

doi: 10.11720/wtyht.2022.0048

宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等. 三江平原耕地土壤重金属元素分布特征及影响因素的多元统计分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1064-1075. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0048>

Song Y H, Yang F C, Liu K, et al. A multivariate statistical analysis of the distribution and influencing factors of heavy metal elements in the cultivated land of the Sanjiang Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1064-1075. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0048>

# 三江平原耕地土壤重金属元素分布特征及影响因素的多元统计分析

宋运红<sup>1,2,3</sup>, 杨凤超<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1,2,3</sup>, 戴慧敏<sup>1,2,3</sup>, 许江<sup>1,2,3</sup>, 杨泽<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 地统计学和多元数据分析是讨论土壤中重金属元素来源的有效方法。对比不同地质背景区表层和深层土壤中重金属元素的含量和分布情况, 可以为研究土壤中重金属元素的来源提供依据。三江平原是我国沼泽湿地分布相对集中的地区之一, 属于温带湿润、半湿润大陆性季风气候, 是我国重要的粮食生产基地, 以农业生产为主。本次以三江平原为典型地区, 从区域尺度上研究影响耕地土壤中的重金属元素分布的主要因素, 分别对表层和深层土壤进行取样, 计算 As、Cr、Cu、Hg、Ni、Cd、Pb 和 Zn 共 8 种重金属元素的最小值、最大值、中值、平均值、变异系数及富集系数。结果表明, 三江平原土壤环境质量优越, 表层土壤中重金属元素(除 Cd 外) As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量均略低于深层土壤; 元素富集系数均小于 2, 仅有个别点位的表层 Cd、Hg、As 富集系数存在较大的值; 通过地统计学和 Pearson 相关性分析, 在 5 种成土母质区域, 确定了表层和深层土壤中重金属元素的主要影响因子, 综合分析表明, Cr、Cu、Ni 和 Zn 的主要物质来源于成土母质, Cd、Hg、As 在部分地区可能受到人类活动的叠加影响。

**关键词:** 重金属元素; 表层土壤; 深层土壤; 地统计学和多元数据分析; 三江平原

**中图分类号:** X142; P595

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)05-1064-12

## 0 引言

东北黑土区是中国最大的商品粮基地, 黑土区的土壤环境质量问题已经引起了许多科学工作者的普遍关注<sup>[1-8]</sup>。土壤中重金属元素的迁移转化是地球关键带物质循环的重要组成, 元素通过生物地球化学过程迁移到水圈、生物圈和食物链, 最终对人类健康产生影响<sup>[9-11]</sup>。经典的道库恰耶夫学说认为, 土壤是由母质、气候、生物、地形和时间五大自然因素综合作用的产物, 在很大程度上, 土壤中的元素分

布与成土母质具有明显的继承关系<sup>[12-13]</sup>, 同时也不同程度的受到人类活动的影响<sup>[14-15]</sup>。因此, 研究土壤中重金属元素的来源首先应该弄清土壤中元素和成土母质间的关系, 在此基础上, 确定人为因素对重金属元素分布的影响程度。

表层土壤中某些重金属元素的含量包括成土母质的继承和人为因素的输入<sup>[9, 16]</sup>。一般而言, 区域上深层土壤中某些重金属元素的含量可以作为背景值来评估该地区表层土壤中重金属元素的富集程度<sup>[17-18]</sup>。然而, 由于长期风化和淋溶, 加上人类活动的影响, 与深层土壤中的元素含量相比, 表层土壤

**收稿日期:** 2022-01-27; **修回日期:** 2022-06-07

**基金项目:** 中国地质调查局项目“松辽平原黑土地生态地质调查”(DD2021779)、“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520)

**第一作者:** 宋运红(1983-), 女, 2009年毕业于吉林大学, 硕士, 高级工程师, 地球化学专业, 主要从事黑土地形成与演化研究工作。Email: yunhong408@163.com

**通讯作者:** 杨凤超(1982-), 男, 2018年毕业于吉林大学, 博士, 高级工程师, 岩石学、矿物学、矿床学专业, 主要从事土地督察及地质矿产调查研究工作。Email: yangfc123@163.com

中的重金属元素含量一般有较强的差异。而且,对不同的成土母质的黑土,这种差异是否相同,到目前为止相关报道还很少。因此,本次引进元素富集系数<sup>[9,19]</sup>,利用黑土深层土壤中的重金属元素含量评估黑土表层土壤中元素富集或损失的程度,以期弄清耕地黑土中重金属元素与成土母质间的关系。

三江平原在保障国家粮食安全中具有举足轻重的地位。但是人类快速增长的农业及工业活动,都可能会引起某些重金属元素在耕地土壤中的积累。由于主要人类活动是农业,这里的土壤受到现代工业的污染较少,所以分析深层土壤中的微量含量对于表层土壤的研究非常重要。目前对三江平原耕地土壤重金属元素的特征研究较少,重金属元素的种类研究也不全,利用表层和深层土壤对比研究更是鲜有报道。本研究利用 2018 年最新获得的 1:25 万表层和深层土壤重金属元素数据,运用地统计学和多元数据分析的方法<sup>[20-21]</sup>,对比研究三江平原表层和深层土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的特征及相关性,分析 8 种重金属元素的来源,对于摸清东北黑土地家底,保护东北大粮仓,实现黑土资源的可持续利用具有重要意义。

## 1 研究区概况

三江平原,又称三江低地,位于东北平原东北

部,是我国最大的淡水沼泽分布区。三江平原的“三江”即黑龙江、乌苏里江和松花江,3 条大江浩浩荡荡,汇流、冲积而成了这块低平的沃土。区内水资源丰富,气候属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,土壤类型主要有黑土、白浆土、草甸土、沼泽土等,而以草甸土和沼泽土分布最广。这里是我国重要的商品粮生产基地,粮食商品化程度和农业机械化程度全国第一,在保障国家粮食安全中具有举足轻重的地位。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集和分析方法

研究区样品来源于中国地质调查局实施的“东北黑土地 1:25 万土地质量调查”项目,在研究区网格化部署采样点,表层土壤样品采样密度为 1 个点/ $\text{km}^2$ ,主要采集耕层土,采样深度为 0~20 cm,4  $\text{km}^2$  组合成一个样品进行分析测试;深层土壤样品采样密度为 1 个点/4  $\text{km}^2$ ,深度为 150~200 cm,16  $\text{km}^2$  组合成一个样品分析。三江平原共取得 9 873 件表层和 2 697 件深层土壤地球化学样品(图 1)。样品分析测试由吉林省地质科学研究所和黑龙江省地质矿产测试应用研究所完成,其中 Cd、Ni 采用等离子体质谱法,As、Hg 采用原子荧光光度法,Cr、Cu、Pb、Zn 采用 X 射线荧光光谱法测定。采用

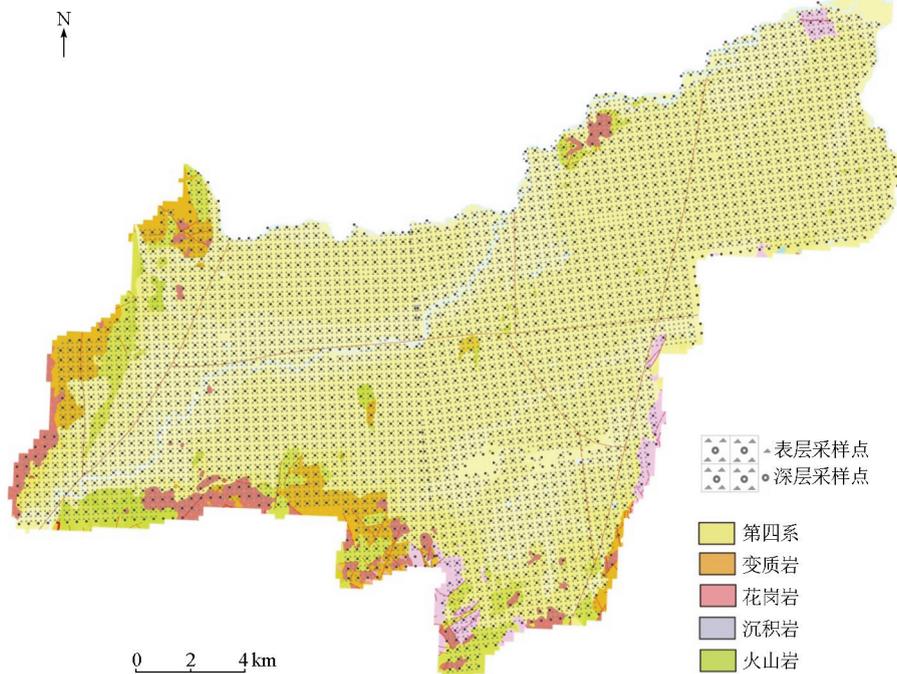


图 1 三江平原土壤采样点分布

Fig. 1 Sampling sketch map of soil sample from Sanjiang Plain

国家标准物质监控分析测试准确度,采用密码样监控分析测试的精密度,所有监控样元素分析准确度和精密度均在允许监控限内,数据可靠。

## 2.2 数据处理及评价方法

表层和深层土壤样品的描述性统计分析及 Pearson 相关性分析均在 SPSS 21.0 软件中完成,采用 Arcgis 10.2 软件绘制克里格元素空间分布图。

为了评价人类活动对研究区土壤中重金属元素的损失或富集的影响程度,一般选取惰性元素 Sc、Zr、Ti 和 Al 作为参比元素<sup>[4,22-23]</sup>,这 4 种元素在土壤中的含量变化较小,在风化及成土过程中较稳定。本次考虑到元素变异系数( $C_v$ )以及表层和深层土壤之间的差异,发现元素钪(Sc)在个层和深层土壤数据集中显示具有较小的变异系数( $C_v$ 分别为 0.155、0.241),有较强的抗风化能力(表 1)。为了减少环境介质的影响,根据上述元素分析的结果,将 Sc 用作标准化参比元素,计算表层及深层土壤中每个元素的富集系数,公式如下<sup>[19]</sup>:

$$q = \frac{C_{i表} / C_{Sc表}}{C_{i深} / C_{Sc深}}, \quad (1)$$

式中: $q$  为富集系数; $C_{i表}$ 、 $C_{i深}$  分别为表层和深层土壤中重金属元素的含量; $C_{Sc表}$ 、 $C_{Sc深}$  分别为表层和深层土壤中 Sc 元素的含量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 统计分析和地球化学特征

三江平原耕地土壤表层及深层描述性统计数据如表 1 所示,包括算术平均值、中位数、最大值、最小值、变异系数( $C_v$ )和标准离差,并使用 Kolmogorov-Smirnov 检验(包括偏度和峰度)来评估数据集分布的正态性。由表 1 可知,表层土壤 8 种元素的变异系数顺序为  $Hg > Cd > As > Ni > Cu > Zn > Cr > Pb$ ,深层土壤 8 种元素的变异系数顺序为  $As > Ni > Cd > Hg > Cu > Cr > Zn > Pb$ 。整体上,重金属元素含量的变异系数均较小(小于 60%),其中 Pb 变异系数最小,但超出背景值倍数较大(表层 1.059 倍,深层 1.064 倍),表明研究区土壤重金属元素含量纵向分布受到一定程度的外来因素的干扰。

### 3.2 表层土壤重金属元素含量分布

表层土壤中元素的含量特征一般反映人类活动

及自然因素双重影响下土壤中元素的分布状态,受人类活动因素的影响较明显。本次统计三江平原 8 种重金属元素平均值、变异系数以及黑龙江省背景值列于表 1,为了进一步描述重金属元素的分布特征,利用 SPSS 21.0 软件分别绘制了表层 8 种重金属元素的直方图和箱形图(图 2、图 3)。三江平原表层土壤中 As、Ni、Cr、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Hg 的平均含量分别为  $8.85 \times 10^{-6}$ 、 $25.69 \times 10^{-6}$ 、 $65.09 \times 10^{-6}$ 、 $21.76 \times 10^{-6}$ 、 $25.62 \times 10^{-6}$ 、 $63.52 \times 10^{-6}$ 、 $0.083 \times 10^{-6}$  和  $0.034 \times 10^{-6}$ ,与黑龙江省土壤 A 层背景值相比,Cd、Hg、Zn 的平均值较黑龙江省略低,而 As、Cr、Cu、Ni、Pb 平均值大于黑龙江省背景值。在对数转换后,基本均显示服从正态分布。

按照不同母质类型分别对表层土壤中 8 种元素进行描述性统计。如表 1 所示,母质为变质岩的土壤中 As、Cd、Zn 含量分别为  $10.32 \times 10^{-6}$ 、 $0.093 \times 10^{-6}$ 、 $72.45 \times 10^{-6}$ ,较其他母质土壤含量高;母质为花岗岩的土壤中 Pb 含量为  $28.03 \times 10^{-6}$ ,远高于其他母质土壤;母质为火山岩的土壤中 Cr、Cu、Ni 含量分别为  $73.79 \times 10^{-6}$ 、 $23.18 \times 10^{-6}$ 、 $28.20 \times 10^{-6}$ ,也较其他母质土壤较高;表明成土母质的岩性对土壤中重金属元素的含量有明显影响。

### 3.3 深层土壤重金属元素含量分布

深层土壤由于受人类活动的影响较小,更能代表成土母质中元素的含量特征。深层土壤中 8 种重金属元素的含量分布特征如图 4 所示。从箱型图中可以看出,研究区内,Cr 平均含量最高( $71.40 \times 10^{-6}$ ),其次是 Zn( $71.33 \times 10^{-6}$ )、Ni( $28.42 \times 10^{-6}$ )、Pb( $25.97 \times 10^{-6}$ )、Cu( $21.98 \times 10^{-6}$ )、As( $11.16 \times 10^{-6}$ )、Cd( $0.075 \times 10^{-6}$ )和 Hg( $0.036 \times 10^{-6}$ )。变质岩母质的土壤中 As、Cr、Pb 含量分别为  $12.58 \times 10^{-6}$ 、 $84.87 \times 10^{-6}$ 、 $28.17 \times 10^{-6}$ ,较其他母质土壤高;火山岩母质的土壤中 Cr、Ni、Zn 含量分别为  $93.37 \times 10^{-6}$ 、 $41.64 \times 10^{-6}$ 、 $80.67 \times 10^{-6}$ ,明显高于其他母质土壤。深层土壤除 Cd 外,其他 7 种元素均表现为表层土壤含量低于深层土壤含量。与表层土壤中的分布相似,深层土壤中 8 种元素在对数转换后,基本均显示服从正态分布(图 5)。

### 3.4 深层土壤重金属元素空间分布

表层土壤反映了地球关键带中物质的相互作用及循环过程,而深层土壤则反映成土母质的地质背

表 1 三江平原耕地表层和深层土壤重金属元素含量统计

Table 1 The statistical data of heavy metal elements in topsoils and subsoils from Sanjiang Plain

参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Sc
全部表层土壤, N=9873									
平均值/ $10^{-6}$	8.85	0.083	65.09	21.76	0.034	25.69	25.62	63.52	11.75
中位数/ $10^{-6}$	8.40	0.075	65.30	21.90	0.031	24.90	25.5	62	11.9
变异系数/%	37.26	50.83	18.78	22.16	54.73	22.73	10.70	20.87	15.51
数据范围/ $10^{-6}$	1.80~116.8	0.009~1.740	16.5~281	4~74	0.013~1.25	5.8~147	2.3~68.3	24.4~225.1	2.3~21.9
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	8.41±1.30	0.076±1.39	64.27±1.18	21.38±1.24	0.032±1.282	25.06±1.22	25.53±1.10	62.09±1.21	11.72±1.16
黑龙江省 A 层背景值 <sup>[24]</sup> / $10^{-6}$	7.3	0.086	58.6	20	0.037	22.8	24.2	70.7	10.79
全部深层土壤, N=2697									
平均值/ $10^{-6}$	11.16	0.075	71.40	21.98	0.036	28.42	25.97	71.33	12.17
中位数/ $10^{-6}$	10.80	0.072	75.30	23.6	0.035	29.50	26.3	73.6	13.1
变异系数/%	51.07	36.60	29.75	30.27	34.43	38.45	12.84	20.67	24.11
数据范围/ $10^{-6}$	1.82~225	0.013~0.36	9.6~371.6	2.5~98.25	0.006~0.274	3.4~294.4	10.75~49.6	13.8~142.5	1.6~24.6
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	10.50±1.34	0.071±1.40	73.11±1.19	21.78±1.32	0.034±1.34	27.48±1.31	25.82±1.13	72.44±1.19	12.42±1.22
黑龙江省 C 层背景值 <sup>[24]</sup> / $10^{-6}$	11.4	0.078	59.5	21	0.040	24.3	24.4	69.9	无
第四系表层, N=8383									
平均值/ $10^{-6}$	8.21	0.079	65.50	21.88	0.032	25.43	25.18	60.47	11.65
中位数/ $10^{-6}$	8.00	0.072	65.70	22.40	0.031	24.80	25.10	58.00	11.80
变异系数/%	27.55	44.36	18.15	21.39	47.43	19.61	9.16	20.45	15.93
数据范围/ $10^{-6}$	1.80~43.45	0.009~1.167	16.5~121.6	4~49.4	0.013~0.986	8.08~47.9	9.2~61.75	27.4~212.1	2.9~19.1
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	7.96±1.26	0.074±1.42	64.86±1.19	21.52±1.24	0.031±1.253	25.00±1.21	25.12±1.08	59.16±1.21	11.61±1.16
变质岩表层, N=454									
平均值/ $10^{-6}$	10.32	0.093	69.98	21.64	0.034	27.11	27.90	72.45	12.29
中位数/ $10^{-6}$	9.98	0.083	70.00	21.45	0.030	26.50	27.40	71.05	12.40
变异系数/%	41.44	59.11	20.61	24.02	50.82	23.00	12.39	21.32	13.01
数据范围/ $10^{-6}$	1.84~59.70	0.023~0.790	31.40~197.8	9.15~55.15	0.015~0.258	10.40~62.10	19.40~53.20	42.00~213.4	6.76~17.2
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	9.71±1.32	0.083±1.30	68.39±1.17	20.94±1.23	0.031±1.303	26.61±1.23	27.67±1.11	70.47±1.18	12.27±1.14
沉积岩表层, N=481									
平均值/ $10^{-6}$	10.15	0.085	68.78	21.52	0.035	25.71	27.29	66.42	12.32
中位数/ $10^{-6}$	10.40	0.077	68.80	21.30	0.032	24.60	27.10	63.90	12.40
变异系数/%	24.45	44.98	18.45	18.35	37.57	24.55	11.78	18.10	13.10
数据范围/ $10^{-6}$	4.32~19.4	0.032~0.445	29.85~167.7	9~39	0.018~0.180	9.3~67.2	19.9~46.6	44~119.7	6.58~18
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	9.89±1.29	0.077±1.34	67.45±1.15	21.23±1.18	0.032±1.265	24.94±1.22	27.04±1.12	65.16±1.18	12.25±1.13
花岗岩表层, N=251									
平均值/ $10^{-6}$	10.03	0.085	69.16	20.40	0.039	26.73	28.03	71.55	12.06
中位数/ $10^{-6}$	9.70	0.081	68.10	20.10	0.032	25.60	27.80	69.90	12.20
变异系数/%	38.19	30.83	21.65	20.20	198.07	22.73	14.36	15.21	12.20
数据范围/ $10^{-6}$	3.80~33.05	0.030~0.255	36.9~170	11.5~33.8	0.016~1.25	13.1~56.2	20.2~46	46.7~108.7	8.26~15.4
(平均值±标准差)/ $10^{-6}$	9.31±1.37	0.081±1.27	66.99±1.17	20.0±1.23	0.032±1.309	25.88±1.21	27.67±1.14	70.80±1.16	11.97±1.14

(续表)

参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Sc
火山岩表层, N=304									
平均值/ $10^{-6}$	10.85	0.083	73.79	23.18	0.033	28.20	26.69	67.84	12.86
中位数/ $10^{-6}$	9.99	0.080	69.85	22.90	0.031	26.15	26.40	67.05	12.70
变异系数/%	50.85	28.56	25.29	21.77	29.46	31.06	11.73	16.48	14.02
数据范围/ $10^{-6}$	4.76~63.80	0.041~0.20	45~163.3	13.05~43.2	0.019~0.095	15.8~65.50	17.3~37.60	43.35~105.3	7.51~21.8
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	9.84±1.30	0.079±1.31	71.45±1.25	22.65±1.23	0.032±1.276	26.92±1.31	26.49±1.12	66.99±1.18	12.74±1.13
第四系深层, N=2214									
平均值/ $10^{-6}$	10.98	0.074	69.61	21.88	0.036	27.99	26.09	70.11	12.02
中位数/ $10^{-6}$	10.65	0.070	76.30	24.30	0.036	30.30	26.60	72.60	13.20
变异系数/%	45.32	37.47	25.88	29.19	27.86	27.32	12.53	21.29	25.19
数据范围/ $10^{-6}$	2.35~225	0.013~0.22	9.6~262	2.5~38.9	0.006~0.095	3.4~146.9	14~49.6	13.8~120.8	1.6~24.6
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	10.30±1.31	0.070±1.45	71.78±1.22	21.63±1.35	0.034±1.33	27.42±1.32	26.00±1.13	70.80±1.21	12.05±1.28
变质岩深层, N=115									
平均值/ $10^{-6}$	12.58	0.075	84.87	23.53	0.037	30.04	28.17	77.15	12.84
中位数/ $10^{-6}$	11.20	0.073	83.50	23.4	0.032	30.50	28	78.70	13.40
变异系数/%	140.56	31.04	33.76	40.02	41.26	45.93	12.75	16.17	19.40
数据范围/ $10^{-6}$	2.27~225	0.028~0.18	12.9~301.3	3.5~98.25	0.011~0.128	5.2~154.4	10.75~40.3	21~117.5	2.96~24.6
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	10.94±1.28	0.071±1.32	82.04±1.16	22.18±1.29	0.034±1.38	28.91±1.23	28.18±1.11	76.56±1.18	12.91±1.16
沉积岩深层, N=131									
平均值/ $10^{-6}$	11.32	0.073	80.62	23.03	0.038	29.63	27.32	74.15	12.91
中位数/ $10^{-6}$	11.30	0.071	79.80	23.6	0.037	29.20	27.3	75.00	13.20
变异系数/%	28.61	30.57	20.99	22.93	32.25	26.65	11.71	14.90	17.76
数据范围/ $10^{-6}$	2.66~28.4	0.017~0.20	15.75~180.7	4.7~40.6	0.013~0.115	6.9~68.00	17.80~40.3	39.5~108.3	3.96~19.2
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	10.99±1.24	0.070±1.30	79.62±1.16	22.86±1.24	0.036±1.32	28.45±1.27	27.23±1.11	73.45±1.17	12.97±1.17
花岗岩深层, N=134									
平均值/ $10^{-6}$	10.43	0.072	83.90	22.62	0.038	32.09	27.50	77.39	12.96
中位数/ $10^{-6}$	11.0	0.071	80.60	21.60	0.035	29.40	27.7	78.6	13.1
变异系数/%	27.39	26.53	32.29	34.66	37.41	68.26	11.76	15.79	17.73
数据范围/ $10^{-6}$	3.72~21.3	0.041~0.16	24.9~251.1	8.1~76.1	0.015~0.128	9.9~202.9	14.2~35.1	48.4~117.7	7.28~24.3
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	10.26±1.32	0.070±1.29	78.52±1.16	21.33±1.27	0.035±1.32	28.84±1.23	27.48±1.12	76.38±1.17	12.79±1.16
火山岩深层, N=105									
平均值/ $10^{-6}$	11.47	0.081	93.37	26.93	0.037	41.64	25.72	80.67	14.30
中位数/ $10^{-6}$	10.95	0.079	81.20	24.80	0.036	32.60	26.1	80.6	14.2
变异系数/%	31.55	36.26	41.49	36.68	29.78	88.93	12.25	17.21	19.78
数据范围/ $10^{-6}$	2.39~28.4	0.032~0.33	45.4~262.6	10.2~76.1	0.013~0.115	15.5~294.4	14.2~40.5	42.8~142.5	6.15~24.3
(平均值±标准偏差)/ $10^{-6}$	11.09±1.23	0.076±1.34	82.99±1.27	24.83±1.21	0.036±1.27	33.19±1.37	25.88±1.10	80.17±1.15	14.19±1.15

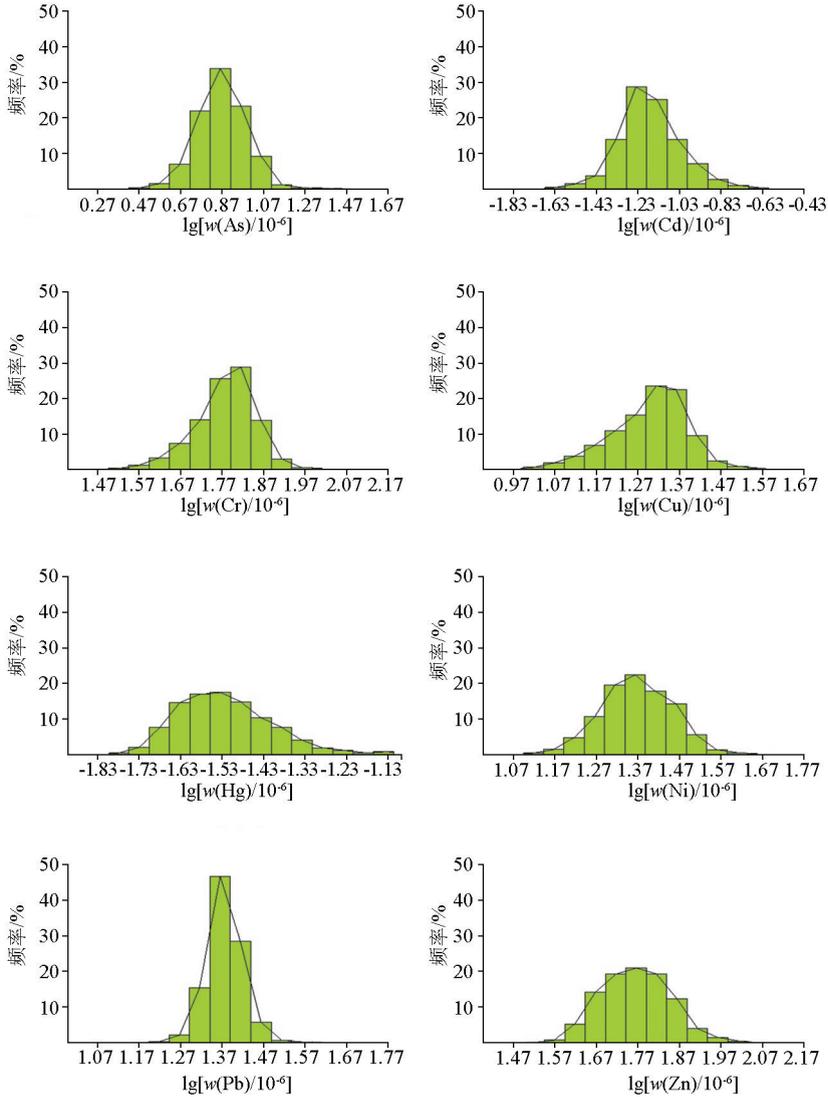


图 2 表层土壤元素含量分布直方图

Fig. 2 Histograms for heavy metal elements in topsoils from Sanjiang Plain

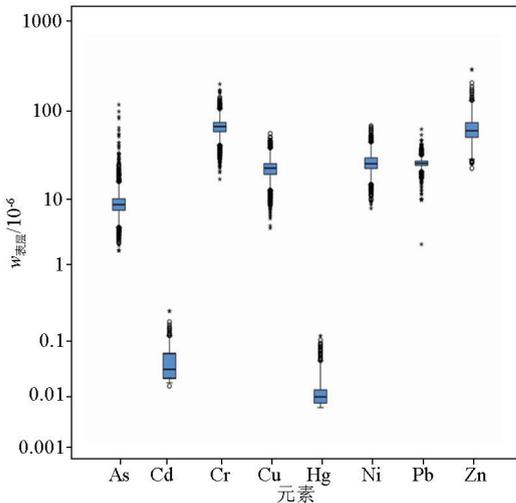


图 3 表层土壤元素含量分布箱型图

Fig. 3 Box-plot diagram for heavy metal elements in topsoils from Sanjiang Plain

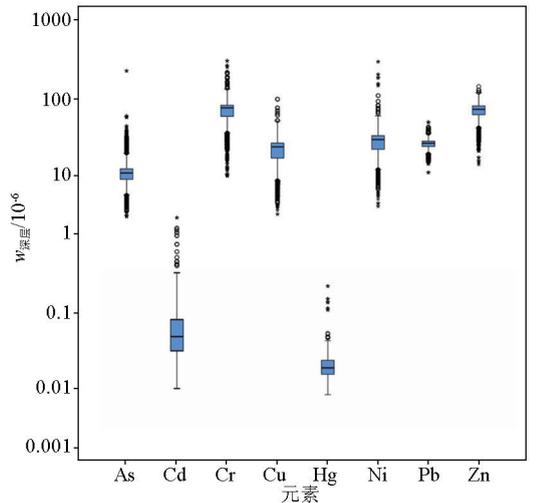


图 4 深层土壤元素含量分布箱型图

Fig. 4 Box-plot diagram for heavy metal elements in subssoils from Sanjiang Plain

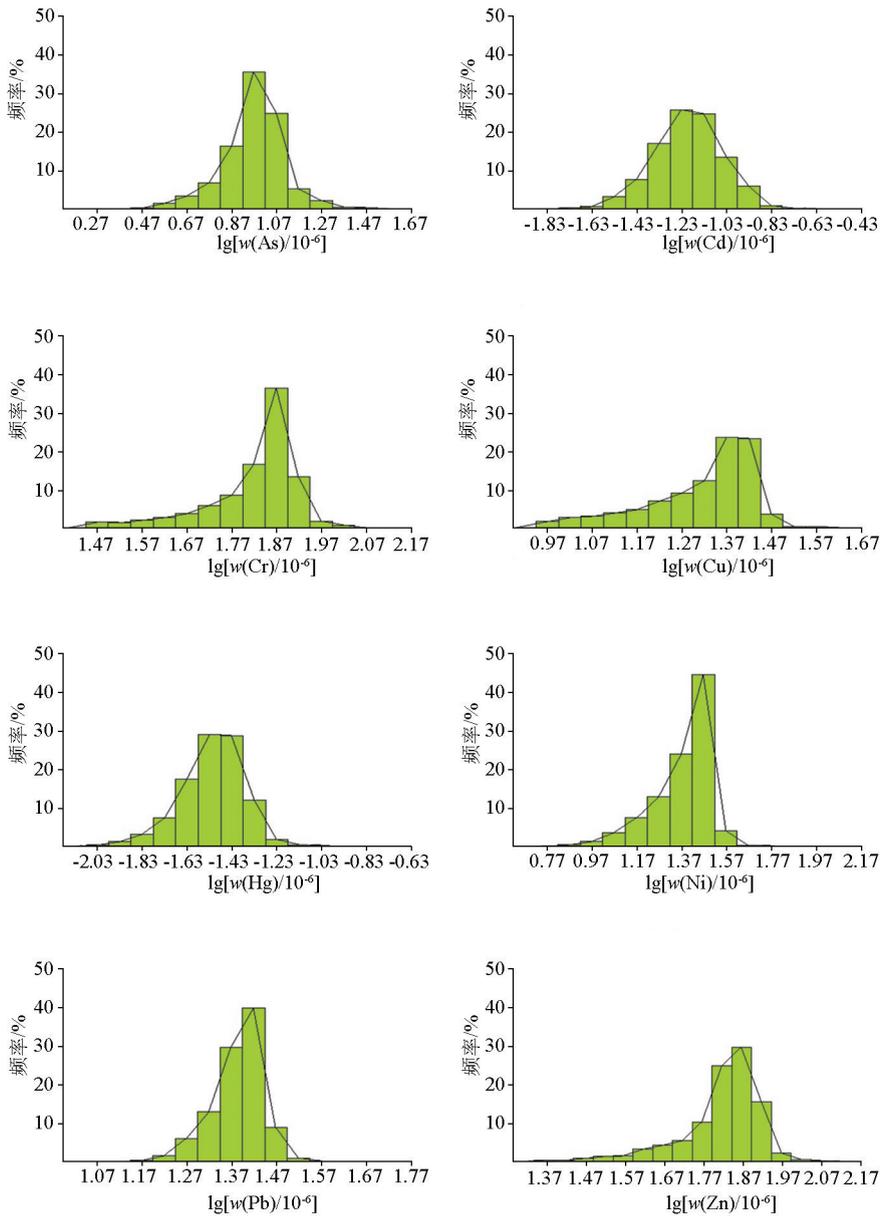


图 5 深层土壤元素含量分布直方图

Fig. 5 Histograms for heavy metal elements in subsoils from Sanjiang Plain

景。表层和深层土壤的重金属元素空间分布显示见图 6、图 7,总体上,表层和深层土壤重金属元素高值区分布较一致,以松花江为界,左侧低、右侧高,形成明显的分界线,与深层元素分布比较,总体上表层土壤均未受到明显的重金属元素污染,说明三江平原土壤环境质量依然优越,仅发现同江市东北部土壤 As、Cd、Cu、Ni 表层较深层稍偏高,有轻微富集的趋势,佳木斯市表层土壤 Hg 较深层有富集的趋势,推测可能受到了人为活动的影响,这可能与城市化发展密切相关<sup>[25-27]</sup>。表层土壤中变质岩区 Cd、Zn 均值含量高,火山岩区 As、Cr、Cu、Ni 含量高,花岗岩区 Pb 含量高;深层土壤在火山岩区中 As、Cr、Cu、Ni、Zn 含量高,变质岩区 Cd、Pb 含量高,这与表层分

布相似,可以推断三江平原土壤中重金属元素主要来源主要是成土母质。

区域上,影响三江平原表层土壤中重金属元素分布的主要因素是成土母质和少量的人类活动。8 种重金属元素富集系数均小于 2(表 1),表明三江平原表层土壤中 8 种重金属元素均无潜在污染风险,仅有某些点位的表层土壤中 Cd、Hg、As 元素的富集系数存在较大的值,说明在部分地区可能受到人类活动的影响稍大。

岩石风化是土壤中重金属元素的主要自然来源,土壤中的元素分布与成土母质具有明显的继承关系。本次利用 Pearson 相关性分析分别计算了三江平原所有类型的成土母质区域内,表层和

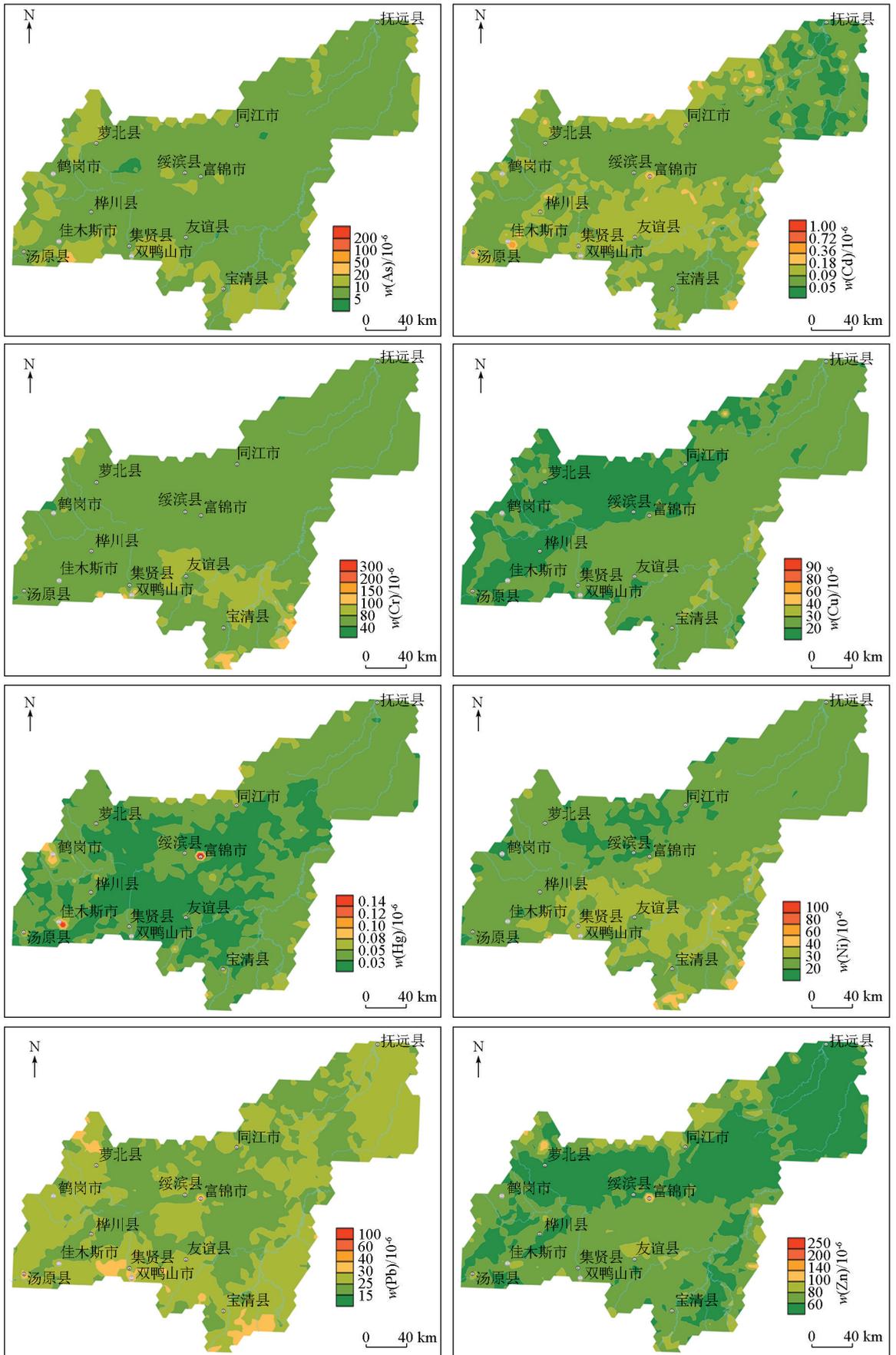


图 6 三江平原表层土壤重金属元素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of heavy metal elements concentrations in the top soil from Sanjiang Plain

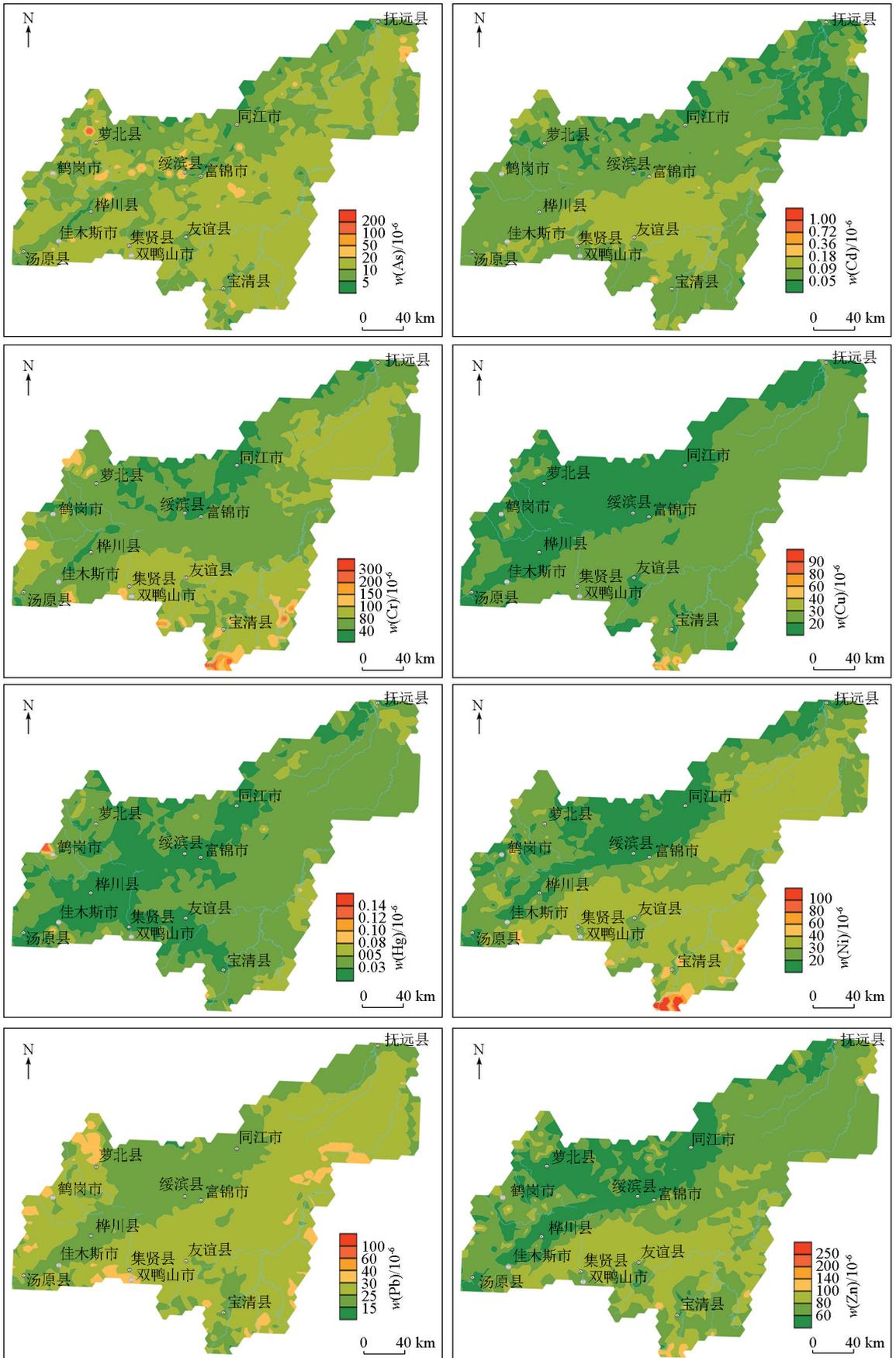


图 7 三江平原深层土壤重金属元素空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of heavy elements concentrations in the deep soil from Sanjiang Plain

深层土壤中重金属元素之间的相关系数(表 2),结果显示 Cr、Cu、Ni 和 Zn 分别呈显著正相关(相关系数 0.3~0.6,  $P < 0.01$ ),说明表层土壤中这些重金属元素主要来源于深层土壤(成土母质),较少受到人类活动的干扰。但是,As、Cd、Hg 和 Pb 在不同的母岩区均显示相关性较弱,表明三江平原表层土壤中的 As、Cd、Hg 和 Pb 可能受到人类活动的影响,如农业生产中的农药和化肥的施用等。

表 2 三江平原表层及深层土壤中重金属元素间相关系数

Table 2 The Pearson correlation coefficient between heavy metal elements in topsoils and subsoils from Sanjiang Plain

元素	Pearson 相关系数				
	第四系	变质岩	沉积岩	花岗岩	火山岩
As	0.018	0.009	0.380**	0.266**	0.216**
Cd	0.332**	0.178**	0.176**	0.091	0.140*
Cr	0.602**	0.185**	0.480**	0.395**	0.625**
Cu	0.584**	0.308**	0.440**	0.512**	0.414**
Hg	0.137**	0.250**	0.218**	0.100	0.249**
Ni	0.500**	0.252**	0.527**	0.488**	0.449**
Pb	0.264**	0.206**	0.268**	0.367**	0.045
Zn	0.314**	0.333**	0.299**	0.203**	0.470**

注:“\*\*”表示在 0.01 级别相关性显著,“\*”表示在 0.05 级别上相关性显著。

## 4 结论

1) 三江平原土壤总体上表现为环境质量依然优越,除 Cd 外,表层土壤中重金属元素 As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量( $8.85 \times 10^{-6}$ 、 $65.09 \times 10^{-6}$ 、 $21.76 \times 10^{-6}$ 、 $0.034 \times 10^{-6}$ 、 $25.69 \times 10^{-6}$ 、 $25.62 \times 10^{-6}$ 、 $63.52 \times 10^{-6}$ )均略低于深层土壤。

2) 表层和深层土壤的重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 空间分布较一致,表现为以松花江为界,左侧低、右侧高,形成明显的分界线。

3) 表层相对于深层土壤的重金属元素富集系数均小于 2,仅个别点位的表层 Cd、Hg、As 富集系数存在相对较高的值,在部分地区可能受到人类活动的叠加影响。

4) 在不同成土母质区域,表层和深层土壤中重金属元素 Cr、Cu、Ni 和 Zn 均呈显著正相关(相关系数 0.3~0.6,  $P < 0.01$ ),表明表层土壤中这些重金属元素主要物质来源于成土母质。

## 参考文献(References):

[1] 宋运红,刘凯,戴慧敏,等.东北松辽平原 35 年来耕地土壤全氮时空变化最新报道[J].中国地质,2021,48(1):332-333.

Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Songliao Plain in Northeast China during the past 35 years[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 332-333.

[2] 宋运红,刘凯,戴慧敏,等.松嫩平原东部典型黑土剖面孢粉组合及其时代和古气候意义[J].地质通报,2020, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20201015.0930.002.html>.

Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Palynological assemblages of typical black soil profile in the eastern Songliao Plain and their age and paleoclimatic significances[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020a, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20201015.0930.002.html>.

[3] 宋运红,刘凯,戴慧敏,等.东北松辽平原典型黑土—古土壤剖面 AMS<sup>14</sup>C 年龄首次报道[J].中国地质,2020,47(6):1926-1927.

Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. The first reported of the AMS<sup>14</sup>C age of typical black soil mollisol—paleosol profile of Songliao Plain [J]. *Geology in China*, 2021, 2020b, 47(6): 1926-1927.

[4] 李斌,段亚军,张娜,等.典型农业区土壤 6 种重金属的人为污染情况及健康风险评估[J].环境与健康杂志,2020,37(3):246-248.

Li B, Duan Y J, Zhang N, et al. Anthropogenic pollution and health risk assessment of six heavy metals in soil of a typical agricultural area[J]. *J Environ Health*, 2020, 37(3): 246-248.

[5] Song Y H, Dai H M, Yang F C, et al. Temporal and spatial change of soil organic matter and pH in cultivated land of the Songliao Plain in Northeast China during the past 35 years[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(S): 142-143.

[6] 张哲寰,宋运红,赵君,等.黑龙江省讷河市土壤某些微量元素地球化学特征[J].地质与资源,2019,28(4):378-382.

Zhang Z H, Song Y H, Zhao J, et al. Trace element geochemistry of the soil in Nehe city, Heilongjiang Province [J]. *Geology and resources*, 2019, 28(4): 378-382.

[7] 张继舟,吕品,于志民,等.三江平原农田土壤重金属含量的空间变异与来源分析[J].华北农学报,2014,29(S):353-359.

Zhang J Z, Lyu P, Yu Z M, et al. Spatial variability and source analysis of heavy metal content of agricultural soil in Sanjiang Plain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(S): 353-359.

[8] 曹宏杰,王立民,罗春雨,等.三江平原地区农田土壤中几种重金属空间分布状况[J].生态与农村环境学报,2014,30(2):155-161.

Cao H J, Wang L M, Luo C Y. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(2): 155-161.

[9] 张宪依,庞成宝,王安婷,等.海南岛表层及深层土壤重金属分布特征及源解析[J].现代地质,2020,34(5):970-978.

Zhang X Y, Pang C B, Wang A T, et al. Distribution characteristics and source identification of heavy metals in topsoils and subsoils of Hainan Island [J]. *Geoscience*, 2020, 34(5): 970-978.

[10] 杨帅斌,刘恋.北京市不同功能区土壤黑碳的含量特征及其来源分析[J].地质力学学报,2017,23(6):846-855.

Yang S B, Liu L. Concentration and sources of black carbon in different function zones of Beijing, China [J]. *Journal of Geomechanics*

- ics, 2017, 23(6): 846–855.
- [11] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425: 66–74.
- [12] Bini C, Sartori G, Wahsha M, et al. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 109(1/3): 125–133.
- [13] Rodríguez J A, Arias M L, Grau J M. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain): Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 1001–1012.
- [14] 李欢, 黄勇, 张沁瑞, 等. 北京平原区土壤地球化学特征及影响因素分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(2): 502–516.  
Li H, Huang Y, Zhang Q R, et al. Soil geochemical characteristics and influencing factors in Beijing Plain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2): 502–516.
- [15] Lyu J, Liu Y, Zhang Z, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *J. Hazard. Mater.*, 2013, 261: 387–397.
- [16] Frattini P, De Vivo B, Lima A, et al. Elemental and gamma-ray surveys in the volcanic soils of Ischia island, Italy[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2006, 6(4): 325–339.
- [17] Ansari A A, Singh I B, Tobschal H J. Importance of geomorphology and sedimentation processes for metal dispersion in sediments and soils of the Ganga Plain: Identification of geochemical domains [J]. *Chemical Geology*, 2000, 162(3): 245–266.
- [18] Rognerud S, Hongve D, Fjeld E, et al. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway[J]. *Environ. Geol.*, 2000, 39(7): 723–732.
- [19] Fergusson, J E. *The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects*[J]. New York: Pergamon Press, 1990: 412.
- [20] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4670–4683.  
Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, et al. Spatial temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4670–4683.
- [21] Yuan G L, Sun T H, Han P, et al. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 136: 40–47.
- [22] 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 等. 厦门某旱地土壤垂直剖面中微量迁移规律及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3764–3773.  
Zhang W H, Yu R L, Yang Y J, et al. Migration and source analysis of heavy metals in vertical soil profiles of the drylands of Xiamen City[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3764–3773.
- [23] Zhang H H, Chen J J, Zhu L, et al. Anthropogenic mercury enrichment factors and contributions in soils of Guangdong Province, South China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 144: 312–319.
- [24] 魏复盛, 郑春江, 刘志虹, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330–380.  
Wei F S, Zhen C J, Liu Z H, et al. *Chinese soil element background values*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330–380.
- [25] 柴立立, 崔邢涛. 河北省重点城市土壤重金属污染评价与防治对策——以石家庄市为例 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(3): 261–269.  
Chai L L, Cui X T. Pollution assessments and prevention countermeasures of heavy metals of soil in main cities of Hebei Province: Taking Shijiazhuang as an example [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(3): 261–269.
- [26] 刘银飞, 孙彬彬, 贺灵, 等. 福建龙海土壤垂直剖面元素分布特征[J]. *物探与化探*, 2016, 40(4): 713–721.  
Liu Y F, Sun B B, H L, et al. Distribution characteristics of elements in vertical soil profile in Longhai, Fujian province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(4): 713–721.
- [27] 宋运红, 张哲寰, 杨凤超, 等. 黑龙江海伦地区垦殖前后典型黑土剖面主要养分元素垂直分布特征[J]. *地质与资源*, 2020, 26(6): 543–549.  
Song Y H, Zhang Z H, Dai H M, et al. Vertical distribution characteristics of main nutrient elements in typical black soil profile before and after reclamation in Helun Area, Heilongjiang Province [J]. *Geology and Resources*, 2020, 26(6): 543–549.

## A multivariate statistical analysis of the distribution and influencing factors of heavy metal elements in the cultivated land of the Sanjiang Plain

SONG Yun-Hong<sup>1,2,3</sup>, YANG Feng-Chao<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1,2,3</sup>, DAI Hui-Min<sup>1,2,3</sup>, XU Jiang<sup>1,2,3</sup>, YANG Ze<sup>1,2,3</sup>

(1. *Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China*; 2. *Key Laboratory for Evolution and Ecological Effect in Black Land, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China*; 3. *Key Laboratory for Evolution and Ecological Effect in Black Land of Liaoning Province, Shenyang 110034, China*)

**Abstract:** Geostatistical and multivariate analyses are effective methods to determine the source of heavy metal elements in the soil. The comparison of the contents and distribution of heavy metal elements in the topsoil and subsoil in different geological setting areas can provide a basis for studying the sources of heavy metal elements in the soil. As one of the areas with concentrated marsh wetlands in China, the Sanjiang Plain has a temperate humid and subhumid continental monsoon climate, is an important grain production base,

and has a low degree of industrial activities. This study investigated the main factors affecting the distribution of heavy metal elements in the soil of cultivated land of the Sanjiang Plain on a regional scale. Samples were collected from the topsoil and subsoil of the Sanjiang Plain. The minimum, maximum, median, and average contents, coefficient of variation, and concentration coefficient of eight heavy metal elements (i. e. , As, Cr, Cu, Hg, Ni, Cd, Pb, and Zn) in the samples were calculated. The results are as follows. The Sanjiang Plain has superior soil environmental quality. The topsoil samples had slightly lower contents of heavy metal elements except for Cd (e. g. , As, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) than the subsoil samples. All these elements in the topsoil samples had concentration coefficients less than 2, except for those in the topsoil samples collected at certain points, which had high concentration coefficients of Cd, Hg, and As elements. The main factors influencing heavy metal elements in the topsoil and subsoil in five soil parent material regions were determined through geostatistical and Pearson correlation analyses. The comprehensive analysis results show that elements Cr, Cu, Ni, and Zn mainly originate from the soil parent materials, and Cd, Hg, and As may also be affected by human activities in some areas.

**Key words:** heavy metal element; topsoil; subsoil; geostatistical and multivariate analyses; Sanjiang Plain

(本文编辑:蒋实)