,且元素的变异系数相差较大,原因可能是浙江西部多石灰岩,东部富碱岩浆岩发育,地质背景和水系流通性差异大,生活习惯和生产方式也有明显区别。该地区 Cu、Hg、Pb、Zn 的富集系数均大于 2,分别为 2.77、2.34、2.56 和 2.74,远远大于沿江区和太湖区,Cu 的变异系数也达到了 1.67,主要是该地区的重金属污染是由多种原因造成的并且输入量较大。

2.3 常量元素与重金属元素的主成分分析

根据不同区域得到元素的空间主成分,可以更好地理解研究区域的污染情况^[12-15]。为此,对 14 种元素抽取了 4 个因子,这 4 个因子可以反映出全部数据的大部分信息,见表 4。

将主成分数据载入绘图,结果见图 2(a~c)。图 2 中 3 个地区的元素主成分分析既有相似之处,又存在明显差异,证实了重金属元素与沉积物物质组分是密切相关的。在因子得分图上,相同之处是除了太湖区的 Na_2O 与金属结合外,另外两个地区的 SiO_2 、 Na_2O 与其他元素明显分离, MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 与重金属的结合不紧密,但有不同的组合。

沿江地区主成分元素组合:(1)CaO、As、Cu、Pb、Hg、Cd;(2)MgO、K₂O;(3)Al₂O₃、Fe₂O₃;(4)Zn、Cr。该地区(特别是江北)是传统的农业种植区,其农药化肥的施用量远高于全国平均水平,而我国农药和化肥的利用率普遍较低,约有 70% 流失到土壤、水和空气中^[16],长期的农业生产活动,使 Hg、As 明显累积,进入农灌区的重金属迁移性差,容易沉积下来;此外该地区城镇密集,市政污水(包括道路沉积物)大多 Cu、Pb 的含量较高,与富含 Cd 的冲积物混合起来,进入由碳酸盐岩发育而来的河流沉积物中。

太湖区主成分元素组合为:(1)MgO、Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃;(2)Na₂O、Hg、Pb、Zn、Cd、Cu;(3)As、Cr;(4)CaO。研究表明,该地区的 Zn、Cd、Hg、Pb、Cu 污染为工业、交通和市政污水共同引起,原因较为复杂。除了电镀、化工企业排放 Zn、Cd、Cu 等元素,废水的任意排放也会导致 Cu 和 Zn 的超标;而 Hg、Pb 可以称为“工业及交通污染源”^[17],它们均为气迁移元素,其来源可能主要为太湖地区大气污染物质在地表的沉降,源于该地区较发达的交通和内河航运,因为 Pb 主要来源于原

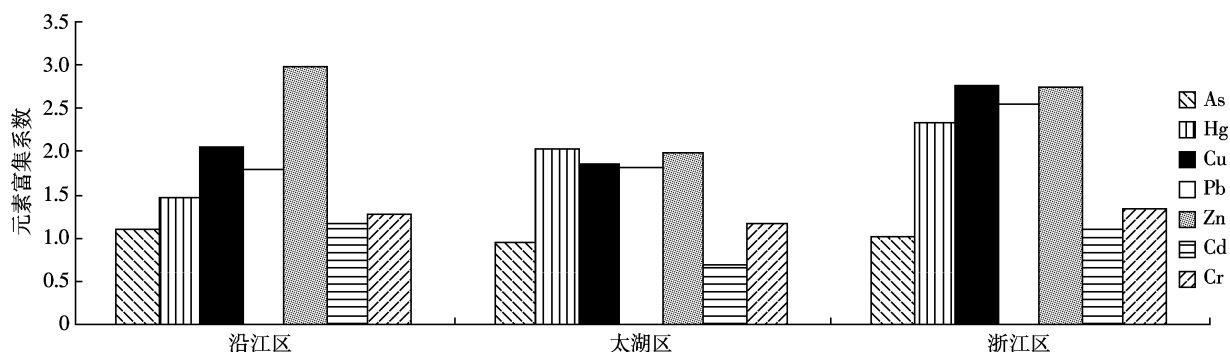


图 1 长江三角洲不同农灌区重金属元素的富集系数

Figure 1 Enrichments of heavy metals in sediments from different agricultural irrigation areas of the Yangtze River Delta Region

表 4 主成分分析的特征值和因子载荷量

Table 4 The eigenvalues and factorial loadings of the main components in sediments

地区		旋转前因子负荷量			旋转后因子负荷量		
		特征值	方差的/%	累积/%	特征值	方差的/%	累积/%
沿江区	1	4.48	32.02	32.02	3.75	26.78	26.78
	2	3.92	27.98	60.00	3.11	22.23	49.01
	3	1.46	10.43	70.42	2.81	20.10	69.11
	4	1.25	8.93	79.35	1.43	10.24	79.35
太湖区	1	3.52	25.14	25.14	3.27	23.33	23.33
	2	2.78	19.87	45.01	2.41	17.24	40.56
	3	2.03	14.46	59.48	2.26	16.15	56.71
	4	1.58	11.28	70.75	1.97	14.04	70.75
浙江区	1	4.57	32.66	32.66	4.15	29.62	29.62
	2	2.18	15.58	48.24	2.28	16.25	45.88
	3	2.03	14.46	62.70	2.17	15.51	61.38
	4	1.56	11.13	73.82	1.74	12.44	73.82

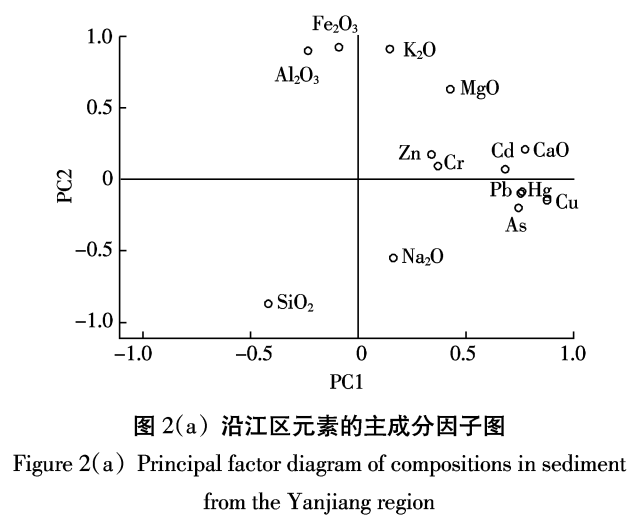


图 2(a) 沿江区元素的主成分因子图

Figure 2(a) Principal factor diagram of compositions in sediment from the Yanjiang region

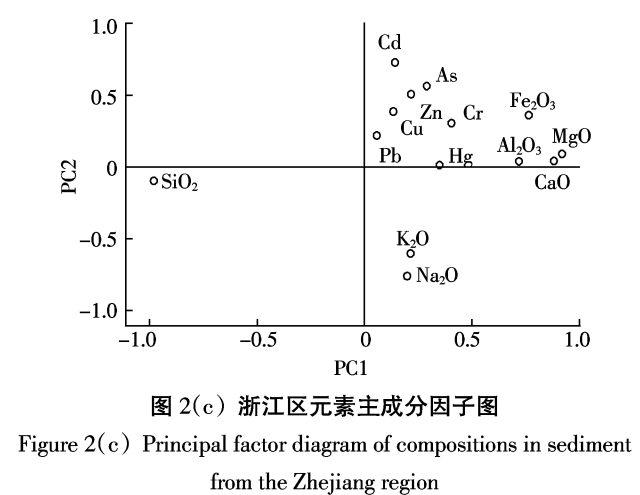


图 2(c) 浙江区元素主成分因子图

Figure 2(c) Principal factor diagram of compositions in sediment from the Zhejiang region

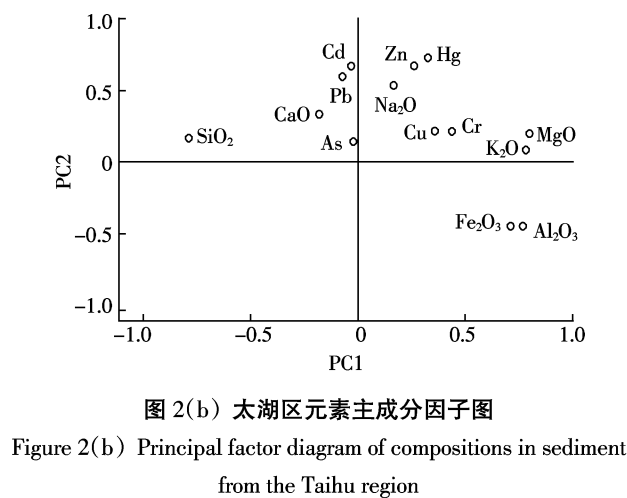


图 2(b) 太湖区元素主成分因子图

Figure 2(b) Principal factor diagram of compositions in sediment from the Taihu region

油和含铅汽油的燃烧^[18]。

浙江区主成分元素组合为:(1)MgO、CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃;(2)Cu、Zn;(3)Cd、Pb;(4)Cr。实地调研表明,当地村镇生活污水普遍直接排放入河道,可以认为 Cu、Zn 部分来自于生活污水的排放;同时,浙江区以村为单位的工业发达,门类各不相同,因此造成了工业来源的多元化。浙江区交通发达,工业多样,使用较多的燃料,煤、原油中均含有微量的 Cd,在燃烧过程中可以和 Pb 一起释放到大气,最终汇入沉积物。刘庆等在研究浙江省慈溪市农田土壤重金属污染时,亦发现 Cd 污染为工业废水排放所导致^[19],但浙江区微量元素均不与常量元素在同一个元素组合,说明该地区农灌区的沉积物受外源物质影响大。

3 重金属的潜在生态危害评价

3.1 评价方法

目前对沉积物有多种重金属污染评价方法,其中主要有地质累积指数法^[20]、污染负荷指数法^[21]、回归过量分析法^[22]、潜在生态风险指数法^[23]等。本研究采用 Hakanson 的潜在生态风险指数法对不同地点沉积物中的重金属进行评价,该方法的优势在于从重金属的生物毒性角度出发,反映了多种污染物的综合影响,并定量给出潜在生态危害的程度。

首先,采用单因子指数法对沉积物样品中重金属的污染要素进行系数计算,其次对多种金属的潜在生态风险指数进行计算。潜在生态风险指数值(R_i)的计算公式如下:

$$C_f^i = C_b^i / C_n^i; E_r^i = T_f^i \times C_f^i; R_i = \sum E_r^i$$

式中: C_f^i 为单一金属污染系数(以下同), T_f^i 为不同金属生物毒性响应因子, E_r^i 为单一风险因子, R_i 为综合潜在生态风险指数, C_b^i 为样品的实测浓度, C_n^i 为沉积物的背景参考值(见表 2)。

重金属的毒性系数(T_f^i)用于反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 的毒性系数分别为 40、5、1、5、30、2、10^[23]。重金属的单一风险因子 E_r^i , 综合潜在生态风险指数 R_i 与污染程度的关系见表 5。

3.2 重金属的潜在生态风险评价

长江三角洲农灌区沉积物中重金属的污染等级可分为以下几类:As、Zn、Cr 的单一风险因子在所有样点均小于 40,即属于轻微生态危害范围,其中 Zn、Cr 污染程度最轻;Cu 和 Hg 属于第二类,生态危害程度略高于上述 3 种元素;Cd 和 Pb 的单一风险因子明显大于其他金属,长江沿岸部分农灌区沉积物存在中等的 Cd 污染,太湖流域有明显的 Pb 污染。

不同样点的重金属综合潜在生态危害指数差异较大,沿江区的潜在生态风险指数平均值为 71,有 6

个样点属于中等生态危害;太湖区的潜在生态风险指数为 119,但整个地区分布较为均匀,变化范围小,多数为轻度生态危害;浙江区的潜在生态风险指数最高,为 152,其中有 18 个样点属于中等生态危害,其中包括北部和西部的大多数样点。

沉积物中不同采样点综合潜在生态风险指数值 R_i 见图 3。中等生态危害的样点主要分布在长江沿岸,以及杭州地区、钱塘江沿线与宁绍平原地区。沿江地区污染相对较轻,而且主要是由 Cd 污染引起的;太湖流域污染中等,且分布均匀,可能跟国家大力治理太湖流域以及太湖流域本身水系流通性较好有关;浙江一带乡镇企业处于高速发展,污染源多,农业使用化肥、农药量高,导致该地区重金属污染比较严重。

4 结论

(1)长江三角洲地区农田灌溉河流沉积物中不同重金属差异明显,总体上 Cu、Pb、Cd、Zn 变化较大,而 Cr、As 的变化稍小。沿江地区沉积物中重金属含量高低不一,Cd 存在天然异常点,Cu 和 Zn 的污染比较明显;太湖区的重金属含量水平中等,Cd 和 As 略小于背景值,Pb 的富集程度较高;浙江区的重金属元素无论是从含量还是变化范围都是最大的,Cu、Hg、Pb、Zn 污染严重,跟重金属来源的多样性和复杂性有关。

(2)主成分分析结果表明,沿江地区中的重金属元素显示主要来自市政污水与农业施肥;太湖区的重金属具有工业、交通源污染的特征;浙江区重金属元素的来源比较,与该地区分散的工业结构和地质背景差异有关。

(3)生态风险统计显示,沿江地区生态风险轻微,主要风险由 Cd 异常引起,浙江区重金属污染比较严重,主要在西部和北部地区,太湖流域农灌区重金属大多属于轻度风险,区域性的重金属水平不仅与来源有关,而且与水系的流通性有较密切关系。

表 5 重金属潜在生态风险因子 E_r^i 和潜在生态风险指数 R_i 与污染程度的关系

Table 5 Potential ecological risk factor(E_r^i) and potential ecological risk index(R_i) for pollution level

指数类型	所处范围	污染程度	指数类型	所处范围	污染程度
单一风险因子 E_r^i	$E_r^i < 40$	轻微生态危害	潜在生态风险指数 R_i	$R_i < 150$	轻微生态危害
	$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害		$150 \leq R_i < 300$	中等生态危害
	$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害		$300 \leq R_i < 600$	强生态危害
	$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害		$R_i \geq 600$	很强生态危害
	$E_r^i \geq 320$	极强生态危害			

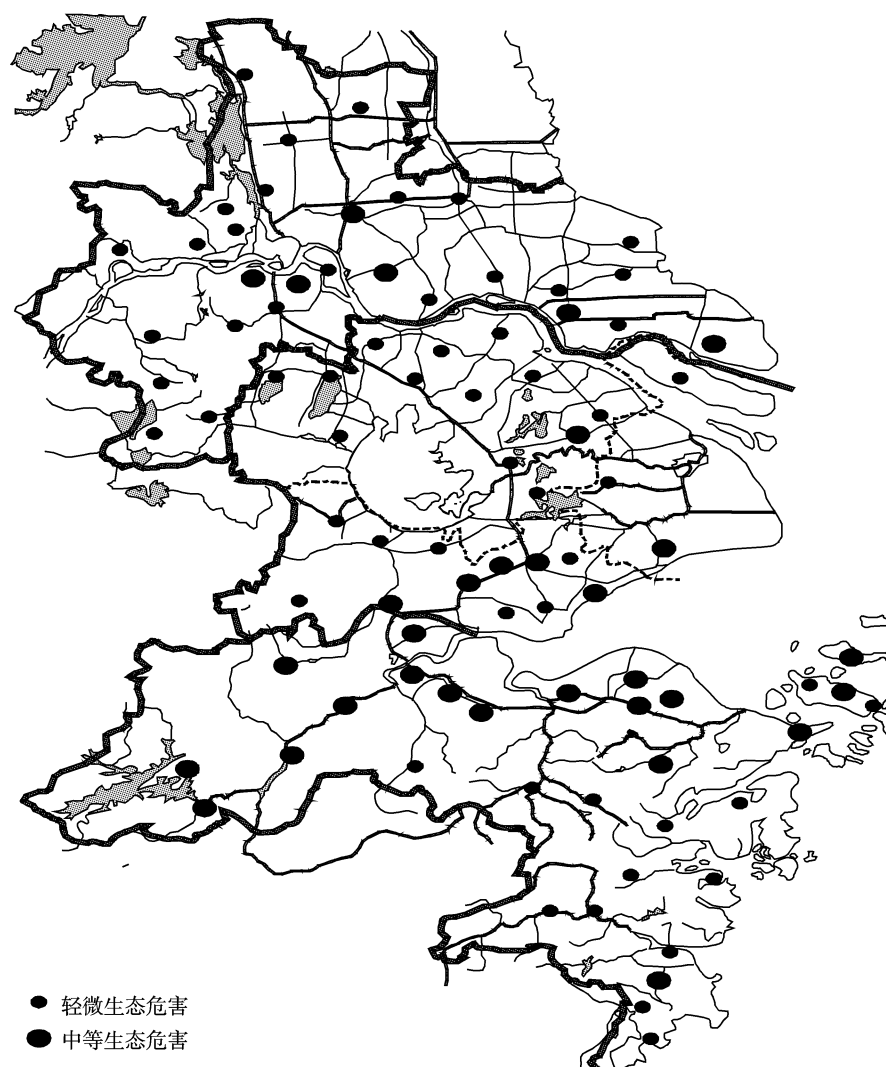


图 3 不同区域采样点的潜在生态危害程度

Figure 3 Map of potential ecological risk for sampling sites in different regions

参考文献:

- [1] 王 颖, 王腊春, 王 栋, 等. 长江三角洲水资源水环境承载力、发展变化规律与永续利用之对策研究[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 34-40.
WANG Ying, WANG La-chun, WANG Dong, et al. Bearing capacity and regularity of development of water resources and water environment of Yangtze River Delta and measures for sustainable development[J]. *Water Resources Protection*, 2003, 19(6): 34-40.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴—2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002: 52-53, 251-258.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook-2001 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002: 52-53, 251-258.
- [3] 任美镔. 长江三角洲可持续发展的若干问题[J]. 世界科技研究与发展, 1996, 6(3): 97-101.
REN Mei-e. Several problems about the sustainable river development in the Yangtze River Delta[J]. *World Science-Technology Research and Development*, 1996, 6(3): 97-101.
- [4] Mester Z, Cremisini C, Ghiara E, et al. Comparison of two sequential extraction procedures for metal fractionation in sediment samples[J]. *Analytical Chimica Acta*, 1998, 359: 133-142.
- [5] 李功振, 韩宝平, 葛冬梅. 京杭大运河(苏北段)底泥成分和砷形态的分布特征[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(14): 4387-4388.
LI Gong-zhen, HAN Bao-ping, GE Dong-mei. Distribution characters of arsenic speciation and sediment composition in Jing-Hang Grand Canal (northern section in Jiangsu province)[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(14): 4387-4388.
- [6] 向 勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 1132-1144.
XIANG Yong, MIAO Qi-long, FENG Jiang-fan. Pollution of heavy metals in the bottom mud of lake Taihu and its assessment of potential ecological risk[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(5): 1132-1144.

- 1132-1144.
- [7] Serife S, Latif E. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic spectrometry after a four stage extraction procedure[J]. *Analytical Chimica Acta*, 2000, 413:33-38.
- [8] 段飞舟, 高吉喜, 何江, 等. 灌溉水质对污灌区土壤重金属含量的影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3):450-455.
- DUAN Fei-zhou, GAO Ji-xi, HE Jiang, et al. Impact of irrigation water quality on heavy metals' concentrations in surface soil of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2005, 24(3):450-455.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 自然环境中元素背景值及其测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1982:95-132.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences(ISSCAS). Background elements in nature environment and their determined method [M]. Beijing: Science Press, 1982:95-132.
- [10] Loska K, et al. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30:159-165.
- [11] Rubio B, et al. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Riade Vigo (NW Spain): An assessment of metal pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11):968-980.
- [12] Facchineill A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114:313-324.
- [13] Loska L, Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. *Chemosphere*, 2003, 51:723-733.
- [14] Martin JAR, Arias ML, Corbi JMG. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain)[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3):1001-1021.
- [15] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128:289-300.
- [16] Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, et al. Pedological characterization of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works[J]. *Ecotoxicology*, 2004, 13:725-737.
- [17] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 汞的环境生物地球化学研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6):33-40.
- LI Yong-hua, WANG Wu-yi, YANG Lin-sheng, et al. A review of mercury in environmental biogeochemistry [J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(6):33-40.
- [18] Moller A, Muller H W, Abdullah A, et al. Urban soil pollution in Damascus, Syria: Concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1-2):63-71.
- [19] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 浙江省慈溪市农田土壤重金属污染初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):639-644.
- LIU Qing, WANG Jing, SHI Yan-xi, et al. Heavy metal pollution in cropland soil in Cixi city of Zhejiang province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):639-644.
- [20] Forstner U. Lecture notes in earth sciences (contaminated sediments) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989:107-109.
- [21] 贾振邦, 周华. 应用污染负荷指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 环境科技, 1992, 16(6):39-42.
- JIANG Zhen-bang, ZHOU Hua. The application of the index of pollution load to evaluate heavy metal pollution in sediments in the benxi section of the Taizi river[J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, 16(6):39-42.
- [22] Hilton J, Davison W, Ochsenein U. A mathematical model for analysis of sediment core data; implications for enrichment factor calculation and trace-metal transport mechanisms[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48:281-291.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1000.