

河流沉积物重金属潜在生态风险及其空间分异——以黄河包头段为例

李朝生¹, 王新伟², 何江³, 孙卫国³

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 石油大学(北京)资源与信息学院, 北京 102249;
3. 内蒙古大学生态与环境科学系, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:以黄河包头段干、支流的 6 个站位 0 ~ 20 cm 柱状沉积物为例, 计算了分层位的重金属潜在生态风险指数, 并对其进行了地统计学分析和 Kriging 插值重建, 以此揭示研究尺度上潜在生态风险的空间分异。结果表明, 几乎所有的层位都发生了轻微和轻微以上生态风险, 排污支流站位 F 的风险达到中等乃至强; 各站位间重金属垂向潜在生态风险在空间上有较大的变异; 其中空间自相关引起的空间变异占主导地位, 表明各站位重金属潜在生态危害整体的垂向空间分布结构性相对较强; 空间变异比与相关尺度的对应揭示出随机部分引起的空间异质性越高, 则空间自相关尺度越小; 阐明了潜在风险空间分异现实存在性和进行分层计算潜在生态风险指数的必要性。

关键词:重金属; 潜在生态风险; 空间分异; 空间相关; 黄河

中图分类号:X825 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 – 2043(2005)02 – 0308 – 04

Potential Ecological Risk and Its Spatial Variance of Heavy Metals in River Sediments: A Case Study on the Baotou Section of the Yellow River

LI Chao-sheng¹, WANG Xin-wei², HE Jiang³, SUN Wei-guo³

(1. Research Institute of Forest, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Faculty of Natural Resource and Technology Information, University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Department of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: Spatial variability of heavy metals co – pollution is one of the foci in the field of water quality researches in recent years. Geostatistics is a branch of applied statistics, and used for randomness and structure of regionalized variable in ecology, soil, agriculture and environment research broadly. Spatial variability and spatial correlation of heavy metals potentially ecological risk in river column sediments were assessed in this paper. Four main river ways (A1, B1, C1, D) and two branches stations (E, F) were selected in the Baotou Section of the Yellow River, and 6 column sediments about 20 cm were taken from these stations, each column sediment was divided into 10 layers by 2 cm in the sampling spots. The concentrations of copper, lead, zinc and cadmium in sediments (<63 μm) were measured by AAS according to Tessier method, and the potential ecological risk indexes (RI) of the heavy metal were calculated at different depths. The spatial variability of the RI was calculated by semivariogram analysis and kriging interpolation by the software of GS+5. 1. The results showed that light or lighter ecological risk in the stations occurred in almost all layers, and the ecological risk of the F station was medium or even serious. The spatial variability of potential ecological risk in vertical section was biggest in the research scale, with the order A1 < E < D < B1 < C1 < F, suggesting the disturbance of the exotic heavy metals. The variability caused by spatial autocorrelation was dominant, which illustrated that the structure of potential ecological risk in vertical section was relatively strong in the stations. The mutuality of spatial variance proportion and correlation scale showed that the higher of the spatial heterogeneous caused by random section, the lower of the scale of the spatial autocorrelation. There existed spatial variability of the potential ecological risk and it was necessity to calculate the RI for different depths.

Keywords: heavy metals; potential ecological risk; spatial variability; spatial correlation; the Yellow River

收稿日期: 2004 – 07 – 09

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (40363001)

作者简介: 李朝生 (1975—), 内蒙古丰镇人, 博士研究生, 主要从事污染生态学和景观生态学研究。E – mail: lcsnmg@sohu.com

联系人: 王新伟, E – mail: xinwei-wang@sohu.com

河流沉积物中重金属污染的研究与评价一直是备受关注的焦点^[1],这也是关系到流域或一定区域内水环境开发、利用和整治的基础。在 1996 年召开的第二届沉积物质量评价国际会议上,污染沉积物的生物/生态敏感性评价更是其中的重要议题^[2]。近些年来,众多的重金属污染评价方法^[3~7]问世,如:地累积指数法、沉积物富集系数法、次生相与原生相分布比值法、次生相富集系数法、污染负荷指数法、潜在生态风险指数法、回归过量分析法、模糊集理论、脸谱图法以及化学、生态学和毒理学的综合方法等。其中,因潜在生态风险指数法充分考虑了重金属的生物毒性与生态风险而得到了广泛的应用^[5~8]。

空间变异分析是目前重金属复合污染的研究热点之一^[9]。在以往的研究中,多采用河流沉积物的表层样品或柱状沉积物的混合样品进行面上污染的评价,也有利用地统计学方法进行面上分布特征的计算与分析^[10,11],但这不足以充分说明沉积物中重金属垂向污染的空间变异,而这种空间异质性由于河流丰枯水期的交替、污染物排放的时空差异、沉积环境的改变等是必然存在的。我们关于黄河包头段柱状沉积物中重金属生物可给态和形态特征分布的研究^[12,13]也初步揭示了其空间异质性的存在。本文将黄河包头段干流和支流的柱状沉积物进行分层分析,在对重金属的潜在生态风险进行评价的基础上,利用地统计学方法在小尺度上进一步探讨了风险在垂向空间的分异规律。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

分别对黄河包头段干流(色气 A1、昆都仑河入黄河口 B1、四道沙河入黄河口 C1、磴口 D)及两条主要支流(昆都仑河 E、四道沙河 F)下游入黄河口前的河段进行了系统的样品采集(图 1)。其中,E 的流量较大而且上游水库有不定期的排水,F 为典型的排污支流且流量小而稳定。鉴于另外两条支流(西河和东河)主要排放生活污水,年排放量甚小且通常为干枯河流,本次研究未进行样品采集。沉积物柱状样用无扰动采样器采集后现场用胶管将上层水相吸弃,并以 2 cm 为间隔分层取沉积物样于 50 mL 聚乙烯螺口离心管中,经实验室离心孔隙水后在 60 ℃ 以下烘干至恒重,筛取 <63 μm 部分用于 Cu、Pb、Zn、Cd 等 4 种重金属的分析。重金属含量的分析采用 Tessier^[14] 法中的全量分析法,测定方法为火焰原子吸收光谱法(美国

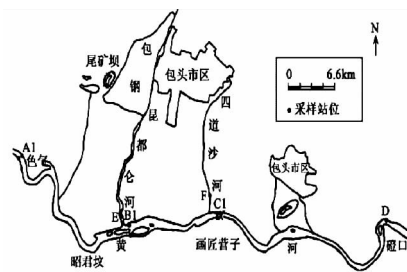


图 1 采样站位示意图

Figure 1 Sketch of sampling location in the Yellow River

Perkin Elmer 公司产 PC5100ZL)。测试过程中进行了重复样和标样分析,结果表明分析数据可靠。

黄河的高含沙水流对界面层沉积物的摩擦携带作用、高含沙水流的强烈的涡流作用、丰水与枯水期流量与流速的明显变化、沉积物的悬浮和再沉积、排污的时空变异等高强度扰动使小尺度内污染物沉积的旋回作用甚为强烈,且沉积速率极不稳定,进而使小尺度内沉积时序的判定极为困难,这也造成了重金属污染源排放的时空变异特征极有可能与干流柱状沉积物中重金属分布的时空变异不相符合。因此,本文只选取界面层附近扰动强度较大的 0~20 cm 深度的柱状沉积物的分层数据分别进行计算分析,目的在于用地统计学的方法对河流沉积物中重金属空间分异的结构作出探索性的描述。相对而言,本文所选取的空间尺度所反映的可以说是瞬时静态的重金属潜在生态风险及其空间分异规律。

1.2 计算方法

本文只计算 4 种重金属总的潜在生态风险指数(RI),具体计算公式见文献[5]、参比值(采用工业化前沉积物最高背景值)和毒性响应系数的设定见文献[4]。污染程度的划分为:无生态风险($RI < 40$)、轻微生态风险($40 \leq RI < 90$)、中等生态风险($90 \leq RI < 180$)、强生态风险($180 \leq RI < 360$)、极强生态风险($RI > 360$)。

计算各断面垂向潜在生态风险指数的变异函数和分维数,计算方法参见文献[15];在此基础上用 Kriging 方法绘制每一站位的潜在风险指数垂向断面图。计算及制图用地统计学软件 GS+5.1 完成。

2 结果与讨论

2.1 潜在生态风险指数分析

统计分析表明(表 1),除个别外,几乎所有的层位都发生了轻微和轻微以上生态风险,到 25% 的值以后更是如此,且排污支流站点 F 的风险达到中等乃

表 1 柱状沉积物中重金属的潜在生态风险指数值的统计
Table 1 The potential ecological risk index of heavy metals
in column sediment

统计参数	A1	B1	C1	D	E	F
样本数	10	10	10	10	10	10
平均值	60.15	53.83	65.14	78.21	72.49	162.47
标准偏差	5.18	12.42	18.24	7.27	5.62	33.79
样本变异	26.88	154.29	332.60	52.83	31.59	1 142.4
最小值	53.41	36.91	38.52	69.63	63.19	97.10
25% 值	55.92	39.97	43.22	70.02	69.68	132.28
最大值	68.56	71.98	85.49	90.01	82.09	210.54
极差	15.15	35.07	46.97	30.38	18.90	193.44

至强。不同站位和不同层之间的潜在生态风险指数值存在较大的差异,变异系数最高可达 1 142.4,而最低只有 26.88,极差则由 15.15 到 193.44 不等,二者的排序均为 A1 <E <D <B1 <C1 <F。对照站位 A1 虽然平均值较 B1 为大,但样本变异与极差是最小的;而排污站位 F 的却最大,导致 C1 也出现较大的极差与变异;受支流 E 影响 B1 的极差与变异系数也较大;这进一步显示了河流人为污染与自身扰动的作用,也表明了重金属潜在风险空间分异的现实存在和进行分层计算指数的必要。

2.2 潜在生态风险的空间变异

区域化变量可以反映某种空间现象的特征,随机性和结构性是其两个最显著和最重要的特征,区域化变量的空间表达可以通过变异函数来实现^[15]。变异函数是方向和两点之间距离的函数,它可反映变量的空间自相关性,因此是分析变量空间结构的主要工具。分维数 D 也是基于变异函数的,可以表征随机性和结构性因素引起的空间异质性程度。

根据 6 个取样站位的重金属潜在风险指数计算变异函数,且对实验数据进行理论模型拟合,并计算其分维数,最大分析距离和步长取软件自动设定值,且软件依据 r^2 、RSS 等参数自动选择最优模型,结果见表 2。除 A1 外,其余站位决定系数均大于 0.6;就适合模型而言,除 C1 为线性外,其余均为球形模型。

6 个取样站位相比较,站位 F 和 B1 均有较大的

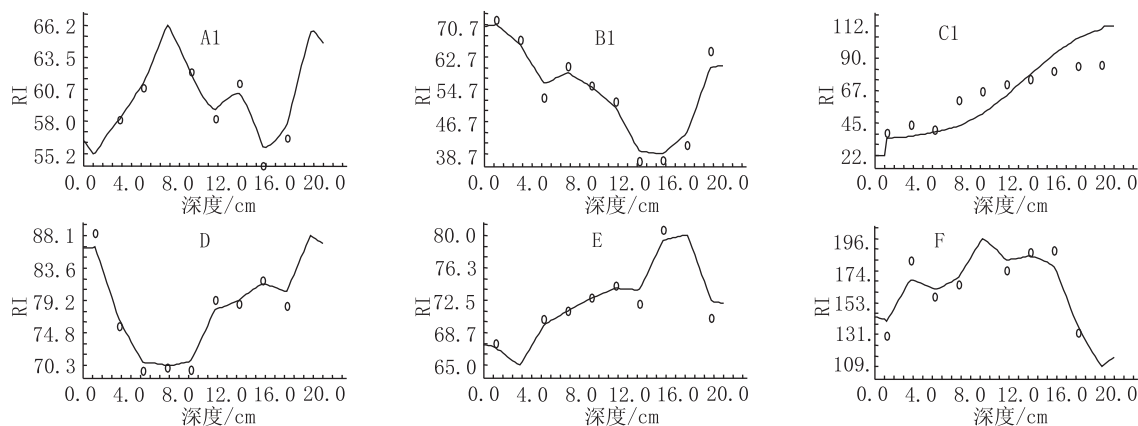
块金值 (C_0),特别是 F,表明这两个站位在小于采样尺度的范围内的某种过程不容忽视,也就是说,其重金属污染物的沉积量、沉积环境等可能会经常发生改变,进而导致了其垂向空间更小尺度的成层性,这与 F 受排污不定量不定期而 B1 受支流 E(其上游有昆都仑水库)的不稳定流量注入有关,即这两个站位的扰动比其他站位更加频繁。基台值($C_0 + C$)通常表示系统内总的变异,各站位排序为: A1 <E <D <B1 <C1 <F,与上述变异系数和极差的排序出现了惊人的相似,又一次显示了黄河包头段重金属潜在生态危害的空间总体变异趋势;扰动作用特别是人为重金属污染排放的扰动作用引起的空间变异再一次被揭示,同时也表明了干流对照、污染、消减断面柱状沉积物中重金属潜在生态风险垂向空间变异“小→大→小”的变化规律,而且以对照断面的变异为最小;这种静态的空间变化规律也在一定意义上揭示了干流沉积物中重金属潜在生态危害总体的动态变化规律。

块金值与基台值之比(空间变异比)表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比列,该比值高,说明随机部分引起的空间异质性程度起主要作用。如果该比值 <25%,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比值在 25% ~ 75% 之间,表明系统具有中等的空间相关性;> 75% 则说明系统空间相关性很弱^[16]。6 个站位的比值均不大,可见重金属垂向潜在生态风险空间分异中随机因素占了较少的作用;在研究尺度上,除 A1 为中等的空间相关外,其余站位的重金属潜在生态危害均表现为强烈的空间自相关,但依然可以看出 F 的随机部分引起空间异质性较其他 4 个站位高一些,也揭示了 F 站位沉积物接受重金属污染物有一定的随机性;但各站位重金属潜在生态危害整体的垂向空间分布相对仍然比较简单,结构性较强。

由于 C1 为线性模型,因此不能确定相关尺度,Kriging 插值后 C1 垂向潜在生态风险指数值图也一目了然(图 2)。其余 5 个站位则表现了 4 ~ 26 cm 不等

表 2 柱状沉积物中重金属的潜在生态风险的空间变异
Table 2 Spatial variation of the potential ecological risk of heavy metals in column sediment

站位	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	相关尺度/cm Range(A_0)	空间变异比 [$C_0/(C_0 + C)$]	决定系数 (r^2)	分维数 (D)	决定系数 (r^2)
A1	Spherical	6.94	26.65	4.16	0.260	0.133	1.953	0.024
B1	Spherical	21.00	352.90	24.43	0.060	0.890	1.620	0.930
C1	Linear	1.00	712.70	> 15.59	0.001	0.966	1.145	0.997
D	Spherical	7.10	75.01	11.65	0.095	0.991	1.675	0.978
E	Spherical	3.80	68.60	25.26	0.055	0.733	1.690	0.718
F	Spherical	254.00	1 423.00	9.74	0.178	0.604	1.775	0.609



○ 理论计算值 — Kriging 插值结果

图2 垂向潜在生态风险指数的 Kriging 图

Figure 2 Kriging map of potential ecological risk index in vertical section

的空间依赖尺度:其中以 A1、F、D 的空间相关尺度较小, A1 站位的垂直相关距离约在 4 cm 左右, F 约在 10 cm 左右, D 约在 12 cm 左右(图 1);而 B1、E 相关尺度较大,约在 25 cm 左右,在图中已经显示不出。这与其空间变异比形成了很好的对应,即由随机部分引起的空间异质性越高,则空间自相关尺度越小。

5 个站点(A1 除外)的分维数 D 的决定系数揭示出重金属垂向潜在生态风险具有较好的分形特征,其范围在 1.145 ~ 1.775 之间,差别较为明显。分维数 D 值越大,表明由随机性因素引起的空间异质性越高,那么 C1、B1、D、E、F 表现出的结构性就依次减弱,从而使由随机部分引起的空间分异增强,垂向重金属潜在生态危害仍然以 F 站位的随机性最大。

3 结论

在黄河包头段采集的 6 个站点中,几乎所有的层位都发生了轻微和轻微以上的生态风险,且排污支流站点 F 的风险达到中等乃至强。

传统统计学与地统计学的分析都表明,在研究尺度上,黄河包头段各站位的垂向潜在生态风险在空间上有较大的变异。虽然以空间自相关引起的空间变异占主导地位的现实现表明黄河包头段重金属潜在生态危害整体的垂向空间分布相对仍然比较简单,即具有较强的结构性,但依然表现出随机部分引起的空间异质性越高,则空间自相关尺度越小的变化趋势。

以上分析进一步揭示了潜在风险空间分异的现实存在性和进行分层计算垂向潜在生态风险指数的必要性,也为沉积物重金属污染治理提供了科学的依据。

参考文献:

- [1] Chapman P M. Sediment quality assessment: status and outlook[J]. *Journal of Aquatic Ecological Health*, 1995, 4: 183 - 194.
- [2] Baudo R and Munawar M. 2nd International symposium sediment quality assessment, tools, criteria; and strategies in fresh, marine and brackish waters[J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, 5(3): 215.
- [3] 霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. *地理科学*, 1997, 17(1): 81 - 86.
- [4] 贾振邦,梁涛,林健枝,等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害评价研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, 33(4): 485 - 492.
- [5] 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 1999, 19(2): 206 - 211.
- [6] 何孟常,王子健,汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. *环境科学*, 1999, 20(1): 7 - 10.
- [7] 何孟常,王子健. 利用综合评价方法和等级模型评价乐安江水体重金属污染[J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 80 - 86.
- [8] 何云峰,朱广伟,陈英旭,等. 运河(杭州段)沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, 28(6): 669 - 674.
- [9] 孙波,周生路,赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 248 - 251.
- [10] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属元素含量空间分布特征研究 - 地统计学方法[J]. *地理学报*, 1997, 52(2): 184 - 192.
- [11] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属元素含量空间分布特征研究 - 空间自相关与分形方法[J]. *地理学报*, 1998, 53(1): 87 - 96.
- [12] 王新伟,何江,李朝生. 黄河包头段沉积物中生物可给态重金属分布研究[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(1): 20 - 23, 30.
- [13] 何江,王新伟,李朝生,等. 黄河包头段水 - 沉积物系统中重金属的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(1): 53 - 57, 60.
- [14] Tessier A, Campbell P G C and Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844 - 851.
- [15] 王政权. 地统计学在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] Cambarell C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field - scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Sci Soc A m j*, 1994, 58: 1501 - 1511.