

典型农业区农田土壤重金属潜在生态风险评价

贾琳^{1,2}, 杨林生¹, 欧阳竹¹, 王五一¹, 李海蓉¹, 李永华¹, 虞江萍¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:采用野外采样和室内分析相结合的方法,以典型农业区山东禹城的农田表层土壤(0~20 cm)为研究对象,分析了土壤中重金属 Cr、Ni、Pb、As、Hg、Cd、Cu 和 Zn 的含量,探讨了土壤中重金属的含量与不同人类活动的关系并进行了潜在生态风险评估。结果显示,8 种重金属的含量均超过黄河下游潮土区的背景值。潜在生态风险评估表明,当地的农田土壤 Cr、Ni、Pb、As、Cu、Zn 有轻度的生态风险,Hg 和 Cd 存在较大的生态风险。城市化进程、畜禽养殖和污灌是造成土壤 Cd 高生态风险的主要因素,城市化进程和污灌也是造成土壤 Hg 高生态风险的主要因素。禹城各区域土壤受 8 种重金属的综合潜在生态风险程度大小依次为城郊农田>污灌农田>典型施肥农田>井灌农田>引黄灌农田,不同人类活动区域土壤 Cd 生态风险和 8 种重金属的综合潜在生态风险存在显著差异。

关键词:山东省禹城市;农田土壤;重金属;潜在生态风险

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2270-07

Assessment of the Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Farmland Soils in Yucheng City, Shandong Province

JIA Lin^{1,2}, YANG Lin-sheng¹, OUYANG Zhu¹, WANG Wu-yi¹, LI Hai-rong¹, LI Yong-hua¹, YU Jiang-ping¹

(1.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Heavy metal pollutions in the soil of farmland are regarded as serious threats to rural environment in China. Human activities, such as intensive livestock, sewage irrigation, large amounts of agrochemicals input and the rapid urbanization are proved to be the main sources of the heavy metals. Yucheng City is located in Huang-Huai-Hai plain, the largest alluvial plain and important agricultural area in China. The concentrations of Cr, Ni, Pb, As, Hg, Cd, Cu and Zn in the topsoil (0~20 cm) of the farmland in Yucheng City were analyzed, and their relations with different human activities were discussed. The potential ecological risks of these heavy metals were assessed. Furthermore, the heavy metal concentrations in wheat grown in the sampled soils were also collected and analyzed to compare those in soils. The results showed that the concentrations of the eight heavy metals in all of the soil samples were far lower than those critical values of the National Soil Quality Standard (Grade II) except Cd, while they were all higher than that of the backgrounds in the soils of the alluvial plain of the lower Yellow River. The rapid urbanization, sewage irrigation and long-time typical manure usage were responsible for the high value of heavy metals in soils. The potential ecological risks of Cr, Ni, Pb, As, Cu, Zn were at a lower level while that of Hg and Cd were at a higher level. The higher ecological risk of soil Cd was mainly derived from the rapid urbanization, intensive livestock and sewage irrigation. And that of soil Hg was located in the suburb of Yucheng City and the area irrigated with sewage from Tuhai River. The potential ecological hazard index of the eight heavy metals in soils followed the sequence as suburban farmland>farmland irrigated with sewage>farmland with typical manure used>farmland irrigated with groundwater>farmland irrigated with the Yellow River. Hg and Cd concentrations in some wheat samples were as high as or even higher than that of critical values of the National Standard (GB2715—2005).

Keywords: Yucheng City; farmland soil; heavy metals; potential ecological risk

收稿日期:2009-05-13

基金项目:中国科学院农业项目(KSCX2-VW-N-46-01);“十一五”国家科技支撑计划课题(2007BAC03A11-07)

作者简介:贾琳(1980—),女,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为地表化学过程与健康。E-mail:jial.07b@ignrr.ac.cn

通讯作者:欧阳竹 E-mail:ouyz@ignrr.ac.cn

工业、城市化进程和农业活动等都可能引起土壤重金属污染^[1],农田土壤及作物的重金属污染带来的潜在健康风险已引起国内外学者的关注^[2-4]。近年来国内的研究多集中于资源开发和污灌等导致的土壤重金属污染及其带来的环境及人体健康风险方面^[5-6],而从县域尺度综合考虑人类活动包括城市化进程、农业活动(畜禽养殖、施肥和污灌)等对土壤重金属含量影响及其生态风险的研究相对较少。近年来,在农业生产迅速发展的同时,我国的农业生态环境也遭到了严重的污染和破坏。我国农业生产环境的污染,主要是由于规模化畜禽养殖、农业活动(农用化学品的不合理使用)和污灌以及农村城市化进程的加快对土壤环境带来的污染,进而对农田土壤及农产品品质造成污染,并对畜禽及人体构成威胁和危害^[7]。调查表明,我国受重金属污染的土地面积已占污灌区面积的 64.8%,农村生态也被称为“中国环保的短板”^[8]。因此,开展典型农业发展区域的土壤污染调查研究对于保护农村生态环境具有十分重要的意义。

山东禹城是黄淮海平原农产品生产的重点县市之一,是中国北方重要的粮棉果蔬生产基地^[9]。但是随着农业和工业的发展,环境与健康风险凸显,主要表现在规模化养殖、农用化学品的不合理使用、徒骇河的工业污染^[10-11]及城市化过程带来的一些环境问题。本文在野外调查和室内实验分析的基础上,对禹城的农田土壤重金属的含量及其可能来源进行了分析,并评估土壤重金属潜在的生态风险,以发现不同人类活动影响下农田土壤潜在生态风险,为禹城市乃至黄淮海平原的农田保护和农产品安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

禹城市位于山东省西北部,徒骇河中游。地处黄淮海下游平原,气候属于暖温带半湿润季风气候,年平均降水量为 593.2 mm,常年以夏季西南风、冬季东北风为主导风向^[12]。其主要的土壤类型是盐土和潮土,土壤 pH 为 8.40~8.85^[13]。禹城市农田灌溉的主要方式是河水灌溉、井灌及引黄灌溉。主要的河流包括徒骇河、赵牛河、赵牛新河、苇河等。禹城市工业废水及生活污水大部分都排入徒骇河,而徒骇河是禹城市灌溉的重点水源。调查发现,近年来徒骇河沿岸居民癌症发病率明显升高。禹城市畜牧生产已经趋于规模化,

据调查部分地区畜牧业发展已有 20 多年的历史,并且大部分的粪肥均投入到当地土壤中。

1.2 样品采集

2008 年 6 月,于小麦收获期,根据不同的灌溉水源,沿禹城市主要河流(徒骇河及其主要支流)、引黄灌渠和井灌区布置土壤采样点(图 1),在每一长期典型施肥区分别布置 2 个采样点,同时在禹城市郊工业园区附近布置采样点。用铁铲采集 2~3 个小麦根际(采样深度为 20 cm)土壤样品,装入自封袋,共 56 个样品。同时采集小麦样品 56 个,所有样品用聚乙烯塑料袋封装后运回实验室。

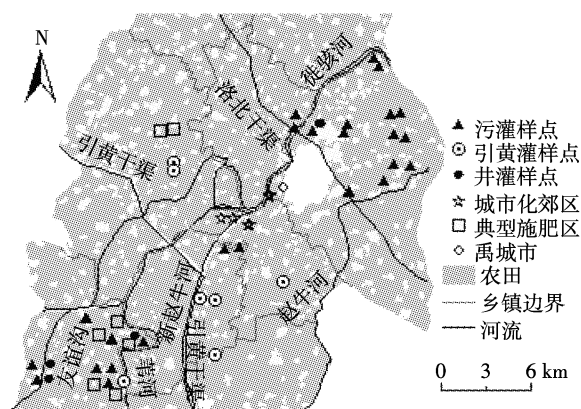


图 1 禹城市农田表层土壤采样点示意图

Figure 1 Sketch map of sampling sites of topsoil in Yucheng farmland

1.3 样品处理与分析

土壤样品自然风干后碾碎,先过 20 目尼龙筛,再过 100 目尼龙筛,经 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4\text{--HF}$ 法消解后测定土壤 Cr 含量;经 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消解后测定 Pb、Ni、Cd 含量;经 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{SO}_4$ 消解后测定土壤 As 含量;经 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{SO}_4\text{--HClO}_4$ 消解后测定土壤 Cu、Zn 含量。麦穗经脱粒机去壳得到麦粒,冲洗、烘干、研磨后装入自封袋。用电感耦合等离子体光谱仪测定 Cr、Cu、Ni、Zn 等元素含量;电感耦合等离子体质谱仪测定 Cd、Pb 元素含量;原子荧光光度计测定 Hg 元素含量;双道原子荧光光度计测定 As 元素含量。土壤分析的质量控制采用 GSS-3、GSS-4、GSS-10、GSS-16 标准物质进行加标回收,Cr、Ni、Pb、As、Hg、Cd、Cu、Zn 的回收率分别达 98.8%~104.1%、93.1%~100.0%、95.5%~108.0%、90.9%~106.2%、90.6%~95.4%、91.1%~115.7%、100.3%~109.1%、92.2%~99.8%。小麦分析通过平行双样进行质量控制以保证数据的准确度和精度。样品的分析由国土资源部南昌矿产资源监督检查中心完成。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤重金属含量特征分析

禹城市农田土壤重金属含量的分析结果见表 1。禹城市农田土壤中 Cr、Ni、Pb、As、Hg、Cd、Cu 和 Zn 经单样本的正态分布检验发现,只有 Hg 不符合正态分布,其他 7 种重金属元素的含量均符合正态分布。因此用中位数来描述土壤 Hg 含量大小,用算术平均值来描述其他 7 种重金属含量的大小。

禹城市地处黄河下游冲积平原,其地形、地貌、土壤性质和农业条件等在黄河下游潮土区具有典型性^[14],因此以 1980 年代黄河下游潮土区重金属元素的背景水平^[15]作为该区土壤重金属元素的背景参考值。与黄河下游潮土区土壤背景值比较,禹城市土壤 Hg 的中位数高于背景值,且经单样本的 *t* 检验,Cr、Ni、Pb、As、Cd、Cu、Zn 的均值均显著高于背景值,其中 Pb 的均值约为背景值的 2 倍,Cd 的均值约为背景值的 2.33 倍。各采样点 Pb 和 Cd 含量均高于背景值,各样点中 Cr、Ni、Cu、As、Hg 和 Zn 含量高于背景值的样点占总样点的比例分别为 89.29%、87.5%、87.5%、64.29%、92.86%、76.79%,这与 Bernhard 的研究结果^[2]相符,表明人类活动已导致土壤中 Cr、Ni、Pb、As、Hg、Cd、Cu、Zn 含量的升高。

禹城市农田土壤 Cr 和 Pb 的平均含量以及 Hg 的中位数均低于我国土壤环境质量标准(GB15618—1995)一级标准,而 Ni、As、Cd、Cu 和 Zn 的平均含量高于一级标准,但低于二级标准。除 As、Cd 接近于国家二级标准外,各元素含量的最大值均低于国家二级标准。除 Pb 和 Hg 外,禹城市农田土壤重金属含量均高于国外相关的研究结果^[2]。与国内的研究^[16]对比,禹城市农田土壤 Cd 的含量较高。因此应当注意禹城市农田土壤重金属含量的增加,尤其是土壤 Cd 含量的

增加及其带来的生态风险。

对不同人类活动区域表层土壤 Cr、Ni、Pb、As、Hg、Cd、Cu 和 Zn 含量进行了统计(表 2),以探讨禹城市表层土壤重金属的可能来源。禹城市土壤重金属最大值均未超过国家二级标准,但 8 种重金属含量均超过黄河下游潮土区的背景值,说明人为的干扰活动导致农田土壤重金属含量的升高。由表 2 可见,禹城市表层土壤中 Cr、Ni、Pb、Cd、Cu 含量的最大值出现在污灌区,而 Hg 和 Zn 的最大值出现在城市化郊区,As 的最大值出现在典型施肥区表层土壤,受人类活动影响较小的引黄灌区和井灌区土壤 Hg 和 Zn 含量较低。就不同人类活动而言,表层土壤中 Cr、Ni、Pb 平均含量的大小为城市化郊区>污灌区>典型施肥区>井灌区、引黄灌区,而 Cd 则为城市化郊区>典型施肥区>污灌区>引黄灌区>井灌区(图 2)。经单因素方差分析显著性检验发现(表 3),不同人类活动区域土壤 Cr、Ni、Pb、Cd 含量均呈显著性差异($P<0.05$),这说明城市化进程的加快和长期典型农业活动已导致表层土壤重金属含量的升高。

表 2 不同人类活动区域农田土壤重金属含量范围($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 Range of heavy metal concentrations in soil derived from different anthropogenic activities ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素	类型(样本量)				
	污灌区 (29)	引黄灌区 (9)	井灌区 (5)	城市化郊区 (6)	典型施肥区 (7)
Cr	47.76~89.23	51.12~64.23	52.06~64.81	61.11~78.48	56.85~68.78
Ni	21.20~41.20	22.69~30.94	22.71~30.91	29.02~37.40	26.20~31.10
Pb	18.70~32.30	20.58~25.96	20.24~25.74	23.84~29.07	21.67~26.33
As	8.97~22.60	6.87~15.80	9.60~14.80	12.60~19.10	7.81~23.20
Hg	0.01~0.13	0.023~0.06	0.021~0.07	0.01~0.19	0.024~0.042
Cd	0.15~0.38	0.15~0.26	0.13~0.22	0.24~0.28	0.20~0.28
Cu	17.24~38.91	19.46~25.09	21.11~26.28	24.65~35.11	22.70~28.63
Zn	48.50~98.13	52.92~81.52	57.86~73.43	65.42~124.3	68.13~84.84

表 1 禹城市农田土壤重金属含量的描述性统计($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in soil of Yucheng City($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	Cr	Ni	Pb	As	Hg	Cd	Cu	Zn
最小值	47.76	21.20	18.70	6.87	0.01	0.13	17.24	48.50
最大值	89.23	41.20	32.30	23.20	0.19	0.38	38.91	124.30
算术平均值	62.75	29.50	25.15	14.27	0.04	0.21	25.52	73.28
中位数	62.40	29.80	24.80	13.90	0.03	0.22	24.80	70.45
标准差	8.16	4.27	2.82	4.00	0.03	0.04	4.29	14.06
黄河下游潮土区背景值	53.6	24.9	14.4	12.9	0.02	0.09	21.4	65.1
土壤环境质量一级标准	90	40	35	15	0.15	0.20	35	100
土壤环境质量二级标准	250	60	350	25	1.0	0.60	100	300

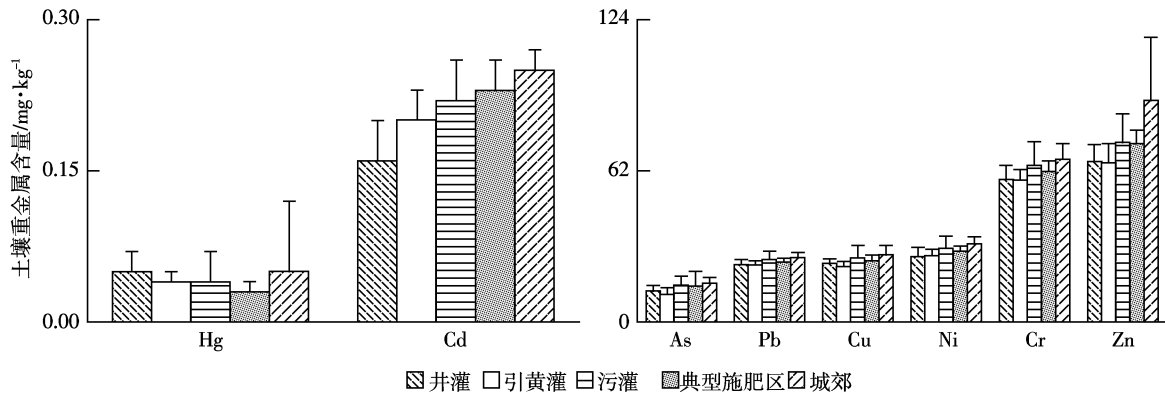


图 2 不同人类活动区域土壤 Cr、Ni、Pb、As、Cu、Zn、Hg 和 Cd 平均含量

Figure 2 The average concentration of Cr, Ni, Pb, As, Cu and Zn in soil derived from different anthropogenic activities

表 3 不同人类活动区域农田土壤重金属含量均值差异性(mg·kg⁻¹)Table 3 Differences of the average concentrations of heavy metals in soil derived from different anthropogenic activities (mg·kg⁻¹)

类型	Cr 均值	差异显著性	Ni 均值	差异显著性	Pb 均值	差异显著性	Cd 均值	差异显著性
城市化郊区	66.79	a	32.00	a	26.48	a	0.25	a
污灌区	64.23	b	30.23	b	25.78	b	0.38	b
典型施肥区	61.84	c	29.14	c	24.61	c	0.23	c
引黄灌区	58.36	d	27.28	d	23.47	d	0.20	d
井灌区	58.38	d	26.81	d	23.59	d	0.16	e

注:同列数值不同字母表明 LSD 多重比较差异显著($P<0.05$)。

2.2 土壤重金属的单项及综合潜在生态风险评估

采用潜在生态风险指数法评价土壤重金属污染的潜在生态风险。潜在生态风险指数法是国际上土壤/沉积物重金属研究方法之一,该方法不仅将土壤重金属的含量考虑在内,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,定量地划分出重金属的潜在风险程度,在此类研究中得到了广泛的应用^[17-18]。其公式如下:

$$(1) \text{ 单项污染系数: } C_i^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i$$

$$(2) \text{ 潜在生态风险单项系数: } E_i^i = T_i^i / C_i^i$$

$$(3) \text{ 潜在生态风险指数: } RI = \sum E_i^i$$

式中: $C_{\text{表层}}^i$ 为土壤重金属的实测浓度; C_n^i 为计算所需的参比值,即研究区域的背景值; T_i^i 为单个污染物的毒性响应参数, E_i^i 为单项潜在生态风险系数。

瑞典科学家 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数分别为 Zn(1)<Cr(2)<Cu(5)=Ni(5)=Pb(5)<As(10)<Cd(30)<Hg(40)^[9]。重金属的潜在生态风险指标与分级关系如表 4 所示。

禹城市农田表层土壤单个重金属的潜在生态危害指数(E_i^i)和多种重金属的潜在生态风险危害指数 RI 见表 5。由表 5 可见,8 种重金属的潜在生态危害

表 4 土壤重金属的潜在生态风险分级标准^[20]

Table 4 Classification standard of potential ecological risk of heavy

metals in soil			
潜在生态风险 E_i^i 范围	单因子生态风险污染程度	潜在生态风险指数 RI 范围	总的潜在生态风险程度
$E_i^i < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度
$40 \leq E_i^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i^i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	较强
$160 \leq E_i^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_i^i \geq 320$	极强		

系数 E_i^i 范围分别为: E_i^i (Cr)1.78~3.33、 E_i^i (Ni)4.25~8.27、 E_i^i (Pb)6.49~11.21、 E_i^i (As)5.33~17.98、 E_i^i (Hg)14~380、 E_i^i (Cd)43.33~126.67、 E_i^i (Cu)4.03~9.09、 E_i^i (Zn)0.74~1.91。由 8 种重金属的潜在生态危害系数的均值来看,其潜在生态危害趋势为 E_i^i (Hg)> E_i^i (Cd)> E_i^i (As)> E_i^i (Pb)> E_i^i (Cu)> E_i^i (Ni)> E_i^i (Cr)> E_i^i (Zn)。根据土壤重金属潜在危害系数所对应的潜在危害程度的频数的统计(表 6),Cr、Ni、Pb、As、Cu 和 Zn 处于轻度的潜在生态风险,而 48.2% 的土壤 Hg 已达到较强的生态风险水平,16.1% 的 Hg 达到很强生态风险水平,甚至有 5.4% 达到了极强的潜在生态风险水平。而 82.1% 的 Cd 达到较强的生态风险水平,1.8% 达到很

强的生态风险水平。

多种重金属的综合潜在生态风险指数(*RI*)的范围为 108.44~501.09 (表 5)。从其频数分布可以看出, 83.9%的土壤样点处于中等生态风险程度, 但分别有 12.5%、1.8%和 1.8%处于较强、很强和极强的潜在生态风险水平(表 6), 这主要与 Hg 和 Cd 潜在生态危害系数较大有关。这说明禹城市农田土壤可能遭受较强的 Hg 和 Cd 的生态危害, 进而导致共有 55 个 (98.2%)土壤样点达到了中等及以上的风险程度, 应引起充分关注。

2.3 不同人类活动区域土壤重金属潜在生态风险评估

为进一步研究禹城市表层土壤重金属潜在生态风险的来源, 探讨在土壤重金属含量低于国家二级标准但高于区域背景值时产生高生态风险的原因, 本文从不同的人类活动类型出发, 比较了不同人类活动影响下土壤 Hg、Cd 及重金属潜在风险指数的大小(图3)。

典型施肥区是指规模化畜禽养殖区, 畜禽粪便及养殖污水均投入到当地土壤中, 已有 20 多年的历史。从图 3 中可以看出, Cd 的潜在生态风险系数以城郊、典型施肥区、污灌区、引黄灌溉区和井灌区的顺序递减。这与 Cd 生态风险系数的空间分布保持一致(图 4), 说明城市化进程、畜禽养殖和污灌是造成土壤 Cd 含量超过背景值的主要因素, 同时较高的 Hg 生态风险系数则主要出现在城郊和污灌区, 井灌区 Hg 的风险指数也要比引黄灌区和典型施肥区高(图3, 图 4),

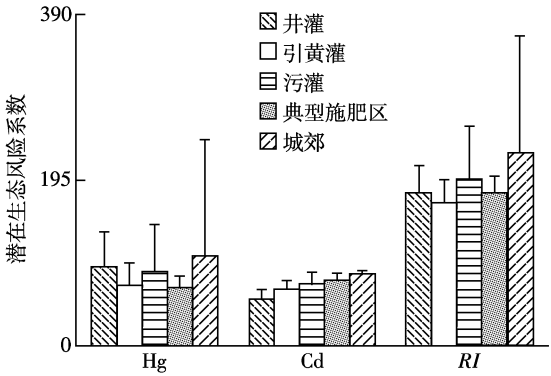


图 3 不同人类活动区域土壤 Hg 和 Cd 的潜在生态风险系数均值和潜在生态风险指数均值
Figure 3 The average value of potential ecological hazard coefficient of Hg and Cd and potential ecological risk index derived from different anthropogenic activities

这说明除城市化和污灌导致土壤 Hg 含量提高外, 其他农业活动也有可能引起土壤中 Hg 含量的提高, 如农药的使用^[2]等。Hg 和 Cd 的生态风险高值区域反映在人类活动较为活跃、城乡工业较为发达的区域, 这与刘庆等的研究^[16]一致。从综合潜在生态风险指数来看, 其顺序为城郊土壤>污灌土壤>典型施肥土壤>井灌土壤>引黄灌土壤(图 3), 因此禹城城市化进程的加快和农业活动(污灌、典型施肥)已导致土壤中重金属一定程度的累积。

为进一步分析当地农田的潜在生态风险水平, 本

表 5 禹城市农田土壤潜在生态危害系数(E_i^p)及潜在的生态风险指数(RI)统计特征值
Table 5 Descriptive statistics of potential ecological hazard coefficient(E_i^p) and potential ecological risk index(RI) of heavy metals in farmland of Yucheng City

项目	潜在生态危害系数 E_i^p								RI
	Cr	Ni	Pb	As	Hg	Cd	Cu	Zn	
最小值	1.78	4.25	6.49	5.33	14.00	43.33	4.03	0.74	108.44
最大值	3.33	8.27	11.21	17.98	380.00	126.67	9.09	1.91	501.09
均值	2.34	5.93	8.73	11.06	85.29	71.55	5.96	1.13	191.98
标准差	0.31	0.86	0.98	3.10	60.05	13.87	1.00	0.22	64.50

表 6 禹城市农田土壤重金属元素潜在生态危害系数及潜在生态风险指数频数分布
Table 6 Frequencies of potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index in farmland of Yucheng City

单项生态 风险程度	潜在生态危害系数(E_i^p)频数分布/%								RI
	Cr	Ni	Pb	As	Hg	Cd	Cu	Zn	
轻度	100	100	100	100	5.4	0	100	100	1.8
中等	0	0	0	0	30.4	16.1	0	0	83.9
较强	0	0	0	0	48.2	82.1	0	0	12.5
很强	0	0	0	0	16.1	1.8	0	0	1.8
极强	0	0	0	0	5.4	0	0	0	1.8

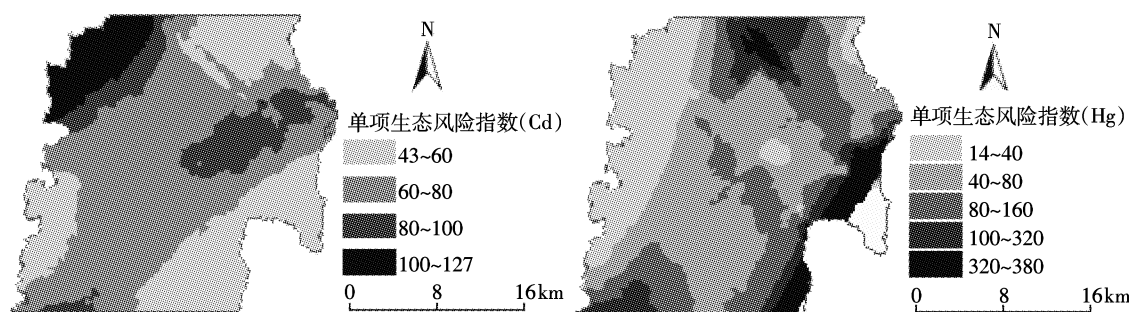


图4 禹城市农田土壤 Hg 和 Cd 的生态风险系数插值图

Figure 4 Kriging map of potential ecological hazard coefficient of Hg and Cd in farmland of Yucheng City

研究在 56 个土壤样品原位采集了 56 个小麦样品,分别测定了小麦样品中 Hg 和 Cd 的含量。结果显示,小麦麦粒中 Hg、Cd 的平均含量分别为 0.01 、 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其含量范围分别为 $0.01 \sim 0.02$ 、 $0.012 \sim 0.202 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。尽管 Hg 和 Cd 的均值均远低于我国粮食中 Hg 和 Cd 的限量标准值(0.02 、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但约 21.43% 样点 Hg 的含量范围接近或达到 Hg 的限量值, Cd 含量的最大值已超过粮食中 Cd 的限量值。洛北干渠是禹城市污染最重的一条河渠,在旱季,市区附近的村庄不得不用渠里和徒骇河的污水进行灌溉,这可能是造成市区附近麦粒中 Hg 含量增加的原因。同时禹城市辛寨镇有长达 20 多年的畜禽养殖和露天蔬菜生产活动,畜禽粪便和化肥的大量使用可能导致该区麦粒中 Hg 和 Cd 含量的提高。城郊区是禹城大部分工业企业的集中地,该区域 Hg 含量出现个别高值,可能由于大量工业废物的处理或存放导致 Hg 释放到土壤及大气^[20-21]中,进而导致麦粒 Hg 的暴露,表明当地的农田生态系统已存在一定的区域潜在风险。

3 结论

(1) 禹城市农田土壤 Cr、Ni、Pb、As、Cd、Cu、Zn 的均值和 Hg 的中位数都高于黄河下游潮土区土壤背景值。各种元素含量的最大值除 Cd 接近国家二级标准外,其他几种元素都低于国家二级标准。

(2) 就不同人类活动导致的土壤重金属元素平均含量而言,城市化、污灌和长期大量施肥是导致土壤中 Cr、Ni、Pb 和 Cd 含量升高的主要原因,而城郊和污灌区土壤 As 和 Hg 的平均含量也呈现较高的含量。城市化进程的加快和长期典型农业活动已经导致表层土壤重金属含量的升高。

(3) 土壤 Hg 和 Cd 存在较大的潜在生态风险。城市化进程、畜禽养殖和污灌是造成土壤 Cd 含量超过

背景值的主要因素,而城市化和污灌是造成土壤 Hg 高生态风险的主要原因。禹城市城市化进程的加快和农业活动(污灌、典型施肥)已造成土壤中重金属有一定程度的累积,且土壤 Hg 及 Cd 高潜在风险也可能是麦粒中 Hg 和 Cd 接近或达到粮食的限量值的主要原因。因此,应当进一步重视禹城市农田土壤的安全监控和生态风险。

参考文献:

- [1] Kabata-Pendias A, Henryk P. Trace elements in soils and plants[M]. New York: CRC Press, 2000.
- [2] Bernhard A Z, Che F I, Mike J M, et al. Heavy metals in soils and crops in southeast Asia. 1. Peninsular Malaysia[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26: 343-357.
- [3] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara, et al. Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe[J]. *Physics Chemistry of the Earth*, 2007, 32: 1399-1405.
- [4] 丛源, 郑萍, 陈岳龙, 等. 北京市农田生态系统土壤重金属元素的生态风险评价[J]. 地质通报, 2008, 27: 681-688.
CONG Yuan, ZHENG Ping, CHEN Yue-long, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soils of the farmland ecosystem of Beijing, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(5): 681-688.
- [5] 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2158-2165.
YIN Ren-zhan, LUO Ya-ping, LI Jin-cheng, et al. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metal pollution in soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in siding Pb-Zn mine[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(6): 2158-2165.
- [6] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 449-456.
YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Leaching of heavy metals in soil column under irrigation reclaimed water: a simulation experiment[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 449-456.
- [7] 陈英旭. 农业环境保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 3-13.

- CHEN yingxu. Agricultural environment protection[M]. Beijing:Chemical industry press, 2007:3-13.
- [8] 王利萍. 农村生态:中国环保的短板[N/OL]. 科学时报, 2007-03-14. http://www.chinaenvironment.com/action/topic/ti_an/ViewNews.aspx?id=1025.
- WANG Liping. Rural ecology:Short-board of China environmental protection[N/OL]. Science times, 2007-03-14. http://www.chinaenvironment.com/action/topic/ti_an/ViewNews.aspx?id=1025.
- [9] 中国科学院/国家计委地理研究所. 禹城河间浅平洼地综合治理与综合开发研究文集[M]. 北京, 1990.
- Institute of Geography, National Planning Commission/Chinese Academy of Sciences. Research works of comprehensive management and development for the shallow and low-lying land between rivers in Yucheng city[M]. Beijing, 1990.
- [10] 吴志民, 刘洪建, 张颖, 等. 徒骇河(德州段)水污染现状及防治对策研究[J]. 水资源保护, 1999(4):16-19.
- WU Zhimin, LIU Hongjian, ZHANG Ying, et al. Current state of water pollution of Tuhai river(Dezhou section) and measures for pollution prevention[J]. *Water Resource Protection*, 1999(4):16-19.
- [11] 张琪. 徒骇河聊城段水污染防治研究[D]. 西安:西安理工大学, 2006.
- ZHANG Qi. Research about water pollution controlling[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2006.
- [12] 中国科学院/国家计划委员会地理研究所. 禹城县经济和社会发展规划(1991—2000年)[M]. 北京, 1991.
- Institute of Geography, National Planning Commission/Chinese Academy of Sciences, Economic and social development planning of Yucheng city(1991—2000年)[M]. Beijing, 1991.
- [13] 虞江萍, 沈瑞珍, 杨京蓉, 等. 山东省禹城县土壤有效态微量元素含量及农业评价[C]//赵其国, 李继云, 朱其清. 黄淮海平原土壤肥料研究论文集. 北京:中国科学技术出版社, 1993:48-58.
- YU Jiang-ping, SHEN Rui-zhen, YANG Jing-rong, et al. Effective state of trace elements in soil and agricultural evaluation of Yucheng city, Shandong province[C]//Zhao Qiguo, Li Jiyun, Zhu Qiqing. Soil and fertilizer research papers of the the Huang-Huai-Hai plain. Beijing:Science and Technology Press of China, 1993:48-58.
- [14] 李玉浸, 宁安荣, 王德中. 黄河下游平原潮土区域土壤十一种元素环境背景图的编制研究[J]. 农业环境保护, 1987, 6(1):18-22.
- LI Yu-jin, NING An-rong, WANG De-zhong. Mapping of soil background content map in 11 elements in aquic soils of the Yellow River downstream[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1987, 6(1):18-22.
- [15] 李廷芳, 吴焕中, 李玉浸. 我国九个农业经济自然区土壤背景值图的编制[J]. 地理研究, 1991, 10(1):39-47.
- LI Ting-fang, WU Huan-zhong, LI Yu-jin. Mapping of soil background content map in agricultural regions of China[J]. *Geographical Research*, 1991, 10(1):39-47.
- [16] 刘庆, 王静, 汪庆华, 等. 基于GIS的县域土壤重金属生态风险评估[J]. 测绘科学. 2008, 33(3):18-21.
- LIU Qing, WANG Jing, WANG Qing-hua, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in soil based on GIS [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 1991, 10(1):39-47.
- [17] 丁海霞, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌市郊农田土壤重金属的污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2183-2188.
- DING Hai-xia, NAN Zhong-ren, LIU Xiao-wen, et al. Characteristics of selected heavy metal pollution in suburb cropland, Jinchang city, Gansu, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2183-2188.
- [18] 曹会聪, 王金达, 张学林. 吉林黑土中Cd、Pb、As的空间分布及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1):89-92.
- CAO Hui-cong, WANG Jin-da, ZHANG Xue-lin. Spatial distribution and potential ecological risk of Cd, Pb, As in Jilin black soil[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1):89-92.
- [19] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] Sznopce J L, Goonan T G. The materials flow of mercury in the economies of the United States and the world[J]. *USA Geological Survey Circular* 1197, USA Geological Survey, 2000.
- [21] Pirrone N. Mercury research in Europe:Towards the preparation of the New EU Air Quality Directive[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35:2979-2986.