



欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价

王伟全,王雪,高珊,孙涛,孙约兵

引用本文:

王伟全,王雪,高珊,孙涛,孙约兵. 基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 475-484.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0071

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利,王学东,李志涛,王夏晖,何俊,季国华 农业资源与环境学报.2019,36(4):513-521 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191

西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价

王伟鹏, 卢宏玮, 冯三三 农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 970-980 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0421

安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价

江宏,马友华,尹国庆,王强,聂静茹,马铁铮,胡宏祥 农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 352-359 https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0302

武清区典型蔬菜种植区土壤重金属的风险评估和空间分布特征

苏辉跃, 王璐, 钱欢, 韩玥江, 刘江川 农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1122-1131 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0538

安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价

岳蛟,叶明亮,杨梦丽,崔俊义,马友华 农业资源与环境学报.2019,36(1):53-61 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0336



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业资源与环境学报 2022, 39(3): 475-484

Journal of Agricultural Resources and Environment

王伟全,王雪,高珊,等.基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 475-484. WANG W Q, WANG X, GAO S, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil at the field scale[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 475-484.



基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价

王伟全^{1,2}, 王雪^{1,2}, 高珊^{1,2}, 孙涛², 孙约兵^{2*}

(1.东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030;2.农业农村部环境保护科研监测所,农业农村部产地环境污染防控重点实验 室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室,天津 300191)

摘 要:为了揭示田块尺度上土壤重金属污染特征及空间分布,以河南省新乡县翟坡镇某冬小麦种植农田为研究对象,采集了 202个农田表层 0~20 cm 土壤和 40 个 0~100 cm 剖面土壤样品,分析了土壤样品中 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni和 Mn 的含量特征,运用地 统计分析中的普通克里格插值法研究土壤重金属的空间分布规律,并结合地质累积指数法和潜在生态危害指数法对研究区土壤 重金属的生态风险进行评价。结果表明,研究区表层土壤 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni和 Mn 均值为 0.95、24.35、6.40、35.52、319.60、21.76 mg·kg⁻¹和 157.32 mg·kg⁻¹。Cr、Cd、Pb 含量均超过河南省土壤重金属含量背景值,其中 Cr、Cd含量超过《土壤环境质量 农用地土壤 污染风险管控标准》(GB 15618—2018)筛选值,点位超标率分别为 98%和 100%。总体来看,土壤重金属含量随着剖面深度增加 而降低,调查区南部的部分区域重金属含量偏高。从地质累积指数法与潜在生态危害指数法两种方法来看,Cd 污染最为严重,生态风险较高,应当对该区域土壤 Cd 污染采取一定的调控措施。

关键词:农田土壤;重金属;空间分布;生态风险

中图分类号:X53;X826 文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)03-0475-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0071

Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil at the field scale

WANG Weiquan^{1,2}, WANG Xue^{1,2}, GAO Shan^{1,2}, SUN Tao², SUN Yuebing^{2*}

(1.School of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 157000, China; 2.Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Here, we aimed to elucidate the characteristics and spatial distribution of soil heavy metals at the field scale. A winter wheat planting farmland in Zhaipo Town (Xinxiang County, Henan Province) was used as the research object. We collected 202 topsoil (0~20 cm) samples and 40 profile (0~100 cm) soil samples. The content of Cd, Pb, Cu, Zn, Cr, Ni, and Mn was determined in the soil samples, and the spatial distribution of heavy metals in the soil was evaluated using ordinary Kriging interpolation in the geostatistical analysis. Furthermore, the ecological risk of soil heavy metals in the study area was evaluated by combining the geological accumulation and potential ecological hazard indexes. The results showed that the average content of Cd, Pb, Cu, Zn, Cr, Ni, and Mn in the topsoil of the study area was 0.95, 24.35, 6.40, 35.52, 319.60, 21.76 mg \cdot kg⁻¹, and 157.32 mg \cdot kg⁻¹, respectively. The content of Cr, Cd, and Pb exceeded the background levels of soil heavy metal content in Henan Province. The content of Cr and Cd exceeded the screening level of the *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Agricultural Land Soil Pollution* (GB 15618—2018), by 98% and 100%, respectively. In general, the heavy metal content in the soil decreased with the profile depth, and the heavy metal content in most south of the survey area was high. The geological accumulation and potential ecological risk is high. Therefore, some control measures should be taken to mitigate soil Cd pollution in the region.

Keywords: farmland soil; heavy metal; spatial distribution; ecological risk

收稿日期:2021-02-01 录用日期:2021-03-29

作者简介:王伟全(1994—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,从事土壤重金属调查与修复研究。E-mail:wangweiquan2017@163.com *通信作者:孙约兵 E-mail:sunyuebing2008@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31971525);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2018YFD0800300)

Project supported : The National Natural Science Foundation of China (31971525); The National Basic Research Program of China (2018YFD0800300)

土壤是人类赖以生存和发展的基石,是保障粮食 安全生产的重要物质基础^{III}。人类活动,如工业采 矿、冶炼、交通运输、农业投入品使用导致土壤受重金 属污染[2-3]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显 示,全国土壤总的超标率为16.1%,其中耕地土壤点 位超标率为19.4%,土壤环境状况总体不容乐观^[4]。 重金属具有生物积累性、持久性和对生物群体的高毒 性,会对整个陆地生态系统的结构和功能产生不利 的影响[5-6]。据估计,目前我国受污染的耕地面积已 达2000万hm²,每年产出重金属污染的粮食约1200 万t,导致我国农业经济遭受巨大的损失¹⁷。重金属还 会伴随着农作物最终被人类吸收,从而对人体健康 产生不良影响¹⁸¹,当前土壤重金属污染问题已成为 国内外的研究热点。土壤重金属含量水平不仅影 响着土壤的可持续利用,而且对粮食安全也有着直 接的影响¹⁹¹,土壤重金属污染已经成为一个十分严重 的问题。

近年来,已有学者对农田土壤重金属污染状况 及生态风险评级进行了一些研究,刘瑞雪等100的研 究表明湘潭县农田土壤综合潜在生态风险系数的均 值为314.9,属于强生态风险水平。张云芸等凹的研 究表明浙江省典型农田土壤8种重金属元素的平均 质量分数均超出浙江省土壤环境背景值,存在明显 的富集效应,其中Cd的富集效应最突出,但均未超 过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018)筛选值。LIU 等^[12]的研究 表明泉州市喀斯特地区农田土壤中Cd是该地区污 染程度最高的污染物。河南省是我国冬小麦主产 区,在该区域开展土壤重金属调查及生态风险评价 对于保障粮食安全具有重要意义。这不仅有利于后 续制定科学的农田土壤修复措施,而且可以对农作 物的种植提出合理的建议,对于环境管理决策和区 域生态环境保护具有重要意义[13]。

目前对农田土壤重金属的调查尺度主要集中 在大区域尺度^[14-17],对于田块尺度的土壤重金属调 查研究较少。本研究以河南省新乡县翟坡镇某冬 小麦种植农田表层和剖面土壤作为研究对象,分析 土壤中重金属Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni和Mn的含量及 空间分布特征,运用地统计分析中克里格插值法 (OK)以及4种指数评价方法对研究区土壤重金属 污染程度进行评价,同时采用主成分分析法(PCA) 探讨研究区土壤中各重金属的可能来源,为研究区 农田土壤重金属污染的管控提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省新乡县位于113°30′~115°30′E、34°55′~ 35°50′N,属暖温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥,四季分明,7月份最热,平均气温 27.3℃,1月份最冷,平均气温0.2℃,无霜期220d,年 均降水量573.4 mm,主要集中在夏季。该研究区位 于新乡县翟坡镇某污灌农田,以种植一年一熟制冬小 麦为主,其面积为1.15 km²,西邻红林村,南临西孟姜 女河,该河流向自西南至东北,河的上游分布居民区 和工厂。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集于2020年5月,使用GPS记录采集 点位的经纬度,共采集242个样品,其中包括202个表 层 0~20 cm 土壤样品和 40 个剖面 0~100 cm 土壤样 品,采样点位置如图1所示。由于南部紧邻污水河与 主干道,且人为活动较为密集,因此对该区域采样点 进行适当地加密,其他部分区域人为活动较少,布点 较为稀疏。表层样品首先用铁铲从田里挖出,再用 木铲刮去土壤样品与铁铲接触的部分,然后装入做 好标记的自封袋内。剖面土壤样品分成5个深度, 分别为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。使 用土钻采集剖面土壤样品,并用木铲把土壤样品从 土钻挖出放入做好标记的自封袋内。把所有样品带 回实验室,从自封袋内取出摊开并使其自然风干,除 去植物根系及其他杂质,用木槌及研钵对土壤样品 进行研磨,过100目筛以及20目筛后,装入做好标记 的自封袋备用。

1.3 试验方法

土壤样品采用 HNO₃-HF 进行消解,称取 0.25 g 土壤样品,每份土壤样品设定三个重复,每次消解设 置三个空白,并使用标准物质 SRM-2586 进行控制, 土壤样品重金属含量的测定采用电感耦合等离子体 质谱仪进行测定^[18]。土壤 pH采用 Sartorius PB-10 pH 计进行测定(水土比为 2.5:1)。

1.4 研究方法

1.4.1 克里格插值法

以半变异函数为理论基础的克里格插值法是地统计学的主要内容之一,其原理是根据未知样点有限邻域内的若干已知样本点数据,考虑与未知样点的空间关系,对未知样点进行最优预测^[19]。使用克里格插值法的数据必须符合正态分布,数据经过整理后,发

2022年5月

王伟全,等:基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价





现原始数据中重金属Cr、Mn、Ni、Cd符合正态分布, Cu、Zn、Pb不符合正态分布,将其异常值剔除后,使其 符合正态分布,经过K-S检验后结果如表1所示。 1.4.2 地质累积指数

地质累积指数又称 Muller 指数,于 1969 年被德国海德堡大学的科学家 Muller 提出,该方法用于评价 沉积物中重金属的污染程度^[20]。其计算公式为:

 $I_{\text{geo}} = \log_2[C_i / (k \times B_i)] \tag{1}$

式中:*I*geo为地质累积指数;*C*i为重金属*i*元素在样品中 的实测值;*B*i为重金属*i*元素的背景值;*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(一般 取值为1.5)^[21]。地质累积指数按照污染程度一般分 为7个等级,其分级程度如表2所示。

表1 正态分布检验结果

Table 1 Normal distribution test results

元素	峰度	偏度	P值
Element	Kurtosis	Skewness	P value
Cr	2.690	0.188	0.976
Ni	3.034	0.435	0.753
Mn	2.322	0.350	0.233
Cu	4.897	0.693	0.206
Zn	4.867	1.057	0.058
Cd	3.948	0.193	0.794
Pb	10.267	1.764	0.240

http://www.aed.org.cn

表2 地质积累指数分级标准

${\rm Table}\; 2$	The classification standard of geological
	accumulation index

地质累积指数	污染程度
Geological accumulation index	The degree of pollution
$I_{\rm geo} < 0$	无
$0 \leq I_{geo} < 1$	轻
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	中
2≤I _{geo} <3	中-强
3≤I _{geo} <4	强
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	强-极强
$I_{\rm geo} \ge 5$	极强

1.4.3 潜在生态危害指数

 E_r^i

潜在生态危害指数法由瑞典科学家HAKANSON 建立,该指数根据重金属的性质及其在环境中迁移转 化的特点,从沉积学角度对土壤重金属进行评 价^[22-23],能综合反映重金属对生态环境的影响潜力^[22]。 计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \tag{2}$$

$$=T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

式中:RI为综合潜在生态危害指数; E_i 为单项元素潜 在生态危害指数; T_i 为重金属元素i的毒性系数,本研 究中Cd、Ni、Cu、Pb、Cr、Mn、Zn的毒性系数分别为30、5、 5、5、2、1、1^[24-25]; C_i 为重金属元素i的实测值与背景值的 比值,即重金属富集指数。其分级标准如表3所示。

表3 潜在生态危害指数分级标准

Table 3 The classification standard of potential ecological

hazard index						
E_r^i	RI	潜在生态危害程度 Potential ecological hazard				
$E_{r}^{i} < 40$	<i>RI</i> <150	低				
40≤ <i>E</i> ^{<i>i</i>} <80	150≤ <i>RI</i> <300	中等				
$80 \le E_r^i \le 160$	300≤ <i>RI</i> <600	重				
$160 \le E_r^i < 320$	<i>RI</i> ≥600	严重				
<i>E</i> ^{<i>i</i>} ≥320	—	极严重				

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行计算,数据正态检验和异常值剔除选用 SPSS 21 进行处理,用 ArcMap 10.6 绘制克里格插值图及采样点分布图,其余相关图表选择 Origin 9绘制。

2 结果与讨论

2.1 调查区农田土壤重金属含量特征与空间分布规律2.1.1 土壤表层重金属含量特征

研究区表层土壤pH范围在7.38~9.07之间,整体 上呈弱碱性。由表4可知,土壤中Cr、Ni、Mn、Cu、Zn、 Cd、Pb含量平均值分别为319.60、21.76、157.32、6.40、 35.52、0.95 mg·kg⁻¹和24.35 mg·kg⁻¹,其中Cr、Cd、Pb 含量全部点位超过河南省土壤重金属含量背景值^[26], Ni、Zn含量部分点位超过河南省土壤重金属含量背 景值,超标率分别为12.38%、2.97%,Mn、Cu含量均未 超过河南省土壤重金属含量背景值,表明除Mn、Cu 以外该研究区土壤均受到一定程度的重金属污染。 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018)可知,土壤中Cd含量全部 超过该标准筛选值,Cr含量部分超过该标准筛选值, 超标率为98%,但Ni、Cu、Zn、Pb含量未超过该标准筛 系数分别为20.36%、11.68%、18.74%、27.18%、 35.09%、13.38%、30.11%,其中Cr、Ni、Mn、Cd离散程度 较小,Cu、Zn、Pb离散程度较大,变异系数超过25%。 变异系数较大,表明受人为干扰较为强烈,因此可判断 研究区土壤受人类活动影响较大。根据以上分析可 以得出,研究区土壤中Cr、Ni、Zn、Cd、Pb含量存在一定 程度的污染,其中Cr、Cd污染程度较为严重,应当引起 足够的重视。

2.1.2 调查区土壤重金属空间分布规律

在对采样点数据进行异常值剔除后,数据符合正态分布,并利用ArcMap10.6中地统计向导模块对比采样点数据,根据地统计分析向导中的第五步交叉验证选择半变异函数最佳的拟合模型,研究区表层土壤重金属含量插值图如图2所示。

研究区中表层土壤重金属分布存在一定规律,重 金属 Cr 在研究区南部沿河区域含量最高,含量在 328.13~489.70 mg·kg⁻¹之间,由南向北逐渐降低。其 次西部和东北部含量稍低于南部,中间区域含量较 低,南部含量最高处是中部的2~3倍;Ni在南部含量 最高,中部区域略低于南部,东部和西部含量较低; Mn含量主要在中部最高,西部和南部边缘含量其次, 其余部分含量较低;Cu含量主要在东北部和南部较 高,其余区域含量较低;Zn含量较高处主要为小片面 状分布,在研究区域的中部、北部、南部、西南部均有 分布;Cd含量在南部、东部以及中北部含量较高,最 高区域的含量在1.09~1.39 mg·kg⁻¹之间,其余区域含 量相对较低,为0.55~1.09 mg·kg⁻¹;Pb含量主要在研 究区中东部、中北部较高,东南部含量稍低,其他区域 含量较低。

重金属污染的空间分布特征是鉴别土壤高污染 区域以及污染来源的有效手段^[27-28]。从研究区表层 土壤重金属含量插值图来看,研究区土壤重金属Cr、 Ni、Cu含量在南部的部分区域相对较高,其原因可能

Table 4 Topsoil pH and heavy metal content in the soil samples							
项目 Item	Cr	Ni	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
平均值/(mg·kg ⁻¹)	319.60	21.76	157.32	6.40	35.52	0.95	24.35
标准差/(mg•kg ⁻¹)	65.07	2.54	29.47	1.74	12.46	0.13	7.33
最大值/(mg·kg ⁻¹)	489.70	30.21	231.88	21.33	102.24	1.39	91.14
最小值/(mg·kg ⁻¹)	176.98	16.23	101.28	4.25	19.60	0.55	15.36
变异系数/%	20.36	11.68	18.74	27.18	35.09	13.38	30.11
背景值/(mg•kg ⁻¹)	53.60	24.90	600.00	21.40	65.10	0.09	14.40
筛选值/(mg·kg ⁻¹)	200.00	100.00	_	100.00	250.00	0.30	120.00

表4 表层土壤pH和重金属含量

—478—

王伟全,等:基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价

2022年5月



是由于南部地区距离污水灌溉水泵较近,污水从水泵 流出后,首先经过南部区域,大部分重金属被南部土 壤吸收,所以导致南部区域重金属含量较高。 2.1.3 土壤剖面重金属含量特征

图 3 为研究区剖面土壤重金属含量分布情况,重 金属 Cr 在土层深度 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm 的含量分别为 376.95、385.03、386.95、 386.11 mg·kg⁻¹和 382.35 mg·kg⁻¹,在土层深度 40~60 cm含量最高。Mn 在土层深度 0~100 cm 间含量分别 为 196.54、199.22、204.36、198.67 mg·kg⁻¹和 192.79 mg·kg⁻¹。重金属 Ni、Cu、Zn、Cd、Pb含量随着土层深 度的增加而显著降低,Ni、Cu、Zn、Cd、Pb在0~20 cm 含量最高,分别为27.70、6.84、27.14、0.92 mg·kg⁻¹和 30.15 mg·kg⁻¹,在80~100 cm含量最低,分别为24.76、 5.12、17.75、0.49 mg·kg⁻¹和17.65 mg·kg⁻¹。本研究表 明Ni、Cu、Zn、Cd、Pb这些元素向下迁移不显著(*P*> 0.05),其表层含量较高可能和人类活动(如耕作、灌 溉等)有关。Cr、Cd、Pb含量在0~100 cm 土层深度下 均超过河南省土壤重金属含量背景值,Ni含量在0~ 80 cm 土层深度均超过河南省背景值,其他重金属含 量均未超过河南省背景值。

综合来看,研究区Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb主要



Different letters indicate significant difference among soil depths (P<0.05) $\,$

图3 研究区剖面土壤重金属含量

Figure 3 Soil heavy metal content in the study area profile

王伟全,等:基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价

集中在0~20 cm 土层,含量远高于其他土层,表明研究区表层土壤有较明显的外部扰动。而 Cr、Mn 在各 土层深度之间无显著差异,相关研究表明,Cr 在土壤 中的迁移受到土壤理化性质的影响^[29],本研究区中表 层土壤为弱碱性土壤,pH 范围为 9.07~7.38, 王学锋 等^[30]的研究表明 pH 升高增强了 Cr 在土壤中的移动 性,由于表层土壤 pH 值较高,加之重力作用导致重金 属 Cr 向深层土壤迁移。而 Mn 含量低于背景值,表层 与深层含量无显著差异(*P*>0.05),说明 Mn 没有外源 污染。

2.2 土壤重金属来源解析

采用主成分分析法对表层土壤重金属可能来源 进行分析,如表5所示,研究区重金属Cr、Ni、Mn、 Cu、Zn、Cd、Pb污染主要由3个主成分构成,其累计 方差贡献率为69.350%。主成分1的方差贡献率 25.497%, 主成分因子为 Mn、Cd 和 Pb; 主成分 2 的方 差贡献率为22.602%,主成分因子为Cr、Ni;主成分3 的方差贡献率为21.251%,主成分因子为Cu、Zn。由 于该研究区主要采用污水灌溉,结合实际情况推断 主成分1来源于污水灌溉。人类的工业活动会使重 金属Cr、Ni随着大气沉降到地表,并污染土壤^[31-32], 而Cr、Ni为主成分2的因子,因此推断主成分2可能 来源于大气沉降对研究区土壤的污染。有机肥可以 为作物提供生长所必需的元素,但同时也会在施用 过程中增加土壤重金属的含量,提高作物吸收重金 属的风险[33-34]。研究表明,与施化肥处理相比,连续 7年施用鸡粪的处理显著增加了耕层土壤Cu、Zn和 Cr含量^[35],因此主成分3可能主要来源于有机肥的

表5 研究区表层土壤重金属含量主成分分析

 Table 5 Principal component analysis of heavy metal content in

 surface soil in the study area

surface son in the study area						
项目 Item	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3			
Cr	-0.258	0.548	0.126			
Ni	0.084	0.513	-0.116			
Mn	0.377	0.267	-0.274			
Cu	-0.012	-0.030	0.514			
Zn	-0.169	-0.041	0.660			
Cd	0.401	-0.030	-0.010			
Pb	0.518	-0.213	0.021			
特征值	2.555	1.305	0.995			
方差贡献率/%	25.497	22.602	21.251			
累计方差贡献率/%	25.497	48.099	69.350			

施用。

2.3 研究区土壤重金属污染生态风险评价

2.3.1 地质累积指数法

利用 Origin 9.0 绘制地质累积指数箱型图,其结 果如图 4 所示。根据地质累积指数分级标准来判断 研究区重金属污染程度,研究区土壤重金属污染地质 累积指数评价结果按照由重至轻依次为 Cd>Cr>Pb> Ni=Mn=Cu=Zn。重金属 Cr有 50% 点位处于中度至强 度污染,另外 50% 点位处于中度污染;Ni、Mn、Cu、Zn 的 Igeo指数小于 0,即本研究区 Ni、Mn、Cu、Zn无污染; Cd 的 Igeo指数全部在 2~3之间,属于中度至强度污染, 在研究区内属于主要污染元素;Pb 的 Igeo指数有 75% 点位介于 0~1之间,属于轻度污染,另外 25% 的点位 Igeo指数小于 0,显示研究区内无 Pb 污染。从地质累积 指数法来看,研究区 Cd 生态风险水平较高,因此应当 采取一定措施防止 Cd 进入农产品当中,以保证粮食 安全。

2.3.2 潜在生态危害指数法

通过潜在生态危害指数法对研究区重金属污染情况进行评价,其结果如表6、表7所示。根据潜在生态危害指数分级标准,研究区各重金属风险指数平均值由大到小依次为Cd>Cr>Pb>Ni>Cu>Zn>Mn,研究区中除重金属Cd外,其余单项潜在生态危害指数全部低于40,属于低生态危害程度,重金属Cd在研究区中单项潜在生态危害指数最大值为463.33,最小值为183.33,平均值为316.67,对研究区的土壤潜在生态风险贡献率最高,根据分级标准判





农业资源与环境学报·第39卷·第3期

表6 土壤重金属单项元素潜在生态危害指数和样点分布频率

Table 6 Single potential ecological hazard index and sample point distribution frequency of heavy metals in soil

二丰	单项元素潜在生态危害指数Single potential ecological hazard index			样点分布频率Sample point distribution frequency					
し系 Element	最大值	最小值	平均值	标准差	低	中等	重	严重	极严重
	Maximum	Minimum	Mean	SD	Low	Medium	High	Very high	Extremly high
Cr	18.27	6.60	11.93	2.43	202	0	0	0	0
Ni	6.07	0.85	4.37	0.51	202	0	0	0	0
Mn	0.39	0.17	0.26	0.05	202	0	0	0	0
Cu	4.98	0.99	1.50	0.41	202	0	0	0	0
Zn	1.57	0.30	0.55	0.19	202	0	0	0	0
Cd	463.33	183.33	316.67	43.33	0	0	0	111	91
Pb	31.65	5.33	8.45	2.55	202	0	0	0	0

表7 研究区土壤综合潜在生态危害指数和样点分布频率

Table 7 Comprehensive potential ecological hazard index and sample point distribution frequency of soil in the study area

综合潜在生态危害指数Comprehensive potential ecological hazard index			样点	分布频率 Sample poi	nt distribution	frequency	
最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值Mean	标准差SD	低 Low	中等Medium	重 High	严重 Very high
516.35	205.33	342.77	44.49	0	31	171	0

断属于严重危害程度。

从样点分布频率来看,在202个采样点中,有111 个点位属于严重危害程度,91个属于极严重危害程 度。从单项潜在生态风险指数来看,重金属Cd在研 究区存在较强的积累,有较高的生态风险。研究区综 合潜在生态危害指数最大值为516.35,最小值为 205.33,平均值为342.77,根据分级标准判断研究区 综合潜在生态危害指数为重度危害程度,说明研究区 存在较重潜在生态风险。从样点分布频率来看,综合 潜在生态危害指数为中等危害程度的点位有31个, 重度危害程度的点位有171个,表明其综合潜在生态 危害程度比较重,说明研究区有比较严重的外源污 染。鉴于此,该研究区农田应采取系统的措施来进行 风险管控,或者对重金属污染土壤进行修复,并密切 监测研究区土壤重金属含量的变化。

3 结论

(1)从土壤重金属表层含量看,土壤Cr、Ni、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb含量平均值分别为319.60、21.76、157.32、6.40、35.52、0.95 mg·kg⁻¹和24.35 mg·kg⁻¹。从空间分布看,研究区土壤Cr、Ni、Cu在南部的部分区域含量较高,Cd在南部、东部及中北部含量较高。其中,Cr、Cd和Pb含量全部点位超过河南省土壤重金属含量背景值;Ni和Zn部分点位超过河南省土壤重金属含量背景值。而表层土壤Cd含量全部点位超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试

行)》(GB 15618—2018)筛选值。

(2)从土壤重金属剖面分布特征看,土壤重金属 含量随垂直深度增加而降低。从重金属污染来源看, 该地区土壤重金属污染可能源于污水灌溉、大气沉降 和有机肥施用。

(3)两种生态风险评价结果不尽相同,因两者引 入的系数不同,地质累积指数法中各元素的系数均为 1.5,而毒性响应系数因不同元素对环境的毒性不同 而有较大的差异。但从综合角度来看,两种方法中 Cd污染相对于其他重金属污染更严重。因此,研究 区农田土壤中Cd污染较为严重,对环境影响较大,应 当采取一定的措施来修复研究区土壤中的Cd污染。

参考文献:

- [1] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安 全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2):153-159. XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2):153-159.
- [2] BHUIYAN M A H, PARVEZ L, ISLAM M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173 (1/2/3): 384– 392.
- [3] ALI A, GUO D, ZHANG Y, et al. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China[J]. Scientific Reports, 2017, 7:2690.
- [4] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11. Ministry of Environmental Protection, Min-

王伟全,等:基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评价

istry of Land and Resources. Bulletin of the National Survey of Soil Pollution[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5):10–11.

- [5] FENT K. Ecotoxicological effects at contaminated sites[J]. *Toxicology*, 2004, 205(3):223-240.
- [6] YANG X, YUAN X, ZHANG A, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals and petroleum hydrocarbon in the sand flats of Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1):503–512.
- [7] 刘坤. 土壤中重金属污染调查研究——以砷和汞为例[J]. 黑龙江科 技信息, 2017(9): 30. LIU K. Studies on heavy metal pollution in soils: Arsenic and mercury as examples[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2017(9): 30.
- [8] GUAN Q, WANG F, XU C, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. *Chemosphere*, 2018, 193:189–197.
- [9] 张贵友, 王素萍, 杜雷, 等. 武汉市江夏区农田土壤重金属含量及其 生态风险评价[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17):54-57. ZHANG G Y, WANG S P, DU L, et al. Analysis and ecological risk assessment on heavy metal contents of farmland soils in Jiangxia District, Wuhan City [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17):54-57.
- [10] 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 等. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1523-1530. LIU RX, QIAO DY, WANG P, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(7):1523-1530.
- [11] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6):1233-1241. ZHANG Y Y, MA J, WEI H Y, et al. Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: Levels, sources and ecological risks[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(6):1233-1241.
- [12] LIU P F, WU Z Q, LUO X R, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in acidic farmland of the karst region in southern China: A case study of Quanzhou County[J]. Applied Geochemistry, 2020, 123:104764.
- [13] 曾建军, 邹明亮, 郭建军, 等. 生态风险评价研究进展综述[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(1):1-5. ZENG J J, ZOU M L, GUO J J, et al. Ecological risk assessment and its research progress[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2017, 29 (1):1-5.
- [14] 易文利,董奇,杨飞,等.宝鸡市不同功能区土壤重金属污染特征、 来源及风险评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11):2142-2149.
 YI W L, DONG Q, YANG F, et al. Pollution characteristics, sources analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in different functional zones of Baoji City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11):2142-2149.
- [15] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021(6):3018-3027. WANG R, DENG H, JIA Z M, et al. Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021(6):3018-3027.
- [16]马佳燕,马嘉伟,柳丹,等.杭嘉湖平原水稻主产区土壤重金属状

况调查及风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2021(2): 336-345. MA J Y, MA J W, LIU D, et al. Survey and risk assessment of soil heavy metals in the main rice producing areas in Hangjiahu Plain[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021(2): 336-345.

- [17] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3):1085-1094. ZHANG H, WANG H, TANG H Y, et al. Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(3):1085-1094.
- [18] 孙彤, 纪艺凝, 李可, 等. 弱碱性玉米地土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(9):2469-2478. SUN T, JI Y N, LI K, et al. The speciation distributions of heavy metals in weakly alkaline maize soil and its potential ecological risk[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9):2469-2478.
- [19] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 二版. 北京:科学出版社, 2012:448. TANG G A, YANG X. ArcGIS spatial analysis experiment course[M]. Second edition. Beijing: Science Press, 2012:448.
- [20] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3):108–118.
- [21] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学 杂志, 2011, 30(5):889-896. GUO X X, LIU C Q, ZHU Z Z, et al. Soil heavy metal pollution evaluation method[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5):889-896.
- [22] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975– 1001.
- [23] 吕占禄,张金良,邹天森,等. 燃煤电厂周边土壤重金属污染特征 及评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6):720-731. LÜ Z L, ZHANG J L, ZOU T S, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil around coal-fired power plants[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(6):720-731.
- [24] WANG M, BAI Y, CHEN W, et al. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2012, 161:235-242.
- [25] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属 毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115. XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2):112-115.
- [26] 邵丰收,周皓韵.河南省主要元素的土壤环境背景值[J].河南农业,1998(10):3-5. SHAO F S, ZHOU H Y. Soil environmental background values of main elements in Henan Province[J]. Agriculture of Henan, 1998(10):3-5.
- [27] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4):1514-1522. ZHENG J P, JIAO X M, FANG N J, et al. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4):1514-1522.
- [28] XIAO Q, ZONG Y, LU S. Assessment of heavy metal pollution and hu-

man health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, northeast China[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2015, 120:377-385.

- [29] 骆传婷.不同土壤质地对铬迁移转化及修复的研究[D].青岛:中国海洋大学,2014. LUO C T. Study on different soil texture on the migration and transformation and remediation of chrome[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [30] 王学锋,尚菲,马鑫,等.pH和腐植酸对Cd、Cr在土壤中形态分布的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(5):101-105. WANG X F, SHANG F, MA X. et al. Effects of pH and humic acid on Cd and Cr morphological distribution in soil[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 101-105.
- [31] 雷停, 孙传敏. 重金属镍的土壤污染及迁移转化[J]. 地球科学进展, 2012, 27(S1): 359-361. LEI T, SUN C M. Soil pollution and migration of heavy metal nickel[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(S1): 359-361.
- [32]陈伟,王兵,吴兆清,等.土壤中重金属铬的来源、危害及修复措施

[C]//2012 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京:中国农业大学出版社, 2012. CHEN W, WANG B, WU Z Q, et al. Source, harm and remediation of chromium in soil[C]//Proceedings of 2012 annual meeting of Chinese Society of Environmental Sciences (Volume 4). Beijing: China Agricultural University Press, 2012.

- [33] OCIEPA A, PRUSZEK K, LACH J, et al. Influence of long-term cultivation of soils by means of manure and sludge on the increase of heavy metals content in soils[J]. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2008, 15(1):103-109.
- [34] GOSS M J, TUBEILEH A, GOORAHOO D. A review of the use of organic amendments and the risk to human health[J]. Advances in Agronomy, 2013, 120:275–379.
- [35] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2070-2078. RUSH, XUWQ, HOULM, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10):2070-2078.