

河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价

张丽红¹, 徐慧珍², 于青春¹, 李瑞敏², 马忠社³, 曹峰², 李宏亮³

(1.中国地质大学(北京), 北京 100083; 2.中国地质环境监测院, 北京 100081; 3.河北省地质调查院, 石家庄 050081)

摘要:在河北省地质调查院 1:250 000 多目标区域地球化学调查的研究基础上,对河北省清苑县及周边的农田土壤及玉米子实进行了采样分析,分析该地区农田土壤重金属的富集程度,并采用富集因子法和单因子土壤污染指数法进行污染状况评价。结果表明,该研究区土壤以重金属 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 污染最为严重,其中 Cd 污染已达显著富集程度;通过对子实重金属含量的描述统计显示,其农产品也受到一定程度的重金属污染,其中玉米子实中的重金属 Ni 和 Pb 存在超标现象。通过地统计学方法分析揭示了清苑县土壤重金属中污染严重的 Zn、Cu、Cr、Pb 的空间分布特征,并探索其主要成因。

关键词:河北清苑县;农田土壤;农作物;重金属;污染评价

中图分类号:X820.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2139-08

The Investigation and Evaluation of the Heavy Metal Pollution in Farmland Soil and Crop in the Qingyuan of Hebei, China

ZHANG Li-hong¹, XU Hui-zhen², YU Qing-chun¹, LI Rui-min², MA Zhong-she³, CAO Feng², LI Hong-liang³

(1.China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3.Geology Survey Institution of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract:Based on the 1:250 000 target regional geochemical survey of Hebei geological survey bureau, study the soil and corn seeds sampling, analyse the area of soil heavy metal concentration degree emphatically, and use enrichment factor and single factor soil pollution index methods for contamination assessment. Results showed that the soil of the study area was polluted by Cu, Zn, Cr, Pb and Cd seriously, including Cd had achieved significant enrichment degree; it indicated that the crop had been polluted though the statistical of the heavy metal in the corn seeds, such as the content of Ni and Pb in corn seeds exceed the food hygiene standards. Through the geo-statistical methods to analyse and reveal the spatial distribution characteristics of the heavy metal of Zn, Cu, Pb and Cr which had serious pollution, and explore the main reasons of heavy metal pollution.

Keywords: Qingyuan of Hebei; farmland soil; crop; heavy metal; pollution evaluation

人类社会的不断发展和技术进步给其生存环境带来的负面效应日益引起世界各国的关注。土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源,随着我国工农业生产的迅猛发展,农田土壤重金属污染问题已引起普遍关注。土壤重金属含量与人类健康息息相关,因此其污染状况分析及评价一直都是环境科学中备受关注的研究领域^[1-2]。

目前我国学者对蔬菜地土壤重金属的污染研究较多,如陈同斌、宋波等对北京蔬菜地重金属污染的研究,李梅等对佛山市郊污灌菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况与评价研究等^[3-4];对农田土壤重金属污染的研究也取得了一定成果,如马成玲等对长江三角洲典型县级农田土壤重金属污染状况的研究,王元仲等对河北省玉米主产区土壤重金属污染水平的调查研究,马光等对焦作博爱农场与中马村矿土壤及玉米重金属污染分析等^[5-7]。但是,过去对土壤重金属污染的研究主要集中在对采样点中污染物含量的分析,污染评价也多采用单一评价方法;对土壤污染源的分析也仅

收稿日期:2010-05-11

作者简介:张丽红(1986—),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事水土环境地质调查研究。E-mail:cugbzhanglihong@163.com

通讯作者:于青春 E-mail:yuchq@cugb.edu.cn

局限于定性评估,定量描述较少^[8-9],结合污染物的空间分布特征进行区域性土壤污染评价及成因分析的研究也较少。

土壤污染对农作物的生长和品质产生不同程度的影响,并通过食物链危害人体的生命和健康。本文通过不同的污染评价方法对河北省清苑县污染较严重地区的农田土壤中的铅、锌、汞、铬、砷、铜、镉、镍8种重金属含量进行研究评价,对其受污染程度及分布特征做出科学的评价,为促进当地土地合理利用和改善农业生态环境提供科学依据,从而最终确保农产品的质量安全,维护人类饮食健康。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清苑县位于河北省中部,保定市南端,西倚太行山,东濒白洋淀。地势低平,西南高,东北低,缓缓倾斜。属暖温带大陆性季风气候。境内河流属海河流域大清河水系,有唐河、新开河、九龙河、龙泉河、清水河、金线河、府河、漕河8条,汇流后入清苑县东北部

的望亭乡东安村附近的白洋淀^[10]。

清苑县东、南、北三面环绕保定市,县城北距北京市145 km,东北距天津市140 km,西南距石家庄117 km。京汉铁路、清苑铁路,京深高速及保衡、保新、保沧和107国道等多条公路贯穿全境。县内有机械、化工、建材、电力等十几种行业。交通要道的贯穿及发达的经济给全县人民带来财富的同时,也造成了农田土壤及农产品的极大污染及危害。

1.2 样点布置与样品采集

采样点布设原则:剖面 and 重点区部署相结合,剖面部署兼顾不同土壤类型、不同土壤地球化学含量值分布区、不同大宗农作物生产区。采样点按4 km²一个点的网格部署,遇到地表水体时采样点可以作适当调整;重点区主要部署在元素含量高值区,采样点部署呈网格状,采样密度大,采样点按1 km²一个点部署,以免漏掉元素含量高值区;对双季农作物产区要分别在两季农作物成熟季节各采集一套土壤和植物子实样品。本论文所研究为玉米作物耕作土壤及子实。采样点布置见图1。

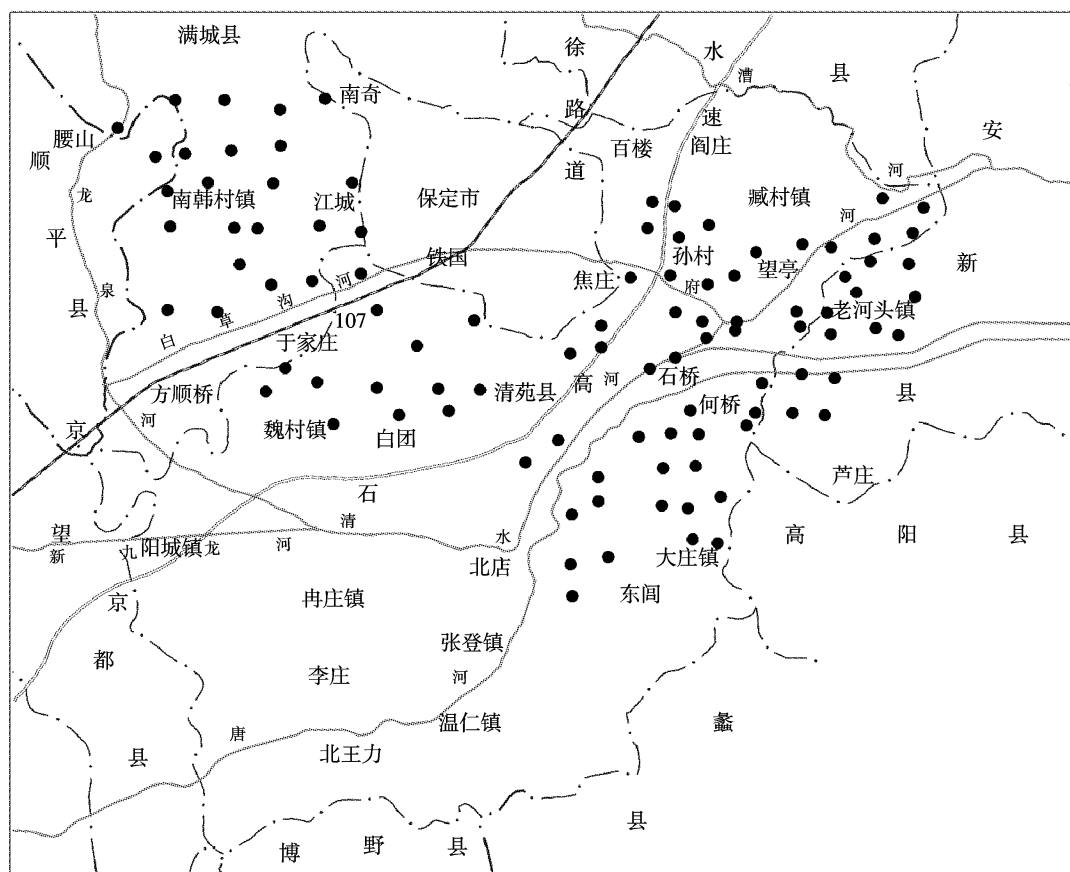


图1 清苑采样点布图(玉米子实及根系土)

Figure 1 Distribution of soil sampling in the Qingyuan farmland

样品采集方法:选择了有代表性的采样点,避开明显点状污染地段、垃圾堆、田埂等,并离开主干公路、铁路 100 m 以外,避开施肥期等干扰因素;在采样点附近至少选择 3 个样方(相距约 30~50 m)分别采集土壤和子实样,合并为一个样品;垂直均匀采集地表至 20 cm(或 15 cm)深的农作物根系生长范围的土壤作为样品,并去除表面 1 cm 土壤和杂物;土壤和子实样品原始重量不少于 1 000 g;样袋外均应套聚乙烯塑料袋隔开。

As、Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)分析,Cd、Cu、Pb、Ni 采用等离子体质谱法(ICP-MS)测试,Cr、Zn 采用压片法-X 射线荧光光谱(XRF)测试。

1.3 数据处理

本研究统计分析数据,包括土壤重金属含量的平均值、方差、标准偏差(SD)及变异系数等采用 SPSS 软件和 GS+进行,空间分布图采用 Minitab 软件完成。

2 结果与分析

通过对 100 件土壤及对应子实样品的重金属含量的描述性统计,分析其土壤及对应作物子实中重金属污染状况,并采用不同的评价方法分析其土壤重金属的富集程度,从而探索其主要污染成因。

2.1 农田土壤重金属污染状况评价

2.1.1 土壤重金属含量统计

将清苑县农田土壤重金属含量统计值列于表 1,土壤环境质量标准见表 2。

从描述统计结果看,As、Cr、Hg、Ni 的平均值分别为 12.067、75.41、0.094 43、30.35 mg·kg⁻¹,都低于土壤环境质量标准中的一级标准,而 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量平均值却远高于土壤环境质量标准中的一级标准;8 种重金属元素含量平均值都高于国家土壤背景值;除 As 和 Ni 外,其他元素的平均值都高于河北省土壤

表 2 土壤环境质量评价标准(mg·kg ⁻¹)					
Table 2 The assessment standards for soil environmental quality(mg·kg ⁻¹)					
元素	土壤环境质量标准			河北省土壤背景值	国家土壤背景值
	一级	二级	三级		
As	15	25	40	13.6	11.2
Cd	0.2	0.6	1	0.094	0.097
Cr	90	250	300	68.3	61
Cu	35	100	400	21.8	22.6
Hg	0.15	1	1.5	0.036	0.065
Ni	40	60	200	—	26.9
Pb	35	350	500	21.5	26
Zn	100	300	500	78.4	72.4

注:土壤环境质量标准执行 GB 15618—1995;河北省土壤背景值引用参考文献[11];国家土壤背景值引用参考文献[12]。

背景值,而 Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 这 5 种元素都远远高于河北省土壤背景值,说明该研究区土壤重金属存在明显的积累现象。

与河北省土壤背景值相比,污染较严重的重金属有 Cd、Cu、Hg、Pb、Zn。从表 3 污染状况统计可得,与

表 3 土壤重金属污染状况统计(以土壤环境质量标准评价)						
Table 3 The statistics of soil heavy metal pollution (Based on the environmental quality standard for soils)						
元素	超过土壤环境质量标准值个数			总超标数	样品总数	超标率
	一级	二级	三级			
As	19	1	0	20	100	20%
Cd	41	9	15	65	100	65%
Cr	14	0	0	14	100	14%
Cu	23	10	0	33	100	33%
Hg	8	0	1	9	100	9%
Ni	16	0	0	16	100	16%
Pb	36	0	1	37	100	37%
Zn	37	5	2	44	100	44%

注:土壤环境质量标准执行 GB15618—1995^[3]。

表 1 土壤重金属元素描述性统计								
Table 1 The descriptive statistics of soil heavy metal elements								
元素	样品数	最小值/mg·kg ⁻¹	最大值/mg·kg ⁻¹	平均值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数	偏度	峰度
As	100	5.811 5	26.958 9	12.067	3.916 39	0.324 55	1.334 3	1.717 3
Cd	100	0.125 14	4.163 04	0.535 27	0.646 404	1.207 63	2.978	11.127
Cr	100	54.4	100.4	75.41	10.631 02	0.140 98	0.665	-0.234
Cu	100	15.98	357.01	46.243	51.062 11	1.104 22	3.901	18.396
Hg	100	0.016	1.850 5	0.094 43	0.195 347	2.068 81	7.84	68.132
Ni	100	19.2	47.63	30.35	6.954 658	0.229 12	0.973	-0.078
Pb	100	18.94	563.06	47.395	62.593 89	1.320 67	6.184	47.382
Zn	100	55.93	676.59	129.2	104.602 4	0.809 86	3.069	11.094

土壤环境质量标准比较, 超标率从大到小依次为: Cd>Zn>Pb>Cu>As>Ni>Cr>Hg。

2.1.2 富集因子法评价农田土壤重金属污染

富集因子是基于一种能反映不同地质环境的化学元素比率方法, 用参考元素平抑元素的自然差异, 从而鉴别和量化人类活动对元素含量的影响。其目的是重金属元素的污染评价, 关键是要区分出自然源和人为源^[14-15]。由于人类活动对源于地壳的参考元素的含量不会产生太大的影响, 表层介质中的重金属元素含量与参考元素含量之间的比率以通过自然背景含量比率标准化后出现的高 EF 值代表人类活动的影响具有一定的合理性^[16-18], Sutherland 根据富集因子 (EF 值), 将重金属污染分为 5 个级别^[18](表 4)。

$$EF=\frac{\left(\frac{C_x}{C_{Al}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{C_x}{C_{Al}}\right)_{\text{baseline}}}$$

式中: EF 为重金属在土壤中的富集系数; C_x 为元素 x 的浓度; C_{Al} 为标准化元素的浓度; sample 和 baseline 分别表示样品和背景。

选择不同的参考元素可能会出现不同的评价结果, 究竟选择沉积物中的何种成分作为参考元素目前尚无统一的认识^[17]。Al 作为参考元素在地质文献中的使用最多^[16], 本文选用 Al 和 Fe 作为参考元素, 分别

计算其富集因子。

不同参考元素下的土壤重金属富集因子描述统计如表 5 所示。理论上, EF>1 即说明元素出现富集, 但清苑县东北部的白洋淀附近地区属于洼地范围, 因此其元素出现富集的起始标准有待进一步研究。但可以看出, 不管使用哪种参考元素, 所有元素都存在一定程度的积累现象, 从其富集因子的平均值和最大值看, 以 Cd 元素的富集程度最高, Cu、Pb、Zn、Hg 元素也存在不同程度的污染, 这与上文所述统计结果基本相同。

2.1.3 土壤污染指数法

下面采用单因子土壤污染指数法进行评价, 具体按如下方法计算:

$$P_i=C_i / S_i$$

其中 P_i 表示土壤污染物 i 的污染指数, C_i 表示土壤污染物 i 的实测值, S_i 表示污染物 i 的评价标准。在评价中, 若 P_i≤1 表示土壤未受污染, P_i>1 表示土壤受到污染, P_i 越大, 表示污染程度越重^[19-20]。评价结果如表 6 所示。

以河北省土壤背景值为评价标准得出, 该地区土壤未受 As 污染, 污染最严重的重金属是 Cd, 其污染指数高达 5.694 3; 其次是 Hg、Pb、Cu、Zn、Cr, 污染指数分别为 2.622 9、2.204 4、2.121 2、1.648、1.104; 而以土壤环境质量标准中的一级标准进行评价, 污染较严重的重金属有 Cd、Pb、Cu、Zn。因为不同评价标准得出的 Hg 污染情况差距很大, 河北省背景值的引用不同也会造成不同的评价结果, 所以该地区重金属 Hg 的污染还有待于进一步研究。

不管引用哪种评价标准, 都可得出该地区重金属元素 Zn、Cu、Cd、Pb 的污染最为严重。这和张秀芝等对河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断的研究

表 4 富集因子判断标准

Table 4 The judgment standard based on enrichment factor

级别	EF 值大小	富集程度
1	<2	无富集到弱富集
2	2~5	中度富集
3	5~20	显著富集
4	20~40	高度富集
5	>40	极度富集

表 5 不同参考元素下的土壤重金属富集因子

Table 5 The enrichment factor of soil heavy metal based on different reference elements

元素	富集因子 1(以 Al 为参考元素)					富集因子 2(以 Fe 为参考元素)				
	最小值	最大值	均值	中值	标准差	最小值	最大值	均值	中值	标准差
As	0.595 3	1.981	1.018	0.972	0.239	0.499 8	1.739	0.935	0.931	0.167
Cd	1.344	40.904	5.030	2.712	5.879	1.344	35.907	4.462	2.576	4.986
Cr	0.984	1.515	1.184	1.188	0.084	0.894	1.534	1.100	1.098	0.108
Cu	0.860	15.056	1.891	1.156	2.034	0.861	13.217	1.693	1.130	1.737
Hg	0.282	26.847	1.406	0.808	2.905	0.237	23.962	1.309	0.745	2.630
Ni	0.819	1.399	1.071	1.041	0.137	0.854	1.096	0.987	0.987	0.046
Pb	0.812	20.640	1.697	1.107	2.230	0.716	18.119	1.525	1.049	1.920
Zn	0.871	8.907	1.658	1.219	1.234	0.887	7.819	1.498	1.155	1.017

表 6 农田土壤重金属污染指数(P_i)
Table 6 The soil heavy metal pollution index

评价参照值	单因子污染指数							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
河北土壤背景值	0.880 1	5.694 3	1.104	2.121 2	2.622 9	—	2.204 4	1.648
国家土壤环境质量一级标准	0.798	2.676 3	0.837 9	1.321 2	0.629 5	0.758 8	1.354 1	1.292

注:国家土壤环境质量引用 GB 15612—1995。

中所得到的结论一致^[17]。

2.2 玉米子实重金属含量

通过对相应采样点玉米子实重金属含量的统计分析(表 7),说明清苑县土壤重金属的高度富集已经对农田作物造成了一定污染。

从变异系数看,以重金属 Ni、As、Cd 的变异系数最大,说明玉米中 Ni、As、Cd 受人类影响最大。将本文所测玉米子实中重金属含量与国家粮食卫生标准^[21]进行对比分析,子实中只有 Ni、Pb 被检出超标,超标率分别为 8%、3%,最大值分别为 0.677 04、0.252 25 mg·kg⁻¹。

该区玉米作物已经受到轻微程度的重金属污染,当地居民使用重金属含量超标的玉米存在一定的健康风险。重金属污染物会通过食物链在人体内积累,从而对人体健康造成危害。

3 讨论

3.1 土壤重金属元素相关性分析

表 8 计算了土壤重金属元素间的相关系数。可以看出,Zn、Cu、Cd、Pb 4 种重金属之间的相关性都很高,简单相关系数都在 0.8 以上,说明它们具有很好的同源性,或具有相同的富集途径,或是源于同一地质作用,或是来于相同的污染源^[22]。

表 8 土壤重金属元素的简单相关系数

Table 8 The simple correlation coefficients of soil heavy metal

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.749	1						
Cr	0.699	0.459	1					
Cu	0.674	0.896	0.378	1				
Hg	-0.014	0.045	0.032	0.024	1			
Ni	0.829	0.546	0.87	0.486	0.003	1		
Pb	0.569	0.847	0.265	0.867	0.059	0.368	1	
Zn	0.696	0.84	0.437	0.805	0.273	0.546	0.778	1

土壤母质、灌溉及生物活动(包括人类)的差异往往是使土壤性质产生变异的主要原因。变异系数的大小反映总体内部各样本之间的变异程度,变异系数越大,元素在土壤中的含量分布越不均匀,说明受人类活动影响越大^[23-24]。变异系数的划分等级如下:变异系数<0.1 为弱变异性、变异系数在 0.1~1 为中等变异性、变异系数>1 为强变异性^[25]。从表 1 得到 Zn、Cu、Cd、Pb 这 4 种重金属的变异系数分别为 0.81、1.104、1.208、1.321,说明这 4 种元素的含量值都易受各种因素的影响,具有较强的空间变异性。

3.2 土壤重金属 Zn、Cu、Cd、Pb 污染来源分析

利用河北省地质调查院所提供的清苑县 1:250 000 多目标区域地球化学调查数据,采用 Minitab 软件绘制清苑地区重金属 Cd、Zn、Pb、Cu 含量空间分布图,

表 7 玉米子实重金属元素描述性统计
Table 7 The descriptive statistics of corn seeds heavy metal

元素	最小值/mg·kg ⁻¹	最大值/mg·kg ⁻¹	平均值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数	偏度	峰度
As	0.034 466	0.137 72	0.071 46	0.019 24	0.269 25	0.668	0.561
Cd	0.007 33	0.023 24	0.011 55	0.002 86	0.247 67	1.759	4.288
Cr	0.246 6	0.613 13	0.446 42	0.072 65	0.162 74	0.001	0.25
Cu	1.373 71	4.445 61	2.064 36	0.525 94	0.254 77	2.019	5.836
Hg	0.002 2	0.003 74	0.002 66	0.000 34	0.126 24	1.147	1.282
Ni	0.101 92	0.677 04	0.252 39	0.091 52	0.362 6	1.894	4.813
Pb	0.091 63	0.252 25	0.137 33	0.025 83	0.188 05	1.319	3.959
Zn	15.024 9	31.997 9	21.287	3.663 94	0.172 12	0.551	-0.077

如图2所示。

从各元素含量空间分布图看,污染程度较高的地区主要分布在清苑县的东北地区,这4种元素的含量都是局部偏高,这和本研究在清苑东北部采样数据分析相吻合。同时Cu、Pb、Zn、Cd的高值区域仅限于洼地的局部范围,由于它们的同源性,使Cu、Pb、Zn、Cd元素异常及富集的空间位置基本相同。根据浅层土壤中重金属的地球化学行为特征和来源,可初步判断这些高值点主要源于人为活动^[25-26]。

清苑县东北部的白洋淀作为天然的积水洼地,汇水区上游及周边的化学风化物在自然河流和地表径流的作用下向洼地汇集,使之成为元素高富集区。过去对白洋淀的污染评价研究有很多,张秀芝等研究认为,独特的地球化学沉积环境是造成浅层土壤中较高的地球化学背景的主要原因,浅层土壤异常具有典型的二元性特征,后期的人为叠加作用十分强烈^[17]。

据实地调查,白草沟河的上游分布有造纸厂、铝钢厂、啤酒制造公司、化工厂等工厂,龙泉河的上游也分布有合金厂、电厂、造纸厂、化工厂等,这些都是污

水排放极其严重的工厂类型,由于该地区的地势为西南高、东北低,污水排放到河里,最后都汇流到望亭乡东安村附近的白洋淀。保定市每年也都有大量城市污水经府河排入白洋淀。而在清苑县的东北地带,即石桥乡、望亭乡、何桥乡及老何头乡等地分布有大量工厂(铅厂、铝厂、杀虫剂制造厂、铝钢厂、炼油厂、冶炼厂、化工厂、煤场、铜加工厂等),并随处可见排污水沟。这些工厂生产过程中排放的大量有毒有害物质通过大气沉降、废渣渗滤和污水灌溉进入土壤,致使周边农田受到不同程度的污染。初步判断该地区重金属含量高于其他地区的主要原因是冶炼厂产生的有毒粉尘及污水灌溉。

张秀芝等在河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断的研究中也提到,位于Cu、Pb、Zn、Cd高度富集区内(洼地西南部)的数家简易炼铜厂、炼锌厂及小-中型的电镀厂(以镀锌、铜为主)构成了主要污染元素Cu、Pb、Zn、Cd的污染源^[17]。杨卓等在对白洋淀污染研究中也指出白洋淀汇入河流上游的工业污水的排放是造成该地区重金属严重异常的重要原因^[27]。

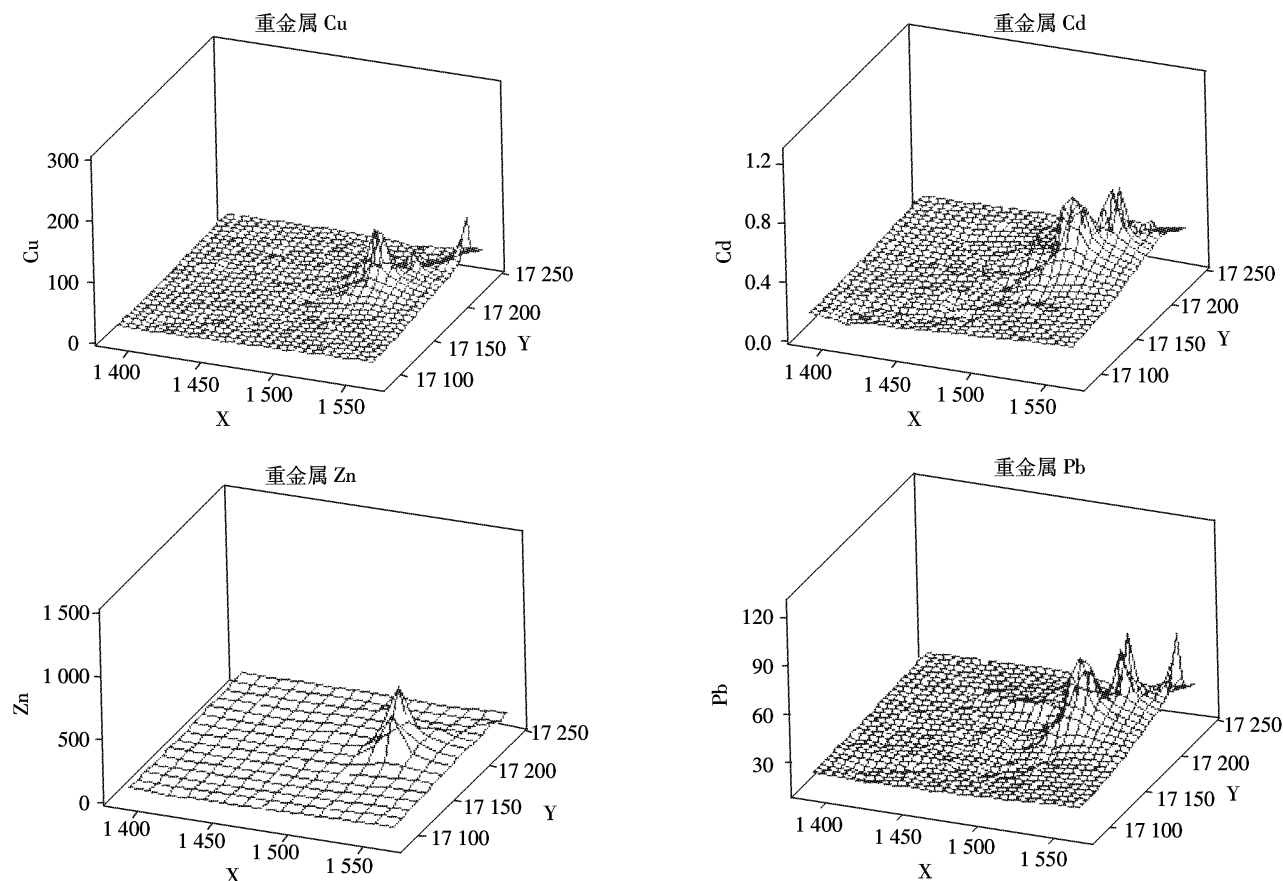


图2 清苑地区表层土壤环境Cu、Cd、Zn、Pb地球化学图

Figure 2 The geochemical maps of Cu、Cd、Zn、Pb of Qingyuan area surface soil

4 结论

清苑县农业土壤存在一定程度的重金属积累,以Zn、Cu、Cd、Pb这4种重金属污染最为严重,这4种元素存在严重的局部污染,而该地区的农田作物也已经存在一定程度的重金属污染。该地区的重金属污染主要是由于人类活动引起,境内大量工厂的污水排放及有毒粉尘的产生,加上特殊的地势走向,以及周边农田的污水灌溉,造成严重的重金属局部积累现象,应引起有关部门的高度重视,并采取积极有效的措施进行污染防治处理。

由于重金属元素在生态系统中的生物富集和生物放大作用会引起农作物代谢失调、生长发育受阻或导致遗传变异从而直接影响作物的品质,并通过食物链直接威胁人们的健康与安全^[28]。该地区土壤重金属存在严重污染情况,但其相应作物子实中只有Ni和Pb超标,因而玉米子实对重金属的富集特性还需要进一步的研究。总之,了解农田土壤和农作物中重金属污染状况、分布的空间变异规律及污染来源,对有效防止重金属污染以及农业结构调整和优化具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 赵良菊,肖洪浪,郭天文,等. 甘肃省武威地区灌漠土微量元素的空
间变异特征[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 536-540.
ZHAO Liang-ju, XIAO Hong-lang, GUO Tian-wen, et al. Spatial vari-
ability of micronutrients of irrigated desert soil in the Baiyun Village of
Wuwei Rgion[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 536-
540.
- [2] 王强恒,李瑞敏,王志农,等. 河南黄淮平原土壤中Cu的生态安全
评价[J]. 地质通报, 2008, 27(2).
WANG Qiang-heng, LI Rui-min, WANG Zhi-nong, et al. Ecological
security evaluation of Cu in soils in the Huanghuai plain, Henan, China
[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2).
- [3] 宋波,陈同斌,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健
康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of
cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the po-
tential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006,
26(8): 1343-1353.
- [4] 李梅,吴启堂,李锐,等. 佛山市郊污灌菜地土壤和蔬菜的重金
属污染状况与评价[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(2): 19-21.
LI Mei, WU Qi-tang, LI Rui, et al. The Investigation and evaluation of
heavy metal pollution in wastewater irrigated soils and vegetables in the
Suburb of Foshan [J]. *Journal of South China Agricultural University*,
2009, 30(2): 19-21.
- [5] 马成玲,王火焰,周健民,等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金
属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 751-
755.
MA Cheng-ling, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Investigation
and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical
county in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Sci-
ence*, 2006, 25(3): 751-755.
- [6] 王元仲,李冬梅,高云凤. 河北省玉米主产区土壤重金属污染水平调
查研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(6): 28-32.
WANG Yuan-zhong, LI Dong-mei, GAO Yun-feng. Investigation of the
heavy metal pollution level in soil of main maize area in Hebei Province
[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(6): 28-32.
- [7] 马光,贺旭峰,胡斌,等. 焦作博爱农场与中马村矿土壤及玉米
重金属污染分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 43-46.
MA Guang, HE Xu-feng, HU Bin, et al. Contents of several heavy met-
als in corn and soils from a Boai Farm and Zhongmacun Coal Mine in
Jiaozuo City, Henan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,
2007, 26(Suppl): 43-46.
- [8] Davies B E, Ballinger R C. Heavy metal in soils in north Somerset, Eng-
land, with special reference to contamination from base metal mining in
the Mendips[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1990, 12:
291-300.
- [9] Korre A. Statistical and spatial assessment of soil heavy metal contami-
nation in areas of poorly recorded, complex sources of pollution, Part 1
[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, 13:
288-316.
- [10] 张僧元,等. 清苑县志[M]. 北京: 新华出版社, 1993.
ZHANG Seng-yuan, et al. Qingyuan County history[M]. Beijing: Xin-
hua Press, 1993.
- [11] 王凤仙,胡玉清,李生志. 河北省褐土重金属元素重金属及其背景
值[J]. 农业环境保护, 1987, 6(3): 21-23.
WANG Feng-xian, HU Yu-qing, LI Sheng-zhi. Brown soil heavy metal
elements in Hebei Province and background values[J]. *Agro-Environ-
mental Protection*, 1987, 6(3): 21-23.
- [12] 魏复盛,等. 中国土壤元素背景值基本统计及其特征值 [J]. 中国环
境监测, 1991, 7(1).
WEI Fu-sheng, et al. The basic statistical characteristic value and
background value of China soil element[J]. *China's Environmental
Monitoring*, 1991, 7(1).
- [13] GB15618—1995, 土壤环境质量标准[S].
GB15618—1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [14] 张秀芝,鲍征宇,唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评
价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1).
ZHANG Xiu-zhi, BAO Zheng-yu, TANG Jun-hong. Application of the
enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the
environmental geochemistry [J]. *Geological Science and Technology
Information*, 2006, 25(1).
- [15] 恭任,于瑞莲. 应用地累积指数法和富集因子法评价 324 国道塘
头段两侧土壤的重金属污染[J]. 中国矿业, 2008, 17(4).
GONG Ren, YU Rui-lian. Application of index of geo-accumulation
and enrichment factor in assessment of heavy metal contamination in
soil of tangtou section on No.324 main road [J]. *China Mining Maga-*

- zine, 2008, 17(4).
- [16] 郝春明, 陈由鑑, 李瑞敏, 等. 基于地球化学标准化方法的平湖市农田土壤重金属污染评价[J]. 环境污染与防治, 2009, 32(2).
HAO Chun-ming, CHEN You-jian, LI Rui-min, et al. The soil heavy metal pollution evaluation of pinghu based on geochemical standardization method[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 32(2).
- [17] 张秀芝, 郭海全, 李宏亮, 等. 河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断[J]. 地学前缘, 2008, 15(5):90-96.
ZHANG Xiu-zhi, GUO Hai-quan, LI Hong-liang, et al. Distinguishing origins of elements in environmental geochemistry of Baiyangdian billabong of Hebei Province, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):90-96.
- [18] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an Urban Stream, Oahu, Hawaii[J]. *Environ Geol*, 2000, 39:611-627.
- [19] Dewan Ali Ahsan, Tomas Angel DelValls. Distribution of arsenic and trace metals in the floodplain agricultural soil of Bangladesh [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2009, 82:11-15.
- [20] S. Gupta. Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes[J]. *Environ Monit Assess*, 2009.
- [21] GB2715—2005, 粮食卫生标准[S].
GB2715—2005, Hygienic standard for grains[S].
- [22] 蔡立梅, 马 瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, 29(12).
CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12).
- [23] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5):825-826.
- SHI Jia-chun, LIU Xing-mei, YU Chun-lan, et al. Spatial variability and risk evaluation of soil heavy metals in Taihu Lake region of North Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):825-826.
- [24] 王 波, 王元仲, 李冬梅, 等. 迁安市农田重金属含量空间变异性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8):1495-1500.
WANG Bo, WANG Yuan-zhong, LI Dong-mei, et al. Spatial variability of farmland heavy metals contents in Qianan City[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8):1495-1500.
- [25] 曹会聪, 王金达, 张学林, 等. 吉林省农田黑土中 Cd、Pb、As 含量的空间分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(10).
CAO Hui-cong, WANG Jin-da, ZHANG Xue-lin, et al. Spatial distribution of Cd, Pb, As contents in the farmland black soil in Jilin Province[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10).
- [26] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3).
HU Ke-lin, ZHANG Feng-rong, LV Yi-zhong, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing County, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3).
- [27] 杨 卓, 王殿武, 李贵宝, 等. 白洋淀底泥重金属污染现状调查及评价研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5).
YANG Zhuo, WANG Dian-wu, LI Gui-bao, et al. Investigation and assessment on pollution status of heavy metal in sediment of Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5).
- [28] 何 凤, 李瑞敏, 王 轶, 等. 河南省基于土壤-小麦系统的土壤 Cr 生态安全评价[J]. 地质通报, 2008, 27(7):1060-1064.
HE Feng, LI Rui-min, WANG Yi, et al. Ecological safely evaluation of Cr in soils based on the soil-seed system in Henan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(7):1060-1064.