

山东省黄河故道区域土壤环境背景值研究

刘江生¹, 王仁卿^{1,2}, 戴九兰^{1,2*}, 张永利², 王强²

(1. 山东大学环境研究院, 济南 250100; 2. 山东大学生命科学院, 济南 250100)

摘要:对山东省黄河故道土壤环境中的重金属元素、六六六、滴滴涕等难降解农药和有机质含量进行了研究,并分析了重金属元素的纵向分布、有机质和重金属含量的相关性、不同土地利用方式对土壤背景值的影响.结果表明,表层土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As、Co、V、Mn、Cd 和 Ni 的背景值含量分别为 13.46、16.23、42.31、30.97、0.090、3.90、8.01、36.42、426.83、0.063 和 18.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量为 0.74%,六六六和滴滴涕的检出率分别为 100% 和 60%,含量低于土壤环境质量二级标准;11 种土壤重金属元素背景值均低于土壤环境质量一级标准,其中 10 种重金属元素(Hg 除外)土壤背景值低于全国水平、山东省及黄土高原地区土壤环境背景值,元素 Hg 在表层土壤存在富集现象,Cd 有向下层迁移的趋势;元素 Hg、Cd 和有机质在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层呈显著差异,其它元素无显著差异;不同土地利用方式下的土壤背景值无显著差异;有机质与 Cu、As、Mn、Pb、Zn、Cr、Co、Ni 等元素有极显著正相关性.

关键词:黄河故道;土壤环境背景值;重金属

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1699-06

Soil Environmental Background Concentrations in Old Course of the Yellow River in Shandong Province

LIU Jiang-sheng¹, WANG Ren-qing^{1,2}, DAI Jiu-lan^{1,2}, ZHANG Yong-li², WANG Qiang²

(1. Environment Research Institute, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. College of Life Science, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: The environmental background concentrations of soil heavy metals, HCH, DDT and organic matter in old course of the Yellow River (Shandong area) were studied. Heavy metals vertical distribution, correlative analysis between organic matter and heavy metals, and the effect of different land use types were analyzed. The results showed that the background concentrations were 13.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Cu, 16.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Pb, 42.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Zn, 30.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Cr, 0.090 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Hg, 3.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for As, 8.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Co, 36.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for V, 426.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Mn, 0.063 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Cd, 18.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Ni, and 0.74% for organic matter respectively. The detection rates of HCH and DDT were 100% and 60% respectively, and their concentrations were lower than Grade II of environmental quality standard for soils. All the heavy metals in soils were lower than Grade I of environmental quality standard for soils, and were lower than the background concentrations in the whole country, Shandong Province and the Loess Plateau area except for Hg. Mercury was significantly enriched in the surface soil, and the concentration of Cd was higher in the sublayer soil. The differences were significant between the layer 0-20 cm and 20-40 cm for Hg, Cd and organic matter, but not for the other heavy metals. The differences were not significant for environmental background concentrations among different land use types. Organic matter had highly positive correlations with Cu, As, Mn, Pb, Zn, Cr, Co and Ni.

Key words: old course of the Yellow River; soil environmental background concentration; heavy metal

土壤环境背景值或称环境本底值,是指在未受或少受人类活动影响下土壤本身的化学元素组成和含量.土壤环境背景值的确定,可以为合理制定土壤环境质量标准提供科学依据,为评价农业化学品投入等人类活动对土壤环境质量的影响提供参考依据,有助于研究和评价不同环境、地质、地理条件下土壤的污染程度.因此它是指导土壤污染监测、评价以及治理工作的基础,并可为农牧业生产以及环境病的防治服务.因此,土壤环境背景值的研究具有重要的理论和实践意义,一直以来都是国内外环境科学领域关注的对象^[1],世界很多地区先后都进行了背景值的研究工作^[2-6].

黄河故道是由于黄河主河道迁徙游动而遗留下来的一个自然环境比较独特的地理单元.根据历史资料,自公元前 602 年以来,黄河下游的决口改道有 1 500 多次,其中重大的改道有 26 次.黄河故道在山东省主要分布在聊城、德州和菏泽与河南省交界地带,成土母质主要是第四系沉积物及黄河冲积物,为

收稿日期: 2007-06-01; 修订日期: 2007-10-23

基金项目: 山东省环境保护重点科技项目(2004132); 中国博士后科学基金项目(20060400981); 山东省博士后科学基金项目(200601005)

作者简介: 刘江生(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染生态学 and 土壤环境质量演变, E-mail: liujsh1983@mail.sdu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: daijiulan@sdu.edu.cn

重要的林果牧渔地区. 该地区属温带大陆性季风气候, 多年平均降雨量 565 ~ 590 mm, 降雨集中在夏季 (60% ~ 70%). 由于黄河多次决口、改道, 泛滥沉积, 地表形成了一系列高差不大, 岗、坡、洼地纵横交错的微地貌类型. 土壤类型以潮土为主, 农业利用结构以耕地为主^[7~12]. 本研究针对聊城、德州等地的典型黄河故道土壤环境背景值进行了系统的调查, 对土壤中的 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As、Co、V、Mn、Cd、Ni 等 11 种重金属元素、六六六、滴滴涕等难降解农药、有机质含量和土壤 pH 值进行了分析测定. 通过研究摸清了山东黄河故道典型区域土壤中重金属、难降解农药及有机质的环境背景值和分布特征, 以期环境污染监测、评价和环境基准的建立提供基础数据, 同时也为今后科研和生产提供准确可靠的信息. 该结果也填补了山东省黄河故道这一区域土壤环境背景值的空白.

1 材料与方法

1.1 样品采集

按数理统计和成图的要求, 综合考虑区域内(黄河故道)地形、地貌、地质、水文、母质、土壤利用及工业、交通、社会经济状况等自然环境和社会环境, 以此为依据来确定采样点. 采样范围为山东省典型黄河故道: 莘县-冠县-临清-夏津及阳谷等古河道. 土壤样品采集方法: 在黄河故道典型区约 5 ~ 10 km 采集 1 个土壤混合样, 由 5 ~ 7 个土壤样品组成, 采样方式采用梅花布点法, 采集土壤样品 2 ~ 3 kg, 共采集 40 个土壤样品 (0 ~ 20 cm 土层 30 个, 20 ~ 40 cm 土层 10 个). 采样避开污染源和路边等人类活动严重影响的区域. 采样点如图 1 所示.

1.2 样品测定

土样在室内风干、磨碎, 过 1 mm 孔径尼龙筛的土样用作物理性质分析, 过 0.25 mm 孔径尼龙筛的土样用作土壤元素全量分析^[13~15], 样品的混合、装袋、粉碎、研磨等处理都采用木头、陶瓷用具.

土壤 pH 值用水土比 2.5:1 浸提酸度计测定. 土壤样品前处理采取美国 EPA3051 方法^[16]——微波密闭消解法 (MARS-5). 样品分析采用电感耦合等离子体光谱法 (ICP-OES) 测定元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、V、Mn、Ni, 石墨炉原子吸收法 (GFAAS) 测定元素 Cd, 原子荧光分光光度法 (AFS) 测定元素 As. 土壤中 Hg 采用王水 (1+1) 法预处理, 原子荧光分光光度法 (AFS) 测定^[17]. 六六六和滴滴涕采用丙酮-石油醚提取, 浓硫酸净化, 气相色谱法测定^[18]. 土壤有机质采

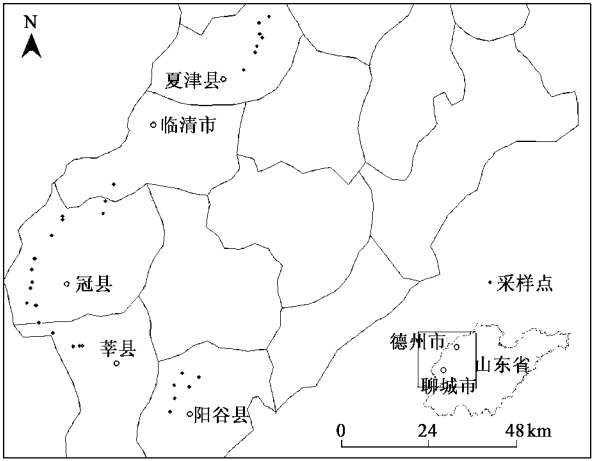


图 1 黄河故道土壤背景值采样点

Fig.1 Schematic map showing the soil sampling sites in old course of the Yellow River

用外加热法-重铬酸钾容量法测定^[19,20]. 通过标准土壤样品的分析测定和平行样测定控制样品分析测定质量, 标准土壤样品和不同元素的标准溶液购于国家标准物质研究中心.

1.3 数据处理

分析数据采用 Grubbs 检验法进行异常值剔除^[21]. 数据处理采用 SPSS、Excel 软件完成. 采样点图采用 ArcGis9.0 和 Photoshop 等软件完成.

2 结果与分析

2.1 黄河故道土壤环境背景值含量

黄河故道土壤 pH 值范围为 8.08 ~ 8.82, 均大于 8, 下层土壤 pH 略高于上层土壤 (见表 1). 从表 1 可以看出, 黄河故道土壤中的 11 种重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As、Co、V、Mn、Cd、Ni 和有机质的含量均符合正态分布, 主要是由于形成该地区土壤的母质相同. 对元素测定值呈正态分布的元素, 用算术平均值 ($\bar{X}$) 表示数据分布的集中趋势, 用标准偏差 (S) 表示数据分散度, 用 $\bar{X} \pm 2S$ 表示 95% 置信度数据范围值^[22]. 按此方法计算求得土壤重金属和有机质含量见表 1.

为了明确土壤 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 重金属元素和有机质含量是否有显著差异, 对 11 种重金属元素和有机质在这 2 个土层的含量进行 t 检验^[23,24]. 结果表明, 各元素在土壤垂直剖面中的背景含量变化总趋势为: Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、V、Mn、Ni 的含量无显著差异, 而 Cd、Hg 和有机质呈显著差异. 其中 Cd 在土壤 20 ~ 40 cm 的含量较 0 ~ 20 cm 高 50%. 而

表 1 土壤环境背景值含量

Table 1 Environmental background concentrations in the soils

测定项目	层次/cm	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值	95% 范围		分布类型
重金属/mg•kg ⁻¹	Cu	0~20	28	13.46	4.25	7.45	24.22	4.96 21.96	正态
		20~40	10	12.48	4.87	5.60	21.54	2.74 22.22	正态
	Pb	0~20	28	16.23	3.62	10.38	26.71	8.99 23.47	正态
		20~40	10	16.29	4.98	12.07	29.23	6.33 26.25	正态
	Zn	0~20	29	42.31	19.84	11.51	85.69	2.63 81.99	正态
		20~40	10	37.33	24.47	11.88	89.45	0 86.27	正态
	Cr	0~20	27	30.97	8.20	14.24	47.84	14.57 47.37	正态
		20~40	10	34.29	14.22	15.60	58.00	5.85 62.73	正态
	Hg	0~20	30	0.090	0.035	0.029	0.177	0.020 0.160	正态
		20~40	10	0.062	0.033	0.021	0.106	0 0.128	正态
	As	0~20	30	3.90	0.83	2.98	5.64	2.24 5.56	正态
		20~40	10	3.56	0.68	3.19	4.39	2.20 4.92	正态
	Co	0~20	27	8.01	1.75	5.60	12.67	4.51 11.51	正态
		20~40	10	8.24	2.08	6.17	12.03	4.08 12.40	正态
	V	0~20	26	36.42	18.62	1.58	81.25	0 73.66	正态
		20~40	10	45.96	19.29	12.67	73.33	7.38 84.54	正态
	Mn	0~20	28	426.83	60.85	337.59	581.05	305.13 548.53	正态
		20~40	10	431.23	68.01	359.46	549.59	295.21 567.25	正态
	Cd	0~20	27	0.063	0.035	0.021	0.139	0 0.133	正态
		20~40	10	0.090	0.083	0.021	0.264	0 0.256	正态
难降解农药/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	HCH	0~20	7	1.40	0.53	1.00	2.00	— —	—
		20~40	3	1.70	0.58	1.00	2.00	— —	—
	DDT	0~20	4	115.80	209.61	2.00	430.00	— —	—
		20~40	2	9.50	10.61	2.00	17.00	— —	—
有机质/%		0~20	30	0.74	0.33	0.25	1.32	0.08 1.40	正态
		20~40	10	0.44	0.13	0.22	0.59	0.18 0.70	正态
pH		0~20	30	8.43	0.17	8.08	8.82	8.09 8.77	正态
		20~40	10	8.57	0.16	8.34	8.78	8.25 8.89	正态

Hg 的表面富集现象比较明显,0~20 cm 土壤中的含量较 20~40 cm 高 50%,这与曹淑萍^[25]在天津土壤中的研究结果一致.土壤中 Cd 在 0~20 cm 和 20~40 cm 差异的原因与土壤母质和土壤淋溶造成的元素迁移有关.黄河故道地区的母质为黄河冲积物,土壤粘粒少,有机质含量低,对 Cd 的吸附和滞留作用比较差.在雨水等的淋洗作用下,Cd 会向下迁移,因此造成了 Cd 在 20~40 cm 土壤中含量高.造成土壤中 Hg 在 0~20 cm 和 20~40 cm 差异的原因除了与土壤母质有关外,主要是受大气沉降等因素的影响.元素 Hg 是一种典型的气迁移元素,山东是燃煤大省,尤其是冬季,燃煤释放出的 Hg 经短途运移后经干湿沉降返回地面.因此,表层土壤中 Hg 含量较高^[26,27].土壤有机质呈现降低趋势,0~20 cm 含量较 20~40 cm 高 68%.由于土壤有机质含量最高为 1.32%,因此该地区土壤属于相对较贫瘠的土壤.0~20 cm 和 20~40 cm 土层中重金属环境背景值均

低于土壤环境质量一级标准,说明该地区土壤中重金属含量主要来源于土壤母质,无明显外源性重金属污染状况.

山东黄河故道区域土壤中六六六的检出率为 100%,0~20 cm 和 20~40 cm 土壤中六六六平均含量分别为 1.40 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.70 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其最高值和平均值均远低于 0.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤环境质量一级标准;滴滴涕的检出率为 60%,0~20 cm 和 20~40 cm 土壤中滴滴涕平均含量分别为 115.80 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 9.50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,0~20 cm 土壤中滴滴涕的最高值和平均值介于一级标准 0.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和二级标准 0.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,而 20~40 cm 的最高值和平均值均低于一级标准.因此,山东省从 1983 年开始禁用六六六、滴滴涕,到目前黄河故道地区六六六、滴滴涕农药残留不会对土壤环境造成污染.

2.2 土壤有机质与环境背景值的相关性

由于土壤有机质是形成重金属络合物的重要组

分,尤其是土壤中的溶解性有机质(DOM),可以通过分解、吸附、解吸、表面径流、淋溶等过程而影响重金属的迁移和转化^[28,29],因此对该区域土壤中有有机质含量和重金属含量进行了相关性分析(见表2).由表2可以看出,0~20 cm土壤中有有机质含量与重金属Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、Mn、Ni的含量呈极显著正相

关性,与Hg、V、Cd无显著相关性;20~40 cm土壤中有有机质含量与重金属Cu、As、Mn的含量呈极显著正相关性,与Zn、Cr、Co呈显著正相关性,而与Pb、Hg、V、Cd、Ni无显著相关性.以上结果说明土壤中的有机质对Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、Mn、Ni等重金属元素的固持具有重要作用.

表2 土壤中有有机质含量和重金属含量的相关关系¹⁾

Table 2 Personal correlations between soil organic matter and concentrations of heavy metals in the soils

层次	项目	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As	Co	V	Mn	Cd	Ni
0~20 cm	相关系数	0.621**	0.718**	0.787**	0.695**	0.352 ns	0.797**	0.626**	-0.100 ns	0.737**	0.252 ns	0.758**
	样本数	28	28	29	27	30	30	27	26	28	27	29
20~40 cm	相关系数	0.790**	0.445 ns	0.739 *	0.717 *	0.090 ns	0.894**	0.711 *	0.200 ns	0.770**	0.280 ns	0.440 ns
	样本数	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

1) **表示p<0.01; *表示p<0.05; ns表示不显著

2.3 不同土地利用方式对土壤环境背景值的影响

许多研究表明,土地的不同利用方式会使土壤的化学性质有所差异^[30],因此对黄河故道区域0~20 cm土壤中不同土地利用方式地区重金属平均值进行比较(见表3).对不同土地利用方式的土壤环境进行方差分析,结果表明,农田、林地、农林混种等不同土地利用方式下全部11种重金属元素和有

机质含量均无显著差异.从平均值来看,尽管土壤中重金属元素和有机质含量相差不大,但除Ni外,林地土壤中其余重金属元素和有机质含量低于农田土壤中的含量.可见,耕作过程中农药、化肥施用是土壤中重金属含量的重要来源.另外由于耕作中的施肥,使得农田和农林混种田土壤中有有机质含量高于林地土壤^[31,32].

表3 不同土地利用方式地区表层土壤元素平均值比较

Table 3 Comparison of mean concentrations of elements among different land use types

类型	重金属/mg•kg ⁻¹											有机质
	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As	Co	V	Mn	Cd	Ni	/%
农田	13.89	16.36	42.97	30.76	0.096	3.82	8.13	33.39	429.89	0.067	18.31	0.77
	(15) ¹⁾	(15)	(15)	(14)	(16)	(16)	(14)	(15)	(15)	(14)	(15)	(16)
林地	12.26	15.48	41.72	27.45	0.073	3.73	7.40	30.43	403.07	0.066	18.45	0.62
	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)
农林混种	13.26	16.33	41.56	32.85	0.089	4.12	8.11	44.35	432.30	0.056	19.04	0.74
	(9)	(9)	(10)	(9)	(10)	(10)	(9)	(8)	(9)	(9)	(10)	(10)

1)括号中数值为样本数

2.4 黄河故道土壤环境背景值与其他地区的比较

将山东黄河故道区域与其他地区测定元素的算术平均值进行比较(见表4).黄河故道土壤中Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、V、Mn、Cd、Ni等10种重金属元素的环境背景值比山东省、黄土高原和全国土壤背景值偏低.这主要是因为该地区土壤母质主要来源是黄河冲积物,土壤中沙粒含量较高,重金属元素含量较低所致.由于泥沙的粒度对重金属的分布影响较大,重金属主要被<0.025 mm的细颗粒泥沙吸附,而淤积泥沙较悬移质泥沙粗,则淤积泥沙中重金属含量低于悬移质泥沙中重金属含量.因此,当被侵蚀的黄土高原土壤进入河流后,土壤在水力作用下分

级形成悬移质和沉积物的过程中,重金属随之发生分离,出现河道沉积物的重金属含量低于黄土高原土壤元素平均值^[33].但0~20 cm土壤中Hg的环境背景值是山东省的5.6倍(1985年左右测定),是全国土壤环境背景值的1.4倍(1985年左右测定),是黄土高原地区的3.8倍(1994年测定),并且有表层土壤富集的趋势,这是因为Hg是一种典型的气迁移元素,燃煤造成空气中的Hg会沉降到地面,造成Hg浓度偏高.另外像农药化肥也可带来一定Hg的积累.在其它许多地区也有类似的现象,例如,徐州两合土区为黄河冲积平原,Hg浓度也偏高,为0.121 mg•kg⁻¹^[34].0~20 cm土壤中Cd的环境背景值较山

表 4 黄河故道土壤重金属背景值与其他地区比较/mg•kg⁻¹

项目	层次/cm	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	As	Co	V	Mn	Cd	Ni
黄河故道	0~20	13.46	16.23	42.31	30.97	0.090	3.90	8.01	36.42	426.83	0.063	18.71
山东省 ^[36]	0~20	21.7	24.3	61.9	65.2	0.016	8.7	13.0	74.4	644	0.079	23.0
黄土高原 ^[37]	0~20	21.30	22.90	69.30	67.30	0.024	12.00	11.90	75.60	616	0.105	30.00
全国 ^[36]	0~20	22.6	26.0	74.2	61.0	0.065	11.2	12.7	82.4	583	0.097	26.9
土壤环境质量标准 ^[38]	0~20	35	35	100	90	0.15	15	—	—	—	0.20	40

东省和全国土壤环境背景值偏低,而 20~40 cm 的背景值含量较山东省环境背景值高 13.9%,略低于全国土壤环境背景值,并有向下迁移的趋势.因此应该对该地区 Hg 和 Cd 这 2 种重金属元素引起足够的重视.

由于人类活动的影响几乎无所不在,在有人类居住的地方很难找到未受到任何污染的土壤.但从实际操作的角度考虑,只要通过合理的取样布点,采集避开人类活动密集区域的“清洁”土壤,则所取土壤的元素含量就可以代表其相应的背景值^[35].

3 结论

(1) 重金属元素和有机质在土壤中的含量较为一致,区域变动幅度较小,这是土壤经长期均匀化作用的结果,因此都服从正态分布.

(2) 重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、V、Mn、Ni 在土壤中的含量均低于山东省、全国和黄土高原地区土壤环境背景值.元素 Cd 在 0~20 cm 土壤中含量低于山东省和全国土壤背景值,在 20~40 cm 土壤中高于山东省土壤背景值,低于全国土壤背景值.元素 Hg 含量相对较高,但是仍低于土壤环境质量一级标准,说明采集土样是没有受到人类活动污染的“清洁”土壤,所测定的含量可以代表黄河故道这一区域土壤环境背景值.

(3) 各元素在土壤纵向分布(自上而下)上,重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Co、V、Mn、Ni 的含量无显著差异,Cd 有向下层迁移的趋势,而 Hg 有表层土壤富集现象,有机质呈明显的降低趋势.

(4) 土壤中有有机质和重金属元素 Cu、As、Mn 呈极显著的正相关性.在 0~20 cm 土壤中,有机质还和重金属元素 Pb、Zn、Cr、Co、Ni 有极显著的正相关性关系.

(5) 在农田、林地和农林混种 3 种不同土地利用方式下土壤环境背景值含量无显著差异.从平均值来看,除 Ni 外,林地土壤中其余重金属元素和有机质含量略低于农田土壤中的含量.

(6) 黄河故道区域土壤中六六六的检出率为 100%,滴滴涕的检出率为 60%,但均低于土壤环境质量二级标准,因此该地区土壤中六六六、滴滴涕等难降解农药残留对土壤生态系统是安全的.

参考文献:

[1] 夏增禄,李森照,李廷芳. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社,1987. 3-5.

[2] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, *et al.* Arsenic background concentrations in Florida, USA, surface soil: determination and interpretation[J]. Environmental Forensics, 2001, **2**: 117-126.

[3] Ma L Q, Tan F, Harris W G. Concentration and distributions of eleven metals in Florida soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, **26**: 769-775.

[4] Holmgren G C S, Meyer M W, Chaney R L. Cadmium, Pb, Zn, Cu and Ni in agricultural soils of the United States of America[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, **22**: 335-348.

[5] Chen J S, Wei F S, Zheng C. Background concentrations of elements in soils of China[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1991, **57/58**: 335-348.

[6] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990. 330-382.

[7] 马昭让,岳彩田. 黄河故道沉沙区综合治理技术研究[J]. 山东林业科技,2005, (3): 27-28.

[8] 袁晓兰. 黄河故道区域土地沙漠化程度的景观尺度评价[J]. 山东林业科技,2006, (3): 15-17.

[9] 张义丰,宁远. 黄河故道的开发利用与发展前景[J]. 地理科学进展,1997,**16**(1): 37-43.

[10] 舒莹,李爱贞,郭笃发. 黄河故道区荒漠化现状、成因及综合治理对策研究——以山东省冠县为例[J]. 国土与自然资源研究,2004, (1): 56-57.

[11] 黄以柱. 黄河故道区域土地利用的合理结构[J]. 地理学报, 1996,**51**(2): 172-180.

[12] 许德凯,张清池,王为君. 夏津县风沙化土地研究[J]. 中国水土保持,1999, (11): 41-42.

[13] 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): 463-468.

[14] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特性[J]. 生态学报,2005, **5**(5): 1146-1151.

[15] McGrath D. Use of microwave digestion for estimation of heavy metal content of soils in a geochemical survey[J]. Talanta, 1998, **46**: 439-448.

[16] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Method 3051: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils [S]. USEPA, 1994.

[17] 刘玉萍,陈晓云,詹德江,等. 应用双道原子荧光分析仪联合测定土壤中汞和砷[J]. 杂粮作物, 2003,23(3): 178-179.

[18] GB/T 14550-1993, 土壤质量——六六六和滴滴涕的测定标准[S].

[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,2000. 106-108.

[20] 骆洪义,丁方军. 土壤学实验[M]. 成都: 成都科技大学出版社,1995. 97-102.

[21] 四川省环境科学学会. 环境监测常用数理统计方法[M]. 成都: 成都科学技术出版社,1983. 25-26.

[22] 奚旦立,孙裕生,刘秀英. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社,1995. 212-213.

[23] 李其林,王显军. 汽车尾气对土壤和蔬菜中铅含量的影响[J]. 生态环境,2004,13(1): 17-18.

[24] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社,1983. 316-325.

[25] 曹淑萍. 重金属污染元素在天津土壤剖面中的纵向分布特征[J]. 地质找矿论丛,2004,19(4): 272-273.

[26] 段永惠. 污水灌区汞、镉在土壤中的纵向迁移及影响因素研究[J]. 污染控制,2004, (12): 35-37.

[27] 徐尚平,陶澍,曹军,等. 天津地区土壤中微量元素含量的纵向分异[J]. 中国环境科学,1999,19(3): 226-229.

[28] 曹会聪,王金达,张学林. 东北地区污染黑土中重金属与有机质的关联作用[J]. 环境科学研究,2007,20(1): 36-41.

[29] 许中坚,刘广深,刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. 环境化学,2003,22(5): 427-433.

[30] 孙启祥, 张建锋, Makeschin F. 不同土地利用方式土壤化学性状的酶学指标分析[J]. 水土保持学报,2006,20(4): 98-101, 159.

[31] 王铁宇,罗永龙,罗维,等. 北京官厅水库周边土壤重金属与农药残留及风险分析[J]. 生态与农村环境学报,2006,22(4): 57-71.

[32] 王起超,麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境,2004,20(2): 62-64.

[33] 赵沛伦,申献辰,夏军,等. 泥沙对黄河水质影响及重点河段水污染控制[M]. 郑州: 黄河水利出版社,1998. 26-28.

[34] 张纪伍,梁伟,顾建宁. 江苏省土壤区域中若干元素含量是环境条件的综合反映[J]. 中国环境监测,1992,8(3): 114-118.

[35] 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.

[36] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1995.

[37] 田均良,彭祥林. 黄土高原土壤地球化学[M]. 北京: 科学出版社,1994.

[38] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].