

崇明岛农田土壤重金属分布特征及生态风险

徐志豪, 吴健, 唐浩, 王敏, 黄波涛, 黄沈发

引用本文:

徐志豪, 吴健, 唐浩, 王敏, 黄波涛, 黄沈发. 崇明岛农田土壤重金属分布特征及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2488-2496.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0212>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价

刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1523-1530 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1491>

三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险

王金霞, 罗乐, 陈玉成, 何清明, 詹玲玲

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2711-2717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0844>

某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价

梁雅雅, 易筱筠, 党志, 王琴, 高双全, 唐婕, 张政芳

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 103-110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0252>

基于田块尺度的农田土壤重金属污染评价及来源解析

穆德苗, 陈艳秋, 胡涛, 林大松, 杨正兰, 孙约兵

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1271-1283 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0984>

安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价

陈城, 鲁潇, 于坤, 张明珠, 孙庆业

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 570-579 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1076>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐志豪, 吴健, 唐浩, 等. 崇明岛农田土壤重金属分布特征及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2488-2496.

XU Z H, WU J, TANG H, et al. Distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in soil of arable land on Chongming Island [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2488-2496.



开放科学 OSID

崇明岛农田土壤重金属分布特征及生态风险

徐志豪¹, 吴健², 唐浩², 王敏², 黄波涛², 黄沈发^{1*}

(1.上海城勘信息科技有限公司, 上海 201206; 2.上海市环境科学研究院, 上海 200030)

摘要:为探明崇明岛农田土壤重金属含量分布特征,采集581个点耕层土壤样品,分析了土壤样品中8种重金属(Hg、Cr、Ni、Pb、As、Cu、Zn和Cd)的含量及污染特征,并采用内梅罗指数法和潜在生态风险指数法评价了研究区土壤重金属的潜在生态风险。结果表明:研究区土壤重金属含量总体低于农用地风险筛选值(GB 15618—2018),但个别点位土壤Cu、Pb、Zn和Cd含量超标,存在一定的环境风险。空间分布上,Cd元素含量自西向东呈逐步下降趋势,其他重金属元素则总体表现出中部>西部>东部的趋势。生态风险评价结果显示,研究区内梅罗指数平均值为0.34,处于清洁水平,潜在生态风险指数平均值为19.6,潜在生态风险较低,其中Cd为主要风险因子。综合分析表明,研究区土壤整体呈现清洁、低生态风险状态,但局部区域土壤重金属的累积问题仍需加以关注。

关键词:农田土壤;重金属;分布特征;生态风险评价

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2488-09 doi:10.11654/jaes.2022-0212

Distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in soil of arable land on Chongming Island

XU Zhihao¹, WU Jian², TANG Hao², WANG Min², HUANG Botao², HUANG Shenfa^{1*}

(1.Shanghai City Geotechnical Investigation Info Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China; 2.Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: To understand the distribution characteristics of heavy metals in soil of arable land on Chongming Island, cultivated soil samples were collected from 581 locations on Chongming Island. The distribution characteristics of eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and Hg) in the samples were investigated, and the potential ecological risks of soil heavy metals were determined using the Nemerow and Hakanson indexes. The results showed that the levels of heavy metals were much lower than the risk control standard (GB 15618—2018). However, the levels of Cu, Pb, Zn, and Cd in several samples exceeded the standard, showing definite environmental risks. The spatial distribution of Cd showed a gradual decline from the western to eastern regions. The levels of the other heavy metals decreased from high to low successively in the central, western, and eastern regions. The average Nemerow and Hakanson index values were 0.34 and 19.6, respectively, showing a clean level and low ecological risk, and Cd was the main risk contributor. In summary, the soil quality of the research area was safe and low risk, but the accumulation of some heavy metals in the soil of certain areas should be paid attention.

Keywords: arable land; heavy metal; distribution characteristics; ecological risk assessment

土壤是农业生产的基础,其环境质量直接影响农产品质量安全,关乎人类健康和生存。作为各类环境污染物的“汇”,土壤在城市化和工业化的高速发展和推进过程中,受到人为活动的强烈影响,各种污染物汇集于土壤中,降低了土壤环境质量,其中,土壤重金

属因易积累、重污染、高风险而备受关注^[1-4]。

崇明岛是地处长江入海口的冲积岛屿,是长江生态廊道与沿海大通道交汇的重要节点。全岛土壤肥沃,物产富饶,为上海提供了近50%的生态资源和生态服务功能^[5],是上海重要的生态屏障和“菜篮子”,其

收稿日期:2022-03-04 录用日期:2022-05-19

作者简介:徐志豪(1993—),男,上海人,硕士研究生,从事土壤环境信息化应用及风险评估。E-mail:xuzhihao@cityk.net

*通信作者:黄沈发 E-mail:huangsf@saes.sh.cn

农田土壤环境质量对上海的生态环境健康和农产品安全尤为重要。崇明世界级生态岛建设规划的出台,对崇明岛生态环境品质提出了更高的要求。

鉴于崇明岛生态环境的重要性以及农田土壤重金属污染的长期危害性,近年来已有学者对崇明岛土壤重金属含量进行了研究,但这些研究大多集中在典型农用地、蔬菜地、交通干线两侧农田、农业园区等小尺度区域,而对崇明岛全岛农田土壤重金属的污染状况进行系统性评价的研究相对较少。例如:孙超等^[6-7]采集分析了102个点点位的农田土壤重金属含量及分布特征,并结合大气沉降说明了其对土壤重金属的叠加影响;周燕等^[8]在崇明三岛范围内采集134个土壤样点,开展了土壤重金属含量的空间分布及污染评价研究;沈根祥等^[9]以上海市土壤环境背景值为依据,比较分析了包括崇明在内的上海6个郊区蔬菜农田土壤重金属累积情况,确定了出现累积现象的主要重金属因子及其分布;王初等^[10-11]研究了崇明岛两条交通干线两侧蔬菜地土壤、路面灰尘及蔬菜中重金属污染状况,并分析了路侧土壤重金属分布差异与路侧防护林体系的相关性;李双喜等^[12]采用地积累指数法评价了光明食品集团在上海崇明区域的土壤重金属累积情况。总体上,关于崇明岛农田土壤重金属含量分布的研究存在发表时间早、研究区域小、布点密度疏等局限性,难以全面、切实地反映崇明岛农田土壤质量现状。因此,本研究基于网格布点法,采集了崇明岛581个点位耕层土壤样品,分析了土壤样品中Hg、Cr、Ni、Pb、As、Cu、Zn和Cd 8种重金属含量,系统探讨了崇明岛农田土壤重金属含量分布特征及其潜在生态风险,以期为区域土壤重金属背景含量统计和污染溯源等研究提供数据支撑,为区域土壤环境管理和决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

崇明岛是我国现今河口沙洲中面积最大的一个典型河口冲积岛。全岛地势平坦,土壤母质系江海沉积物经盐渍化、草甸化和沼泽潜育过程,发育为水稻土、潮土和滨海盐土3类,呈东西向伸展、南北向排列的条带状分布,又可进一步细分为4个亚类、8个土属和21个土种^[13]。

近年来,研究区北沿垦区持续围垦,农用地面积有所增加,占全岛陆域面积的30%以上,多种植水稻、蔬菜及经济作物等;在生态发展的总体规划目标

下,岛上湿地、森林等生态空间持续提升,建设用地面积占比低于20%,主要集中于研究区南沿,其中工业用地面积占比不足2%,以南沿城桥镇区域的工业分布最为集中^[5,14]。

1.2 样品采集

利用ArcGIS 10.1软件,对崇明岛进行1 km×1 km网格化处理,选取农田土壤面积占比≥50%的网格,在每个网格中心进行布点,结合遥感影像和实地踏勘结果,对部分人为扰动较大的点位进行调整,最终确定土壤采样点位共计581个(图1)。样品采集以采样点位为中心,20 m为间距,设置东、南、西、北4个采样分点,去除表面植被层,使用取土器连续采集点位及分点0~20 cm表层土壤。用刮刀剔除与金属采样器接触的部分土壤,剩余土壤混匀后采用四分法选取500 g土样装入样品袋封装。

1.3 样品处理与检测

样品处理与检测分析工作由上海市环境科学研究院完成。样品在实验室室温条件下自然风干,去除植物根系、砂砾等侵入体,研磨过20目和100目尼龙筛后,封装备用。使用酸度计测定土壤pH(HJ 962—2018)。分别采用硫酸-硝酸-高锰酸钾法(Hg)和盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸法(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)消解后,对8种重金属含量进行检测分析,分析方法及检出限如表1所示。20%平行双样测定值精密度和准确度以及10%试样加标回收率均在《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的允许误差范围内。

1.4 生态风险评价

1.4.1 地积累指数法

地积累指数法是德国科学家Muller于1969年提出的定量指标,用于研究沉积物中重金属污染程度,之后也被广泛用于土壤重金属的污染评价中,通常用指数是否大于0来辅助判断人为污染的可能性^[15]。地积累指数(I_{geo})的计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

式中: C_n 为重金属的实测含量,mg·kg⁻¹; B_n 为重金属的地球化学背景值,本研究采用区域土壤环境背景值^[6];1.5是考虑了由于成岩作用可能引起背景值变动而设置的常数。

1.4.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是国内外普遍采用的土壤重金属综合评价方法之一^[17-19],其不仅能反映不同污染物对环境的综合污染状况,而且考虑了高含量污染物



图1 土壤采样点分布图

Figure 1 Distribution map of the soil sampling sites

表1 重金属检测分析方法与检出限

Table 1 Analysis methods and limitations

重金属 Heavy metal	分析方法 Analysis method	检出限 Limitation (mg·kg ⁻¹)
Hg	GB/T 17136—1997	0.001
Cu	HJ 491—2019	1.0
Pb	GB/T 17141—1997	0.1
Zn	HJ 491—2019	0.5
Ni	HJ 491—2019	5.0
Cr	HJ 491—2019	5.0
As	HJ 680—2013	0.4
Cd	GB/T 17141—1997	0.01

对环境质量的影响。其计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i_{max}}^2 + P_{i_{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_i 为重金属的单污染指数; C_i 为重金属的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为重金属的评价标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本研究采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值作为评价标准; P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{i_{max}}$ 为重金属单污染指数的最大值; $P_{i_{ave}}$ 为重金属单污染指数的平均值。评价

标准: $P \leq 0.7$, 清洁; $0.7 < P \leq 1.0$, 尚清洁(警戒线); $1.0 < P \leq 2.0$, 轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$, 中度污染; $P > 3.0$, 重度污染。

1.4.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法^[20-21]侧重于多元素间的协同作用, 并综合考虑了重金属的生态效应和毒理学效应, 能综合反映重金属对生态环境的潜在影响, 其计算公式:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i} \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (5)$$

$$RI = \sum E_r^i \quad (6)$$

式中: C_f^i 、 E_r^i 和 RI 分别为重金属污染系数、潜在生态风险系数和潜在生态风险指数, 无量纲; C^i 和 C_n^i 分别为重金属实测含量和评价标准(GB 15618—2018), $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; T_r^i 和 C_f^i 分别为重金属毒性响应系数和毒性因子, 无量纲。各重金属 T_r^i 由大到小依次为 $\text{Hg}(40) > \text{Cd}(30) > \text{As}(10) > \text{Cu}(5) = \text{Ni}(5) = \text{Pb}(5) > \text{Cr}(2) > \text{Zn}(1)$ 。潜在生态风险指数分级标准如表2所示。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016、Origin 9.1 和 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析, 采用 ArcGIS 10.1 进行地统计分析 and 制图。

表2 潜在生态风险指数分级标准

Table 2 Grading standard of potential ecological risk index

潜在生态风险系数 E_i^j Potential ecological risk coefficient	潜在生态风险指数 RI Potential ecological risk index	风险等级 Risk level
$E_i^j < 40$	$RI < 110$	轻微
$40 \leq E_i^j < 80$	$110 \leq RI < 220$	中等
$80 \leq E_i^j < 160$	$220 \leq RI < 440$	强
$160 \leq E_i^j < 320$	$RI \geq 440$	很强
$E_i^j \geq 320$		极强

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量分布特征

研究区农田土壤 pH 介于 4.90~11.20 之间,整体呈弱碱性。农田土壤 Hg、Cr、Ni、Pb、As、Cu、Zn 和 Cd 的样本平均值分别为 0.05、40.1、27.8、17.8、6.1、27.1、76.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均未超过农用地土壤风险筛选值。变异系数可以反映区域土壤重金属含量分布差异,研究区土壤各项重金属元素的变异系数介于 0.2~0.7 之间,属于中等程度变异^[22],其中 Pb 和 Hg 的变异系数超过 0.5,表明其受外源干扰较大,含量分布不均,机动车尾气排放和工业生产活动可能是研究区土壤 Pb 和 Hg 的主要外源干扰因素^[23-24]。对比近 30 年研究结果^[7,9,12,25-26],如图 2 所示,研究区农田土壤中 8 种重金属元素的样本平均值大体呈先升高后下降的趋势,其中 2007—2009 年重金属累积最为突出。本研究中 Hg、Cr 和 As 的样本平均值低于各项历史研究数据,而 Ni、Pb、Cu 和 Cd 的样本平均值较李双喜等^[12] 2018 年的研究结果有所提升,其中以 Cd 尤为显著,达到 2018 年研究数据的 1.6 倍。

从单样本来看(图 3),重金属含量高于农用地土

壤风险筛选值的样本约占总样本数的 1%,主要超标因子为 Cu、Pb、Zn 和 Cd,点位超标率分别为 0.52%、0.17%、0.17% 和 0.34%,最大超标倍数分别为 0.87、0.15、0.43 倍和 0.6 倍。其中,研究区土壤 Cd 元素含量普遍较高,且样本平均值高于上海市土壤环境背景值^[16],区域土壤背景值偏高及施肥等农业活动可能是导致土壤 Cd 元素累积的主要原因^[27-29]。

2.2 土壤重金属空间分异特征

利用 ArcGIS 地统计模块进行普通克里格插值计算得到土壤中 8 种重金属元素含量的插值结果如图 4 所示。研究区土壤重金属含量分布总体表现为中部>西部>东部,其中 Cd 含量的分布呈自西向东逐步下降的趋势,与历史研究结果相似^[7-8,30]。西部的绿华镇是上海柑橘之乡,柑橘需肥量较大,其中磷肥可有效提升柑橘产量和果实品质,因此在柑橘生产过程中普遍施用^[31-32],而由于生产原料中杂质或生产工艺的引入,磷肥产品中通常 Cd 含量较高^[33-34],Cd 经施用化肥进入土壤累积,导致研究区西部土壤 Cd (I_{geo} 介于 -0.36~1.42 之间)含量较高。

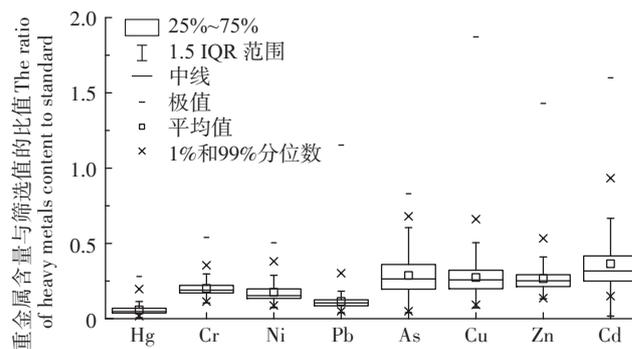


图3 土壤重金属含量与筛选值的比值分布

Figure 3 Distribution of the ratio of heavy metals content to standard

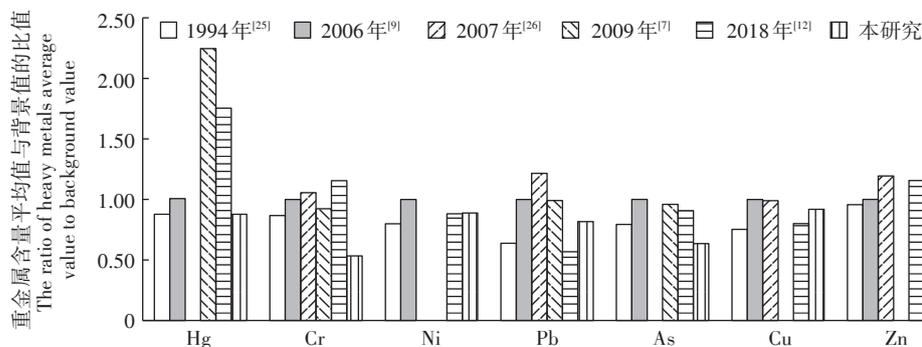


图2 土壤重金属含量变化特征

Figure 2 Variation characteristics of soil heavy metals content



图4 研究区土壤重金属含量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of soil heavy metals in the research area

中部南沿城桥镇土壤中Pb和Hg的含量较高,且 I_{geo} 值普遍大于0,个别点位Pb和Hg的 I_{geo} 值介于1~3之间,说明受到一定程度人为污染的影响。该区域为研究区行政中心,城镇化水平较高,水陆交通较为发达,区域南部的南门港码头是研究区往返上海市区的

重要水路客运枢纽,汽油和柴油燃烧及机动车尾气排放可能造成区域土壤Pb和Hg的累积。靳治国等^[35]的研究结果显示,崇明岛港口码头土壤Pb超标率高达70%以上,污染程度仅次于工业区。同时,全岛唯一的市级工业园区也坐落于该区域,园区建成20余

表3 土壤重金属相关性分析($n=581$)Table 3 Correlation analysis of soil heavy metals($n=581$)

	Hg	Cr	Ni	Pb	As	Cu	Zn	Cd
Hg	1							
Cr	0.226**	1						
Ni	0.196**	0.897**	1					
Pb	0.269**	0.415**	0.446**	1				
As	0.197**	0.583**	0.694**	0.363**	1			
Cu	0.251**	0.757**	0.769**	0.483**	0.535**	1		
Zn	0.266**	0.774**	0.740**	0.459**	0.598**	0.918**	1	
Cd	0.061	0.106*	0.117**	0.084*	0.034	0.138**	0.106*	1

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note:**indicates significantly correlated at the 0.01 level(two-sides),*indicates significantly correlated at the 0.05 level(two-sides)。

年,以汽车零部件生产基地为主要发展目标,集聚了一批金属制品、机械制造企业,生产过程中金属切削、镀膜等加工工艺产生的含重金属废液、废气和固废可能造成周边土壤重金属的累积^[36]。此外,东南偏南风(SSE)与南风(S)是崇明的主风向^[37],而吴淞工业区(宝钢厂区)恰位于其上风向,含重金属废气随大气干湿沉降也可能在一定程度上影响了中部南沿地区土壤重金属的累积^[3-4,38]。李舒^[39]在崇明岛最东端对大气Hg及其湿沉降进行长期监测,结果显示崇明地区大气中Hg浓度在偏西及西南风向上偏高,受江苏和上海等地人为源排放的影响较大。因此,工业“三废”、机动车尾气及大气沉降的叠加影响可能是该区域土壤Pb和Hg含量较高的主要原因。

如表3所示,Cu、Zn、As、Ni和Cr含量分布具有较强的相关性($r > 0.5, P < 0.01$),总体呈现北沿>南沿的趋势。地积累评价结果显示,该区域内Cu、Zn、As、Ni和Cr的 I_{geo} 值均小于1,表明土壤中重金属主要是自然来源变化的结果,受人为活动影响相对较弱。北支水道水流较缓、滩涂淤高,为北沿地区围垦创造了有利的水利条件。作为研究区围垦的重点地区,北沿在保滩促淤和边围边垦的模式下,围垦开发了大规模淤积滩涂^[40],滩涂沉积物主要源于长江水道下泄泥沙,受工业、农业、生活、港口和船舶污染等多重影响,其重金属含量普遍偏高,Zn、Cu、Cr等重金属含量均在上海潮滩背景值的2倍以上,污染较为严重^[41-43]。同时,北沿区域多种植粮菜、养殖畜禽,施用化肥农药及排放禽畜粪便也可能造成土壤中Cu、Zn、As、Ni和Cr的累积^[23-24,44]。

2.3 内梅罗污染指数评价结果

通过对研究区土壤重金属含量的测定,以农用地

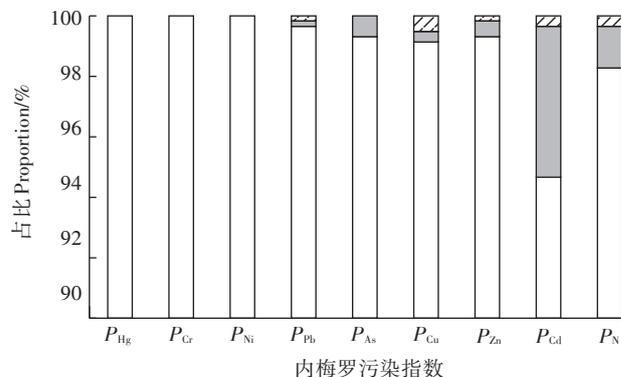
土壤风险筛选值为评价标准,对8种重金属的污染程度和样本的综合污染水平进行评价。评价结果(图5)显示, P_N 介于0.13~1.41之间,平均值为0.34,总体处于清洁水平。其中,两个样本的 P_N 高于1,达到轻度污染水平,占比为0.3%,Cu和Cd为主要污染贡献因子。从 P_i 来看,As、Ni、Cr和Hg均处于清洁水平,无累积污染风险,Cu、Pb、Zn和Cd存在不同程度的轻度污染,其中Cd的样本清洁率相对较低,为94.7%。

对比同类相关研究,研究区土壤重金属指标评价结果优于上海其他地区^[45-48],在全国层面也处于较高质量水平^[49-51],但部分区域Cd的污染程度较历史水平未见显著缓解^[7],其累积问题仍需加以关注。

2.4 潜在生态风险指数评价结果

以农用地土壤风险筛选值为评价标准,结合重金属毒性系数,进一步对8种重金属的潜在生态风险系数和样本的潜在生态风险水平进行评价(表4)。结

□ 清洁 Clean ■ 尚清洁 Still clean ▨ 轻度污染 Lighted polluted
▩ 中度污染 Moderated polluted ▤ 重度污染 Severely polluted

图5 内梅罗指数评价结果($n=581$)Figure 5 The assessment results of Nemerow index($n=581$)

果表明,研究区土壤中Hg、Cr、Ni、Pb、As、Cu和Zn的 E_i^p 均小于40,潜在生态风险较低;Cd总体生态风险属于轻微,但1个样本潜在生态风险较高,达到中等水平。综合来看,样本 RI 均低于110,平均值为19.6,整体生态风险轻微。结合各元素 E_i^p 值分析结果,Cd对潜在生态风险指数的贡献最高,是主要贡献因子。

表4 潜在生态风险指数法评价结果($n=581$)

Table 4 The assessment results of Hakanson index($n=581$)

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
E_i^p (Hg)	0.2	11.2	2.3	1.3	0.6
E_i^p (Cr)	0.2	1.1	0.4	0.1	0.2
E_i^p (Ni)	0.4	2.5	0.9	0.3	0.4
E_i^p (Pb)	0.2	5.8	0.6	0.3	0.6
E_i^p (As)	0.4	8.3	2.9	1.3	0.4
E_i^p (Cu)	0.4	9.4	1.4	0.7	0.5
E_i^p (Zn)	0.1	1.4	0.3	0.1	0.4
E_i^p (Cd)	0.5	48.0	10.9	5.2	0.5
RI	6.7	57.3	19.6	6.7	0.3

3 结论

(1)研究区土壤呈弱碱性,重金属含量整体处于较低水平,但中部南沿城镇等局部区域存在一定程度的重金属累积,6个点位样本的Cu、Pb、Zn和Cd元素含量超出风险筛选值,点位超标率为1.0%,均呈轻度污染。

(2)基于克里格插值结果,研究区土壤Cu、Zn、As、Ni和Cr元素含量分布具有较强的相关性,高值区主要分布于中部地区,其中,中部北沿地区的含量又普遍高于南沿,这可能与研究区河口冲积成陆过程及长江南北两支水沙运动特征有关。Pb和Hg元素含量高值区与城区分布高度吻合,工业和交通等因素可能是土壤Pb和Hg元素累积的主要原因。Cd元素含量分布表现为西部高、东部低的趋势,结合区域农业生产特征,磷肥施用可能是西部地区土壤Cd元素的主要外源输入途径。

(3)生态风险评价结果表明,研究区土壤总体处于清洁、低生态风险水平,个别点位样本存在中等生态风险,主要风险贡献因子为Cd。考虑到Cd的毒性效应和生物有效性,应关注区域土壤Cd的污染防治。

参考文献:

[1] 赵沁娜,徐启新,杨凯.潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤

污染评价中的应用[J].华东师范大学学报(自然科学版),2005(1):111-116. ZHAO Q N, XU Q X, YANG K. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2005(1): 111-116.

[2] 刘玉燕,刘敏,刘浩峰.城市土壤重金属污染特征分析[J].土壤通报,2006,37(1):184-188. LIU Y Y, LIU M, LIU H F. Analysis on characteristics of heavy metal pollution in urban soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):184-188.

[3] 曹伟,周生路,王国梁,等.长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J].地理科学,2010,30(2):283-289. CAO W, ZHOU S L, WANG G L, et al. Spatial variability characteristics of soil heavy metals due to industry development of typical regions in Changjiang River Delta of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2):283-289.

[4] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515. DAI B, LÜ J S, ZHAN J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507-515.

[5] 上海市人民政府.崇明世界级生态岛发展“十三五”规划[R].上海:上海市人民政府,2016. Shanghai Municipal People's Government. Chongming world-class ecological island development "13th Five-Year" plan[R]. Shanghai:Shanghai Municipal People's Government, 2016.

[6] 孙超.崇明岛农田土壤重金属的分布与累积特征[D].上海:华东师范大学,2010. SUN C. Distribution and accumulation characteristics of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.

[7] 孙超,陈振楼,毕春娟,等.上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J].地理学报,2009,64(5):619-628. SUN C, CHEN Z L, BI C J, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5):619-628.

[8] 周燕,李德志,宋云,等.崇明岛土壤重金属含量的空间分布及污染评价[J].华东师范大学学报(自然科学版),2009(5):75-84. ZHOU Y, LI D Z, SONG Y, et al. Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation in Chongming Island[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2009(5):75-84.

[9] 沈根祥,谢争,钱晓雍,等.上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):37-40. SHEN G X, XIE Z, QIAN X Y, et al. Investigation and analysis of heavy metal accumulation in the soil of vegetable cropland in Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):37-40.

[10] 王初,陈振楼,王京,等.崇明岛公路两侧蔬菜地土壤和蔬菜重金属污染研究[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):89-93. WANG C, CHEN Z L, WANG J, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables on roadsides in Chongming Island[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2):89-93.

[11] 王初,陈振楼,王京,等.上海市崇明岛公路两侧土壤重金属污染研究[J].长江流域资源与环境,2008,17(1):105-108. WANG C,

- CHEN Z L, WANG J, et al. Heavy metal pollution of soils alongside roads of Chongming Island of Shanghai City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1):105-108.
- [12] 李双喜, 吕卫光, 雷艳芳, 等. 上海郊区典型农业土壤重金属累积和评价[J]. 上海农业学报, 2018, 34(3):6-10. LI S X, LÜ W G, LEI Y F, et al. Accumulation and evaluation of heavy metals in typical agricultural soil of Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2018, 34(3):6-10.
- [13] 上海土壤普查办公室. 上海土种志[M]. 上海:上海土壤普查办公室, 1992. Shanghai Soil Survey Office. A database of soil type in Shanghai[M]. Shanghai:Shanghai Soil Survey Office, 1992.
- [14] 上海市崇明区人民政府, 上海市规划和国土资源管理局. 上海市崇明区总体规划暨土地利用总体规划(2017—2035)[R]. 上海:上海市人民政府, 2018. Chongming District People's Government, Shanghai Municipal Administration of Planning, Land and Resources. Master plan and general land-use plan of Chongming District, Shanghai, 2017—2035[R]. Shanghai:Shanghai Municipal People's Government, 2018.
- [15] 郑志侠, 潘成荣, 丁凡. 巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):161-165. ZHENG Z X, PAN C R, DING F. Distribution and environmental pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):161-165.
- [16] 上海市环境保护局. 上海土壤环境背景值[M]. 上海:中国环境科学出版社, 1992. Shanghai Municipal Bureau of Environmental Protection. Background value of soil in Shanghai[M]. Shanghai:China Environmental Press, 1992.
- [17] 杨玉敏, 师学义, 张琛. 基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4):338-343. YANG Y M, SHI X Y, ZHANG C. Spatial distribution and evaluation of heavy metal pollution of reclaiming village based on Nemerow integrated pollution index method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4):338-343.
- [18] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8):3845-3853. LI J K, ZHANG D, ZHOU P, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8):3845-3853.
- [19] 祝培甜, 赵中秋, 陈勇, 等. 江苏省某镇土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4):2535-2541. ZHU P T, ZHAO Z Q, CHEN Y, et al. Evaluation of soil heavy metals pollution in a town, Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4):2535-2541.
- [20] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3):1500-1507. YU M D, ZHANG H, HE X S, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(3):1500-1507.
- [21] 秦鹏一, 王敏, 高宗军, 等. 滕州土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(3):720-726. QIN P Y, WANG M, GAO Z J, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in Tengzhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3):720-726.
- [22] 陈锐, 杜双杰, 徐伟, 等. 南京城郊某典型退耕农用地土壤重金属含量特征与污染评价分析[J]. 环境工程, 2022, 40(3):102-110, 165. CHEN R, DU S J, XU W, et al. Concentration characteristics and pollution assessment of heavy metals in soil of withdrawal cultivated land in suburb of Nanjing[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(3):102-110, 165.
- [23] LUO L, MA Y B, ZHANG S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524-2530.
- [24] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10):2219-2238. CHEN Y L, WENG L P, MA J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10):2219-2238.
- [25] 庞金华. 上海郊县土壤和农作物中金属元素的污染评价[J]. 植物资源与环境, 1994, 3(1):20-26. PANG J H. The evaluation of metal elements pollution in soils and crops in the suburbs of Shanghai[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1994, 3(1):20-26.
- [26] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3):647-653. WANG J, CHEN Z L, WANG C, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):647-653.
- [27] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6):2822-2833. CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6):2822-2833.
- [28] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2):223-227. CHEN L H, NI W Z, LI X L, et al. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used[J]. *Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology*, 2009, 26(2):223-227.
- [29] 刘久臣, 刘晓端, 徐清, 等. 上海崇明岛表层土壤重金属元素分布特征与环境地球化学基线值研究[J]. 岩矿测试, 2010, 29(3):245-249. LIU J C, LIU X D, XU Q, et al. Distribution characteristics of heavy metals and their environmental geochemical baselines in top soils from Chongming Island of Shanghai City[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(3):245-249.
- [30] 申广荣, 卢德俊, 钱振华, 等. 上海崇明岛土壤重金属含量空间变异特征研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2010, 28(4):349-354. SHEN G R, LU D J, QIAN Z H, et al. Spatial variability of soil heavy metals in Chongming Island, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2010, 28(4):349-354.
- [31] 梁珊珊. 我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2017. LIANG S S. Studies on NPK fertiliza-

- tion status and the potential of reducing application rate in major citrus planting regions of China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [32] 方正, 杨静, 周鑫斌. 长江上游地区柑橘磷肥减施增效技术规范[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(2):43-45. FANG Z, YANG J, ZHOU X B. Technical regulation for phosphate fertilizer reduction and synergism on citrus in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(2):43-45.
- [33] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992(2):150-157. LU R K, SHI Z Y, XIONG L M. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on ecological environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992(2):150-157.
- [34] 黄青青, 刘星, 张倩, 等. 磷肥中镉的环境风险及生物有效性分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2):156-161. HUANG Q Q, LIU X, ZHANG Q, et al. Evaluating the environmental risk and the bio-availability of Cd in phosphorus fertilizers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(2):156-161.
- [35] 靳治国, 施婉君, 高扬, 等. 不同土地利用方式下土壤重金属分布规律及其生物活性变化[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3):74-77, 96. JIN Z G, SHI W J, GAO Y, et al. Distribution of heavy metals and changes of soil biological activity under different land use patterns [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3):74-77, 96.
- [36] 罗后巧, 段启超, 何文艳, 等. 四川某金属制品厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(4):440-444. LUO H Q, DUAN Q C, HE W Y, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in soils surrounding a metal products factory in Sichuan[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(4):440-444.
- [37] 俞海森, 周海珠, 忻闻. 崇明岛风力资源分析与评价[J]. 可再生能源, 2008, 26(3):76-79. YU H M, ZHOU H Z, XIN W. Analysis and assessment on wind energy resource in Chongming Island[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008, 26(3):76-79.
- [38] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. 环境科学, 2021, 42(3):1105-1113. ZENG W B, GU G Q, WAN X M, et al. Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1105-1113.
- [39] 李舒. 上海崇明地区大气汞及其湿沉降特征研究[D]. 北京:清华大学, 2016. LI S. Characteristics of atmospheric mercury and its wet deposition in Chongming Island, Shanghai[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [40] 何钰滢. 环崇明岛岸滩变化过程研究[D]. 上海:华东师范大学, 2020. HE Y Y. Geomorphological evolution of tidal flat around Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [41] 陈振楼, 许世远, 柳林, 等. 上海滨岸滩涂沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报, 2000, 55(6):641-651. CHEN Z L, XU S Y, LIU L, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6):641-651.
- [42] 康勤书, 周菊珍, 吴莹, 等. 长江口滩涂湿地重金属的分布格局和研究现状[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(3):44-47. KANG Q S, ZHOU J Z, WU Y, et al. Distribution and research situation of heavy metals in tidal wetlands of Changjiang Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3):44-47.
- [43] 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 等. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(7):2368-2375. LI Y J, YANG S L, HOU L J, et al. Spatial distribution and contamination evaluation of heavy metals in the intertidal surface sediments of eastern Chongming[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(7):2368-2375.
- [44] NI R X, MA Y B. Current inventory and changes of the input/output balance of trace elements in farmland across China[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(6):e0199460.
- [45] 孟飞, 刘敏, 史同广. 上海农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(2):2428-2433. MENG F, LIU M, SHI T G. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2):2428-2433.
- [46] 孟飞, 张建, 单宝艳. 上海浦东新区农田土壤重金属空间结构及分布特征[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2):218-224. MENG F, ZHANG J, SHAN B Y. Spatial structure and distribution of heavy metals in agricultural soils from Pudong of Shanghai[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2):218-224.
- [47] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海城郊地区城市化进程与农用土壤重金属污染的关系研究[J]. 资源科学, 2009, 31(7):1250-1256. XIE X J, KANG J C, LI W J, et al. Relationship between urbanization and heavy metal pollution in soils in Shanghai suburb[J]. *Resources Science*, 2009, 31(7):1250-1256.
- [48] 袁大伟, 何七勇, 郑宪清, 等. 上海松江蔬菜田土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 上海农业学报, 2013, 29(4):42-46. YUAN D W, HE Q Y, ZHENG X Q, et al. The heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Songjiang District of Shanghai[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2013, 29(4):42-46.
- [49] 吴琼, 赵同科, 邹国元, 等. 北京东南郊农田土壤重金属含量与环境质量评价[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1):7-12. WU Q, ZHAO T K, ZOU G Y, et al. Heavy metals contents and environment quality evaluation of farmland soil in east-south area of Beijing[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(1):7-12.
- [50] 王玉军, 欧名豪. 徐州农田土壤养分和重金属含量与分布研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6):1438-1450. WANG Y J, OU M H. Contents and distribution of soil nutrients and heavy metal elements in farmlands of Xuzhou[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6):1438-1450.
- [51] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):96-104. YIN G Q, JIANG H, WANG Q, et al. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):96-104.