

官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析

王铁宇, 罗维, 吕永龙*, 史雅娟, 王晓龙

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 在官厅水库周边 2 ~ 10 km 范围内系统测定了 8 种重金属元素的含量, 利用 GIS 技术和地统计分析方法, 研究了重金属元素的空间变异特征及环境风险. 结果表明, Cd 是该区域主要的污染物, 检测值 (0.68 ± 0.17) mg/kg 相当于国家 1 级标准的 3.4 倍, 40% 的区域超过国家 2 级标准. 土壤中 7 种重金属 (Ni 除外) 的空间变异主要缘自于施肥、耕作及种植制度等人为活动引起的随机性因素, 空间格局呈现西高东低, 并呈洋河至怀来县区段污染最重的趋势. 单因子污染指数和单因子生态危害系数 Cd 均显著高于其他重金属元素, 复合污染指数呈库北高于库南, 西部高于东部的空间趋势, 复合生态风险指数南北向也有类似分布特征, 东西向集中在怀来县、延庆县和中部北辛堡镇 3 个区域, 说明高环境污染区将伴随高的生态风险, 人口密集、工业化程度较高的城镇区域更容易引起生态危害.

关键词: 重金属; 官厅水库; 空间变异; 风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0225-07

Spacial Variation and Eco-Environmental Risk of Heavy Metals in Soil Surrounding Guanting Reservoir

WANG Tie-yu, LUO Wei, LÜ Yong-long, SHI Ya-juan, WANG Xiao-long

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10085, China)

Abstract: Topsoil samples around the Guanting Reservoir ranging from 2 ~ 10 km were measured for heavy metals concentrations. GIS and geostatistical techniques were applied to analyze the special variation and eco-environmental risk of heavy metals. The results show that Cd is the major contamination in this area, 3.4 fold higher than the national background level, with a mean of 0.68 mg/kg and a standard deviation of 0.17. The area in which Cd concentration is higher than the second level of national standard accounts for about 40% of the whole study area. Spacial variation of heavy metals (except Ni) mainly is induced by the stochastic factors—mostly anthropogenic activities, e.g. fertilizer application, cultivation and planting modes, etc. The spatial pattern of heavy metals approximately declines in the W-N and N-S direction, with the highest value in the region between Yanghe River and Huailai County. The complex contamination index of heavy metals has the same distribution as their concentrations. However, the complex eco-risk index with higher value mainly occurs in vicinities of Huailai County, Yanqing County and Beixinpu town. It suggests that the town with higher population density and industrialization will induce both environmental pollution and ecological risk.

Key words: heavy metals; Guanting Reservoir; spacial variation; risk

官厅水库是北京市 2 个重要水源地之一, 1997 年因污染退出首都饮用水供水系统. 近年来围绕库区水体质量开展了大量研究, 证明了水体和沉积物富含重金属、有机污染物等持久性有毒物质^[1~6], 而对水库周边农田过量使用农药、化肥引起的面源污染, 径流逸失造成水体间接污染的研究不足^[7~9]. 重金属一方面造成粮食减产、减质, 另一方面会导致土壤质量恶化, 严重危害土壤生态系统的良性循环和人类生存环境^[10~12]. 因此, 揭示水源地土壤重金属的污染格局及生态环境风险, 对于采取有效措施保护水源具有重要意义. 本研究通过对官厅水库周边土壤采样监测, 利用 GIS 技术和地统计分析方法, 探讨重金属元素的空间变异特征及分布格局, 划分不同等级的污染区域, 并对其生态环境风险以及空间格局进行分析, 对于探明水源地污染来源和风险以

及水库综合治理具有重要的科学意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

官厅水库位于北京市西北 100 km 左右的永定河上, 总库容量 41.6×10^8 m³, 流域总面积 4.6 万 km². 该地区属寒温带大陆性季风气候, 多年均温 3 ~ 9℃, 多年平均降水量 370 ~ 480 mm, 降雨集中在夏季 (占全年的 60% ~ 70%). 周边地形地貌呈高度异质性, 山地、丘陵、河谷、盆地相间分布. 土壤类型以棕壤、褐土、栗钙土为主, 农业利用植被主要有果

收稿日期: 2006-03-08; 修订日期: 2006-05-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2007CB407307)

作者简介: 王铁宇 (1973 ~), 男, 博士, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: wangty@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yllu@rcees.ac.cn

园、玉米、菜地等。

1.2 样品采集与处理

根据妫水河、洋河、桑干河 3 条入库河流及周边土地利用类型,将距离官厅水库 2 ~ 10 km 的周边范围划为研究区域 (E115.43° ~ 115.97°, N40.19° ~ 40.50°),面积约为 920 km²,包括水体 100 km² 和陆地 820 km².2003 年在研究区采集 58 个 0 ~ 20 cm 的表层土壤,每一样点均由半径 5 m 范围内采集的 5 个土样混合而成,样点分布见图 1.

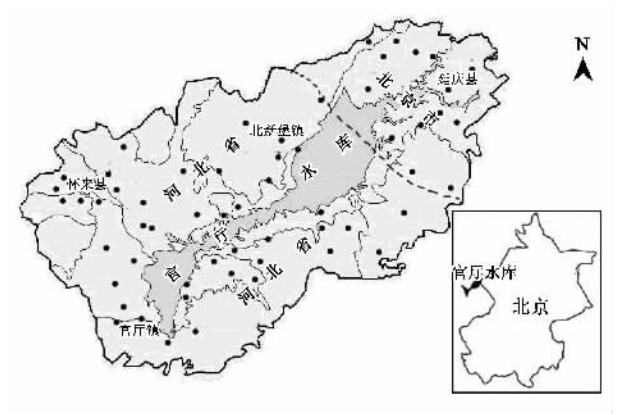


图 1 官厅水库周边区域及土壤样点分布

Fig.1 Study area and sample locations in Guanting Reservoir

土样室内风干后磨细,过 2 mm 尼龙筛.重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni、As 和 Co 的测定采用 USEPA 3050B 消煮方法,经 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 微波消解后,利用等离子质谱仪(ICP-MS)(最低检测限

为 1 ~ 2 ng•g⁻¹)测定其总量.分析过程中用土壤标样 GBW07410 做质量控制,同时进行空白和试剂的实验.

1.3 数据处理

常规数理统计分析采用 SPSS11.0 软件完成,地统计分析采用 GEO-EAS 软件拟合半变异函数、建立拟合模型及其参数.在 ArcGis 8.0 中应用 Kriging 插值模块,输入拟合参数,建立研究区重金属元素的空间分布图.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属的统计性描述

表 1 可以看出,As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均值分别为 6.83、0.68、8.96、32.09、12.58、15.61、4.68 和 53.90 mg/kg. 与我国土壤环境质量标准相比,Cd 已明显构成污染,相当于 1 级标准(自然背景值)的 3.4 倍,并超过国家 2 级标准(0.60 mg/kg),而与北京市土壤环境背景值^[13]相比,高出近 5 倍.其中洋河流域(河北省怀来县附近)的几个样点,检测值高达 0.91 ~ 1.20 mg/kg,存在极大的环境风险,对库区水质安全造成严重影响.与 Cd 相比,Pb 在该地区的含量已非常低,检测平均值仅相当于国家 1 级标准的 13%,比北京市环境背景值也低很多(相当于 19%).其它几种重金属元素 As、Co、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均值均低于国家 1 级标准,但 Cu、Zn 和 Co 略高于北京市对应的土壤环境背景值 8.66、40.37

表 1 官厅水库周边土壤重金属元素的统计性描述

Table 1 Descriptive statistics of the heavy metals in soils around Guanting Reservoir

元素	<i>n</i>	平均值 /mg•kg ⁻¹	中值 /mg•kg ⁻¹	标准偏差	最小值 /mg•kg ⁻¹	最大值 /mg•kg ⁻¹	峰值	偏斜度	分布类型
As	58	6.83	7.02	2.12	3.06	10.9	-0.88	-0.03	正态
Cd	58	0.68	0.68	0.17	0.39	1.2	0.1	0.05	正态
Co	58	8.96	8.77	2.52	4.47	16.49	-0.03	0	对数正态
Cr	58	32.09	30.01	8.53	16.78	59.36	0.12	0.15	对数正态
Cu	58	12.58	12.17	6.34	2.86	28.37	0.09	0.76	对数正态
Ni	58	15.61	14.93	5.96	5.95	33.33	0.09	-0.06	对数正态
Pb	58	4.68	4.51	1.9	1.74	10.88	0.74	0.64	正态
Zn	58	53.90	53.70	17.18	22.99	109.33	0.35	-0.09	对数正态

和 7.46 mg/kg.

2.2 土壤重金属的空间变异特征函数

半变异函数是分析变量空间结构的主要工具,用以反映变量的空间自相关性^[14].根据公式(1)计算出半变异函数 $\gamma(h)$ 的散点图,并用不同类型的模型进行拟合,计算其参数及拟合度最好的模型类型^[15],各项目的半变异函数模型及其参数见表 2 和

图 2. $\gamma(h)$ 的计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $Z(x_i)$ 为 x_i 点位的观测值, $N(h)$ 为由距离 h 分隔的观测点的对数, h 为步长.

As、Cd 和 Pb 3 种重金属元素基本服从正态分布,Co、Cr、Cu、Ni 和 Zn 5 种元素的原始值经对数变

换后,也基本服从正态分布(表 1). As、Cd、Co、Cr、Ni 和 Pb 的理论模型均能很好地拟合球状模型,Cu 和 Zn 则能较好地拟合高斯模型. 各种重金属元素半变异函数模型的拟合度均在 0.65 以上,模型的选取基本符合要求^[16, 17].

块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,基台值通常表示系统内总的变异. 由表 2 可以看出,该地重金属元素的块金值都比较高,而基台值则相对较低,说明各种重金属在空间上相

对于系统内总的变异,其较小尺度上的过程影响更为重要. 通常块金值与基台值之比可用于表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例. 除 Ni 之外,其他 7 种重金属的块金值与基台值之比均较大(>80%),说明空间变异主要是由随机因素引起的,如施肥、耕作措施、种植制度等人为活动使得土壤重金属的空间相关性减弱,并向均一化方向发展,而结构性因素如气候、母质、地形、土壤类型等对其影响不够显著.

表 2 土样中重金属元素半变异函数的主要特征参数
Table 2 Theory models of soil heavy metals and relevant parameters

元素	拟合模型	块金效应	基台值	块金/基台	步长/(°)	数据变换
As	Sphericity	2.5	1.7	1.47	0.09	—
Cd	Sphericity	0.015	0.012	1.25	0.09	—
Co	Sphericity	0.042	0.03	1.40	0.09	ln
Cr	Sphericity	0.03	0.03	1.00	0.09	ln
Cu	Gaussian	0.13	0.14	0.93	0.10	ln
Ni	Sphericity	0.04	0.08	0.50	0.09	ln
Pb	Sphericity	2.0	1.8	1.11	0.10	—
Zn	Gaussian	0.05	0.06	0.83	0.10	ln

2.3 土壤重金属的空间变异格局

利用 ArcGis 的 GS 扩展功能模块(Geostatistical Analyst)的地统计分析功能,采用普通克里格(Ordinary Kriging)插值模式,输入上述半变异函数的模型参数,建立土壤重金属元素的空间变异分布格局(图 3).

可以看出,土壤 As 分布大致呈库北高于库南的趋势,水库东、西两边缘(河北省怀来县和北京延庆县)明显高于其它地区;水库中段北辛堡镇样区,也有较高的 As 污染风险[图 3(a)]. Cd 在该地区环境风险最大,高风险区面积超过 40%,集中分布在洋河和桑干河流域[图 3(b)]. 已有研究表明^[5, 6],位于该区段的 8 号桥水域有机氯和多环芳烃等有机污染物的含量也比较高,说明洋河上游、张家口等地化工厂废物排放,可能是造成 Cd 含量较高的主要原因. Co、Zn、Cr 和 Ni 具有相似的空间分布特征,4 种污染物集中分布在官厅水库的西部,呈南北贯穿的条带状,水库中部呈现为北高南低的趋势,在水库中段北辛堡镇和延庆县附近也有斑块状的高污染风险区域[图 3(c)、3(d)、3(e)、3(g)]. Cu 的高风险区主要分布在库区西部,但基本集中在怀来县周边[图 3(h)],说明怀来县城的工业化行为以及周边化肥、农药的使用,可能是造成 Cu 污染的重要途径. 该地区土壤 Pb 的含量比较低[图 3(f)],远低于国家标准,高风险区域面积不足 15%,主要分布在怀来县城及

110 国道沿线,并呈斑块状.

2.4 土壤重金属污染的生态环境风险评价

根据我国土壤环境质量标准,采用内梅罗指数法对 8 种重金属污染物的生态环境风险进行评价. 计算公式如下:

单因子污染指数: $P_i = c_i/S_i$ (2)

复合指数: $P_c = \sqrt{[(\max P_i)^2 + \overline{P_i^2}]/2}$ (3)

式中, c_i 为污染物的实测值, S_i 为污染物的评价标准,研究中选用李建等^[13]建立的北京市土壤环境背景值作为评价基准(表 3). $\max P_i$ 为单项污染指数的最大值, $\overline{P_i}$ 为单项污染指数的平均值.

在环境质量评价的基础上,进一步对重金属元素可能存在的生态风险进行探讨. 借鉴 Hakanson 提出的多指标生态评价法^[18],在基于元素丰度和释放度原则的基础上,将地壳作为元素的分配相,计算公式如下:

单因子生态危害系数: $E_i = T_i \times P_i$ (4)

复合生态风险指数: $R_i = \sum_{i=1}^m E_i$ (5)

式中, P_i 为单因子污染指数,可由公式(2)得出, T_i 为毒性响应系数.

结合官厅水库周边土壤母质情况及重金属的污染特征,经一系列统计和规范化处理,借鉴何孟常等对沉积物的生态风险评价方法,求算出 8 种重金属

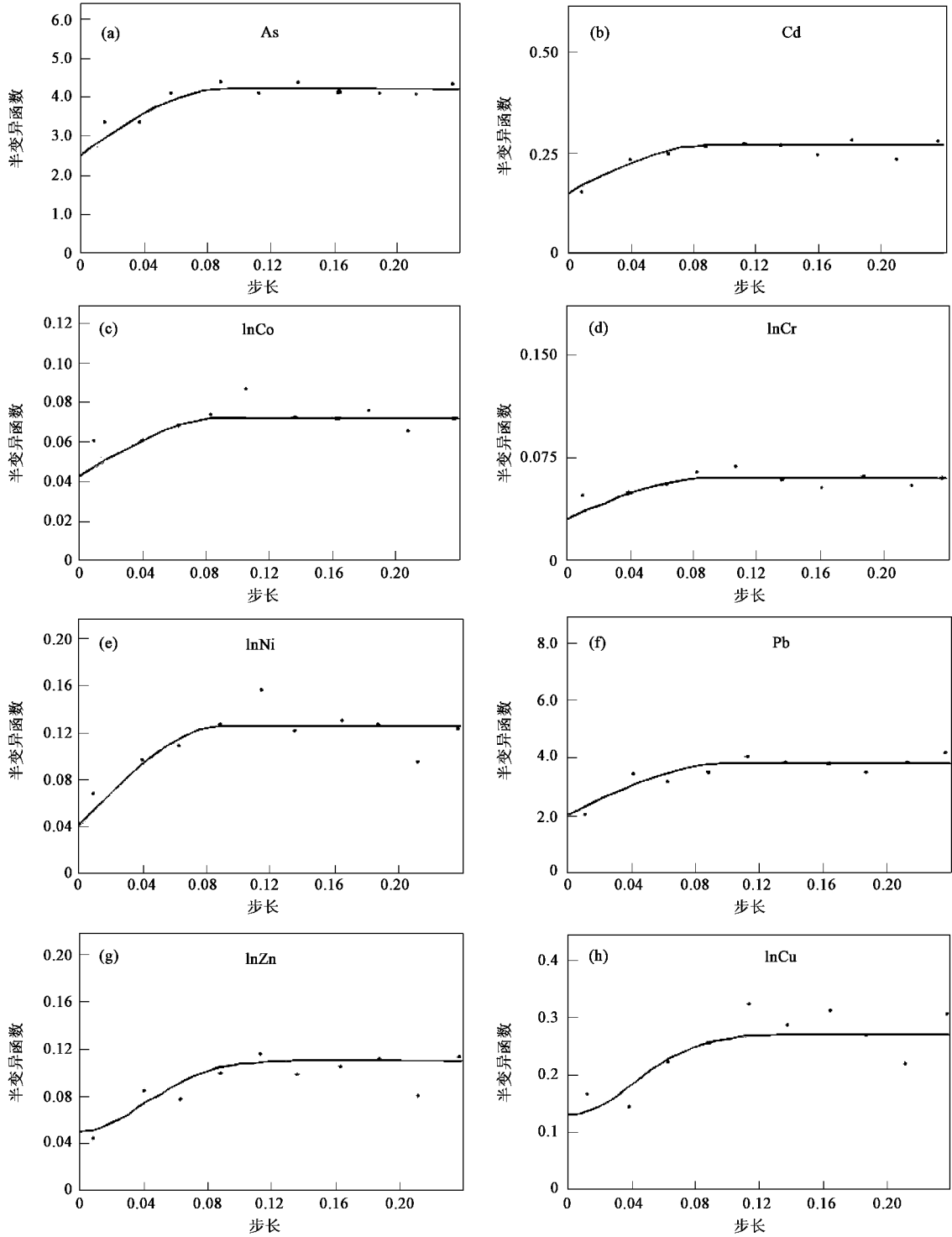


图 2 官厅水库周边土壤重金属半变异函数图

Fig. 2 Semi-variogram of the heavy metals and spherical model fitness

元素的毒性响应系数分别为: Cu(6)、Zn(3)、Pb(8)、Cr(4)、Cd(45)、Ni(4)、As(16)、Co(7)^[19, 20](表 3)。

由表 4 综合风险评价结果可以看出,单因子污染指数 P_i 排序为 Cd> Cu> Zn> Co> Ni> As> Cr> Pb, Cd 对该地区环境污染的贡献率最高,达 40%。复

合污染指数为 3.6 ± 0.9 ,最高达 6.3。通常 $P_e \leq 1$ 为未污染, $P_e > 1$ 为已污染, $1 < P_e \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_e \leq 3$ 为中度污染, $P_e > 3$ 为重度污染^[21]。分析全部样点的 P_e 值均高于(含等于)2,构成重度污染($P_e > 3$)的样点超过 65%,说明官厅水库周边土壤存在着明

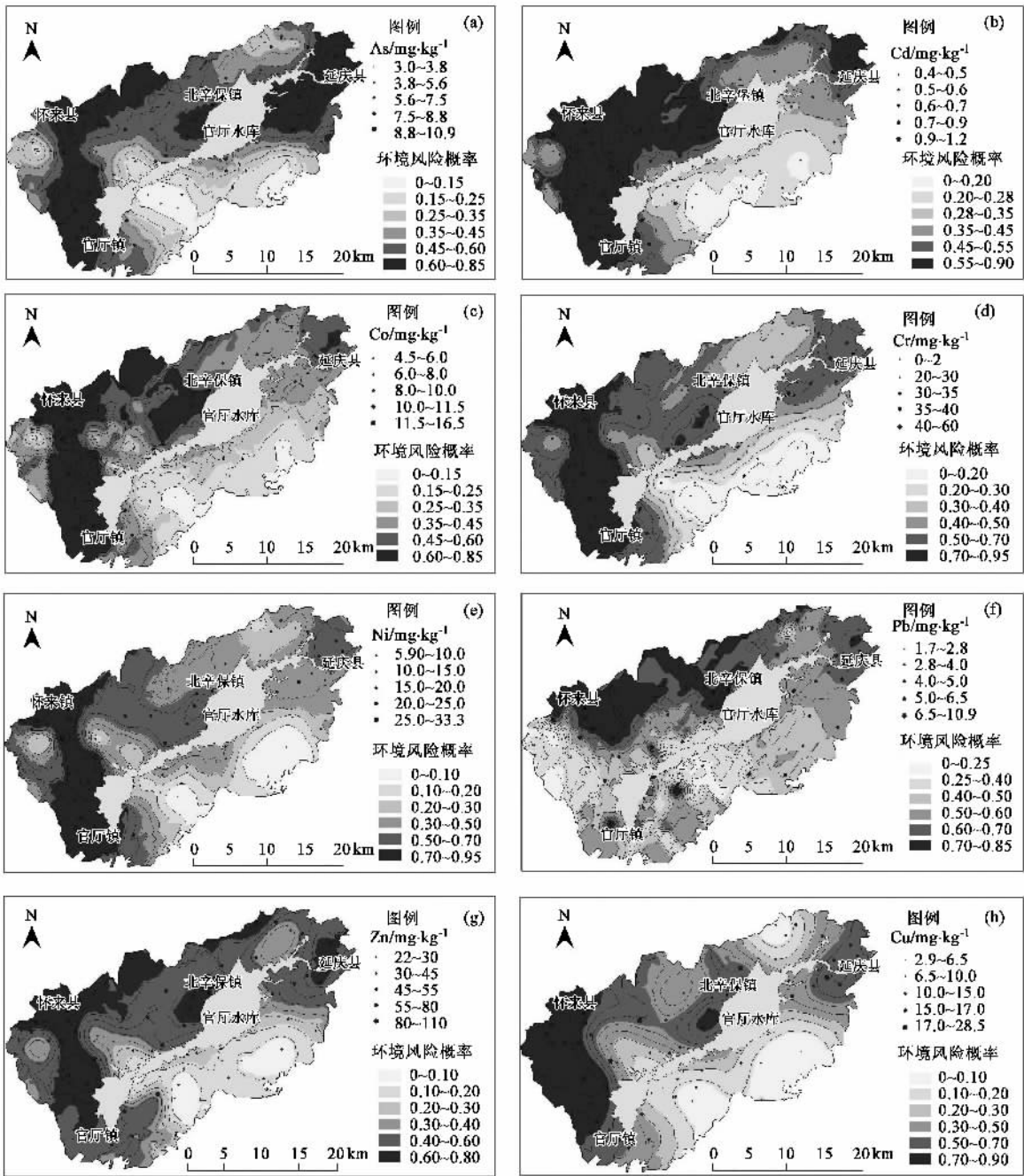


图3 官厅水库周边土壤重金属的空间分布格局

Fig.3 Spatial distributions of the heavy metal contents in soils around Guanting Reservoir

显的多种污染物的复合污染,将会通过水土流失、地下水运移等途径对库区水质构成潜在威胁.单因子生态危害系数 E_i 为 $Cd > As > Cu > Co > Pb > Zn > Ni > Cr$,土壤较高水平的 Cd 在构成环境污染的同时,也构成了严重的生态危害, E_i 值高达 218.9.

进一步利用 ArcGis 的空间分析功能,对有毒污染物复合污染的空间格局进行预测, P_c 和 R_i 空间格局如图 4 所示. P_c 呈库北高于库南,西部明显高

表3 重金属元素的土壤环境质量标准值及毒性响应系数

Table 3 Environmental standards and toxico parameters of the heavy metals

元素	国家 1 级标准 /mg·kg ⁻¹	北京市背景值 /mg·kg ⁻¹	毒性响应系数
As	15	8.4	16
Cd	0.2	0.14	45
Cr	90	51.9	4
Cu	35	8.7	6
Ni	40	19	4
Pb	35	9.1	8
Zn	100	10.4	3
Co	—	7.5	7

表 4 土壤重金属风险评价指数描述性统计

Table 4 Environmental risk assessments of the heavy metals in soils

元素	因子	平均值	最大值	最小值	标准差	CV/%
As	P_i	0.8	1.3	0.4	0.3	30.8
	E_i	13.0	20.8	5.8	4.0	30.8
Cd	P_i	4.9	8.6	2.8	1.2	24.2
	E_i	218.9	385.7	125.4	52.9	24.2
Cr	P_i	0.6	1.1	0.3	0.2	26.3
	E_i	2.5	4.6	1.3	0.7	26.3
Cu	P_i	1.4	3.3	0.3	0.7	50.0
	E_i	8.7	19.6	2.0	4.3	50.0
Ni	P_i	0.8	1.8	0.3	0.3	37.8
	E_i	3.3	7.0	1.3	1.2	37.8
Pb	P_i	0.5	1.2	0.2	0.2	40.2
	E_i	4.1	9.6	1.5	1.7	40.2
Zn	P_i	1.3	2.7	0.6	0.4	31.6
	E_i	4.0	8.1	1.7	1.3	31.6
	P_i	1.2	2.2	0.6	0.3	27.8
	E_i	8.4	15.4	4.2	2.3	27.8
Co	P_c	3.6	6.3	2.0	0.9	24.2
	R_i	262.8	456.1	144.7	63.9	24.3

于东部的趋势。 R_i 的空间分布与 P_c 基本相似,也呈库北高于库南的趋势,东西方向分布主要集中在 3 个区域:怀来县附近、延庆县周边以及水库中部的北辛堡镇附近。 R_i 的空间格局揭示了高环境污染区将伴随高的生态风险,同时也说明人口密集、工业化程

度较高的城镇区域更容易造成生态危害.本研究与笔者前期在该区域开展的有机氯农药(HCHs、DDTs)的研究结论基本一致^[22, 23],有机、无机污染物环境风险的空间格局具有极大的相似性,这为将来水源开发、整治过程中采取有效措施、控制污染源头提供

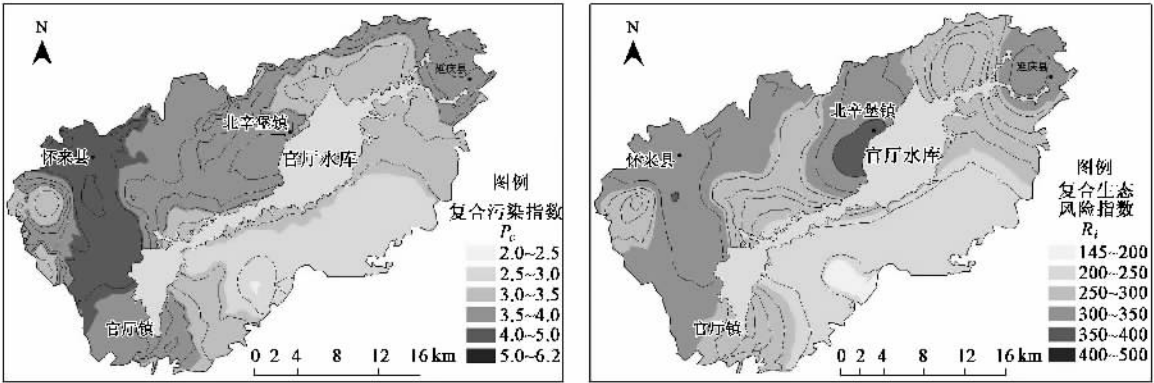


图 4 土壤重金属污染生态环境风险格局

Fig. 4 Eco-environmental risk patterns of the heavy metals in soils

了科学依据.

3 结论

- (1)官厅水库周边土壤中 As、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量均低于国家 1 级标准,而 Cd 含量超过了国家 2 级标准,已构成污染,河北省怀来县附近的洋河流域检测值高达 0.91 ~ 1.20 mg/kg.
- (2)水库周边土壤重金属空间格局均为洋河至

- 怀来县区域高于其他地区.Cd 环境风险最大,高风险区超过 40%,主要分布在洋河和桑干河流域.进一步表明,上游张家口、宣化工业废水及生活污水的排在污染水体的同时,也造成了临近区域土壤的面源污染,对库区水质安全构成了长期的潜在威胁.
- (3)单因子污染指数排序为 Cd > Cu > Zn > Co > Ni > As > Cr > Pb,单因子生态危害系数为 Cd > As > Cu > Co > Pb > Zn > Ni > Cr,Cd 在构成环境污染的同

时,也存在严重的生态危害.复合污染指数 P_c 和复合生态风险指数 R_i 均呈库北高于库南,西部高于东部的趋势.

参考文献:

[1] 梁涛,张秀梅,章申.官厅水库及永定河枯水期水体氮、磷和重金属含量分布规律[J].地理科学进展,2001,20(4):341 ~ 346.

[2] 梁涛,王浩,丁士明,等.官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J].地理科学进展,2003,22(1):38 ~ 44.

[3] 马梅,王子健,Anders Sodergren.官厅水库和永定河沉积物中多氯联苯和有机氯农药的污染[J].环境化学,2001,20(3):238 ~ 243.

[4] 姜树君,王净.官厅水库水质污染状况及趋势分析[J].北京水利,2003,2:31 ~ 32.

[5] Wang X T, Chu S G, Xu X B.Organochlorine pesticide residues in water from Guanting Reservoir and Yongding River, China[J].Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2003,70:351 ~ 358.

[6] 康跃惠,刘培斌,王子健,等.北京官厅水库-永定河水系水体中持久性有机氯农药污染[J].湖泊科学,2003,15(2):125 ~ 132.

[7] 黄满湘,张国梁,张秀梅,等.官厅流域农田地表径流磷流失初探[J].生态环境,2003,12(2):139 ~ 144.

[8] Zhang H, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Accumulation features of organochlorine pesticides residues in soils around Beijing Guanting Reservoir[J].Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2004,72:954 ~ 961.

[9] Wang T Y, Lu Y L, Dawson R W, *et al.* Effects of environmental factors on organochlorine pesticide residues in soils of the Guanting Reservoir area, China[J].J. Environ. Sci. Health, Part B,2006,41:309 ~ 321.

[10] Adciano D C.Biogeochemistry of trace metal[M].New York: Lewis Publishers Boca Raton,1992.

[11] Kawachi T, Kubo H. Model experimental study on the migration behavior of heavy metals in electtokinetic remediation process for contaminated soil[J].Soil Sci. Plant Nutr., 1999,45(2):259 ~ 268.

[12] Kwon Y T, Lee C W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area[J].Sci. Total Environ., 1998,214(3):203 ~ 210.

[13] 李建,郑春江.环境背景值数据手册[M].北京:中国环境科学出版社,1989.73 ~ 74.

[14] Isaaks E H, Srivastava R M. An introduction to applied geostatistics [M].New York: Oxford University Press, 1989.

[15] 侯景儒,黄竞先.地质统计学的理论与方法[M].北京:地质出版社,1990.

[16] 侯景儒,尹镇南,李维明.实用地质统计学[M].北京:地质出版社,1998.31 ~ 72.

[17] 胡克林,李保国,林启美.农田土壤养分的空间变异性特征[J].农业工程学报,1999,15(3):33 ~ 38.

[18] Hakanson L. An ecological risk index for quality pollution control: a sediment ecological approach [J]. Water Res., 1980,14: 975 ~ 1001.

[19] 夏增禄.中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量的区域分异[J].地理学报,1993,48(4):297 ~ 303.

[20] 何孟常,王子健,汤鸿霄.乐安县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.

[21] 王铁宇,汪景宽,周敏,等.黑土重金属元素局地分异及环境风险[J].农业环境科学学报,2004,23(2):272 ~ 276.

[22] Wang T Y, Lu Y L, Zhang H, *et al.* Spatial Distribution of Organochlorine Pesticide Residues in Soils Surrounding Guanting Reservoir, China[J].Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2005,74(4):623 ~ 630.

[23] 张红,王铁宇,吕永龙,等.官厅水库周边土壤中有机氯农药残留的统计分布特征[J].环境科学学报,2004,24(3):550 ~ 554.