

# 宿州市北蔬菜园区土壤重金属含量特征与污染评价

王晓悦, 许继影, 韩淑新, 赵景宇, 许洁玮, 高力, 束永列

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年4月27日; 录用日期: 2023年6月30日; 发布日期: 2023年7月11日

## 摘要

为了解宿州市北蔬菜园区土壤重金属污染分析, 本文对36个取样点进行采样。利用X射线荧光光谱分析仪对采集到的蔬菜园区土壤样品进行重金属(Cu、Zn、Co、Ni、Cr、Mn和Pb)的含量检测, 并基于地累积指数法和内梅罗综合污染指数法评价重金属超标程度, 并运用统计学分析重金属的空间特征。研究结果表明: Cu、Zn、Co、Ni、Cr、Mn和Pb的平均含量分别为4.09、184.47、2.90、16.04、33.54、701.18和225.49 mg/Kg; 与安徽省土壤背景值相比, 元素的超标率从小到大依次为Cr < Cu < Co < Ni < Mn < Zn < Pb; 污染程度从高到低依次为Pb > Zn > Mn > Co > Ni > Cr > Cu, 其中Pb和Zn污染极为严重; 在空间分布上, 同一区域内不同重金属元素受到的污染程度不同, 产生的原因可能是局部的污水排放、工矿污染、生活垃圾污染。

## 关键词

土壤重金属, 污染评价, 蔬菜园区, 宿州地区

# Characteristics of Soil Heavy Metal Content and Pollution Evaluation in the North Vegetable Park of Suzhou City

Xiaoyue Wang, Jiying Xu, Shuxin Han, Jingyu Zhao, Jiewei Xu, Li Gao, Yonglie Shu

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 11<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to understand the analysis of soil heavy metal pollution in the North Vegetable Park of Suz-

文章引用: 王晓悦, 许继影, 韩淑新, 赵景宇, 许洁玮, 高力, 束永列. 宿州市北蔬菜园区土壤重金属含量特征与污染评价[J]. 自然科学, 2023, 11(4): 578-587. DOI: 10.12677/ojns.2023.114069

hou City, 36 sampling sites were sampled in this paper. The content of heavy metals (Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn and Pb) was detected on the soil samples collected in the vegetable park by an X-ray fluorescence spectrum analyzer, and the excessive degree of heavy metals was evaluated based on the ground accumulation index method and the comprehensive pollution index method, and the spatial characteristics of heavy metals were analyzed statistically. The results showed that the average contents of Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn and Pb were 4.09, 184.47, 2.90, 16.04, 33.54, 701.18 and 225.49 mg/Kg, respectively. Compared with the soil background values in Anhui Province, the exceeding standard rate of elements from small to large is Cr < Cu < Co < Ni < Mn < Zn < Pb; degree of contamination from high to low was Pb > Zn > Mn > Co > Ni > Cr > Cu, the Pb and Zn pollution is extremely serious. On the spatial distribution, different heavy metal elements in the same area are polluted to different degrees, which may be caused by local sewage discharge, industrial and mining pollution, and household garbage pollution.

## Keywords

Soil Heavy Metals, Pollution Evaluation, Vegetable Park, Suzhou Area

Copyright © 2023 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

近年来, 土壤重金属污染越来越严重, 这不仅降低农产品的产量和品质, 而且导致人类健康和环境安全问题的出现[1] [2] [3]。土壤是发展农业、保证粮食安全以及生态环境的基础, 它既是维持地球上生命的关键, 也是农作物的直接营养来源[4]。据农业部环境监测系统近年的调查, 在我国 24 个省(市)城郊、污水灌溉区、工矿等经济发展较快地区的 320 个重点污染区中, 污染超标的大田农作物种植面积为 60.6 万 hm<sup>2</sup>, 占调查总面积的 20%。其中, 重金属含量超标的农作物种植面积约占污染物超标农作物种植面积的 80% 以上, 尤其是 Pb、Cd、Hg、Cu 及其复合污染最为突出。农副产重金属污染指由于重金属或其化合物造成的环境污染, 主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致[5] [6] [7]。特别是蔬菜类, 蔬菜是人类生活的必需品, 所以蔬菜园区的重金属污染一直是热点内容。

近年来, 国内有不少关于农田土壤重金属污染相关的研究, 如赵杰等对环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价, 对环鄱阳湖区农田表层土壤(0~20 cm)中 7 种重金属元素(Hg、As、Pb、Cd、Cu、Cr、Zn)进行污染及生态风险评价[8]; 张旭辉等对云南农田土壤中铅、镉、铬水平及分布规律的研究; 穆莉等对湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析, 以湖南省某县稻田土壤样品为研究对象, 分析 Cd、Pb、Cr、As、Hg 的污染特征及来源[9]; 刘伟等对农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤 Cd 为例, 揭示了土壤重金属的空间分异性及其空间结构特征[10]。宿州市是一个典型的农业大市, 是全国重要的农产品生产基地, 主要种植经济作物占地面积为 1012.34 万亩, 前人在此方面研究较少。

本文以宿州市北面的蔬菜园区为采样点, 对蔬菜园区内部的土壤重金属(Cu、Zn、Co、Ni、Cr、Mn 和 Pb)进行系统的采集, 基于荧光元素含量测定结果, 借助地累积和内梅罗综合指数法, 并结合土壤采样示意图, 掌握蔬菜园区土壤重金属的污染特征, 旨在为周边居民的健康得以保障并对耕地环境可持续利用提供科学依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

宿州，别称宿城，安徽省辖地级市，建设为皖苏鲁豫四省交汇区域的新兴中心城市，介于东经115°09'~117°10'，北纬33°18'~34°38'之间，属于北温带半湿润季风气候，夏冬长，春秋短，夏季炎热，冬季寒冷。主要农作物有小麦、棉花、大豆、玉米、山芋及花生、芝麻等。研究区种植有小麦、辣椒、西瓜、葡萄等，都是肥沃的黑土地，离交通大道比较近。本次采样位置定于宿州市周边蔬菜园区，分为三个地点，如图1所示。

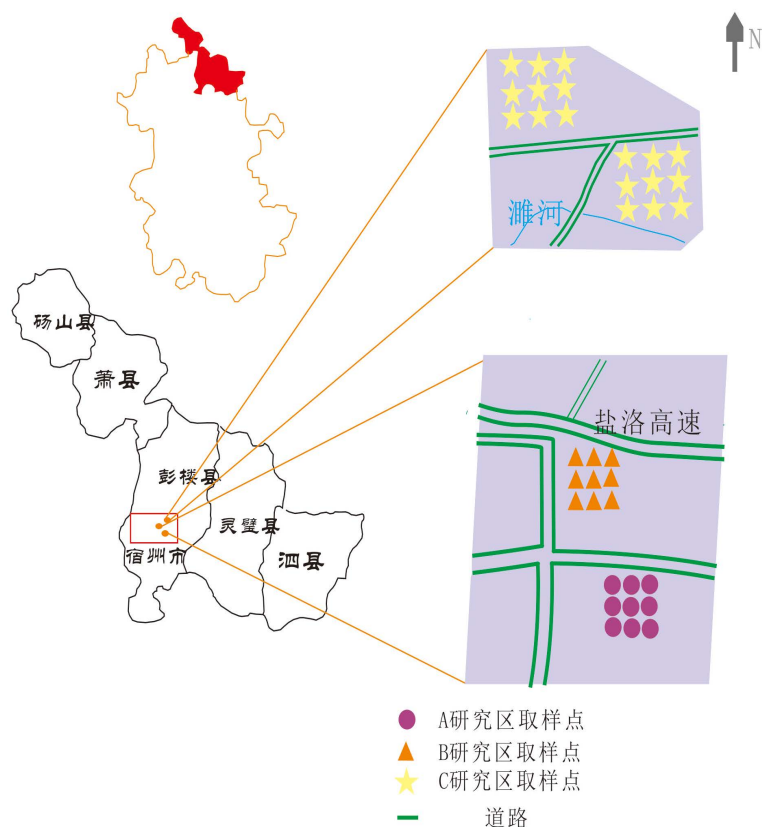


Figure 1. Distribution map of the study area  
图 1. 研究区分布图

### 2.2. 样品采集与处理

2021年6月完成采样工作，分别在道路两边的蔬菜大棚基地内设定了4个采样区。依据现场条件，每个采样区内按间隔100×150 m的3×3单元格布置，每个单元格代表一个采样点。

现场取土时，利用采样器采集农田中3~10 cm的土壤，去除树根等杂质，保留1 kg左右的土壤样品作为该采样点的分析样品装袋，贴好标签带回实验室。将采集的土壤样品置于阴凉通风处自然风干，剔除样品中的杂物，依次研磨至过0.074 mm网筛后置于密封袋中保存待测。最后分别取各个采样点粉末样品5 g左右置于手动台式压片机压成约0.5 mm的薄片并用密封袋封存以备下一步测定。

利用X射线荧光光谱仪测定样品薄片Cu、Zn、Co、Ni、Cr、Mn和Pb重金属含量，该测定方法具有检测元素广泛、测试速度快等特点。

### 2.3. 数据分析方法

#### 1) 地累积指数法:

地累积指数  $I_{geo}$  是由德国科学家 Muller 在 1969 年提出, 用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量指标。其能直观地反映重金属在沉积物中的富集程度的方法, 对该地区重金属污染程度进行评估[11]。  $I_{geo}$  越大, 则表示土壤所含重金属含量越高。地累积指数法估计重金属污染程度划分标准见表 1, 计算公式如(1)所示。

$$I_{geo} = \log_2 [C_i \div (K \times B_i)] \tag{1}$$

式中,  $C_i$  为元素  $i$  在土壤中的含量;  $B_i$  为该元素的背景值, 本研究以安徽省土壤背景值作为参比值;  $K$  为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(在本次研究中取值为 1.5), 用来表征沉积特征、岩石地质及其它相关联的影响。

#### 2) 内梅罗综合污染指数法:

单因子污染指数  $P_i$  是评价土壤中某一重金属污染程度的重要方法。内梅罗综合污染指数  $P_{综}$  是由美国学者内梅罗在《河流污染科学分析》中提出的。兼顾单因子污染指数的平均值和突出最大值的一种加权型多因子环境质量指标[12]。由于它综合考虑土壤中各金属对环境质量影响, 所以目前应用较多。其计算公式为(2)和(3), 污染程度评价标准见表 1。

$$P_i = C_i \div S_i \tag{2}$$

$$P_{综} = \left\{ \left[ (P_{i,max})^2 + (P_{i,ave})^2 \right] \div 2 \right\}^{1/2} \tag{3}$$

式中,  $P_i$  为单因子污染指数;  $P_{综}$  为内梅罗综合污染指数;  $C_i$  为  $i$  元素实测含量;  $S_i$  为  $i$  元素参考标准含量;  $P_{i,ave}$  为  $i$  采样点元素环境质量指数平均值;  $P_{i,max}$  为  $i$  采样点元素环境质量指数中的最大值。

**Table 1.** Soil heavy metal pollution grade classification standard

**表 1.** 土壤重金属污染等级划分标准

地质累积指数		内梅罗综合污染指数			
$I_{geo}$	污染等级	$P_i$	污染等级	$P_n$	污染等级
$\leq 0$	无污染	$\leq 1$	清洁	$\leq 0.7$	清洁
0~1	无~轻污染	1~2	清污染	0.7~1	警戒线
1~2	中污染	2~3	中度污染	1~2	轻度污染
2~3	中~强污染	$> 3$	重度污染	2~3	中度污染
3~4	强~极强污染			$> 3$	重度污染
$> 5$	极强污染				

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 含量特征

本文选取 Cu、Zn、Co、Ni、Cr、Mn、Pb 共 7 种重金属元素进行分析, 并利用 Excel 软件对 36 个采样点的重金属测试结果进行含量特征分析, 如表 1 所示。

根据表中数据可得: 测得的 7 种重金属元素含量的平均值由大到小依次是 Mn > Pb > Zn > Cr > Ni > Cu > Co, 其中均值含量最多的是 Mn 元素, 为 701.18 mg/Kg, 最少的是 Co 元素, 为 2.90 mg/Kg。与安

徽省土壤背景值的对比下, Pb、Zn 和 Mn 这 3 种重金属元素的均值超标, 且分别是安徽省背景值的 8.47、2.98、1.32 倍。在所有采样点中元素的超标率从小到大依次为 Cr < Cu < Co < Ni < Mn < Zn < Pb, 其中 Pb 和 Zn 元素全部超标, 83.3%的 Mn 元素超标, 19.44%的 Ni 超标, 2.78%的 Co 元素超标, Cu 和 Cr 元素没有超标。以上分析表明, Pb、Zn、Mn、Ni、Co 在该蔬菜园区已经受到不同程度的污染, 其中 Pb、Zn、Mn 污染严重, Ni 和 Co 污染程度较低, 可能是受人为因素干扰影响。

变异系数是指所有数据与平均值相比的波动程度。如表 2 所示, 重金属中变异系数从大到小依次为 Co > Cu > Ni > Mn > Zn > Cr > Pb, 根据 Wilding 对变异程度的分类, 可知 Co、Cu 和 Ni (214.32%、67.03%、53.87%)为高等变异类型(CV > 36%); Mn (21.47%)为中等变异类型(15% ≤ CV ≤ 36%); Zn、Cr 和 Pb (13.99%、8.56%、4.64%)为低等变异类型(CV < 15%)。如果变异越高, 说明在空间分布不均匀, 元素受人为或其他因素的影响程度越高; 变异系数越低, 说明在空间分布越均匀, 受外界干扰越小。其中, Co、Cu 和 Ni 为高变异类型, 说明数据分布具有极大的空间离散性, 该三种元素受人为或其他外界因素的影响极高。

Table 2. Characteristics analysis of soil heavy metal content

表 2. 土壤重金属含量特征分析

元素	范围	平均值 (mg·Kg <sup>-1</sup> )	安徽省土壤背景值	标准方差	变异系数
Cu	11.1~11.87	4.09	20.4	2.74	67.03%
Zn	140.75~242.54	184.47	62	25.81	13.99%
Co	0.12~38.89	2.90	16.3	6.22	214.32%
Ni	0~32.06	16.04	23.44	8.64	53.87%
Cr	28.22~40.45	33.54	66.5	2.87	8.56%
Mn	496.53~1122.05	701.18	530	150.55	21.47%
Pb	190.94~240.29	225.49	26.6	10.46	4.64%

### 3.2. 空间分布特征

运用 Suffer 软件对研究区不同元素的空间分布绘制等值线图, 并对其进行分析, 分析结果如下:

图 2(a)所示为 Cu 元素的分布等值线图。从该图可以看出, 正北方向、东北方向和西南小部分地区的 Cu 元素含量多。正中方向和东南方向 Cu 元素含量少。Cu 含量空间变化范围较大, 相邻的等含量线间距相对较小, 含量变化趋势相对较快。从东北到西南方向 Cu 元素含量先快速递减, 在研究区 C 和 B 之间元素含量达到最低, 经过中部后含量缓慢上升。

图 2(b)所示为 Zn 元素的分布等值线图。如图所示, 中部和东北方向的 Zn 元素含量多。正南方向、西部方向和正北方向的 Zn 元素含量少。Zn 含量的空间变化范围小, 相邻的等含量线间距大, 含量变化趋势缓慢。从正北方向到正南方向 Zn 元素含量先增大, 并在 B 研究区达到最大值, 经过中部后含量再缓慢减小。

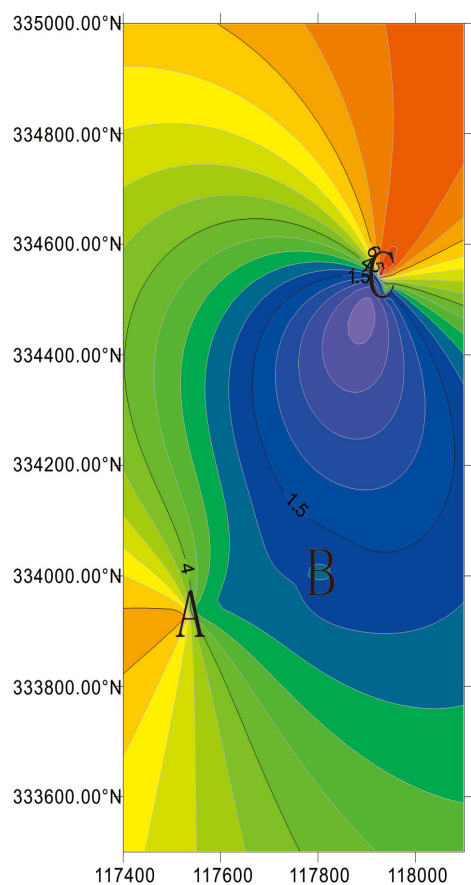
图 2(c)所示为 Co 元素的分布等值线图。如图所示, 该图的中部和西北方向地区的 Co 元素含量多。正南方向和东北方向小部分地区 Co 元素含量少。Co 含量空间变化范围较小, 相邻的等含量线间距相对较大, 含量变化趋势相对较缓慢。从西北到东南方向 Co 元素含量先增加, 在研究区 B 元素含量达到最大, 后含量缓慢下降。

图 2(d)所示为 Ni 元素的分布等值线图。如图可见, 该图的西南方向、正南方向和东北方向小部分的 Ni 元素含量多。北方位和中部的 Ni 元素含量少。Ni 含量的空间变化范围大, 相临的等含量线间距小, 含量变化趋势较快。从东北方向到西南方向 Ni 元素含量先减小, 并在 C 和 B 研究区达到最小值, 经过中部后含量再快速增大。

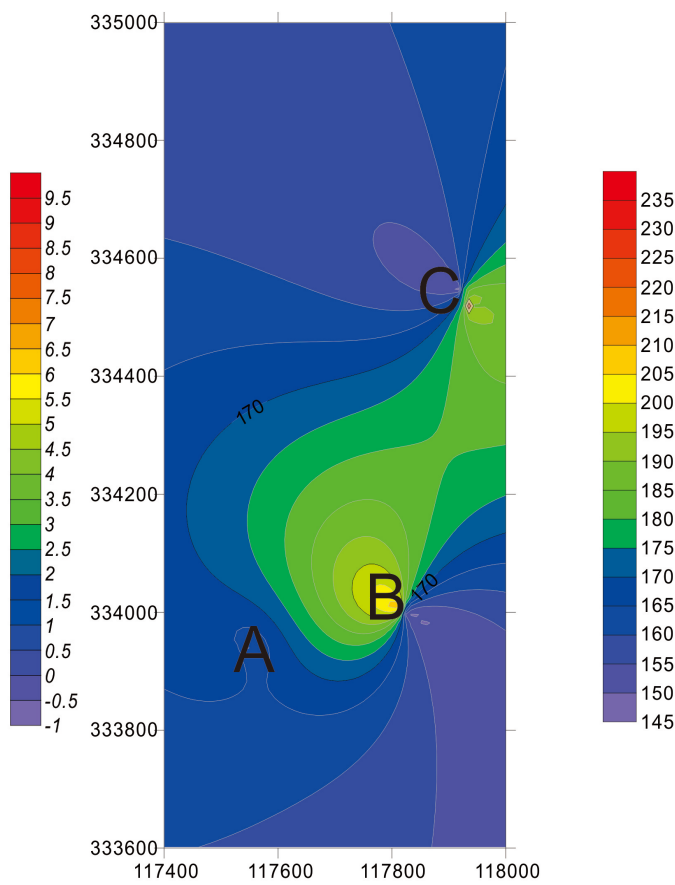
图 2(e)所示为 Cr 元素的分布等值线图。从该图可见, 正南方向和西南方向的 Cr 元素含量多。正北方向和东北方向的 Cr 元素含量少。Cr 含量的空间变化范围大, 相临的等含量线间距小, 含量变化趋势较快。从东北方向到西南方向 Cr 元素含量一直在增大, 并在 A 和 B 研究区达到最大值, 达到最大值后周边含量有轻微浮动。

图 2(f)所示为 Mn 元素的分布等值线图。如图所示, 中部和东北方向的 Mn 元素含量多。正南方向正西方向和正北方向的 Mn 元素含量少。Mn 含量的空间变化范围大, 相临的等含量线间距小, 含量变化趋势较快。从东北方向到西南方向 Mn 元素含量先增大, 并在 C 和 B 研究区达到最大值, 达到最大值后周边含量有轻微浮动, 并向西南方向元素含量减少。

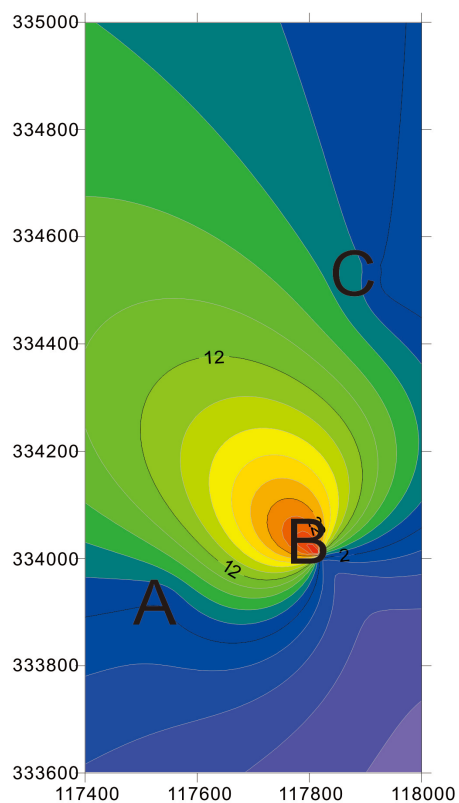
图 2(g)所示为 Pb 元素的分布等值线图。如图所示, 该图的正南方向和东北方向的 Pb 元素含量多。中部和西北方向的 Pb 元素含量少。Pb 含量的空间变化范围大, 相临的等含量线间距小, 含量变化趋势较快。从东北方向到西南方向 Pb 元素含量先减小, 并在 B 研究区达到最小值, 达到最小值后并向西南方向元素含量少量增大。



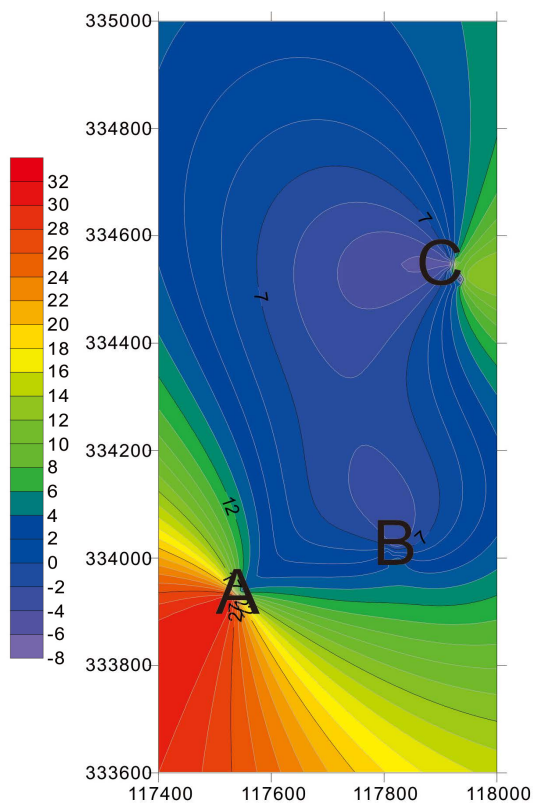
a. Cu 的分布图



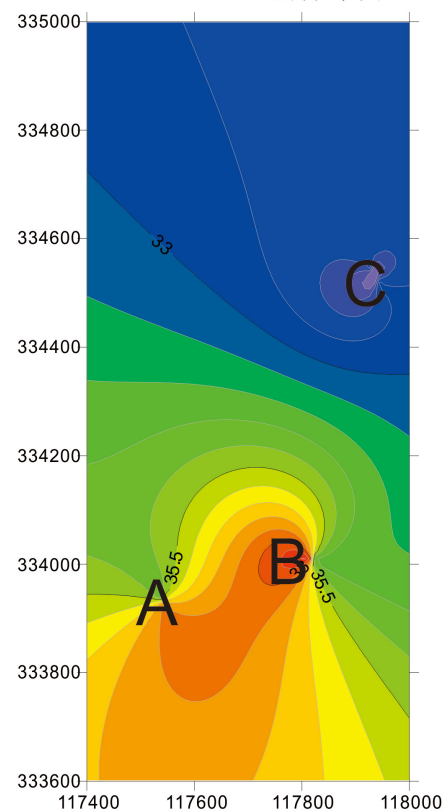
b. Zn 的分布图



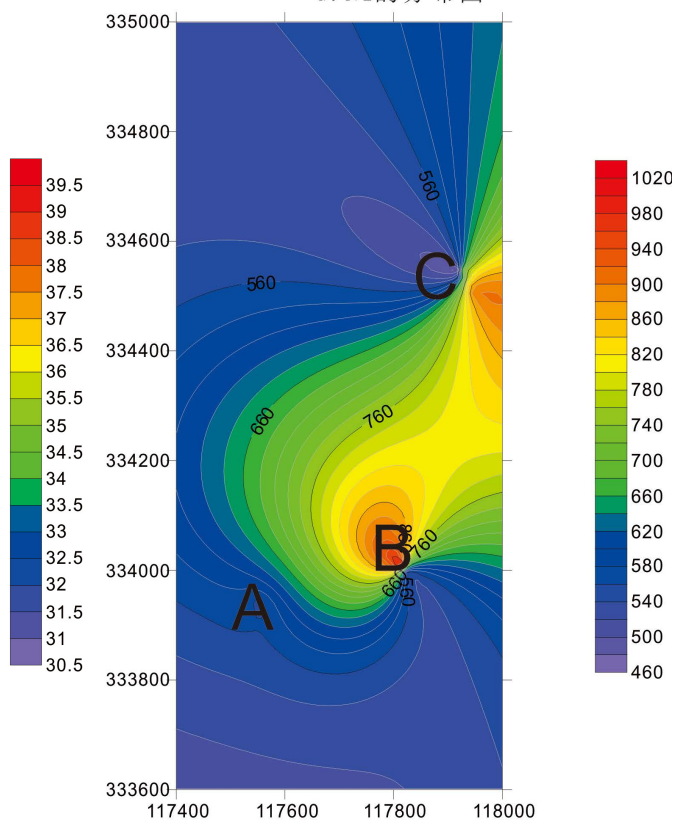
c. Co的分布图



d. Ni的分布图



e. Cr的分布图



f. Mn的分布图

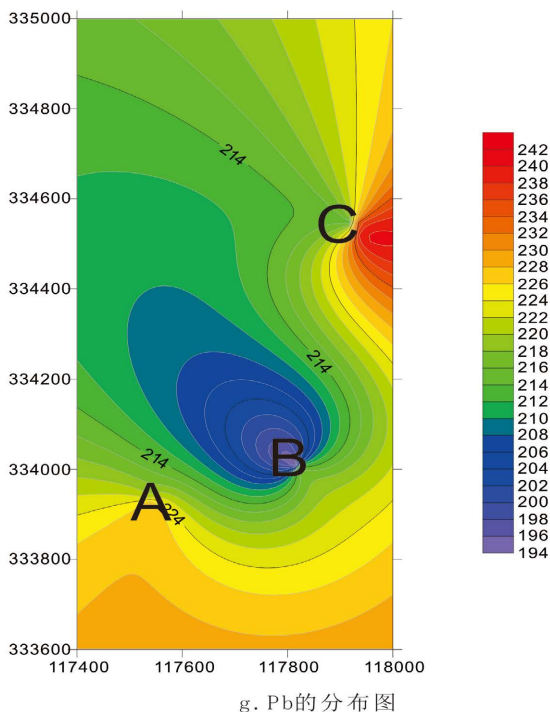


Figure 2. Spatial distribution characteristics of the elements  
图 2. 元素的空间分布特征

### 3.3. 污染水平

由图 3 可知，该图展示了每个取样点不同重金属元素含量的累积情况，Cu、Ni 和 Cr 的地累积指数均小于 0，处于无污染状态，表明 Cu、Ni 和 Cr 中重金属元素对研究区的污染风险较低；土壤中 Pb、Zn、Mn 和 Co 均存在一定的累积水平，其中 Pb 均处于中 - 强度污染之间；Zn 处于轻 - 中度污染和无污染之间，各占 55.6%和 44.4%；Mn 的污染贡献比率为 61.1%，污染等级均为轻污染，对于 Co 元素只有一个元素点处于轻度污染范畴。从地累积污染指数来看，重金属元素对种植区土壤的污染影响依次为：Pb > Zn > Mn > Co > Ni > Cr > Cu，说明该地受到 Pb、Zn 和 Mn 的污染比较严重。

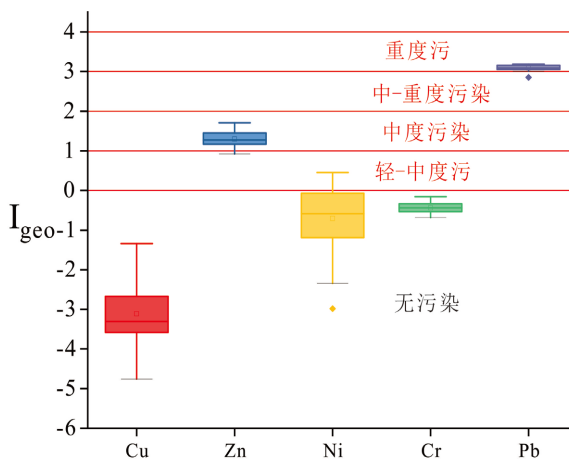


Figure 3. Ground cumulative index ( $I_{geo}$ ) box plot  
图 3. 地累积指数( $I_{geo}$ )箱体图



如图 4 所示, 各种重金属的清洁程度依次为: Cu、Mn、Cr、Co、Ni、Zn、Pb。只有 Cu 和 Mn 两种元素属于清洁( $P_n < 0.7$ ), Cr、Co 和 Ni 属于轻度污染( $1 < P_n < 2$ ), 其中 Pb 和 Zn 的内梅罗综合污染评价分别达到 8.76、3.48, 属于重度污染( $P_n > 3$ )。说明研究区的 Pb 污染最为严重, Zn 污染相对严重, 需要引起重视。

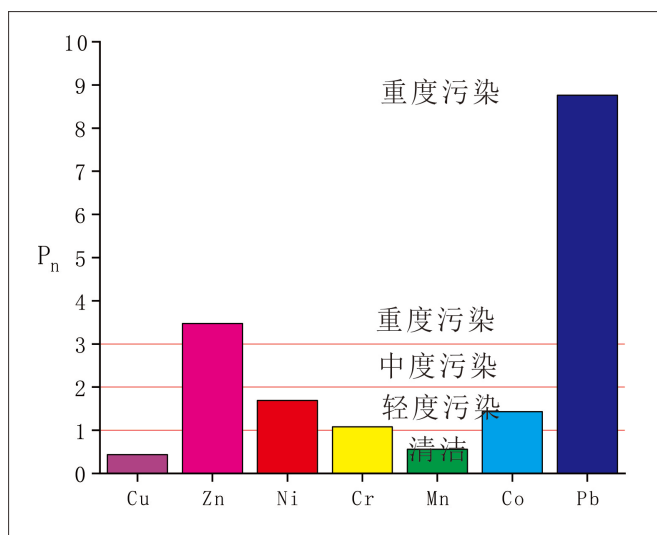


Figure 4. Memero comprehensive pollution evaluation ( $P_n$ ) bar chart  
图 4. 内梅罗综合污染评价( $P_n$ )柱状图

#### 4. 结论

本文对宿州市北边的蔬菜园区进行检测, 基于地累积法和内梅罗指数法进行污染评价, 所得结果如下:

- 1) 与安徽省背景值相比, Pb、Zn、Mn、Ni、Co 在该蔬菜园区土壤重金属含量都存在高于背景值的数据, 其中 Pb 和 Zn 元素全部超标, 83.3%的 Mn 元素超标, 19.44%的 Ni 超标, 2.78%的 Co 元素超标。
- 2) 根据重金属的地累积结果表明: 土壤中 Pb、Zn、Mn 和 Co 均存在一定的累积水平, 其中 Pb 均处于中-强度污染之间, Zn 大部分处于轻-中度污染。
- 3) 根据重金属的内梅罗综合污染评价表明: Pb 的内梅罗综合污染达到 8.76, Pb 和 Zn 的内梅罗综合污染评价属于重度污染, 该地 Pb 和 Zn 的污染应该被重视。

#### 基金项目

本研究由 2023 年宿州学院国家级大学生创新创业训练项目, 项目名称: 宿州千博地质技术服务有限公司; 2022 年宿州学院资助省级大学生创新创业训练项目, 项目名称: 宿州地源地勘技术服务有限公司; 国家级大学生创业实践项目(202210379055S); 2022 年宿州学院大学生创新创业项目(ZCXM22-310); 2022 年宿州学院大学生创新创业项目(KYLXYBXM22-077); 2022 年宿州学院大学生创新创业项目(KYLXYBXM22-078)资助。

#### 参考文献

- [1] He, H., Le, L., Le, H., *et al.* (2020) Effects of Human Body Composition on Distribution of Copper and Zinc in Rhizosphere Soil and Accumulation of Heavy Metals in Rape Grasses. *Water, Air and Soil Pollution*, **231**, 1-10.
- [2] Guo, J., Yue, T.L., Li, X.T. and Yuan, Y.H. (2016) Heavy Metal Levels in Kiwifruit Orchard Soils and Trees and Its

- 
- Potential Health Risk Assessment in Shaanxi, China. *Environmental Science and Impulse Research*, **23**, 14560-14566. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6620-6>
- [3] Li, Q.H., Li, C.F., Wang, H., *et al.* (2021) Geochemistry Characteristics of Heavy Metals in Soil and Buleberries of the Core Majiang Blueberry Production Area. *Bulletin of Environmental Pollution and Toxicology*, **106**, 57-64. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03007-4>
- [4] 王玉军, 陈能场, 刘存, 等. 土壤重金属污染防治的有效措施: 土壤负载容量管控法——献给 2015 “国际土壤年” [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 613-618.
- [5] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 166-172.
- [6] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 83-92.
- [7] Jiao, W., Niu, Y., Niu, Y., Hu, H.Y. and Li, R.P. (2018) Spatial Assessment of Anthropogenic Impact on Trace Metal Accumulation in Farmland Soils from a Rapid Industrializing Region, East China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, Article 2052. <https://doi.org/10.3390/ijerph15092052>
- [8] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475-2485.
- [9] 张旭辉, 熊庆, 栗昉. 云南农田土壤中铅、镉、铬水平及分布规律[J]. 环境与职业医学, 2019, 36(3): 238-241.
- [10] 刘伟, 张永波, 贾亚敏. 重金属污染农田植物修复及强化措施研究进展[J]. 环境工程, 2019, 35(5): 29-33.
- [11] Haris, H. and Aris, A.Z. (2013) The Geoaccumulation Index and Enrichment Factor of Mercury in Mangrove Sediment of Port Klang, Selangor, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, **6**, 4119-4128. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0674-7>
- [12] Nemerow, N.L. (1974) *Scientific Stream Pollution Analysis*. McGraw-Hill Book Co., New York.