

北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究

韩 平^{1,2}, 王纪华^{1,2*}, 冯晓元^{1,2}, 马智宏^{1,2}, 陆安祥^{1,2}, 魏 荔³, 闫连波³

(1.北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097; 2.农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097; 3.北京市顺义区农业科学研究所, 北京 101300)

摘 要:在北京顺义区农业用地采集了 412 份土壤表层样品,采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对区域土壤重金属污染生态风险进行评估。结果表明:研究区土壤 6 种重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg)的地积累指数(I_{geo})平均值均小于 0,处于无污染程度;但处于 Hg、Zn 和 Cd“轻度-中等污染”和“中等污染”的土壤样本分别有 12.6%、12.9% 和 17.0%。土壤重金属生态风险指数(RI)平均值为 93.07,属于轻度生态危害;轻度、中等和强度生态危害的比例分别为 95.6%、3.9% 和 0.5%;均有超过 20% 的土壤样本处于 Hg 和 Cd 中等生态危害以上的水平;从不同土地利用类型中土壤样本的 RI 分析,菜地土壤 RI 平均值为 109.55,达到中等污染等级的比例为 14.3%。从研究区土壤重金属生态危害指数的空间分布特征分析,区域内潮白河、小中河和金鸡河对区域生态存在影响。

关键词:土壤重金属;地积累指数;生态危害指数;生态风险评估

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)01-0103-07 doi:10.11654/jaes.2015.01.015

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils in Shunyi, Beijing

HAN Ping¹, WANG Ji-hua^{1,2*}, FENG Xiao-yuan^{1,2}, MA Zhi-hong^{1,2}, LU An-xiang^{1,2}, WEI Li³, YAN Lian-bo³

(1.Beijing Research Center of Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China; 2.Risk Assessment Laboratory for Agro-products of the Ministry of Agriculture(Beijing), Beijing 100097, China; 3 Agricultural Science Institute in Shunyi District, Beijing 101300, China)

Abstract: Soil heavy metals possess latent and long-term risks to human health. Here we collected 412 surface soil samples from agricultural soils of Shunyi district of Beijing and used the index of geo-accumulation(I_{geo}) and potential ecological risk index(RI) to evaluate the ecological risks of heavy metal pollution in soils. The results revealed that the average I_{geo} values of heavy metal Cu, Zn, Pb, Cd, As and Hg were less than 0, belonging non-pollution. However, there were 10% of soil samples in which I_{geo} of Cu, Cd and Hg were at low or moderate pollution levels. The average RI value of all soil samples was 93.07 in studied area, having mild ecological hazards. About 95.6%, 3.9% and 0.5% of soil samples were in mild, moderate and high ecological hazards, respectively. For Hg and Cd, more than 20% of soil samples were in moderate ecological hazards. The mean value of RI was 109.55 in vegetable soils and 14.3% of soil samples were at medium pollution level. Spatial distribution of ecological risk indices of heavy metals in soils of studied area indicated that Chaobai, Xiaozhong and Jinji rivers had the ecological risk.

Keywords: soil heavy metal; index of geo-accumulation(I_{geo}); potential ecological risk index(RI); ecological risk assessment

土壤是农业生态系统的重要组成部分,土壤作为重要的“汇”,接纳了环境中大约 90%来自各方面的污染物^[1]。随着工业化、城市化的快速发展,土壤环境污染问题日渐突出,重金属污染因具有潜伏

性、不可抗逆性和长期性以及影响后果严重等特点而受到高度重视^[2]。土壤中的重金属能从土壤迁移到其他生态系统组成部分中,如地下水、植物等,并被作物吸收和富集^[3-6],最终通过食物链影响人类健康^[7-8],从而影响生态系统的整体结构与功能。重金属污染评价方法较多,从环境地球化学角度出发,应用于土壤重金属污染评价的主要有单因子指数评价法、内梅罗综合污染指数法^[9]、地积累指数法^[10]和生态危害指数法^[11]。前两者是根据国家相关标准和行业标准,将重金属作为污染因子评价指标进行土壤环境质量评价^[12-14];后两者偏重于用来评估土壤或沉积物中重金属污染的生态环境效应^[15-16]。

收稿日期:2014-09-11

基金项目:北京市农林科学院青年科研基金项目(QNJJ201312);北京市农林科学院科技创新能力建设专项农产品质量与农田环境基础数据平台建设项目(KJCX20140302);2014 年北京蔬菜产品质量安全风险评估(GJFP2014001)

作者简介:韩 平(1981—),男,陕西蒲城人,在读博士,助理研究员,主要从事农产品质量检测与农田环境监测技术研究。

E-mail:hanping1016@163.com

* 通信作者:王纪华 E-mail:Wangjh@nrcita.org.cn

北京市正在发展都市型现代农业, 农业类型由数量型向质量型转变^[12]。农业已不是单一的提供农产品, 其生态地位和作用日益突出。李晓秀等^[12]在北京地区基本农田采取土壤样本 45 份, 按照农田土壤环境质量标准进行单因子评价和综合评价, 结果显示基本农田土壤环境质量属于清洁和安全范围; 霍霄妮等^[17]采取土壤样本 385 份, 从综合评价结果来说, 综合污染指数处于 0.96~2.16 之间, 几乎所有的土壤样点都属于轻度污染状态。近年来, 本课题组在北京市顺义区农用地进行网格化取样和土壤样本中重金属元素检测分析, 在获取数据的基础上, 从土壤中重金属空间分布、来源^[18]和土壤环境质量评价^[14]等方面进行了相关研究工作。

本文从土壤重金属污染的生态环境效应评价思路出发, 采用土壤中重金属的地积累指数和潜在生态危害指数作为污染评价指标, 对研究区农用地土壤重金属污染水平进行评价。一方面, 有助于评估农业生产活动对土壤生态环境的影响; 另一方面, 对北京郊区农田土壤重金属的控制、监管以及农业产业结构调整具有指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

顺义区位于北京市东北部, 城区距市中心 30 km, 北纬 40°00′至 40°18′之间, 东经 116°28′至 116°59′之间。地处燕山南麓, 华北平原北端, 属潮白河冲积扇下段。地势北高南低, 坡度 6/10 000。区境东西长

45 km, 南北宽 30 km, 总面积 1020 km², 平原面积占 95.7%。耕地面积 404.05 km², 占土地总面积的 39.56%。区域内有大小河流 20 余条, 分属北运河、潮白河、蓟运河 3 个水系, 河道总长 232 km。蓟运河水系主要支流金鸡河是顺义东南部的的主要泄洪、排污河道, 小中河是顺义西南部的主要泄洪、排污河道。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2009 年, 在获得重金属含量结果后, 于 2011 年对部分含量较高的样点进行原位置追踪采样。取样点的位置和样点数根据田块的利用方式和面积进行确定, 每个取样点采用 GPS 米级定位, 记录空间坐标, 共采集土壤样本 412 个(图 1)。采样点主要分布于水浇地(小麦、玉米)、果园、苗圃、菜地、设施农业用地、荒地及林地等田块。每个样点在直径 10 m 范围内选择 3~5 个 0~20 cm 耕层土壤混合, 按四分法取土壤样品 1.0 kg。土壤在室内风干, 磨碎后过 100 目尼龙网筛用来测定各重金属元素。样品的混合、装袋、研磨等前处理都采用木头、陶瓷或玛瑙材质用具。

土壤样品经 HNO₃-HCl-H₂O₂ 消解^[19]用来测定土壤中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量, 采用原子吸收光谱仪(SOLAAR M6, 美国 Thermo 公司)分析消解液中重金属含量。Cu、Zn 和 Pb 元素采用火焰原子吸收法, Cd 采用石墨炉原子吸收法测定; 土壤样品在 100 °C 采用 HNO₃:HCl(10 mL, 1:1 V/V)消解 2 h 用来测定土壤中 As 和 Hg^[20], 采用原子荧光光谱仪(AFS 830, 中国吉天)分析。

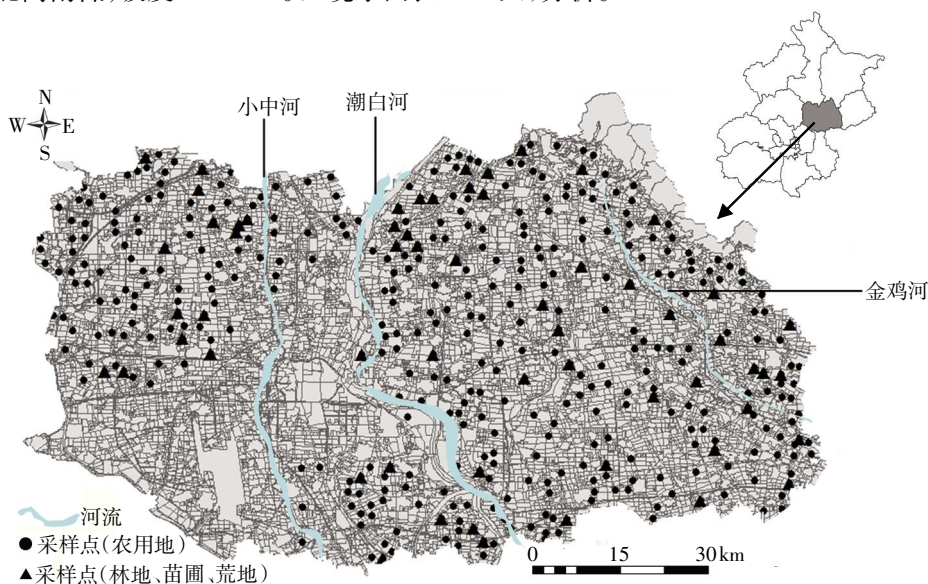


图 1 研究区采样点分布

Figure 1 Location of sample sites in studied area

1.3 评价方法

1.3.1 地积累指数法

该方法由德国科学家 Muller 提出,用于定量评价沉积物中的重金属污染的程度^[21]。在评价过程中除了考虑人为污染因素、环境地球化学背景值外,还考虑到自然成岩作用引起背景值变动的因素^[22]。

$$I_{geo}=\log_2[C_i/(K\times C_n^i)] \quad (1)$$

式中: C_i^i 为元素*i*在沉积物中的含量; C_n^i 为沉积物中该元素的地球化学背景值(表 1); K 是为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。

计算结果按照地积累指数评价标准划分污染等级(表 2)。

1.3.2 潜在生态危害指数法

该方法由瑞典科学家 Hakanson 提出^[11],是根据重金属性质及其在环境中迁移转化沉积等行为特点,从沉积学角度提出来的,将重金属含量、生态效应、环境效应和毒理学联系在一起进行评价。根据该方法,某一区域沉积物中第*i*种金属的潜在生态风险系数(E_i^i)及沉积物中多种重金属的潜在生态风险指数 RI 可分别表示为:

$$E_i^i=T_i^i\times C_f^i \quad (2)$$

$$RI=\sum E_i^i=\sum T_i^i\times C_f^i=\sum T_i^i\times C_s^i=C_n^i \quad (3)$$

式中: T_i^i 为重金属*i*的毒性响应系数(表 1); C_f^i 为重金属*i*相对于沉积物背景值的污染系数; C_s^i 为表层沉积物重金属*i*的实测含量; C_n^i 为沉积物中重金属*i*的背景参考值。

表 1 北京地区重金属的背景值^[23-24]及其毒性系数^[10]

Table 1 Background values(C_n^i) and toxicity coefficients(T_i^i) of heavy metals in soils of Beijing area

项目	As	Hg	Zn	Cu	Cd	Pb
背景值 $C_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.09	0.057 9	57.5	18.7	0.119	24.6
毒性系数 T_i^i	10	40	1	5	30	5

表 2 地积累指数(I_{geo})分级标准^[10]

Table 2 Criteria for index of geo-accumulation(I_{geo})

项目	分级	污染程度
$I_{geo}\leq 0$	0	无污染
$0<I_{geo}\leq 1$	1	轻度-中等污染
$1<I_{geo}\leq 2$	2	中等污染
$2<I_{geo}\leq 3$	3	中等-强污染
$3<I_{geo}\leq 4$	4	强污染
$4<I_{geo}\leq 5$	5	强污染-极严重污染
$5<I_{geo}\leq 10$	6	极严重污染

根据潜在危害指数的评价标准(表 3)判断土壤污染状况。

1.4 数据处理

土壤重金属基本参数统计采用 SPSS18.0 分析,其他数据的处理采用 Excel 2007 进行分析。土壤重金属生态风险系数和生态风险指数空间分布图使用地理信息系统(GIS)软件(ArcGIS 9.3)中的空间分析工具,采用反距离加权(IDW)插值方法进行制作。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属基本参数统计描述

土壤重金属基本参数统计描述如表 4 所示。结果表明,土壤样本中 As、Cd、Hg、Cu、Pb 和 Zn 含量平均值分别为 7.85、0.136、0.073、22.43、20.38、69.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与李晓秀等^[12]2006 年调查研究的北京地区农田土壤重金属平均值相比,本研究中 Hg 元素明显较高,其他元素含量平均值相接近;从重金属含量值的数理统计上分析,Hg 元素在农田土壤中积累趋势显著。这 6 种重金属的变异系数在 0.240~0.674 范围内,属于中等变异程度,其中 Hg 和 Cd 元素变异程度相对较大,表明其受外源因子干扰影响较大。

2.2 土壤重金属地积累指数

据 412 份土壤样本中重金属含量分析结果计算得到其地积累指数(I_{geo})。通过统计分析,结果如表 5

表 3 潜在生态风险系数(E_i)和潜在生态风险指数(RI)分级标准^[11]

Table 3 Criteria for potential ecological risk coefficients(E_i) and potential ecological risk indices(RI)

潜在生态风险系数 E_i	潜在生态风险指数 RI	污染程度
<40	<150	轻度生态危害
$40\leq E_i<80$	$150\leq E_i<300$	中等生态危害
$80\leq E_i<160$	$300\leq E_i<600$	强度生态危害
$160\leq E_i<320$	≥ 600	很强生态危害
≥ 320		极度生态危害

表 4 土壤重金属基本参数统计描述

Table 4 Descriptive statistic parameters of soil heavy metals ($n=412$)

重金属	算术平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
As	7.85	3.37	17.34	0.270
Cd	0.136	0.015	0.469	0.449
Hg	0.073	0.004	0.490	0.674
Cu	22.43	11.80	72.48	0.280
Pb	20.38	10.33	20.02	0.260
Zn	69.75	37.48	136.68	0.240

表5 土壤重金属地积累指数(I_{geo})
Table 5 I_{geo} of heavy metals in soils($n=412$)

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	污染分级比例/%			
					0级	1级	2级	3级
As	-1.66	0.71	-0.49	0.38	91.5	8.5	0	0
Hg	-5.06	2.03	-1.00	0.93	87.1	12.1	0.5	0.3
Cu	-1.25	1.37	-0.37	0.35	90.0	9.7	0.3	0
Zn	-2.11	0.66	-0.35	0.36	87.1	12.9	0	0
Pb	-1.84	0.02	-0.91	0.38	99.8	0.2	0	0
Cd	-3.54	1.39	-0.51	0.60	83.0	15.5	1.5	0

所示。土壤6种重金属元素的地积累指数平均值均小于0,处于无污染程度;但其最大值均大于0,特别是Hg、Cu和Cd地积累指数最大值超过1,达到了中等污染程度。从土壤样本污染分级比例分析可知,Cd元素污染比例最大,达17.0%,其中15.5%的土壤样本属于“轻度-中等污染”,1.5%的土壤样本达到“中等污染”;Hg元素污染比例亦达到12.9%,并且有0.3%的土壤样本处于“中等-强污染”程度;Pb元素的污染比例最低,仅为0.2%。从总体样本中各元素的统计分析可知,Hg和Cd元素的 I_{geo} 标准差(S.D.)较大,表明土壤样本中这两种元素 I_{geo} 值的离散程度较大,即变异程度较大。

2.3 土壤重金属潜在生态风险

土壤重金属潜在生态风险系数(Ei)如表6所示。土壤中6种重金属元素的潜在生态风险系数的平均值均小于40,均属于轻度生态危害。As、Cu、Zn和Pb元素的潜在生态风险系数的最大值也小于40,表明所获得的412份土壤样本中,这4种元素的潜在生态风险均属于轻度生态危害,对研究区土壤生态污染的贡献率较低;Cd和Hg的潜在生态风险系数的最大值分别达到118.18和245.00,平均值也接近中等生态危害。按照污染程度分级,Hg元素潜在生态风险系数达到中等、强度和很强生态危害的比例分别为

表6 土壤重金属生态风险系数(Ei)
Table 6 Ecological risk coefficients(Ei) of heavy metals in soils($n=412$)

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	污染程度比例/%			
					轻度	中等	强度	很强
As	4.75	24.45	11.07	3.01	100	0	0	0
Hg	1.80	245.00	36.33	24.50	65.5	30.6	3.4	0.5
Cu	3.15	19.38	6.00	1.69	100	0	0	0
Zn	0.35	2.38	1.21	0.29	100	0	0	0
Pb	2.10	7.62	4.14	1.06	100	0	0	0
Cd	3.87	118.18	34.32	15.42	75.2	23.1	1.7	0

30.6%、3.4%和0.5%;Cd元素潜在生态风险系数达到中等、强度生态危害的比例分别为23.1%和1.7%。这表明Cd和Hg元素对研究区土壤生态污染的贡献率较高。从不同土地利用类型中土壤样本的土壤重金属生态风险指数(RI)分析(表7),菜地土壤重金属生态风险指数平均值最大,达到中等污染等级的比例为14.3%;荒地土壤重金属生态风险指数平均值最小,且每个样点的污染程度均属于轻度污染。按照样点土壤重金属生态风险指数超出轻度污染等级的比例大小,研究区不同土地利用类型的土壤重金属生态风险从高到低依次为:菜地、设施农业、林地、果园、苗圃、水浇地、荒地。

土壤重金属生态风险指数(RI)平均值为93.07,属于轻度生态危害;轻度、中等和强度生态危害的比例分别为95.6%、3.9%和0.5%(表8)。本研究结果与霍霄妮等^[17]通过综合污染指数法对北京农业土壤重金属污染水平进行评价结果一致。虽然研究方法和判定标准不尽相同,但两种评价结果均表明,本地区土壤重金属污染水平均在轻度污染状态。韩平等^[14]采用内梅罗综合指数法对本地区土壤重金属质量评价的结果显示,该区土壤重金属水平在“警戒线”级,尚未达到“轻度污染水平”,说明本研究采用的潜在生态危害指数法较内梅罗综合指数法更为严格。

2.4 土壤重金属生态风险系数和风险指数空间分布

如图2所示,土壤中重金属Hg和Cd元素的潜在生态风险均有达到中等生态危害以上水平。其中以

表7 不同土地利用类型土壤重金属生态风险指数(RI)
Table 7 Ecological risk indices(RI) of heavy metals under different soil use types

土地利用类型	最小值	最大值	平均值	标准差	污染程度比例/%		
					轻度	中等	强度
水浇地($n=237$)	38.04	341.31	91.63	33.8	97.1	2.1	0.8
果园($n=61$)	43.08	168.57	86.66	25.02	96.7	3.3	0
苗圃($n=30$)	65.16	155.80	102.11	23.67	96.7	3.3	0
菜地($n=41$)	62.71	202.39	109.55	35.88	85.7	14.3	0
设施农业($n=13$)	61.26	162.44	93.98	29.46	92.3	7.7	0
林地($n=17$)	77.67	153.23	101.52	22.53	94.1	5.9	0
荒地($n=13$)	50.66	77.29	64.60	9.59	100	0	0

表8 研究区土壤重金属生态风险指数(RI)
Table 8 Ecological risk indices(RI) of heavy metals in soils($n=412$)

最小值	最大值	平均值	标准差	污染程度比例/%		
				轻度	中等	强度
38.04	341.33	93.07	32.08	95.6	3.9	0.5

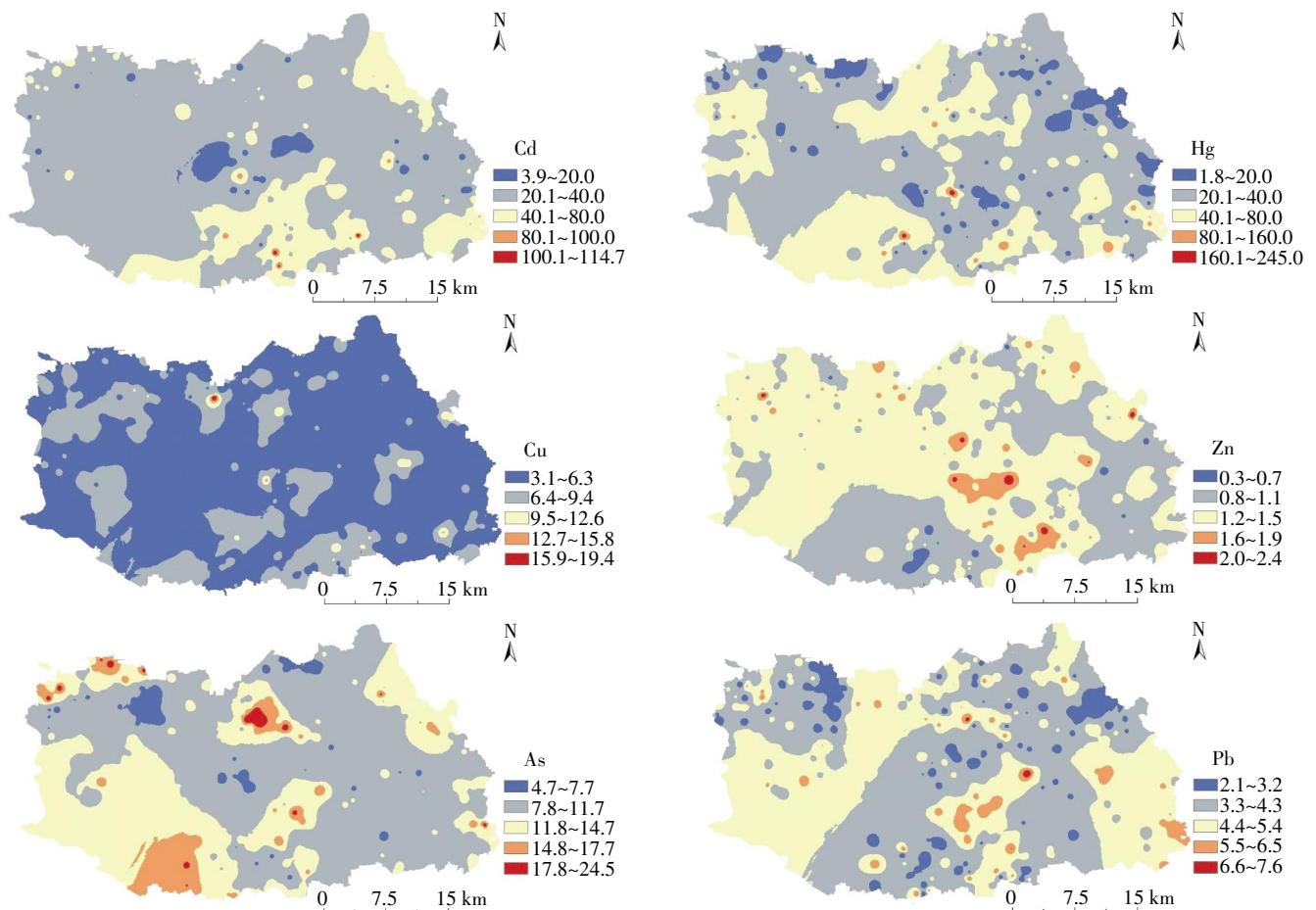


图 2 研究区土壤重金属生态风险系数空间分布

Figure 2 Spatial distribution of ecological risk coefficients of heavy metals in soils of studied area

Hg 元素较为突出,有较大区域达到了中等、强度和很强生态危害,主要分布在南部、中北部和西部,位于境内潮白河北段和南段区域、小中河南段区域和境内蓟运河水系的主要支流金鸡河区域;土壤重金属 Cd 元素也有较大区域达到了中等和强度生态危害,主要分布在中南部、东南部和东北部,位于境内潮白河南段、小中河南段区域和境内蓟运河水系的主要支流金鸡河区域。其他元素的潜在生态风险系数的最大值均小于 40,表明其潜在生态风险均属于轻度生态危害,但为了显示不同区域的潜在生态风险程度,在插值作图过程中将其潜在生态风险系数分五级进行显示,其生态危害水平较高区域主要位于境内潮白河流域,呈零星点状分布。

如图 3 所示,大部分区域土壤重金属生态风险处于轻度生态危害水平;中等生态危害和强度生态危害风险的区域有零星点状分布,这些点状分布主要集中在研究区中北部、南部区域,分别位于境内潮白河上、下游、小中河区域,境内金鸡河区域。综合图 2 和图 3

进行分析可知,研究区土壤重金属生态风险主要来源于重金属 Hg 元素和 Cd 元素,应加强对这两种元素的控制,以避免土壤生态环境进一步恶化。

3 讨论

赵忠海^[25]在顺义区国土资源与生态环境大调查的基础上,对顺义区内主要河流的污染情况进行了初步的调查与评价,水质评价指标包括水中高锰酸钾指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)、悬浮物(SS)、氨氮(NH₃-N)等指标。结果表明,1995—1999 年间,潮白河水质污染程度为轻度污染,金鸡河为中度污染到重度污染,小中河为重度污染。顺义区重要的工业废水污染源主要分布于温榆河—小中河—潮白河一代,而金鸡河主要接纳养殖场和屠宰点滥排粪便等污水^[25]。此项水质调查和评价没有测定水中重金属含量,但相关研究报道表明生活及工业污水中含有一定量的重金属,使用污水灌溉将导致土壤中重金属不同程度的累积^[26-29]。从研究区土壤重金属生态风险指数分布来看,

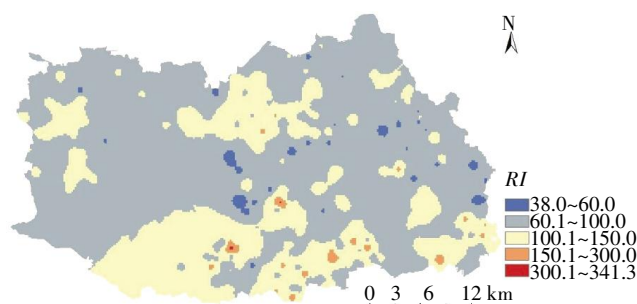


图3 研究区土壤重金属生态风险指数空间分布
Figure 3 Spatial distribution of ecological risk indices of heavy metals in soils of studied area

中等生态危害和强度生态危害风险的区域主要位于境内潮白河、小中河以及金鸡河区域,从而推测工业废水和养殖业废水的排放对区域土壤生态环境产生了一定的影响。朱宇恩等^[30]在北京东南城郊凉水河、凤港减河、北运河区域农田采集土壤样本进行分析的研究结果表明,区域内土壤重金属 Cu、Cd、Cr、Pb 和 Zn 的均值高于北京土壤元素背景值,已出现累积现象。杨军等^[26]研究发现,在这一区域土壤中重金属 Hg 元素的几何平均值为北京市土壤 Hg 背景值的 2.5 倍,超过基线值样点高达 34.5%,Hg、Pb、Cu、As 含量分别增加了 11.4%、40%、26% 和 9.0%。孟涛等^[31]在污灌区上游部分的天津武清区北部农产品商品基地采集土壤样本,研究结果表明 Cu 含量以排污河为中心向两侧递减,Zn 和 As 含量的高值主要分布在排污河附近,Pb 和 Hg 高含量区域与污灌范围明显关联。另外,从研究区采样点的分布以及样点属性来看,在土壤重金属生态风险较高区域,农业用地和非农业用地均有分布,应当更加重视土壤重金属生态污染风险带来的农产品污染,下一步拟开展这些区域的农产品重金属污染风险研究,以期开展相关重金属污染防治提供数据支持。

土壤重金属生态风险评估所使用的两种方法的评价结果不尽相同。土壤重金属地积累指数评价结果显示,对于 6 种重金属元素,80% 以上的土壤样点均处于无污染程度,处于中等污染程度的样点比例很小。从重金属元素所有样点的地积累指数平均值来看,从小到大排序的结果为 $Hg < Pb < Cd < As < Zn < Cu$,均有超过 10% 的土壤样本处于 Cd、Zn 和 Hg “轻度-中等污染”和“中等污染”。土壤重金属生态风险系数评价结果显示,Hg 和 Cd 元素达到中等生态危害的比例达到 20% 以上,其他元素均处于轻度生态危害水平。按照每种元素所有样点的潜在风险系数平均值,从小

到大排序的结果为 $Zn < Pb < Cu < As < Cd < Hg$ 。地积累指数法引入的系数 K 为 1.5,每种元素均相同;生态风险系数评价法引入的毒性响应系数因不同元素的环境毒性不同而存在较大差异。另外,从评价结果来看,地积累指数法仅对每种元素进行分级评价,只可以反映单个元素的污染情况,对全面评价土壤重金属污染风险尚有欠缺;生态危害指数法则更为严格,在评价过程中不仅可以对单个元素进行生态危害指数评价,而且可以对同一样本的多种重金属的生态危害系数进行加权,进而综合反映重金属对生态环境影响。

4 结论

(1)依据土壤重金属地积累指数的评价结果,研究区 6 种重金属元素含量的平均值尚在“无污染”范围内,但均有超过 10% 的土壤样本处于 Hg、Zn 和 Cd “轻度-中等污染”和“中等污染”。需严格控制这几种元素的人为引入,以避免累积对土壤生态环境的破坏。

(2)依据土壤重金属潜在生态危害指数的评价结果,在 6 种重金属元素中,研究区均有超过 20% 的土壤样本处于 Hg 和 Cd 中等生态危害以上的水平。从不同土地利用类型中土壤样本的土壤重金属生态风险指数(RI)分析,菜地土壤重金属生态风险指数平均值最大,达到中等污染等级的比例较高;土壤重金属潜在生态系数和生态指数的空间分布特征分析表明,研究区主要的几条河流,如潮白河、小中河和金鸡河对其周边土壤生态环境的影响较大,故应当加大对其周边排污企业或农场的管理和约束。

参考文献:

- [1] 陈 煌, 郑袁明, 陈同斌. 面向应用的土壤重金属信息系统 (SHMIS): 以北京市为例[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 272-280.
CHEN Huang, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin. Development of soil heavy metals information system: A case study on Beijing[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(3): 272-280.
- [2] 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1948-1952.
WANG Zheng-zhong, ZHANG You-mei, DENG Ji-fu, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1948-1952.
- [3] 陈 燕, 刘晚香, 郑小林, 等. 玉米植株对重金属的富集与分布[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 93-95.
CHEN Yan, LIU Wan-gou, ZHENG Xiao-lin, et al. Metallic accumulation and distribution in maize plant[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 93-95.
- [4] 关共凑, 徐 颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 315-318.
GUAN Gong-cou, XU Song, HUANG Jin-guo. The regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system

- [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):315-318.
- [5] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, et al. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang lead/zinc mine, Guangdong, China[J]. *Environment international*, 2004, 30(7):883-889.
- [6] Voutsas D, Grimanis A, Samara C. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94(3):325-335.
- [7] Zhu Y, Zhao Y, Sun K, et al. Heavy metals in wheat grain and soil: Assessment of the potential health risk for inhabitants in a sewage-irrigated area of Beijing, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, 20(5):1109-1116.
- [8] 隋建红, 吴璇, 崔岩山. 土壤重金属迁移模拟研究的现状与展望[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6):197-200.
- SUI Hong-jian, WU Xuan, CUI Yan-shan. Modeling heavy metal movement in soil, review and further study directions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6):197-200.
- [9] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- LI Zuo-yong, DING Jing, PENG Li-hong. *Environment Quality Evaluation Principles and Methods*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [10] Forstner U. Lecture notes in earth sciences(contaminated sediments) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989:107-109.
- [11] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [12] 李晓秀, 陆安祥, 王纪华, 等. 北京地区基本农田土壤环境质量分析与评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2):60-63.
- LI Xiao-xiu, LU An-xiang, WANG Ji-hua, et al. Analysis and assessment of soil environmental quality of some farmlands in Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2):60-63.
- [13] 息朝庄, 戴塔根, 黄丹艳. 湖南株洲市土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 中国地质, 2008, 35(3):524-530.
- XI Chao-zhuang, DAI Ta-gen, HUANG Dan-yan. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soils in Zhuzhou, Hunan[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3):524-530.
- [14] 韩平, 王纪华, 陆安祥, 等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1):106-112.
- HAN Ping, WANG Ji-hua, LU An-xiang, et al. Distribution and environment quality evaluation of heavy metals in soil in Shunyi of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1):106-112.
- [15] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):289-297.
- LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, LI Guo-xue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):289-297.
- [16] 尤冬梅, 王纪华, 马智宏, 等. 北京郊区小尺度农产品产地土壤重金属污染性评价[J]. 上海农业学报, 2011, 27(3):89-93.
- YOU Dong-mei, WANG Ji-hua, MA Zhi-hong, et al. Assessment of heavy metal pollution of small scale farmland in Beijing Suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2011, 27(3):89-93.
- [17] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京市农业土壤重金属状态评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):66-71.
- HUO Xiao-ni, LI Hong, SUN Dan-feng, et al. Status assessment of heavy metals in Beijing agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):66-71.
- [18] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425, 66-74.
- [19] United States Environmental Protection Agency. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges and soils[S]. USEPA, 1996.
- [20] Lacerda L D, de Souza M, Ribeiro M G. The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta. Southern Amazon[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 129(2):247-255.
- [21] Muller G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2:108-118.
- [22] 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 2006, 35(6):629-638.
- YAO Zhi-gang, BAO Zheng-yu, GAO Pu. Environmental geochemistry of heavy metals in sediments of Dongting Lake[J]. *Geochimica*, 2006, 35(6):629-638.
- [23] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [24] 夏增禄, 李森照, 李延芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- XIA Zeng-lu, LI Sen-zhao, LI Yan-fang, et al. Soil element background value and its research methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987.
- [25] 赵忠海. 北京市顺义区主要河流污染情况的初步调查[J]. 北京地质, 2001, 13(4):36-42.
- ZHAO Zhong-hai. Preliminary investigate on situation of main river pollution in Shunyi County Beijing[J]. *Beijing Geology*, 2001, 13(4):36-42.
- [26] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9):1175-1181.
- YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1175-1181.
- [27] Bansal O P. Heavy metal pollution of soils and plants due to sewage irrigation[J]. *Indian Environmental Health*, 1998, 40:51-52.
- [28] Liang J T, Chen C C, Song X L, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil and plants from Dunhua sewage irrigation area[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2011, 6(11):5314-5324.
- [29] Xue Z J, Liu S Q, Liu Y L, et al. Health risk assessment of heavy metals for edible parts of vegetables grown in sewage-irrigated soils in suburbs of Baoding City, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(6):3503-3513.
- [30] 朱宇恩, 赵焯, 李强, 等. 北京城郊污灌土壤-小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):263-270.
- ZHU Yu-en, ZHAO Ye, LI Qiang, et al. Potential influences of heavy metal in soil-wheat(*Triticum aestivum*) system on human health: A case study of sewage irrigation area of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):263-270.
- [31] 孟涛, 周非, 聂庆华, 等. 污灌条件下农田土壤重金属的空间变异与模拟[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):867-872.
- MENG Tao, ZHOU Fei, NIE Qing-hua, et al. Spatial variation of heavy metal contents in farmland soils under permanent irrigation from polluted river water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):867-872.