

沈阳地区河流灌渠沿岸农田表层土壤中重金属的污染现状评价

吴学丽¹, 杨永亮^{1*}, 徐清¹, 黄园英¹, 路国慧¹, 何俊², 刘晓端¹

(1.国家地质实验测试中心, 中国地质科学院生态地球化学重点实验室, 北京 100037; 2.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:用地积累指数法和单因子内梅罗综合指数法研究了沈阳地区蒲河、浑河、细河以及沈抚灌渠周边农田表层土壤中 7 种重金属的污染状况。结果表明, 表层土壤中 As、Hg、Cd、Pb 和 Cr 的最大值出现在细河周边, Zn 和 Cu 的最大值出现在沈抚灌渠周边, Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 6 种重金属的平均含量在各个区域中差别明显。Cd 与 Hg 之间的相关系数高, 表明 Cd、Hg 来源相同; Pb、Zn、As、Cu 相关性好, 判定可能来自同一来源。地积累指数和单因子内梅罗综合指数计算结果表明, Cd、Hg、Zn 污染在这些河流地区较普遍, Pb、Cu、Cr 和 As 在部分地区受到污染, 部分细河沿岸农田土壤受到严重污染。

关键词:重金属; 表层土壤; 沈阳; 地积累指数法; 内梅罗综合指数法

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)02-0282-07

Evaluations of Heavy Metal Pollution Status in Surface Soils Adjacent to the Rivers and Irrigation Channel in Shenyang, China

WU Xue-li¹, YANG Yong-liang^{1*}, XU Qing¹, HUANG Yuan-ying¹, LU Guo-hui¹, HE Jun², LIU Xiao-duan¹

(1.Key Laboratory of Ecological Geochemistry of Chinese Academy of Geological Sciences, National Research Center of Geo-analysis, Beijing 100037, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The pollution situation of seven types of heavy metals in surface soils from the farmland adjacent to the Pu River, Hun River, Xi River and the Shenyang-Fushun Irrigation Channel were studied using the geo-accumulation index (I_{geo}) and the single factor Nemerow index (NI) methods. The maxima of As, Hg, Cd, Pb and Cr in surface soils occurred in the Xi River area and the maxima of Zn and Cu appeared in the Shenyang-Fushun irrigation channel. The average concentrations of Hg, Cd, Pb, Zn, Cu and Cr were significantly different in each studied area. Cd and Hg were highly correlated, suggesting a common source. Pb, Zn, As and Cu were highly correlated, suggesting another common source. I_{geo} and NI calculation showed that Cd, Hg, Zn pollution in studied areas was a common phenomenon and pollution of Pb, Cu, Cr and As also occurred in some river areas in Shenyang. The farmland soils nearby the Xi River were seriously polluted.

Keywords: heavy metals; surface soil; Shenyang; geo-accumulation index; Nemerow index

多年来, 由于工业三废的排放及城市生活垃圾、污泥及含重金属的农药、化肥的不合理使用, 使土壤受到污染, 其中, 重金属污染较为突出, 并导致农产品品质下降。农产品中积累的重金属可以通过食物链进入人体而给人类健康带来潜在的危害。沈阳市是我国的重要工业城市, 土壤污染问题较为突出。城市土壤环境作为大气、水体和固体废弃物中污染物的重要受

纳体, 重金属将在土壤中长期滞留, 对城市居民的健康造成潜在威胁。

沈阳市河流主要有浑河、蒲河、细河和沈抚灌渠, 其中细河和沈抚灌渠为城市生活污水及工业废水的排污河道^[1]。据报道, 沈阳西郊地区有些灌区中有的糙米含镉量竟高达 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]。沈阳地区已多次对浑河和细河进行了清淤, 取得了一定的成效, 但细河和沈抚灌渠仍是污染较严重的地表水。目前对沈阳污灌区土壤的重金属污染的报道较多^[3-5], 但对非污灌区农田土壤的报道较少^[6], 对蒲河以及周边农田重金属的研究还未见报道。为查明沈阳地区主要河流周边农田的污染现状, 本文对上述河流周边农田表层土壤中的

收稿日期: 2010-08-19

基金项目: 科技部国际合作项目(2006DFA21280)

作者简介: 吴学丽(1981—), 女, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为环境地球化学。E-mail: wuxueli-2000@yahoo.cn

* 通讯作者: 杨永亮 E-mail: ylyang2003@yahoo.com.cn

7种重金属/类金属(以下简称重金属)的空间分布特征及污染程度进行初步的讨论。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

于 2007 年 9 月和 2008 年 7 月下旬, 采用 GPS 定位, 沿浑河、蒲河、沈抚灌渠、细河流向自上而下, 采集农田表层 (0~15 cm) 样品共 42 个 (图 1)。以 1 m 为半径, 圆周形放射状交错采样, 每个混合样由 4 个样点组成, 为 1 kg 左右, 装入样袋, 注明采样信息。将样品粉碎后用 20 目尼龙筛过筛, 将小于 20 目筛孔部分收集到塑料瓶中, 过筛后样品重量大于 500 g。

1.2 土壤重金属的测定

采用原子荧光光谱法测定土壤中 As 和 Hg。试样用 50% (体积分数, 下同) 王水分解后, 在 20% 王水介质中直接上机测定 Hg。以硫脲-抗坏血酸为还原剂, 还原 As 为三价后上机测定。仪器为 AFS-820 双道原子荧光光度计 (北京吉天仪器有限公司)。测量条件: 负高压 300 V; 原子化器高度 8 mm; 灯电流 As 为 35 mA, Hg 为 35 mA; 载气流量 300 mL·min⁻¹; 屏蔽气流量 700 mL·min⁻¹。As 的方法检出限为 0.01 μg·g⁻¹, Hg 的方法检出限为 0.001 μg·g⁻¹。

采用 X-荧光光谱法测定土壤中 Cd、Cr、Cu、Fe、

Pb、Zn。采用粉末压片法制样,用天平称取 0.074 mm 的样品 4 g,放入模具中,用低压聚乙烯镶边垫底,在 247 MPa 的压力下压制成型。试样的外径为 40 mm,试样部分的内径为 32 mm。按上述条件设置仪器,通过机械手将样品置入机器内,计算机自动调出测试条件,测定强度,并进行基体效应和谱线重叠干扰的校正。

使用经验系数法和散射线内标法校正元素间的吸收-增强效应,用 X 射线荧光光谱仪对试样 Cd、Cr、Cu、Fe、Pb、Zn 6 个元素进行测定。仪器为帕纳科公司(荷兰)Magix Pro Pw2440 型 X 射线荧光光谱仪,端窗铑靶 X 线管、50 个位置的自动样品交换器,SuperQ 系统软件。

在重金属的分析过程中采用国家级标准样品以及福建二级标准样品进行全过程质量控制,8种元素的测定值均在国家标准参比物质的允许误差范围之内。分析质量要求按中国地质调查局地质调查技术标准《生态地球化学评价样品分析技术要求》^[7],各元素分析方法的技术指标均满足规定的要求。

2 结果与讨论

2.1 沈阳河流沿岸农田土壤重金属污染的分布状况

As、Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 重金属测定数据的统计属性见表 1,可以看出:农田表层土壤样品中($\text{pH} =$

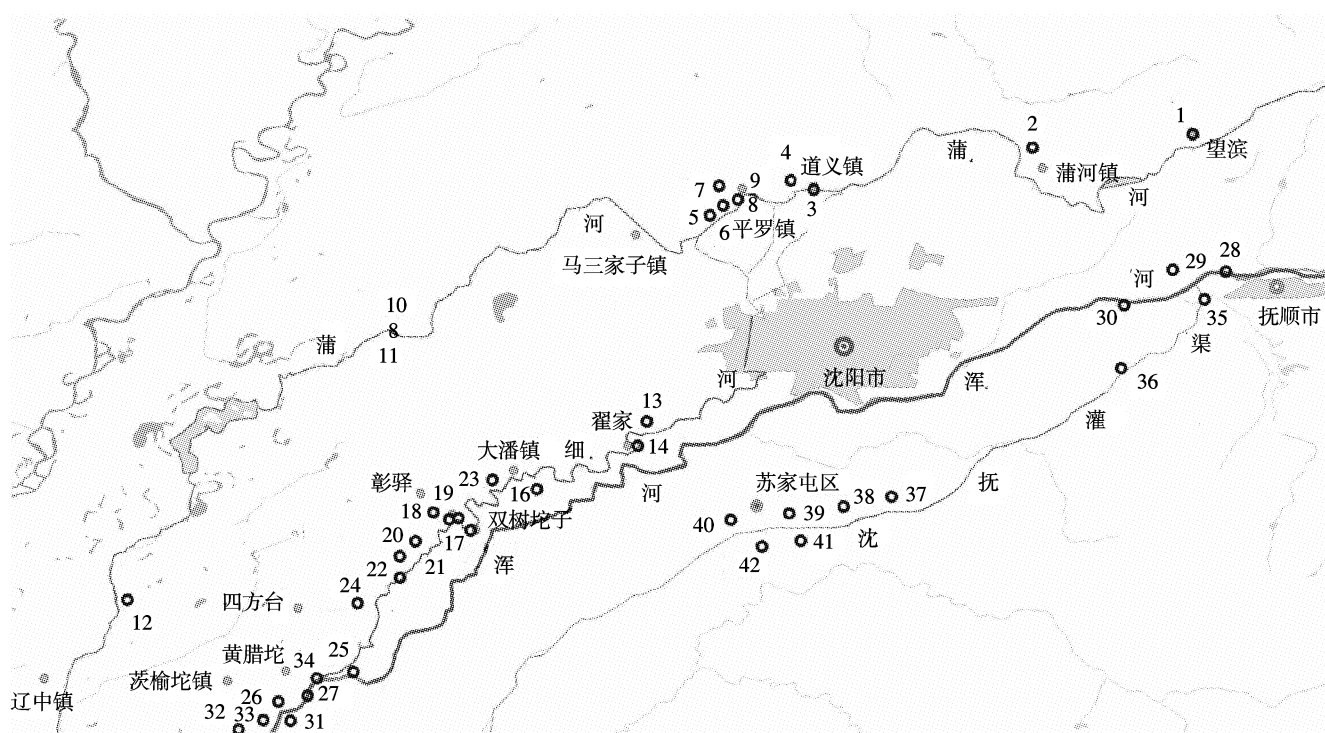


图 1 沈阳市主要河流周边农田表层土壤采样点分布图

Figure 1 Sampling locations of top-soils from the major watershed areas in Shenyang

6.5~7.5), Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 6 种重金属的平均含量在各个河流周边差别明显。细河周边部分农田土壤中 Cd 含量的平均值已经超过土壤质量标准(GB 15618—1995)的二级限值(表 1), 表明该地区 Cd 污染严重。

在 42 个表层土壤样品中, As、Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 的最大值几乎都出现在细河周边。其中 Hg、Cd 的含量分别为标准限值的 6.84 倍和 3.43 倍。浑河、蒲河和沈抚灌渠周边表层土壤中部分重金属也存在一定的超标现象。从图 2 和图 3 中可以明显看出细河周边土壤重金属含量的分布情况。其中彰驿地区 As、Hg、

Cd、Zn 的含量均明显高于其他地区, 翟家地区的 Cd 的含量也属于较高水平。细河和沈抚灌渠周边土壤中 Pb、Zn、Cu、Cr 存在着超标现象。

2.2 评价标准与方法

2.2.1 地积累指数法

地积累指数法是 Muller 于 1969 年提出^[8], 是一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标, 在欧洲被广泛采用。其计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (1.5 \times B_n)]$$

式中: C_n 为所研究元素实测含量, B_n 为土壤背景值^[9]。1.5 为一常数, 是对成岩作用可能会引起背景值的变

表 1 沈阳河流周边农田土壤中重金属含量及其与背景值和土壤质量标准的比较($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Heavy metals contents in surface soils from agriculture fields adjacent the major rivers in Shenyang and comparisons with geochemical background and national soil quality standard($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

野外编号	As	Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr
蒲河($n=12$)平均值	8.9	0.1	0.2	34.1	77.7	24.6	62.2
细河($n=15$)平均值	8.9	0.28	1.42	40.0	152.2	54.6	84.3
浑河($n=7$)平均	7.1	0.1	0.3	25.1	88.1	34.7	89.0
沈抚灌渠($n=8$)平均值	11.4	0.253	0.37	42.2	121.9	47.9	88.1
辽宁土壤背景值	8.8	0.037	0.108	21.4	55.4	19.8	57.9
国家土壤质量标准限值(一级)	15	0.15	0.20	35	100	30	90
国家土壤质量标准限值(二级)	25	0.5	0.6	300	250	100	300

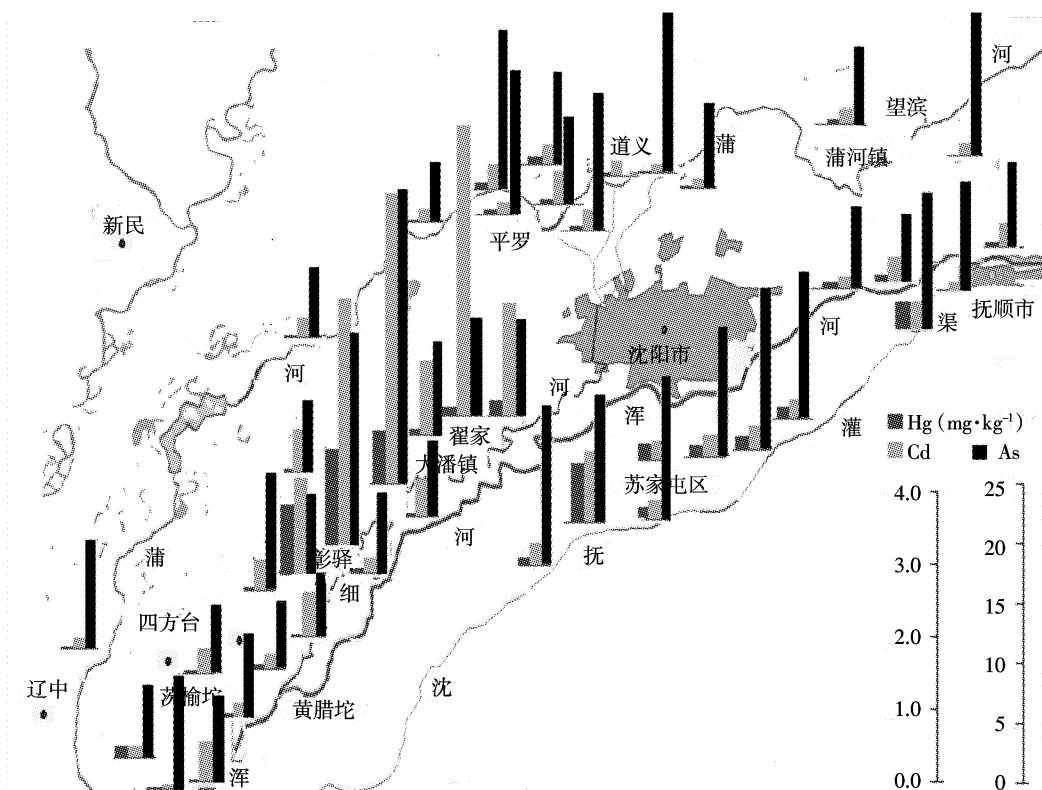


图 2 沈阳河流沿岸表层土壤中 As、Hg、Cd 分布情况

Figure 2 Distributions of As, Hg, and Cd in surface soils from different river discharge areas

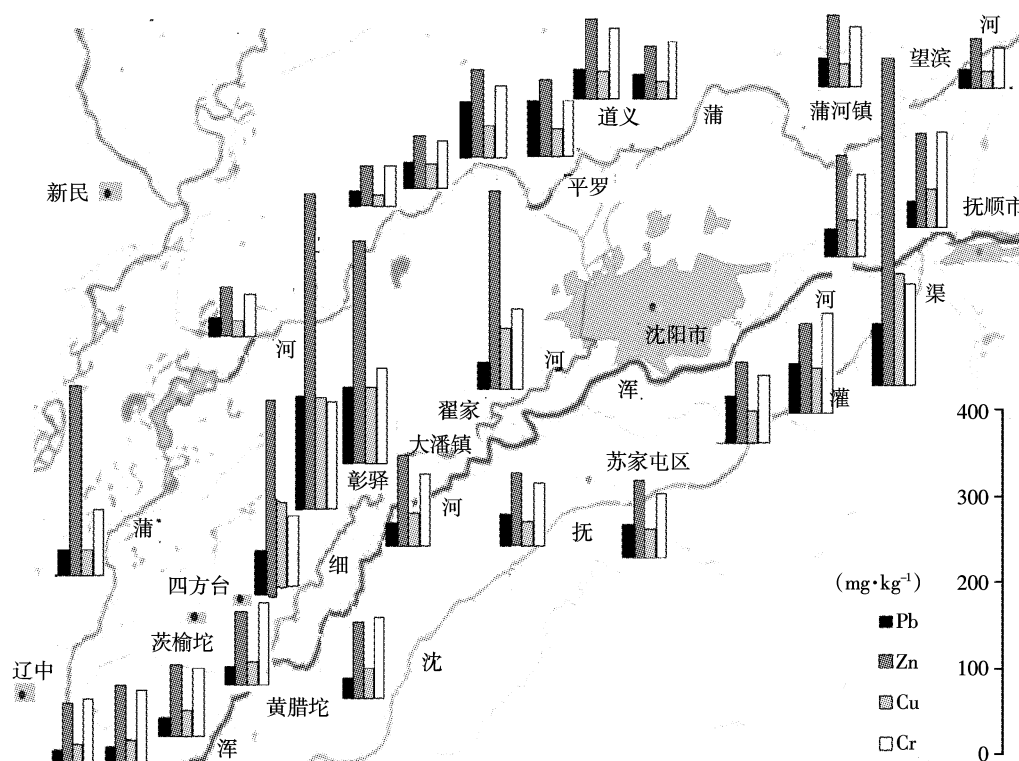


图3 沈阳河流沿岸表层土壤中 Pb、Zn、Cu、Cr 分布情况

Figure 3 Distributions of Pb, Zn, Cu and Cr in surface soils from different river discharge areas

动的修正。地积累指数法定量分级标准如下: $I_{geo} < 0$ 时,等级为 0,为无污染;0~1 等级为 1,为轻度污染;1~2 等级为 2,为中等污染;2~3 等级为 3,为中~强污染;3~4 等级为 4,为强污染;>4 时等级为 5~6,为强污染-极严重污染。

采用辽宁土壤背景值^[9]为基准(表 1),计算出各元素平均地积累指数(表 2)。Cd 污染样品最多, $I_{geo} > 0$ 的样品占全部样品的 88.1%;其次是 Hg、Zn 和 Cu, $I_{geo} > 0$ 的样品分别占样品总数的 73.8%、71.4%和

66.7%;Pb 和 Cr $I_{geo} > 0$ 的样品占样品总数小于 50%;As 污染样品最少,仅占 7.14%。

Cd 的 I_{geo} 的平均值为 1.22,分级为 2,污染程度为中等污染,其中值得注意的是 Cd 的 I_{geo} 的最大值为 3.43,已经达到分级 4(强污染)污染程度。Hg、Zn、Cu 元素的 I_{geo} 平均值均处于分级 0~1 的范围之内,为轻度污染,As、Pb、Cr 的 I_{geo} 平均值均处于分级 0 的范围之内,总体来讲处于无污染的情况,个别点呈现轻度污染、极少数点为中等污染。图 4 为不同河流

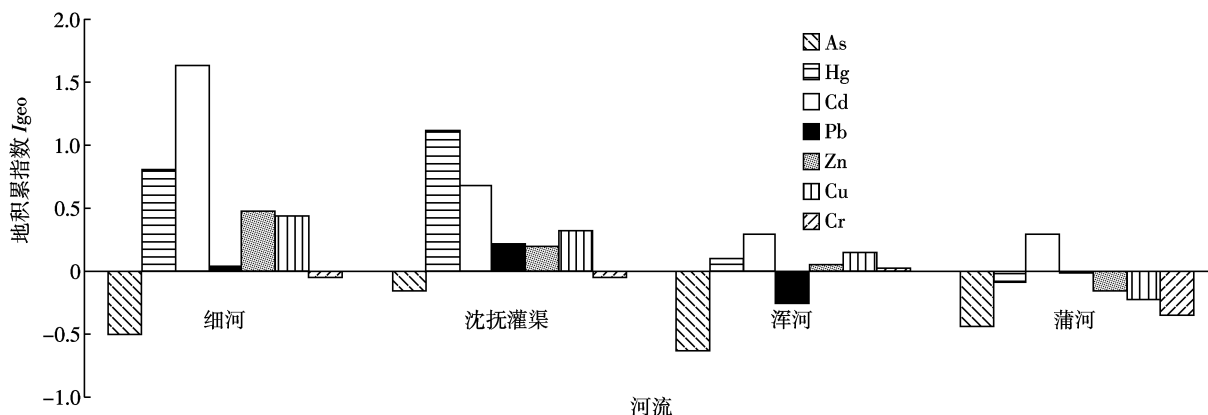


图4 沈阳地区不同河流周边农田表层土壤中 7 种重金属的地积累指数

Figure 4 Geo-accumulative index(I_{geo}) of heavy metals in top-soils from farm areas adjacent to the rivers

周边农田土壤种重金属的 $I_{geo}>0$ 所占比例柱状图,可以看出 Cd、Hg、Zn 污染在沈阳河流周边农田表层土壤中是普遍现象,而 Pb、Cu、Cr 在部分地区存在污染现象。

2.2.2 单因子内梅罗综合指数综合污染评价

内梅罗指数法(Nemerow's Pollution Index)^[10-11]兼顾了单因子污染指数的平均值和最高值,可以突出污染较重的污染物的作用,其计算公式如下:

$$NI = \left[\frac{\left[\frac{1}{n} \sum \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \right]^2 + \left[\max \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \right]^2}{2} \right]^{1/2}$$

式中:NI 为内梅罗指数;n 为指标个数; C_i 为重金属 i 的实际监测值; S_i 为重金属 i 的标准值。

本文采用国家土壤环境质量标准(GB/T 14848—1993)一级限值为参比值。当 $NI \leq 0.5$ 时,污染等级为

安全级; $0.5 < NI \leq 0.7$,污染等级为清洁; $0.7 < NI \leq 1.0$,污染等级为警戒级; $1.0 < NI \leq 2.0$,污染等级为污染; $2.0 < NI \leq 3.0$ 为中等污染; $NI > 3.0$ 为严重污染^[12]。对沈阳河流周边农田表层土壤的 7 种重金属元素进行的污染状况的内梅罗指数法评价结果详见表 3。42 个样品中,8 个样点 $NI < 0.7$,占样点数的 19.05%,处于安全、清洁无污染水平;15 个样点 $0.7 < NI \leq 1.0$,占样点数的 35.7%,处于警戒级、土壤质量尚清洁水平; $1 < NI \leq 2$ 的为 14 个,占总数的 30.95%,为土壤轻污染;重污染的为 5 个,占总数的 11.9%。

Cd 在蒲河、浑河、细河和沈抚灌渠周边农田表层土壤中污染指数的最大值分别为 2.26、2.85、25.0 和 4.90。在这 4 条河流周边区域都有不同程度的污染,其中在细河周边土壤中属于严重污染。Cu 在细河、浑河和沈抚灌渠周边土壤中也有轻度污染情况,Hg、

表 2 沈阳河流附近农田表层土壤中重金属的地积累指数(I_{geo})统计表

Table 2 Geoaccumulation index of heavy metals in surface soils from agriculture fields adjacent to the major rivers in Shenyang

项目	As	Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr
细河($n=15$)							
平均值	-0.50	0.81	1.63	0.05	0.48	0.45	-0.05
最小值	-0.95	-0.33	0.31	-0.38	0.01	-0.04	-0.32
最大值	0.62	3.23	3.43	1.42	1.48	1.48	0.37
>0 百分比	13.3	86.7	100.0	33.3	100.0	80.0	33.3
>1 百分比	0.0	26.7	73.3	13.3	26.7	26.7	0.0
污染等级	无污染	轻污染	中污染	轻污染	轻污染	轻污染	无污染
沈抚灌渠($n=8$)							
平均值	-0.16	1.12	0.69	0.22	0.20	0.33	0.00
最小值	-0.35	-0.33	-0.15	-0.20	-0.18	-0.10	-0.18
最大值	0.01	2.68	1.80	0.83	1.52	1.49	0.31
>0 百分比	12.5	87.5	87.5	75	75	87.5	25
>1 百分比	0	75	12.5	0	12.5	12.5	0
污染等级	无污染	中污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
蒲河($n=12$)							
平均值	-0.44	-0.09	0.30	-0.01	-0.16	-0.22	-0.35
最小值	-0.99	-0.88	-0.12	-0.52	-0.65	-0.73	-0.66
最大值	-0.02	0.56	1.02	0.62	0.88	0.17	-0.13
>0 百分比	0.0	50.0	75.0	33.3	33.3	25.0	0.0
>1 百分比			8.3				
污染等级	无污染	无污染	轻污染	无污染	无污染	无污染	无污染
浑河($n=7$)							
平均值	-0.63	0.10	0.30	-0.25	0.05	0.15	0.02
最小值	-0.84	-1.13	-0.84	-0.41	-0.15	0.02	-0.10
最大值	-0.29	1.11	1.26	-0.07	0.25	0.31	0.17
>0 百分比	0.0	71.4	85.7	0.0	71.4	100.0	57.1
>1 百分比		14.3	14.3				
污染等级	无污染	轻污染	轻污染	无污染	轻污染	轻污染	轻污染

表 3 重金属内梅罗综合指数(NI)描述统计

	As	Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	NI
细河(n=15)								
平均值	0.60	1.84	7.10	1.14	1.52	1.82	0.94	5.24
最小值	0.34	0.27	1.10	0.63	0.84	0.95	0.70	0.96
最大值	1.6	9.3	25.0	3.8	3.7	4.4	1.4	18.2
污染级别	安全	轻污染	重度污染	轻污染	轻污染	轻污染	警戒级	重度污染
沈抚灌渠(n=8)								
平均值	0.76	1.69	1.87	1.21	1.22	1.60	0.98	1.62
最小值	0.62	0.27	0.70	0.75	0.70	0.90	0.81	0.70
最大值	0.89	5.40	4.90	2.09	3.81	4.39	1.32	4.16
污染级别	警戒级	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
蒲河(n=12)								
平均值	0.60	0.37	1.17	0.98	0.78	0.82	0.69	0.99
最小值	0.33	0.15	0.72	0.55	0.44	0.48	0.50	0.60
最大值	0.86	0.65	2.26	1.70	2.00	1.17	0.85	1.80
污染级别	安全	安全	轻度污染	警戒级	警戒级	警戒级	安全	警戒级
浑河(n=7)								
平均值	0.48	0.51	1.29	0.72	0.88	1.16	0.99	1.09
最小值	0.38	0.12	0.35	0.61	0.72	1.01	0.87	0.51
最大值	0.66	1.12	2.85	0.85	1.07	1.35	1.14	2.13
污染级别	安全	安全	轻度污染	警戒级	警戒级	轻污染	警戒级	轻污染

Pb、Zn 在细河和沈抚灌渠周边土壤中为轻度污染,Cr 在沈抚灌渠周边表层土壤中也有轻度污染。

2.3 细河周边农田土壤中重金属来源分析

由表 4 可以看到,彰驿地区 Fe 与 As、Cr、Zn 的相关性较好,表明这 3 种元素与 Fe 的来源基本相同,虽然 Fe 来自自然环境的因素较大,但不能就此推断 As、Cr、Zn 来自于自然地质环境,这是由于细河附近的冶金和金属加工产业较为密集。Cd、Hg 与 Fe 的相关性较差,但 Cd 与 Hg 之间的相关系数高, R^2 为 0.771,说明 Cd、Hg 来源相同;而 As 与 Hg、Cd 的相关系数 R^2 分别为 0.538 和 0.346,说明 Hg 与 As 并非来自同一来源,可以断定为另一类污染来源,如废旧电池和固体废弃物。Cd 除了与 Hg 和 Pb 稍有正相关关系外,与其他任何元素都不相关。农田中 Cd 的一个重要来源是施用磷肥。如国外报道磷肥中含有 $2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^[13-14],我国磷肥中 Cd 含量也有报道为 $0.4\sim0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15]。牲畜粪肥中 Cd 含量可高达 $1.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16],此含量接近细河附近农田土壤中 Cd 的平均值。此外污水排放也是 Cd 的重要来源之一^[17]。Pb、Zn、As、Cu 之间的相关系数均超过 0.8,初步判定该 4 种元素可能来自同一来源,根据沿岸工业分布情况推断为来自冶金、电镀和不锈钢产业的排放。As 可作为

表 4 彰驿镇表土中重金属间相关性分析

Table 4 Correlations among the heavy metals in the surface soils from Zhangyi Town								
	As	Hg	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Fe
As	1							
Hg	0.538	1.000						
Cd	0.346	0.771	1.000					
Pb	0.835	0.761	0.670	1.000				
Cr	0.718	0.366	0.104	0.657	1.000			
Zn	0.849	0.727	0.539	0.912	0.825	1.000		
Cu	0.864	0.685	0.456	0.848	0.764	0.949	1.000	
Fe	0.782	0.336	0.051	0.667	0.974	0.824	0.783	1.000

Cu、Pb 冶金提取的副产物被排放到环境中。据报道,在电镀工业中可伴随有 As 的污染排放^[18]。细河河水应是这些污染物输送的主要途径,同时由于附近农田灌溉采用浅层地下水,造成细河河水对地下水的补给,间接造成农田表层土壤的污染。

沈阳各河流都在不同程度上受到工业和生活污水的影响,尤以细河最为严重,因此对细河进行治理并对周边一些受浅层地下水灌溉污染的农田进行修复治理是非常必要的。

3 结论

沈阳市浑河、蒲河、细河和沈抚灌渠周边农田表层土壤中 Hg、Cd、Zn、As、Cr、Cu、Pb 含量均值均高于辽宁土壤背景值,细河周边地区的积累程度显著高于其他河流周边地区。应用单项污染指数和综合污染指数法评价结果表明,大部分样点 Cd 和 Hg 含量严重超出国家土壤环境质量标准值,污染突出。7 种元素的污染程度依次为 $Cd > Hg > Zn > Pb > Cu > Cr > As$ 。细河沿岸一些农田土壤属于重污染级别。浑河、蒲河和沈抚灌渠周边农田也存在污染现象。污染来源大致分为 3 类:污水排放和固体废弃物;施用磷肥或粪肥;冶金、电镀和不锈钢产业的排放。对细河进行治理并对周边一些受浅层地下水灌溉污染的农田进行修复治理是非常必要的。

参考文献:

- [1] 杨继松,孙丽娜,杨晓波,等. 沈阳市细河沿岸农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1933-1936.
YANG Ji-song, SUN Li-na, YANG Xiao-bo, et al. Evaluation of the heavy metal pollution in farmland of Xihe River outlet in Shenyang[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1933-1936.
- [2] 徐晟徽,郭书海,胡筱敏. 沈阳张士灌区重金属污染再评价及镉的形态分析[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2144-2148.
XU Sheng-hui, GUO Shu-hai, HU Xiao-min, et al. Revaluation of soil heavy metals pollution in Zhangshi irrigation area of Shenyang and analysis of Cd forms in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2144-2148.
- [3] 王世斌,姜勇,梁文举. 沈阳西郊灌区农田土壤镉污染特征研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(13): 450-453.
WANG Shi-bin, JIANG Yong, LIANG Wen-ju. Characteristics of cadmium contamination in farmland soils irrigated with wastewater in western Shenyang suburb [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2006, 22(13): 450-453.
- [4] 宋玉芳,周启星,宋雪英,等. 沈阳西部灌渠沉积物中污染物积累与生态毒性研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1926-1930.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, SONG Xue-ying, et al. Accumulation of pollutants in sediments and their ecotoxicity in the wastewater irrigation channel of western Shenyang[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1926-1930.
- [5] 刘韬,郭淑满. 污水灌溉对沈阳市农田土壤中重金属含量的影响[J]. 环境保护科学, 2003, 29(117): 51-52.
LIU Tao, GUO Shu-man. Effect of waste irrigation on heavy metal content in farmland in Shenyang[J]. *Environmental Protection Science*, 2003, 29(117): 51-52.
- [6] 马力,杨晓波,佟成治,等. 辽宁省浑河流域沉积物中重金属元素地球化学特征[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 184-188.
MA Li, YANG Xiao-bo, TONG Cheng-ye, et al. The geochemical characteristics of heavy metal elements in sediments of Hunhe Drainage Area in Liaoning Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2008, 27(3): 184-188.
- [7] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求 (DD2005-3)[S]. 北京: 2005: 9-10.
China Geological Survey. Technical Specification for Sample Analysis in Eco-geochemistry Assessment (DD2005-3)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2005: 9-10.
- [8] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journal*, 1969, 2, 109-118.
- [9] 吴燕玉,李彤,谭方,等. 辽河平原土壤背景值区域特征及分布规律[J]. 环境科学学报, 1986, 6(4): 420-433.
WU Yan-yu, LI Tong, TAN Fang, et al. Regional distribution characteristics of the element background values in soils of Liao River Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(4): 420-433.
- [10] Nemerow N L, Sumitomo, H. Benefits of water quality enhancement[R]. Syracuse University, Syracuse, New York, report No. 16116 DAJ 12/70, Washington, D C; EPA, Water Quality Office. 1970.
- [11] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范(HJ-T 166—2004)[S]. 中华人民共和国环境保护行业标准.
China Environment Protection Administration. The Technical Specification for Soil Environmental Monitoring (HJ-T 166—2004)[S]. National Standard for Environment Protection of People's Republic of China.
- [12] 李建军,冯慕华,喻龙. 辽东浅水区水环境质量现状评价[J]. 海洋环境科学, 2001, 20: 42-45.
LI Jian-jun, FENG Mu-hua, YU Long. Assessment on the situation of water quality in Liaodong Bay shallow waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20: 42-45.
- [13] Gavi F, Basta N T, Raun W R. Wheat grain cadmium as affected by long term fertilization and acidity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 265-271.
- [14] Rahaman A K M M, Alam M S, Mian M J A, et al. Effect of different fertilizers on concentration and uptake of cadmium by rice plant[J]. *Journal of Agriculture Research*, 2007, 45(2): 129-134.
- [15] 高志岭,刘建玲,廖文华. 磷肥施用与镉污染的研究现状及防治对策[J]. 河北农业大学学报, 2001, 24(3): 90-94.
GAO Zhi-ling, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua. Situation of cadmium pollution caused by application of phosphate fertilizer and the countermeasure of prevention and control of cadmium[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, 24(3): 90-94.
- [16] 谭长银,吴龙华,骆永明,等. 长期施肥条件下黑土镉的积累及其趋势分析[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2738-2744.
TAN Chang-yin, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Cadmium accumulation and its development tendency in black soil under long term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2738-2744.
- [17] Baker D E, Amacher M C, Leach R M. Sewage sludge as a source of cadmium in soil-plant-animal systems[J]. *Environmental Health Perspective*, 1979, 28: 45-49.
- [18] Pokhrel D, Viraraghavan T, ASCE F, et al. Evaluation of treatment systems for the removal of arsenic from groundwater[J]. *Practive Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 2005, 9(3): 152-157.