

黑土重金属元素局地分异及环境风险

王铁宇^{1,2}, 汪景宽¹, 周敏¹, 边振兴¹, 关连珠¹, 颜丽¹

(1. 沈阳农业大学土壤肥力研究室, 辽宁 沈阳 110161; 2. 中国科学院生态环境研究中心系统生态室, 北京 100085)

摘要:选择典型黑土 3 个基本样区的 191 个土壤样品,探讨了 8 种重金属元素的分异状况。结果表明,不同重金属元素,整体上存在区域差异,表层中 Cu、Zn、Cr、Hg 均为海伦高于其他两地,Pb 为公主岭> 海伦> 北安;亚表层含量略有降低,分异趋同于表层。不同利用黑土的方式 Cu、Zn、Cr、Hg 大豆土壤高于玉米和荒地,Pb、Ni、As、Cd 基本呈现玉米> 大豆> 荒地,整体上荒地土壤重金属含量低于耕地。与土壤理化性质的关系主要体现在公主岭地区,Cu、Zn、Pb、As 与全 P、全 K 呈相反的显性相关趋势。重金属的环境污染及潜在生态风险均为海伦> 公主岭> 北安,海伦地区已构成轻度污染,公主岭存在较大的潜在污染,北安土壤相对较为清洁,Cd、As、Hg 在 3 地区均存在较大的环境风险。

关键词:黑土;重金属;分异;环境风险

中图分类号:X833 文献标识码:A 文章编号:1672 - 2043(2004)02 - 0272 - 05

Local Variation and Environmental Risk of Heavy Metals in Black Soils from the Northeast of China

WANG Tie-yu^{1,2}, WANG Jing-kuan¹, ZHOU Min¹, BIAN Zhen-xing¹, GUAN Lian-zhu¹, YAN Li¹

(1. Research Lab. of Soil Fertility, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Research Center for Eco - Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China)

Abstract: The levels of 8 heavy metals from 191 soil samples obtained from typical black soils in Northeast of China were analyzed in the present survey. The results showed that the concentrations of Cu, Zn, Cr and Hg in Hailun were higher than that in Gongzhuling and Beian, respectively. The concentrations of Pb showed an order: Gongzhuling> Hailun> Beian. The contents of the heavy metals in subsoil were lower than those in topsoil and varied according with them at different sampling areas. The levels of Cu, Zn, Cr and Hg in bean soil were higher than those in corn soil and fallow, respectively, while the order of Pb, Ni, As and Cd were: corn soil> bean soil> fallow. As a whole, the concentrations in the farmland were higher than in the fallow. In addition, Cu, Zn, As, Pb had the significant positive correlation with total phosphorus and the negative correlation with total potassium in Gongzhuling. The contamination caused by the heavy metals and the potential eco - risk of the regions ranked in the following order: Hailun> Gongzhuling> Beian. There was a light pollution in Hailun, potential pollution in Gongzhuling and the soil in Beian was cleaner than that in other two areas, while a severe environmental risk induced by Cd, As and Hg was found in three sampling areas.

Keywords: black soil; heavy metals; variation; environmental risk

黑土地区是我国重要的粮食生产基地,集中分布在东北地区小兴安岭和长白山西侧的山前起伏台地,总面积达 1 178 万 hm^2 。近年来,黑土耕地面积及生产力正呈下降趋势,黑土的有机质含量下降,理化性质发生了深刻的变化^[1, 2],土壤质量退化现象已极为严重。

环境中与人类健康关系较为密切的重金属主要包括 Hg、Cd、Zn、Cu、Cr、Pb、Ni、以及类金属元素 As 等,这些虽然都是土壤的构成元素,但含量过高就会对土壤造成污染^[15]。由于工业“三废”(废水、废气、废渣)的排放和农药、化肥的大量施用,使得重金属元素在土壤中的积累比 20 世纪初已明显增高^[10]。因此,重金属污染物及其对人类健康的毒害,应当予以足够的重视。

本文是国家重大基础研究项目“黑土质量时空变异规律研究”子课题的部分研究内容,通过对东北主要黑土分布典型区域采样调查,在明晰重金属含量及

收稿日期:2003 - 06 - 23

基金项目:国家重点基础研究发展(973)规划项目(G1999011810)

作者简介:王铁宇(1973 -),男,在读博士生,从事土壤质量和环境管理研究。E - mail: wangtieyu@163.com

联系人:汪景宽

局地分异现状的基础上,探讨了黑土重金属元素潜在的环境风险以及生态危害,为充实黑土质量评价指标,进一步改善黑土质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤

供试土壤为黑土,2000年5—6月采自吉林省公主岭市(70个样点)、黑龙江省海伦县(76个样点)和北安县(45个样点),采集0~20 cm和20~40 cm 2层,包括破皮黄、薄层、中层、厚层黑土及中层黑钙土等5种土样类型,同时进行样点调查和GPS定位。3地土壤母质均为第四纪沉积物,处于温带寒温带交错半湿润气候区,地貌以坡状起伏台地为主。其中公主岭地区黑土开垦年限较长,没有开垦的黑土很少;海伦是典型的黑土分布区,目前尚有没开垦的黑土,大面积土地开垦的历史不是很长,一般在300 a以内,是著名的粮食产区;北安以中厚层黑土为主,开垦历史不长,一般在150 a以内,目前还有一些尚未开垦的黑土。

1.2 分析方法

土壤有机质、全氮含量采用C/H/O/N/S元素分析仪(Elemental-III 德国)测定;全磷采用碱熔-钼锑抗比色法;全钾含量采用碱熔-火焰光度法;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法;土壤pH值采用1:2.5(土/水)pH计法;<0.002 mm粘粒含量采用吸管法^[4]。土壤中重金属元素Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni、As采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄消解,Hg用硝酸-硫酸-五氧化二钒消解,利用ICP质谱仪(HP7500,惠普公司,美国)测定其总量。数据统计分析使用Microsoft Excel和SPSS软件完成。

2 结果与讨论

2.1 不同地区黑土中重金属元素的分布状况

从表1可以看出,不同地区表层黑土中Cu、Zn、Cr、Hg均表现为海伦高于其他2地,尤其以Zn较为突出,高出公主岭地区62%,约为总体平均值的1.3倍,且呈现较大的空间变异性(变异系数35.83),明显高于公主岭和北安。这与海伦是黑土区重要的种粮生产基地有关,受农事操作以及肥料的大量使用影响较

表 1 不同黑土区重金属元素的分异(mg·kg⁻¹)

Table 1 Distribution variation of the heavy metals in different black soil regions

元素	项目	公主岭		海伦		北安	
		0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
Cu	检测值	18.01 ± 4.63	18.64 ± 4.77	23.10 ± 2.64	18.89 ± 3.75	19.82 ± 4.74	19.39 ± 4.31
	变幅	10.56 ~ 35.24	11.46 ~ 29.50	15.56 ~ 29.21	10.52 ~ 27.63	10.50 ~ 32.98	11.00 ~ 31.75
	变异系数	25.71	25.61	11.45	19.83	23.89	22.23
Zn	检测值	68.94 ± 18.11	62.31 ± 13.98	111.54 ± 39.96	106.20 ± 26.92	75.86 ± 20.66	67.40 ± 12.03
	变幅	37.24 ~ 143.15	39.73 ~ 96.21	48.99 ~ 237.81	54.93 ~ 149.80	51.50 ~ 132.63	43.74 ~ 89.74
	变异系数	26.27	22.44	35.83	25.35	27.24	17.86
Pb	检测值	26.00 ± 4.13	25.49 ± 4.93	18.33 ± 6.63	17.22 ± 7.05	14.78 ± 4.50	14.15 ± 2.98
	变幅	10.29 ~ 33.96	12.43 ~ 32.51	6.14 ~ 30.64	6.09 ~ 28.93	6.97 ~ 27.34	7.61 ~ 19.25
	变异系数	15.88	19.36	36.17	40.93	30.43	21.08
Cr	检测值	53.37 ± 11.30	52.43 ± 11.28	58.68 ± 6.43	60.58 ± 7.09	45.07 ± 7.58	44.87 ± 7.68
	变幅	28.73 ~ 76.94	29.74 ~ 69.92	39.87 ~ 70.93	38.96 ~ 70.82	31.48 ~ 65.48	27.24 ~ 55.98
	变异系数	21.17	21.52	10.95	11.71	16.83	17.11
Cd	检测值	0.12 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.11 ± 0.04	0.10 ± 0.04	0.10 ± 0.03	0.09 ± 0.03
	变幅	0.05 ~ 0.19	0.06 ~ 0.15	0.03 ~ 0.23	0.03 ~ 0.20	0.05 ~ 0.20	0.05 ~ 0.16
	变异系数	26.46	23.54	36.03	36.19	25.76	31.46
Ni	检测值	33.23 ± 7.75	29.57 ± 5.76	30.08 ± 3.84	19.78 ± 5.18	24.33 ± 4.30	24.10 ± 4.56
	变幅	18.20 ~ 52.09	17.77 ~ 4.25	18.83 ~ 38.58	18.01 ~ 38.40	11.35 ~ 34.89	15.44 ~ 35.89
	变异系数	23.33	19.49	12.78	17.40	17.68	18.92
As	检测值	17.52 ± 2.26	16.39 ± 2.50	15.94 ± 0.98	16.29 ± 1.14	12.30 ± 2.09	11.90 ± 1.64
	变幅	11.20 ~ 25.26	9.87 ~ 19.90	11.19 ~ 18.51	13.10 ~ 20.07	7.14 ~ 15.50	8.75 ~ 15.95
	变异系数	12.91	15.28	6.11	7.00	16.99	13.83
Hg	检测值	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.18 ± 0.05	0.15 ± 0.03	0.02 ± 0.10	0.02 ± 0.01
	变幅	0.01 ~ 0.11	0.01 ~ 0.09	0.05 ~ 0.30	0.03 ~ 0.15	0.01 ~ 0.04	0.01 ~ 0.04
	变异系数	28.13	57.64	30.17	37.06	27.24	25.65

大,且该地区为南低北高的空间地形变异。Pb 为公主岭含量最高,海伦次之,北安最低的趋势,Pb 污染主要来源于工业“三废”、汽车尾气排放等^[13],该趋势与公主岭在 3 地中工业、交通相对发达,车辆较多、乡村公路相对完善等因素有关。进一步对不同地区重金属元素含量进行方差检验和多重比较的结果表明,Cu,Pb,Cr,Ni,As,Hg 6 种元素在公主岭、海伦和北安 3 地均存在显著差异。亚表层与表层相比,整体上含量略有降低,但差异并不明显,Cu 的降低幅度最大,约为 22%。Zn,Cr,Hg 与表层趋势一致,均为海伦最高;Cu 和 Cd 受地域变化影响较小,3 地区表现较大的空间一致性;Ni,As 公主岭和海伦两地基本平衡,略高于北安;Pb 呈现与表层一致的分布规律(公主岭> 海伦> 北安),北安与其他 2 地的 Zn,Cr,Ni,As 和 Hg 均存在显著差异。说明不同重金属元素,整体上存在区域差异。公主岭 Pb 含量最高,初步判断存在 Pb 污染;Cu,Zn,Cr,Hg 为海伦最高,可能存在重金属的复合污染^[5]。3 地区以北安土壤环境质量相对较好。

2.2 不同利用方式黑土中重金属元素的分布状况

根据采样区不同种植制度,将 3 地合并归纳出玉

表 2 不同利用方式黑土中重金属元素的分异($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Distribution variations of the heavy metals in black soils under different cultivations

		玉米	大豆	荒地
Cu	检测值	18.47 ± 4.68	22.24 ± 3.60	19.79 ± 5.00
	变幅	10.56 ~ 35.24	14.49 ~ 32.98	10.50 ~ 26.50
	变异系数	25.34	16.18	25.29
Zn	检测值	73.09 ± 21.06	101.77 ± 40.72	76.16 ± 29.87
	变幅	37.24 ~ 143.15	48.99 ~ 237.81	51.11 ~ 161.13
	变异系数	28.82	40.02	39.23
Pb	检测值	24.81 ± 4.89	17.43 ± 6.40	12.33 ± 5.31
	变幅	10.29 ~ 33.96	6.18 ~ 30.64	6.14 ~ 25.29
	变异系数	19.73	36.71	43.04
Cr	检测值	53.33 ± 11.46	54.08 ± 8.76	48.65 ± 11.50
	变幅	28.73 ~ 76.94	31.48 ~ 70.93	32.23 ~ 66.95
	变异系数	21.48	16.20	23.63
Cd	检测值	0.11 ± 0.03	0.11 ± 0.04	0.08 ± 0.22
	变幅	0.05 ~ 0.19	0.03 ~ 0.23	0.03 ~ 0.12
	变异系数	26.97	33.72	29.14
Ni	检测值	32.76 ± 7.58	28.49 ± 4.73	23.88 ± 5.83
	变幅	18.20 ~ 52.09	14.17 ~ 38.58	11.35 ~ 30.19
	变异系数	23.43	16.62	24.43
As	检测值	17.11 ± 2.40	14.57 ± 2.33	13.65 ± 2.64
	变幅	9.06 ~ 25.26	8.64 ~ 18.51	7.14 ~ 16.75
	变异系数	14.05	15.98	19.32
Hg	检测值	0.05 ± 0.02	0.9 ± 0.03	0.07 ± 0.02
	变幅	0.01 ~ 0.13	0.06 ~ 0.11	0.02 ~ 0.12
	变异系数	40.00	33.33	19.93

米($n=83$)、大豆($n=91$)、荒地($n=12$)3 种主要土地利用类型,荒地包括林地、草地和灌木等未开垦土壤。其中公主岭以玉米为主,大豆主要分布在海伦和北安,12 个荒地样品全部来自海伦、北安,且主要分布在北安。统计结果见表 2,可以看出,Cu,Zn,Cr,Hg 4 种元素为种植大豆土壤高于玉米、荒地两种利用类型,且以 Zn,Hg 差异较为显著,与不同地区表层土壤的分异趋势基本一致。Pb,Ni,As,Cd 4 元素基本呈现玉米> 大豆> 荒地的分异规律,整体上荒地土壤中的重金属元素含量低于耕地。说明农业生产过程,尤其是施肥是土壤重金属元素来源及分异的重要影响因素。不同土地利用方式与不同地区分异规律的高度一致性,初步证明重金属在土壤中的行为及其效应受土壤类型以及自身性质所控制,土壤类型的地带性分异使得其主要性质具有质的差异,进一步导致重金属元素在空间分布上的变异。

2.3 不同地区黑土中重金属元素与土壤理化特性的关系

由表 3 可以看出,公主岭地区表层黑土中全量 Cu,Zn,Pb,As 与全 P 均呈显著或极显著的正相关($r=0.355^{**}, 0.295^{*}, 0.258^{*}, 0.318^{**}$),说明重金属元素在土壤中的迁移转化与结合形态相对复杂的 P 元素的吸附解吸可能存在密切联系;而与全 K 呈现显著或极显著的负相关($r=-0.287^{*}, -0.316^{**}, -0.385^{**}, -0.590^{**}$),调查表明,黑土区 K 肥施用量仍然很低,全 K 来源主要依赖于母质,这种显著的负相关说明黑土母质中丰富的 K 元素(平均含量 $20.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对重金属的固持和蓄积具有明显的拮抗作用。Pb、As 与土壤有机碳和全氮也呈现显著或极显著的正相关($r_{\text{Pb}}=0.293^{*}, r_{\text{As}}=0.419^{**}, r_{\text{Pb}}=0.294^{*}, r_{\text{As}}=0.419^{**}$)。海伦和北安两地重金属元素与土壤理化性质间基本没有明显的相关性,但 Pb 元素在公主岭和北安表现为完全相反的相关趋势。分析其原因一方面是各地区在气候、母质、地形等自然条件的差异,使得重金属元素基底及在土壤中的环境行为不同;另一方面是耕作、施肥和管理水平等人为因素方面的差异,使得重金属元素的注入途径以及注入量发生较大分异,从而导致黑土重金属元素含量水平与黑土质量之间的关系更为复杂。

3 不同地区黑土重金属元素污染的环境风险评估

重金属污染对土壤-植物体系的影响十分复杂,

如何利用实际的检测值来反映其对于土壤、食物链的潜在环境风险以及生态危害是至关重要的。对农田土壤环境质量的评价,是在土壤单因子评价的基础上进行多因子区域和单项污染物综合环境质量评价。本文采用比较常用的评价方法—内梅罗指数法,计算公式如下:

$$\text{单因子污染指数: } P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: C_i 为污染物的实测值; S_i 为污染物的评价标准,文中以全国土壤质量 1 级标准作为评价的环境背景值^[7]。

单个重金属污染虽有发生,但在自然界中,重金

属的污染多为伴生的综合性的复合污染^[5]。通常一种土壤又很少出现多种污染物超标现象,因此,采用兼顾平均值和最重值的多因子综合污染指数。

$$\text{复合指数: } P_c = \sqrt{[(\max P_i)^2 + \overline{P_i}^2]}/2 \quad (2)$$

式中: $\max P_i$ 为单项污染指数的最高值; $\overline{P_i}$ 为单项污染指数的平均值。

一般 $P_c \leq 1$ 为未污染, $P_c > 1$ 为已污染, $1 < P_c \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_c \leq 3$ 为中度污染, $P_c > 3$ 为重度污染。

在环境质量评价的基础上,进一步对重金属元素

表 3 不同地区黑土中重金属元素与土壤理化特性相关系数表

Table 3 Correlative coefficient of the heavy metals with soil basic properties in different regions

		粘粒	有机 C	全 N	全 P	全 K	有效 P	有效 K	pH
公主岭	Cu	0.130	0.193	0.186	0.355**	-0.287*	0.172	0.307**	0.069
	Zn	0.085	0.091	0.075	0.295*	-0.316**	-0.177	-0.020	0.008
	Pb	0.011	0.293*	0.294*	0.258*	-0.385**	-0.012	0.141	0.014
	Cr	-0.091	0.192	0.185	0.167	-0.140	-0.149	-0.018	0.140
	Cd	-0.099	-0.186	-0.226	-0.212	0.0489	-0.162	-0.168	0.012
	Ni	-0.077	0.001	-0.023	-0.029	0.108	-0.167	-0.055	0.099
	As	0.382**	0.419**	0.419**	0.318**	-0.590**	0.064	0.148	-0.055
	Hg	0.043	0.177	0.218	0.161	0.052	-0.067	0.113	0.031
海伦	Cu	0.168	0.101	0.098	0.258*	-0.112	-0.062	-0.005	-0.005
	Zn	0.096	0.068	0.073	0.112	-0.238*	0.089	-0.036	-0.047
	Pb	0.088	0.043	0.102	0.108	-0.018	0.053	0.057	0.068
	Cr	0.018	0.132	0.150	0.190	-0.218	-0.258*	-0.105	0.028
	Cd	0.148	0.125	0.150	0.231*	-0.103	0.102	-0.062	0.289*
	Ni	0.051	0.028	0.056	0.164	-0.151	0.071	0.104	0.203
	As	-0.088	-0.186	-0.180	-0.160	0.067	-0.022	0.100	-0.082
	Hg	0.086	0.082	0.113	0.072	0.055	0.199	0.189	0.144
北安	Cu	0.051	0.073	0.059	0.108	-0.050	0.183	0.156	-0.170
	Zn	-0.215	-0.020	-0.052	-0.054	-0.001	0.153	-0.023	0.023
	Pb	0.012	-0.355*	-0.336*	-0.217	0.330*	0.166	0.090	0.051
	Cr	-0.057	-0.091	-0.125	0.085	-0.065	0.087	-0.115	0.010
	Cd	0.226	0.029	0.041	0.127	-0.082	-0.351*	0.071	-0.280
	Ni	0.147	-0.212	-0.211	-0.069	0.103	-0.161	0.185	-0.115
	As	-0.001	-0.089	-0.096	-0.125	0.200	-0.040	-1.147	0.120
	Hg	-0.087	0.090	0.084	0.077	-0.190	-0.022	-0.107	0.003

可能存在的生态风险进行探讨。借鉴 Hakanson 提出的多指标生态评价方法^[11],在基于元素丰度和释放度原则的基础上,将地壳作为元素的分配相,计算公式如下:

$$\text{单因子生态危害系数: } E_i = T_i \times P_i \quad (3)$$

$$\text{复合生态风险指数: } R_i = \sum_{i=1}^m E_i \quad (4)$$

式中 P_i 为单因子污染指数,可由公式(1)得出。 T_i 为毒性响应系数。

结合黑土母质情况及重金属污染特征,经一系列统计和规范化处理,设定 8 种重金属的毒性响应系数分别为: Cu(6), Zn(3), Pb(8), Cr(4), Cd(45), Ni(4), As(16), Hg(50)^[7-9]。

采用以上两种方法建立的采样区土壤重金属综合风险评价结果见表 4。复合污染指数 P_c 为海伦 > 公主岭 > 北安,其中海伦地区为 1.45 ($P_c > 1$),已构成轻度污染,从单因子贡献来看,处于前 3 位的 Hg, As 和 Zn,均超过 1。公主岭地区存在较大的潜在污染

风险,尤其是 Pb,而北安土壤相对较为清洁。重金属的污染与其潜在的生态风险二者表现高度的一致性,不同采样区的 R_i 也呈现海伦>公主岭>北安的分异,以 110 作为 R_i 的阈值底线^[7],海伦地区已存在中等生态风险,其中 Hg、Cd、As 的潜在风险相当大。与污染指数 P_i 相比,Zn 虽然从量上反映较高的污染程度,但作为植物的必需营养元素,其潜在的生态风险却非常低, E_i 仅 3.35。3 地区 Cd、As、Hg 均存在较大的风险,探明其来源,并加以控制管理,防止污染进一步蔓延造成危害至关重要。

表 4 不同地区黑土重金属元素污染的环境风险评价结果

Table 4 Environmental risk assessments of the heavy metals in different black soil regions

样区		Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Ni	As	Hg
公主岭	P_i	0.60	0.69	0.87	0.59	0.77	0.95	1.17	0.41
	E_i	3.60	2.07	6.93	2.37	34.50	3.80	18.68	20.50
	P_c					0.98			
	R_i					92.46			
海伦	P_i	0.77	1.12	0.61	0.65	0.75	0.86	1.06	1.81
	E_i	4.62	3.35	4.89	2.61	33.60	3.44	17.00	90.50
	P_c					1.45			
	R_i					160.00			
北安	P_i	0.66	0.76	0.49	0.50	0.65	0.70	0.82	0.23
	E_i	3.96	2.28	3.94	2.00	29.10	2.78	13.12	11.50
	P_c					0.72			
	R_i					68.69			

4 结论

(1) 不同地区表层黑土中 Cu、Zn、Cr、Hg 均为海伦高于其他 2 地,并以 Zn 较为突出;Pb 为公主岭>海伦>北安;与表层相比,亚表层含量略有降低。不同重金属元素,整体上存在区域差异,3 地区以北安土壤环境质量相对较好。

(2) 不同利用方式下,Cu、Zn、Cr、Hg 为种植大豆土壤高于玉米、荒地,且以 Zn、Hg 差异较为显著,Pb、Ni、As、Cd 基本呈现玉米>大豆>荒地的分异,整体上荒地土壤中重金属含量低于耕地。

(3) 与土壤理化性质的关系主要体现在公主岭地区,表层 Cu、Zn、Pb、As 与全 P 均呈显著或极显著的正相关,而与全 K 呈现显著或极显著的负相关,Pb、

As 与土壤有机碳和全 N 也有较高的相关性,海伦和北安两地重金属元素与土壤理化性质间基本没有明显的相关关系。

(4) 重金属的环境污染及潜在生态风险均为海伦>公主岭>北安,海伦地区已构成轻度污染,达到中等生态风险,公主岭地区存在较大的潜在污染,北安土壤相对较为清洁。Cd、As、Hg 在 3 地区均存在较大的环境风险。

参考文献:

- [1] 汪景宽,王铁宇,关连珠,等. 黑土土壤质量演变初探 I. 不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. 沈阳农业大学学报. 2002. 33(1):43-47.
- [2] 王铁宇,颜丽,关连珠,等. 长期定位监测黑土有机物质的变化[J]. 农业环境科学学报. 2003. (已接受)
- [3] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990. 18-27.
- [4] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [5] 郑春荣. 重金属的复合污染[A]. 陈怀满,等. 土壤-植物系统中的重金属污染[C]. 北京:科学出版社,1996. 294-295.
- [6] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [7] 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄,乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. 生态学报,1999,19(2):206-211.
- [8] 汪晶等编译. 环境评价数据手册-有毒物质鉴定值[M]. 北京:化学工业出版社,1988. 438-439.
- [9] 何孟常,王子健,汤鸿霄. 乐安县沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学,1999,20(1):7-10.
- [10] Adciano DC. Biogeochemistry of trace metal[M]. New York Lewis Publishers Boca Raton, 1992. 3.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for quality pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, (14): 975-1001.
- [12] Fergusson J E. The heavy metals, chemistry, environmental impact and health effects[J]. Pergamon Press, 1990, 382-388.
- [13] Lee P K, Touray J C, bailiff j P. Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-17 motorway in Sologne, France[J]. Sci Tot Environ, 1997, 201: 1-15.
- [14] Berrow ML, Reaves GA. Background levels of trace elements in soils [A]. In: Perry R (ed) Proc Int Conf Environ Contam[C]. CEC Consultants, Edinburgh, 1984. 333-340.
- [15] Reimann C, Caritat P D. Chemical elements in the environment. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1998.