

高密度人口活动下土壤元素含量及分布特征： 以宿州学院为例

洪申申^{*}, 陈倩倩, 鲍张毅, 李伟泽, 陈松[#]

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州
Email: #szychensong@163.com

收稿日期: 2020年11月6日; 录用日期: 2020年11月19日; 发布日期: 2020年11月26日

摘要

以宿州学院教育园区为研究对象, 使用硼酸垫底压片法X荧光光谱分析对该校区范围内23个土壤样品中的Mn、Hg和Zn进行了检测, 进而利用数理统计、描述性统计分析、地积累指数法、内梅罗综合指数法以及土壤重金属元素空间分布特征等对检测结果进行分析。结果表明: 研究区地表土壤重金属元素含量的变异系数和极差均较大, 空间分布差异显著; 宿州学院教育园区的地表土壤已受到不同程度的重金属污染, 处于轻度污染水平, 校园重金属污染问题亟需解决; 地表土壤中重金属元素含量与分布特征会受到高密度人口活动的影响, 不同元素所受的程度也会存在着差异, 高密度人口活动对土壤重金属元素含量影响较大, 一般表现为重金属元素富集。

关键词

土壤重金属, 元素, 富集, 地积累指数, 内梅罗综合指数

The Content and Distribution Characteristics of Soil Elements under High-Density Population Activities: An Example in Suzhou University

Shenshen Hong^{*}, Qianqian Chen, Zhangyi Bao, Weize Li, Song Chen[#]

College of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui
Email: #szychensong@163.com

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

Abstract

The education park of Suzhou University is the research object. The Mn, Hg and Zn of the 23 soil samples in the campus range were tested, using boric acid bottom pressing X fluorescence spectroscopic analysis, and the results were analyzed based on such methods as mathematical statistics, descriptive statistical analysis, ground accumulation index method, Nemero composite index method and spatial distribution characteristics of heavy metal elements in soil. The results show that the variation coefficient and polar difference of heavy metal element content in surface soil in the study area are large and the spatial distribution is significantly different, the surface soil of Cebu College Education Park has been polluted by heavy metals to varying degrees, is at the level of mild pollution, and the problem of heavy metal pollution in campus needs to be solved urgently. It is generally manifested as the abounding of heavy metal elements.

Keywords

Soil Heavy Metals, Elements, Enrichment, Ground Accumulation Index, Nemero Composite Index

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤作为人类赖以生存的物质基础[1], 对人类社会生存发展具有重大的意义。土壤质量的好坏直接关系到人类的生存状况, 土壤质量问题正在不断得到世界范围内的关注, 土壤质量的保持和提高已日益成为当今国际土壤学界、环境科学界、地学界共同关注的课题。

近年来, 在高密度人口活动下土壤重金属元素相关领域研究成果丰硕, 这些成果主要涉及土壤重金属元素的污染与防治、区域土壤重金属分布、大学校园土壤重金属污染以及土壤重金属元素来源等方面。如 Ahemad 等[2]对植物体和土壤中重金属特征进行了研究, 分析了重金属元素的污染程度和来源进行了分析和评价; 宋智萍等[3]对山西师范大学校园内土壤 Pb、Cr、Zn、Cu 和 Ni 五种重金属元素的污染状况进行了研究分析, 发现这五种重金属元素都有不同程度的富集但没有达到污染的程度; 刘红侠等[4]对徐州市北郊农业土壤重金属污染情况研究分析, 发现其农业土壤 5 种重金属平均含量均远高于该市农业土壤背景值, Zn 为污染警戒等级; 朱伟等[5]对镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源进行分析, 发现重金属主要来源与交通污染和生活污染源有关, 通过 CER 值评价 RDS 中重金属的人为污染程度, Pb、Zn、Cr、Ni 和 Cu 均表现出一定程度的人为影响; 周广柱等[6]对兖矿地区的土壤环境质量进行分析, 研究结果表明, 一部分地区表土中镍、镉等重金属含量较高, 与矿山距离较近的地区均受到重金属不同程度的污染, 并有可能对兖矿地区农业生产构成威胁。

宿州学院教育园区位于宿州市东部, 地处宿州火车站与宿州高铁站之间, 交通便利。基于土壤重金属超标的危害性和近年来土壤重金属污染不断恶化的现实情况以及国家建设生态文明的重大战略部署, 本文旨在研究与探讨高密度人口活动下土壤重金属元素的特征及其与人为活动的联系, 通过对各个功能区中土壤各种元素成分分布情况进行分析, 从而有效的推测出土壤中元素与人类高密度活动的联系, 提

出建议用以控制以及降低土壤中有害元素，提高城市土壤质量并为土壤环境的保护、污染防治和生态建设提供参考或帮助。

2. 材料与方法

2.1. 研究区简介

研究区为宿州学院教育园区，坐落在安徽省宿州市区东约 10 km 处，校园北邻天地阳光学习学校，西侧和南侧均为农田和村庄，东侧为学府大道，学府大道南接宿灵公路北连宿州大道，交通便利。该校校区在校师生及职工约 2 万人，研究区面积约 51.43 万平方米，人口密度约 3.89 万人/平方千米，属于人口密集区。如图 1，校园整体呈南北走向的长方形，师生公寓、食堂及浴室等生活建筑共 20 栋，总体分布于校园西北侧；教学楼、实验楼及体育场馆等教学场所 20 余处，总体分布于校园东南侧；二冬大道和闵贤路呈南北向贯穿校园。校园内地表水系有珍珠湖和柳溪，珍珠湖面积约 7760 m²，深 2~3 m，北与柳溪以涵洞相连通；柳溪源于宿州市郊沱河支流自西向东注入小黄河，东西横穿校园中部约 5000 m。

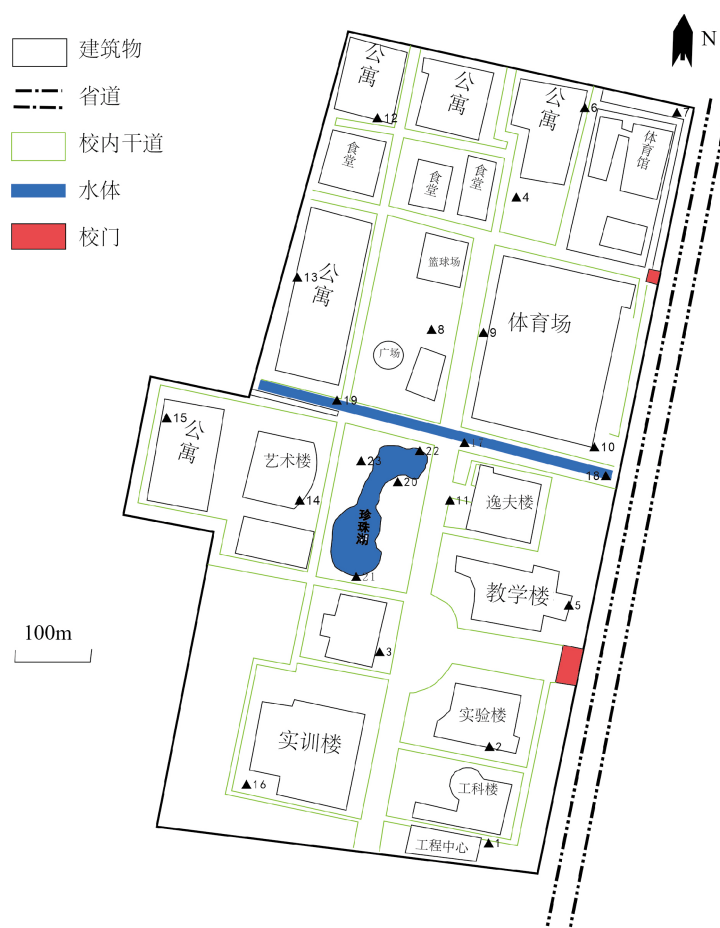


Figure 1. A brief map of the study area

图 1. 研究区简图

2.2. 样品采集与测试

选取高密度人口活动的宿州学院教育园区为研究区，依据研究分析需求在教学楼、主干道、河流和

湖泊、学生宿舍、食堂等附近布置采样点 23 个。采样点分布见图 2。采样时使用干净的塑料铲将表层杂物除去,垂直地将土壤切开,采取 0~20 cm 深度的新鲜地表土壤 0.5~1 kg 装入密封样品袋,分别编号 1~23,用铅笔注明采样地点、日期和采样名称,且采样时避免接触铁质物品和使用铁质器械。

待样品采集完毕,将土样摊开于干净的塑料布上,在通风、干燥和避免阳光照射的室内自然风干。样品风干时,需用一张标签纸放在样品中防止混匀。风干过程中要经常翻动土样加速干燥以及用不锈钢镊子剔除土壤以外的动植物残体,而后对风干后的土样按照研究分析要求进行破碎、研磨,研磨为粉状后过 200 目的尼龙筛,充分混匀后,装入密封袋备用。制备好的样品要妥善贮存,避免日晒、潮湿和高温的污染。注意每次处理样品前必须对使用过的尼龙筛、相关研磨工具进行清洁。

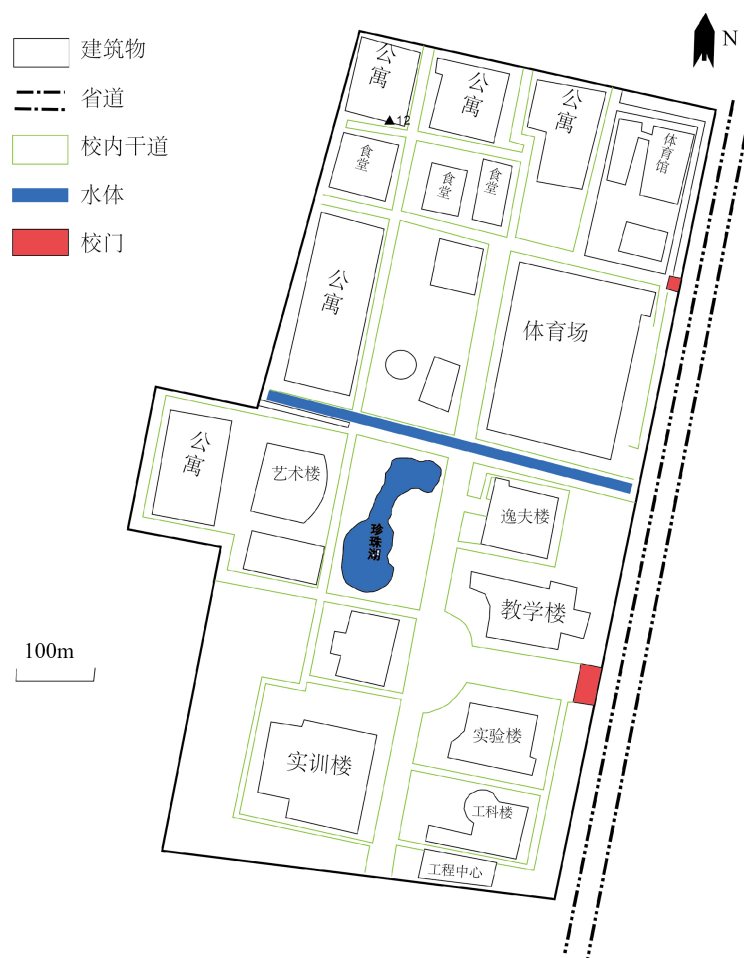


Figure 2. Sample point distribution

图 2. 采样点分布图

将预处理好的样品进行压片,先将模具安装好,土样取两勺放于模具中,轻压使其平整;再用硼酸粉末充填模具周围,轻轻垂直拿起模具避免土样被带出;然后放入垫片和 T 型圆柱。将模具整体慢慢的放置于压片机上,旋紧螺旋,关紧气阀,加压至 20 MPa,停留 2 分钟左右;慢慢打开放气阀,使压力缓慢下降到 0,拧开螺旋取出模具,打开底座,压出模块,小心取出压好的样片。注意每次处理土样前均要使用酒精清洁模具整体。处理好的样品用 XRF 荧光光谱仪(型号: EDX5500H)进行检测,测试精度为 0.01 ppm。测试过程中,每测 10 个土壤样品需测试一次标样校正。

2.3. 统计与分析

样品检测结果统计如表 1 所示。由统计可知, 所测土壤中 3 种元素的含量 Mn 含量最高, 含量范围 385.19~698.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 492.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Zn 含量范围 46.1~116.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 63.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Hg 含量最低, 含量范围 0.01~0.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 0.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Table 1. Test results of soil heavy metal content on the campus of Suzhou University (mg/kg)

表 1. 宿州学院校园土壤重金属含量测试结果(mg/kg)

样品号	Mn	Hg	Zn	样品号	Mn	Hg	Zn
1	459.7	0.01	47.84	13	524.43	0.1	54.73
2	553.64	0.05	72.67	14	478.06	0.01	52.53
3	468.94	0.09	53.65	15	533.95	0.01	60.95
4	385.19	0.55	60.9	16	507.74	0.01	54.55
5	440.29	0.04	55.1	17	532.61	0.01	94.08
6	563.68	0.06	56.79	18	438.01	0.35	109.16
7	471.45	0.31	56.24	19	399.3	0.45	116.22
8	558.8	0.24	57.76	20	432.67	0.18	46.1
9	462.04	0.01	53.9	21	525.5	0.01	54.05
10	538.96	0.01	57.43	22	698.07	0.15	53.12
11	417.96	0.05	64.85	23	480.92	0.01	52.86
12	454.04	0.01	66.24				

如表 2 所示, 3 种元素含量的变异系数 Mn 最大, 达到 0.41; 其次为 Zn 元素的变异系数为 0.23; Hg 的变异系数最小, 为 0.01。Mn 变异系数较大, 则说明该元素在表层土壤中的空间分布差异较大, 受到高密度人口活动的影响比较大; Hg 的变异系数较小, 则说明该元素在表层土壤中的空间分布差异较小, 受到高密度人口活动的影响极小; Zn 元素则介于前两者中间。但是, 不能片面地只通过变异系数的大小来推测各种元素受高密度人口活动影响的程度, 应该考虑到其他的影响因素以及从多方面去分析考量。

Table 2. Statistics of test results

表 2. 检测结果统计表

项目	范围 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	均值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差	变异系数	背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤环境质量二 级标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Mn	385.19~698.07	492.43	68.47	0.14	482.00	1200
Hg	0.01~0.55	0.12	0.16	1.33	0.04	0.50
Zn	46.1~116.22	63.12	18.02	0.29	67.70	250

注: 中国土壤元素背景值源于文献[7], 土壤环境质量标准源于文献[8]。

综合表 1 和表 2, Mn 元素的含量均值略高于其背景值, Hg 元素的含量均值是其背景值的三倍, Zn 元素的含量均值略低于其背景值。一般来说, 某个元素的正异常越大、异常点越多, 则其受高密度人口活动影响的程度越大。

根据《土壤环境质量标准》规定的土壤环境质量二级标准即为保障农业生产, 维护人体健康的土壤

限制值, Mn、Hg 和 Zn 的元素含量均值都在土壤环境质量二级标准限制值以下。

2.4. 污染评价方法

2.4.1. 地质积累指数法

地质积累指数(I_{geo})通常称为 Muller 指数, 不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响, 而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响, 因此, 该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征, 而且可以判别人为活动对环境的影响, 是区分人为活动影响的重要参数。但该方法不能评价某一种土壤重金属元素含量分布的综合污染指数或多种土壤重金属元素含量分布的综合污染指数, 只适用于分析某研究对象中单独的土壤重金属元素污染程度。公式如下[9]:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / 1.5B_n] \quad (1)$$

式中: C_n 为样品中元素 n 的浓度; B_n 为背景浓度; 1.5 为修正指数, 通常用来表征沉积特征、岩石地质及其它影响。如表 3 所示, 地质积累指数可分为 7 个级别, 级别越高污染程度越大。

Table 3. Geological accumulation index (I_{geo}) grading criteria

表 3. 地质积累指数(I_{geo})分级标准

I_{geo}	污染级别	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	无污染 - 中度污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染 - 强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强污染 - 极强污染
$I_{geo} > 5$	6	极强污染

Mn、Hg 和 Zn 的地质积累指数(I_{geo})计算结果见表 4, 统计结果见表 5。Mn 元素的所有测试值污染级别全为 0 级, 皆为无污染; Hg 元素无污染占 60.87%, 无污染 - 中度污染占 8.70%, 中度污染占 13.04%, 中度污染 - 强污染占 13.04%, 强污染占 4.35%, 4 号样品测值为强污染; Zn 的所有测值主要以无污染为主, 无污染 - 中度污染次之。22 号样品采样位置为珍珠湖东北向的河床, 该点的 Mn 的地积累指数达到最大值, 为-0.05。4 号样品采样位置为三食堂, 该点的 Hg 的地积累指数达到最大值, 为 3.20; 地积累指数级别仅次于 4 号的是 19 号样品采样位置为柳溪懿行桥正下方的河床, 该点的 Hg 的地积累指数将近 3。Zn 的地积累指数在 21 个测点测值上为负, 只有 18 号和 19 号测点样品的地积累指数超过零。有 14 个测点的 Mn、Hg 和 Zn 的地积累指数级别皆为 0 级。

Table 4. Results of geo accumulation index calculations

表 4. 地积累指数计算结果

编号	Mn		Hg		Zn	
	I_{geo} -Mn	污染级别	I_{geo} -Hg	污染级别	I_{geo} -Zn	污染级别
1	-0.65	0	-2.58	0	-0.25	0
2	-0.39	0	-0.26	0	-0.11	0
3	-0.62	0	0.58	1	-0.21	0

Continued

4	-0.91	0	3.20	4	-0.17	0
5	-0.72	0	2.37	0	-0.20	0
6	-0.36	0	-0.58	0	-0.19	0
7	-0.62	0	0.00	3	-0.20	0
8	-0.37	0	2.00	2	-0.19	0
9	-0.65	0	-2.58	0	-0.21	0
10	-0.42	0	-2.58	0	-0.19	0
11	-0.79	0	-0.26	0	-0.15	0
12	-0.67	0	-2.58	0	-0.14	0
13	-0.46	0	0.74	1	-0.21	0
14	-0.60	0	-2.58	0	-0.22	0
15	-0.44	0	-2.58	0	-0.17	0
16	-0.51	0	-2.58	0	-0.21	0
17	-0.44	0	-2.58	0	-0.03	0
18	-0.72	0	2.54	3	0.02	1
19	-0.86	0	2.91	3	0.05	1
20	-0.74	0	1.58	2	-0.26	0
21	-0.46	0	-2.58	0	-0.21	0
22	-0.05	0	1.32	2	-0.22	0
23	-0.59	0	-2.58	0	-0.22	0

Table 5. Statistical table of geo accumulation index results

表 5. 地积累指数结果统计表

污染级别	$I_{\text{geo-Mn}}$	$I_{\text{geo-Hg}}$	$I_{\text{geo-Zn}}$
0	23	14	21
1	—	2	2
2	—	3	—
3	—	3	—
4	—	1	—

通过使用地积累指数对数据的分析，可以发现在三食堂采样的 4 号的 Hg 的地积累指数级别最高，人为活动大的 18 号、19 号等采样点的地积累指数级别较高，位于校园偏僻地方、非人车流量大的 15 号、16 号等采样点的地积累指数级别较低。

2.4.2. 内梅罗综合指数法

只反映不同种类的单个污染物的污染程度是不行的，要完全和充分地反映土壤整体的污染程度。因此就需要将各个重金属元素的污染指数结合起来进行评价，综合污染指数兼顾了单因子污染指数平均值和最高值，可以突出污染较重的重金属污染物的作用。但同时可能会夸大或缩小一些重金属污染物的影

响作用，导致对土壤综合污染程度分级的不精确，对土壤元素含量分布特征的分析也会有偏差。内梅罗综合指数法是目前被广泛使用的一种综合指数法[10]。内梅罗综合指数法计算公式为[11]：

$$P = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{i\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中：P 是采样点的综合污染指数， $P_{i\max}$ 为 i 采样点地积累指数中的最大值， \bar{P} 为地积累指数加权平均值。公式如下[12]：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i P_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

式中： ω_i 为权重， P_i 为单项测量值。根据 Dalway J. Swaine [13]对重金属的分类，Mn、Hg 和 Zn 的权重都为 1。土壤综合污染程度分级标准见表 6。

Table 6. Classification standard of soil comprehensive pollution degree
表 6. 土壤综合污染程度分级标准

等级	内梅罗综合指数	污染等级	污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全状态	清洁
2	$0.7 < P \leq 1.0$	污染警戒	尚清洁
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	作物开始污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	土壤和作物污染明显
5	$P > 3.0$	重度污染	土壤和作物污染严重

如表 7 所示，23 个样品综合污染程度 1 级安全的有 16 个，该 16 个样品 Mn 和 Zn 的地积累指数级别皆为 0 级，且 Hg 的地积累指数级别大部分为 0 级；2 级污染警戒的只有一个，为 22 号样品；3 级轻度污染的有 4 个；4 号和 19 号样品为 4 级中度污染，其 Hg 元素的地积累指数级别都较高。

Table 7. Calculation results and statistics of Nemeru composite index
表 7. 内梅罗综合指数计算结果与统计

编号	I_{geo} 最大值	I_{geo} 加权平均值	内梅罗综合指数	土壤综合污染级别
1	-0.25	-0.42	0.35	1
2	-0.11	-0.01	0.08	1
3	0.58	0.08	0.41	1
4	3.20	0.50	2.29	4
5	-0.20	-0.09	0.16	1
6	0.00	0.00	0.00	1
7	2.37	0.29	1.69	3
8	2.00	0.14	1.42	3
9	-0.21	-0.35	0.29	1
10	-0.19	-0.21	0.20	1
11	-0.15	-0.03	0.11	1
12	-0.14	-0.25	0.20	1

Continued

13	0.74	0.07	0.53	1
14	-0.22	-0.34	0.29	1
15	-0.17	-0.19	0.18	1
16	-0.21	-0.27	0.24	1
17	-0.03	-0.03	0.03	1
18	2.54	-0.04	1.80	3
19	2.91	-0.11	2.06	4
20	1.58	0.31	1.14	3
21	-0.21	-0.25	0.23	1
22	1.32	0.01	0.93	2
23	-0.22	-0.33	0.28	1

内梅罗综合指数的分析表明,可以发现在三食堂采样的 4 号样品的 Hg 元素的土壤综合污染程度最强,校园河流柳溪的 18 号、19 号等采样点的土壤综合污染程度较强,位于校园偏僻地方、非人车流量大的 8 号、15 号和 16 号等采样点的土壤综合污染程度较弱。

由此可见,虽然地积累指数法与内梅罗综合指数法的侧重方向和计算方法有所不同,但是这两种方法的分析结果可以达到相互验证的效果。

3. 结果与分析

3.1. 描述性统计

首先对 23 个土壤样点的 3 种重金属元素的检测结果(表 1)和检测结果统计表(表 2)进行分析,了解样品数据的分布状况。变异系数[13]反映了采样总体中各样点之间平均变异程度。其中,样点之间重金属元素含量差异最大的是 Hg (变异系数为 1.33),最小的是 Mn (变异系数为 0.14),3 种重金属元素含量的总体平均变异程度由小到大依次为 Mn、Zn 和 Hg。而且 3 种重金属元素含量的极差均比较大,表明土壤重金属元素含量存在着明显的空间分布差异[14]。

3.2. 空间分布特征

克里金(Kriging)插值法是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计的一种方法,也是一种在许多领域都很有用的地质统计格网化方法,采用普通克里金插值,对不符合正态分布的采取反距离加权插值进行空间可视化表达[14][15]。Surfer8.0 基于 windows 操作系统的三维绘图软件,可以轻松制作基面图、数据点位图、分类数据图、等值线图、线框图、地形地貌图、趋势图、矢量图以及三维表面图等[16]。Surfer8.0 软件自带有克里金插值功能,则在确定克里金插值模型后,利用 Surfer8.0 软件绘制出土壤重金属元素 Mn、Hg 和 Zn 的空间区域分布点位图、等值线图,清晰地呈现出各重金属元素含量的空间分布情况。土壤重金属含量的空间分布特征如图 3~5 所示。

由图 3 可知 Mn 相对富集于 20 号、22 号和 23 号采样点所围成范围内和以及 2 号、10 号和 17 号采样点附近;在 2 号、4 号、5 号、9 号、12 号、13 号和 16 号采样点所在的区域出现相对贫化。由图 4 可知相对富集于 8 号和 19 号采样点所围成范围内以及 4 号和 18 号采样点附近;在研究区的西部、西南、

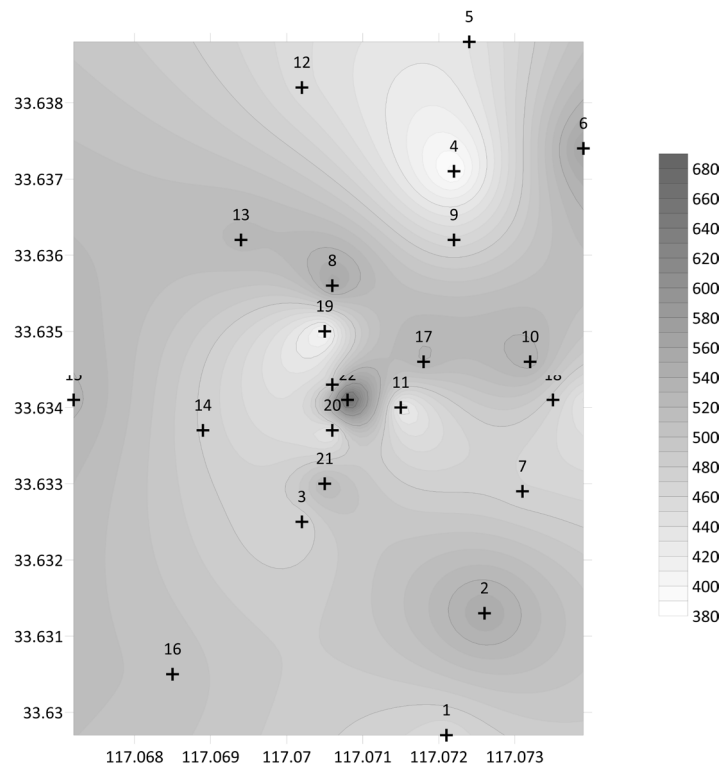


Figure 3. Spatial distribution of Mn elements ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
图 3. Mn 元素空间分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

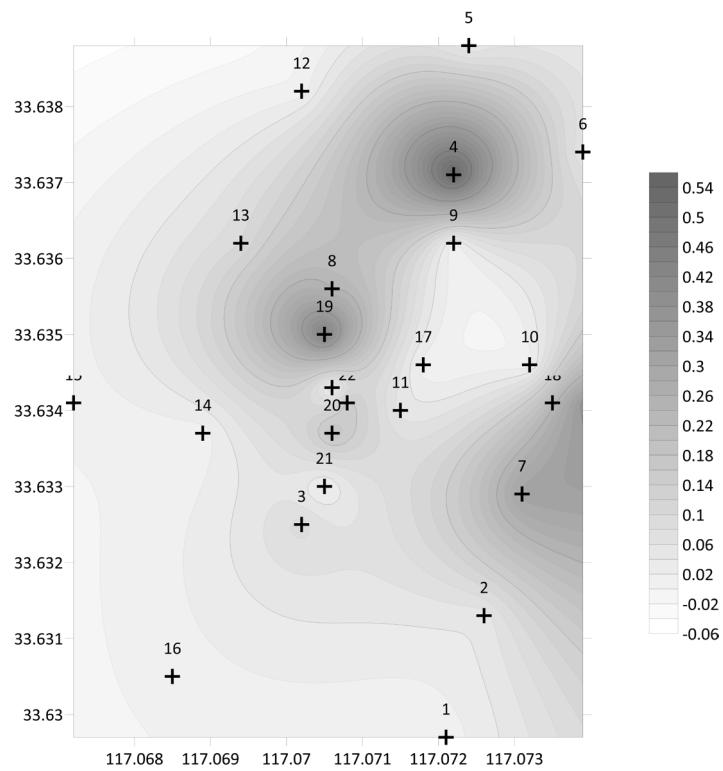


Figure 4. Spatial distribution of Hg elements ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
图 4. Hg 元素空间分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

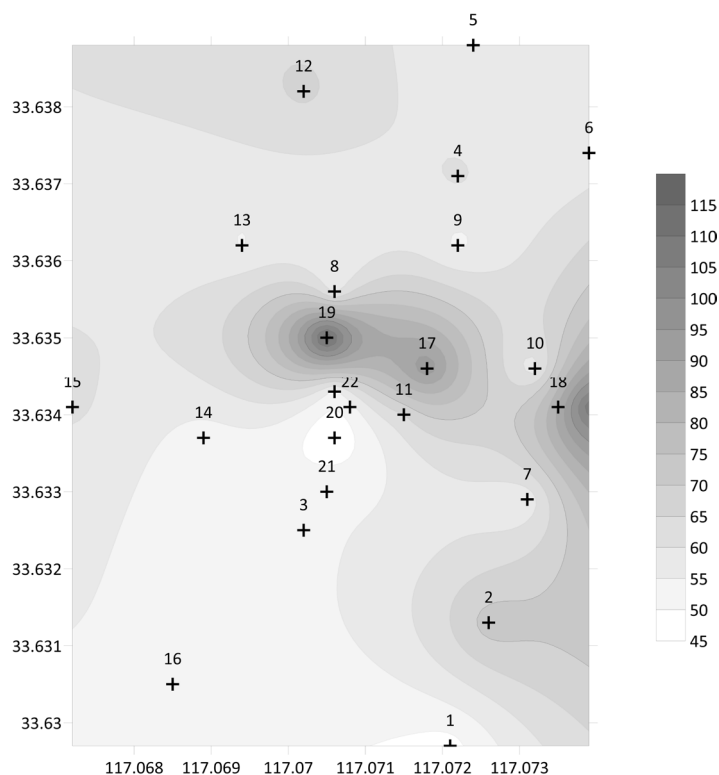


Figure 5. Spatial distribution of Zn elements ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图 5. Zn 元素空间分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

西北区域以及中部的 3 号、9 号、10 号、17 号和 21 号采样点出现相对贫化。由图 5 可知 Zn 的空间分布相对于 Mn 和 Hg 总体上较集中, 在研究区中部区域含量较高, 相对富集于 17 号和 19 号采样点所围成范围内。由图 3~5 可知, 17 号采样点的 Hg 元素和 19 号采样点的 Mn 元素与另二者相比都呈现出明显的富集与贫化的两极差异。

3.3. 人为活动与元素富集的关系

根据国家土壤元素背景值和土壤环境质量标准进行多方面分析, 全部样点重金属元素含量低于国家土壤环境质量二级标准, 总体上受外源物质影响和富集程度较低。Hg 元素的环境质量指数异常较大, 且变异系数较大, 说明某些样点受高密度人口活动影响较大, 富集较为明显。而且 Mn、Hg 和 Zn 元素含量较高的样点主要集中在人口密度较大, 交通活动比较繁忙的功能区附近。

通过土壤重金属的描述性统计分析、地积累指数法、内梅罗综合指数法和元素空间分布特征对 Mn、Hg 和 Zn 在研究区内不同区域的污染程度及相对富集程度进行了分析, 土壤环境质量总体上较好, 有轻微的污染程度。Mn、Hg 和 Zn 在地表土壤中的元素含量均受到高密度人口活动下一定程度的影响, 高密度人口活动对 Mn、Hg 和 Zn 的影响都较大。

4 号采样点位于三食堂, 样品土壤潮湿, 土质疏松, Hg 元素含量最高, 所以 Hg 出现较强的负异常; 18 号和 19 号采样点位于校园河流柳溪, 样品实际为河流底泥, 所以 Hg 出现较强的正异常。Mn、Hg 和 Zn 均表现为正异常的 9、10、11、12 号采样点等处, 9、11、12 号采样点日常人流量和车流量都很大, 且都位于停车位附近; 10 号采样点位于操场, 空间相对较小, 人流量较大。几乎全部采样点的 Mn 和 Zn 元素的污染程度较小, 均表现为正异常。

4. 结论

(1) 研究区地表土壤重金属元素含量的统计结果和空间分布特征表明, 重金属 Hg 元素含量的变异系数和极差均较大, 空间分布差异显著。

(2) 从地累积指数法内和梅罗综合指数法可以看出 3 种重金属元素的污染程度顺序为 $Hg > Zn > Mn$, 宿州学院教育园区的地表土壤已受到不同程度的重金属污染, 处于轻度污染水平, 校园重金属污染问题亟需解决;

(3) 对宿州学院教育园区校区地表土壤中 Mn、Hg 和 Zn 含量的检测结果进行了污染评价分析, 发现地表土壤中重金属元素含量与分布特征会受到高密度人口活动的影响, 不同元素受高密度人口活动影响的程度也存在差异, Mn、Hg 和 Zn 三种元素受人为活动的影响都较大, 一般表现为重金属元素富集。

基金项目

安徽省大学生创新创业训练项目(201910379162)、安徽省高校学科(专业)拔尖人才学术资助(gxbjZD2020091)共同资助。

参考文献

- [1] 肖武, 隋涛, 王鑫, 朱琦, 刘瑞, 陈翔宇. 巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 144-152.
- [2] Ahemad, M. (2019) Remediation of Metalliferous Soils through the Heavy Metal Resistant Plant Growth Promoting Bacteria: Paradigms and Prospects. *Arabian Journal of Chemistry*, **12**, 1365-1377.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.020>
- [3] 宋智萍, 张永清, 闫姣. 山西师范大学校园土壤重金属污染状况与评价[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 112-116.
- [4] 刘红侠, 韩宝平, 郝达平. 徐州市北郊农业土壤重金属污染评价[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 159-161.
- [5] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1584-1589.
- [6] 周广柱, 杨锋杰, 程建光, 等. 土壤环境质量综合评价方法探讨[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 113-115, 118.
- [7] 国家环境保护局, 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: 87-90, 330-496.
- [8] 土壤环境质量标准: GB 15618-1995 [S]. 1995.
- [9] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地累积指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(8): 13-17.
- [10] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 599-605.
- [11] 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所. 农产品质量安全风险评估: 原理、方法与应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 杨畅, 马宏伟, 田立新, 等. 葫芦岛市典型区土壤重金属污染特征及评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(2): 71-73.
- [13] Swaine, D.J. (2000) Why Trace Elements Are Important. *Fuel Processing Technology*, **65**, 21-23.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00073-9)
- [14] 李姗姗, 曹广超, 石平超, 等. 青岛城区土壤重金属元素空间分布及其现状评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 112-117.
- [15] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2869-2876.
- [16] 赵金亮, 徐亚飞, 刘焕宗, 等. Surfer 软件在油田开发中的应用[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(11): 45.