

# 上海典型地貌重金属含量特征与潜在生态风险

陈逸斌<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 徐伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海申环环境工程有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

Email: 15801733177@163.com

收稿日期: 2021年6月4日; 录用日期: 2021年7月6日; 发布日期: 2021年7月14日

## 摘要

针对上海湖沼平原、滨海平原, 以及河口、砂嘴、砂岛和潮坪地带四种典型地貌进行土壤采样和检测分析, 并对重金属的潜在生态风险进行评估。结果表明: 调查范围内土壤样品重金属的含量由高到低依次为: Ni > Cu > Pb > As > Cd > Hg。所有土壤样品中重金属含量平均值与背景值较为接近。滨海平原、湖沼平原、潮坪地带、河口, 砂嘴, 砂岛的重金属含量依次递减。表层土壤样品中的重金属含量总体高于较深土壤中的含量。所有土壤样品的各种重金属污染程度均不超过偏轻度污染。所有土壤样品的各种重金属均属于低生态风险。

## 关键词

地貌, 土壤, 重金属, 生态风险, 上海

# The Heavy Metal Content in Shanghai's Typical Landforms and Its Potential Ecological Risks

Yibin Chen<sup>1</sup>, Lei Wang<sup>2</sup>, Wei Xu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Shenhuan Environmental Engineering CO., LTD., Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) CO., LTD., Shanghai

Email: 15801733177@163.com

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 6<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 14<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Soil sampling and testing have been carried out on the lacustrine plains, coastal plains and four other typical landforms of Shanghai including estuaries, sand spits, sand islands and tidal flats, to evaluate the potential ecological risks of their heavy metal content. The results showed that the concentration of heavy metals analyzed in the soil samples was in a descending order of Ni > Cu > Pb > As > Cd > Hg. The average value of heavy metal content in all the soil samples was close to the background value. The concentration of heavy metals in the landforms was in a decreasing order of coastal plains, lacustrine plains, tidal flats, estuaries, sand spits and sand islands. The heavy metal content in surface soil samples was generally higher than in deeper soil samples. In terms of contamination level of heavy metals, the results revealed relatively low contamination in all the soil samples. All the heavy metals analyzed in the soil samples were of low ecological risk.

## Keywords

Landforms, Soil, Heavy Metals, Ecological Risks, Shanghai

Copyright © 2021 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. 前言

上海位于长江三角洲东南前缘,成陆较晚,除西南部有十余座零星剥蚀残丘外,地形平坦,河港密布。境内地面标高(吴淞高程)大多在 2.5 m~4.5 m 之间,西部为淀迎洼地,东部为碟缘高地,东西高差约 2 m~3 m。按地貌形态、时代成因、沉积环境和组成物质等方面的差异,境内可分为五大地貌类型:湖沼平原;滨海平原;河口、砂嘴、砂岛;潮坪地带;剥蚀残丘[1]。

铅、汞、砷等重金属由于其具有较高的毒性、容易在生物体内富集等特点,对生态环境可能造成一定程度的危害风险。而由于各大地貌的成型原因、分布范围均有所不同,土壤中重金属含量和生态风险也相应存在差异。然而,目前针对上海各地貌浅部土壤中重金属含量的研究较少。上海剥蚀残丘主要位于西南部松江、青浦以及金山的孤丘或岛屿,分布范围较小。因此,本文主要针对湖沼平原、滨海平原,以及河口、砂嘴、砂岛和潮坪地带等 4 种典型地貌土壤中重金属含量进行了检测分析,并评估了重金属的潜在生态风险,以期为土地的科学开发利用提供参考。

## 2. 研究方法

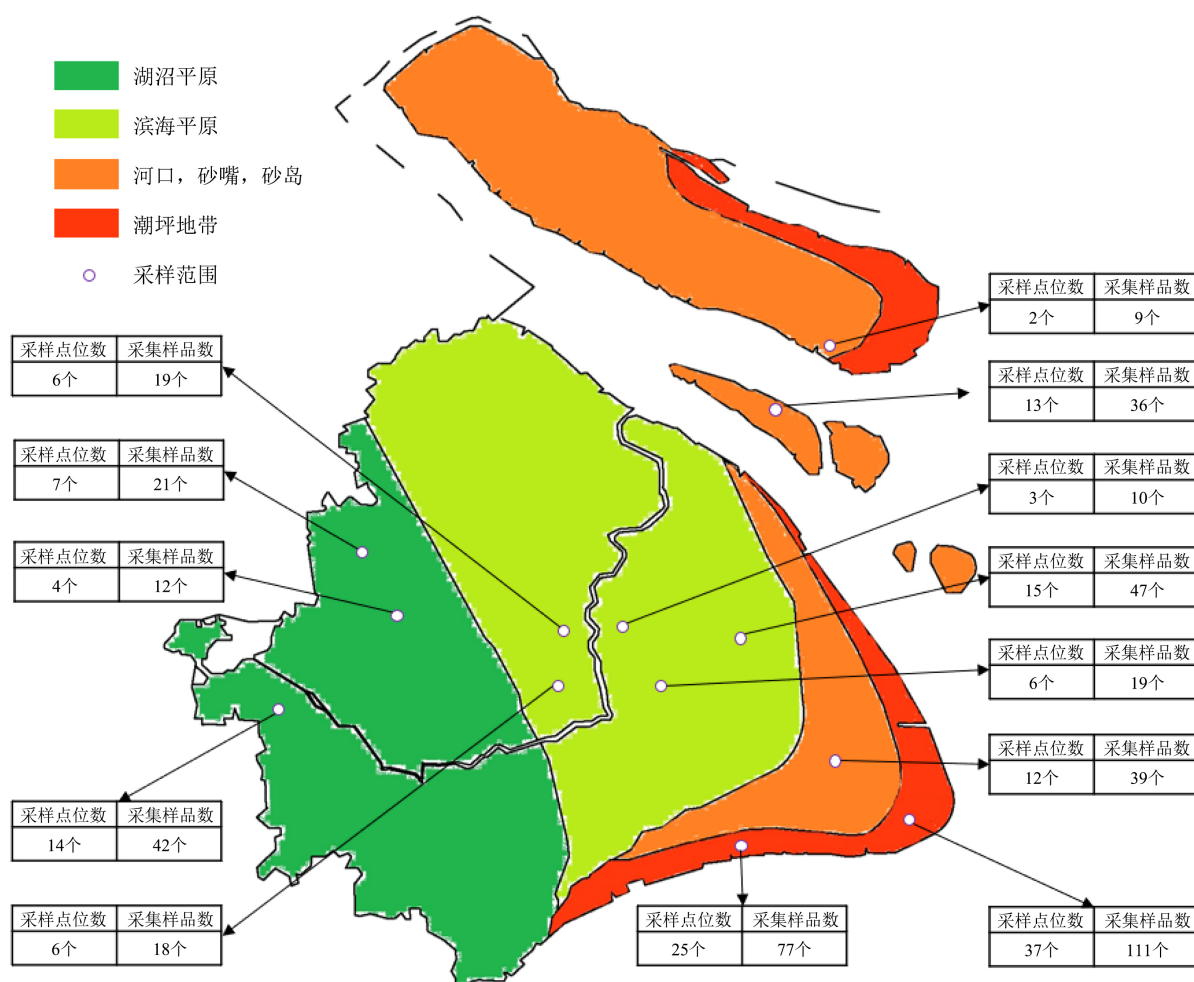
### 2.1. 布点采样方法

分别在湖沼平原、滨海平原,以及河口、砂嘴、砂岛和潮坪地带等四种典型地貌中设置多个土壤采样点。采样点所在区域主要为上海各个郊区,且其历史上均为农田或者空地,受工业活动扰动较小,更能体现各地貌重金属本底情况。

使用 GeoProbe@7822DT 系统通过双套管直推钻进方式采集原状连续土样,每个采样点位最大采样深度均不超过 6 m,分别采集表层土壤(0.0~0.2 m)、表层至饱和带土壤(表底土壤底部~地下水位以上)以及饱和带以下(地下水位以下)土壤送至实验室进行检测分析,采样情况见表 1,具体点位位置见图 1。

**Table 1.** Sample in various landform  
**表 1.** 各地貌采样情况

地貌	分布范围	浅部土壤类型	采样点位数 (个)	采集样品数 (个)
湖沼平原	太仓、外冈、华新、徐泾、马桥、庄行、漕泾一线以西	局部缺失淤泥质黏性土	25	75
滨海平原	湖沼平原以东，顾路、合庆、蔡路、江镇、盐仓、大团一线以西，奉城、柘林、漕泾一线以北	淤泥质黏性土遍布	36	113
河口、砂嘴、砂岛	顾路、合庆、蔡路、江镇、盐仓、大团一线以东，奉城、柘林、漕泾、金山卫一线以南的沿海陆域地区及崇明、长兴、横沙等岛屿	粉性土、粉砂遍布，而淤泥质黏性土局部缺失	27	84
潮坪地带	东南部沿江、沿海地区	砂性土、粉砂遍布	62	188
合计			150	460



**Figure 1.** Diagram of sampling location  
**图 1.** 采样范围示意图

## 2.2. 检测方法

土壤样品检测指标包括铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)、镍(Ni)、汞(Hg)和砷(As)等 6 种重金属,检测方法见表 2。

**Table 2.** Detection methods of heavy metals in samples of shallow soil

**表 2.** 土壤样品重金属检测方法

检测项目	检测方法	检出限(mg/kg)
Ni	《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法》	3
Pb	《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》	0.1
Cd	《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》	0.01
Cu	《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法》	1
Hg	《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 1 部分:土壤中总汞的测定》	0.02
As	《土壤和沉积物 12-种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法》	0.4

## 2.3. 评价方法

### 2.3.1. 地积累指数法

Müller [2]认为可以通过针对重金属含量与地球化学背景值进行对比分析来定量地分析该种物质的污染程度。因此,他提出了地积累指数法这一有效方法,使得非本源重金属在沉积物中的富集程度能够有效直观的反应出来[3] [4] [5] [6]。其计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ C_i / (1.5B_i) \right]$$

其中,  $I_{geo}$  为地积累指数;  $C_i$  为土壤中重金属含量的实际检测值;  $B_i$  取上海土壤背景值(见表 3)。

**Table 3.** Toxicity response factors and background values of heavy metals

**表 3.** 重金属的背景值和毒性响应因子

项目	Cu	Cd	Ni	Pb	Hg	As
上海土壤重金属背景值(mg/kg) [7]	28	0.12	37	27	0.075	7
毒性响应因子[5]	5	30	5	5	40	10

### 2.3.2. 潜在生态风险指数法

Hakanson [8]认为可以通过同时针对土壤中重金属浓度、种类、毒性水平以及水体对该种污染物的敏感程度这 4 种参数进行对比分析,来评价土壤生态中重金属的危害程度[3] [4] [5] [6]。潜在生态风险指数  $RI$  的计算方法如下:

$$C_{f,i} = C_{s,i} / C_{n,i}$$

$$E_{r,i} = T_{r,i} \cdot C_{f,i}$$

$$RI = \sum E_{r,i} = \sum T_{r,i} \cdot C_{f,i}$$

其中,  $C_{s,i}$  为土壤中重金属含量的实际检测值;  $C_{n,i}$  取上海市土壤重金属的背景值;  $C_{f,i}$  为污染因子;  $T_{r,i}$  反映了该种污染物的毒性水平和相应环境对重金属污染的敏感程度;  $E_{r,i}$  为该种污染物的潜在生态风险系数;  $RI$  为多种污染物的潜在生态风险指数。不同阈值区间所对应的生态风险分级见表 4。



**Table 4.** Standard of ecological risk classification [4]**表 4.** 生态风险程度分级标准表[4]

一种重金属		多种重金属	
阈值( $E_{r,i}$ )	生态风险程度	阈值( $R_I$ )	生态风险程度
<40	低	<110	低
40~80	中等	110~220	中等
80~160	强	220~440	强
160~320	很强	/	/
$\geq 320$	极强	$\geq 4400$	极强

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 重金属含量总体特征

针对土壤样品中重金属检测结果进行统计分析,并与上海市土壤重金属含量背景值[7]以及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)风险筛选值[7] ( $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ )进行比较,结果见表 5。

**Table 5.** The content of heavy metals in soil (n = 460)**表 5.** 土壤重金属含量统计(n = 460)。单位: mg/kg

元素	统计结果				农用地筛选值[9]		背景值[7]
	含量范围	中值	平均值	变异系数	水田/果园	其他	
Pb	7.8~47.8	17.50	19.87	33%	140	120	27
Cd	0.02~0.36	0.08	0.11	49%	0.6	0.3	0.12
Cu	3~66	23.00	23.82	37%	200	100	28
Ni	6~59	36.00	35.67	23%	100	100	37
Hg	0.01~0.492	0.050	0.06	66%	0.6	2.4	0.075
As	1.88~16	7.31	7.58	35%	25	30	7

调查范围内土壤样品重金属的含量由高到低依次为:  $\text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ , 含量最高的是 Ni 和 Cu, 平均含量分别为 35.67 mg/kg 和 23.82 mg/kg; 含量最低的是 Cd 和 Hg, 平均含量分别为 0.11 mg/kg 和 0.06 mg/kg。Pb、Cu、Ni 和 As 的变异系数低于 40%, 其中 Ni 和 Pb 的变异系数分别为 23% 和 33%, 表明这 4 种重金属可能来自土壤背景或者面源污染。

所有土壤样品中重金属含量平均值与背景值较为接近, 其中 As 含量平均值略高于上海市土壤 As 含量背景值, 高出约 8%。土壤中的重金属背景值通常是指在未受重金属污染的情况下, 土壤环境中重金属的含量。上海市土壤中重金属背景值的获取方法是在区域内设置多个采样点, 每个采样点上分别采集表层(0~20 cm)和深层(150~180 cm)土壤样品, 将两者结合作为该区域的土壤重金属背景值。其中, 表层土壤样品不仅包括了成土母质中化学元素的自然地质背景含量, 还将人类活动带来的外源化学物质也包含在其中; 而深层土壤样品因受到较少的人类活动影响, 其化学元素组成更接近成土母质[7]。这可能是 As 含量与背景值含量略有区别的原因[10]。

所有土壤样品中重金属含量平均值均低于 GB15618-2018 中农用地土壤污染风险筛选值, 但部分土壤样品中的 Cd 含量略高于农用地(其他类)筛选值, 超标倍数最高为 0.2。土壤中采样点所在区域历史上均为农田或空地, Cd 超过农用地(其他类)筛选值可能是与大气沉降、以及肥料中含有 Cd 等有关[11]。

### 3.2. 不同地貌重金属含量特征

不同地貌土壤样品重金属含量特征如图 2 所示。滨海平原中重金属含量总体最高, 河口、沙嘴、砂岛中重金属含量总体最低。镉和砷含量排序依次为: 滨海平原 > 潮坪地带 > 湖沼平原 > 河口、沙嘴、砂岛; 铜和镍含量排序依次为: 潮坪地带 > 滨海平原 > 湖沼平原 > 河口、沙嘴、砂岛; 铅含量排序依次为: 滨海平原 > 湖沼平原 > 河口、沙嘴、砂岛 > 潮坪地带; 汞含量排序依次为: 湖沼平原 > 滨海平原 > 河口、沙嘴、砂岛 > 潮坪地带。

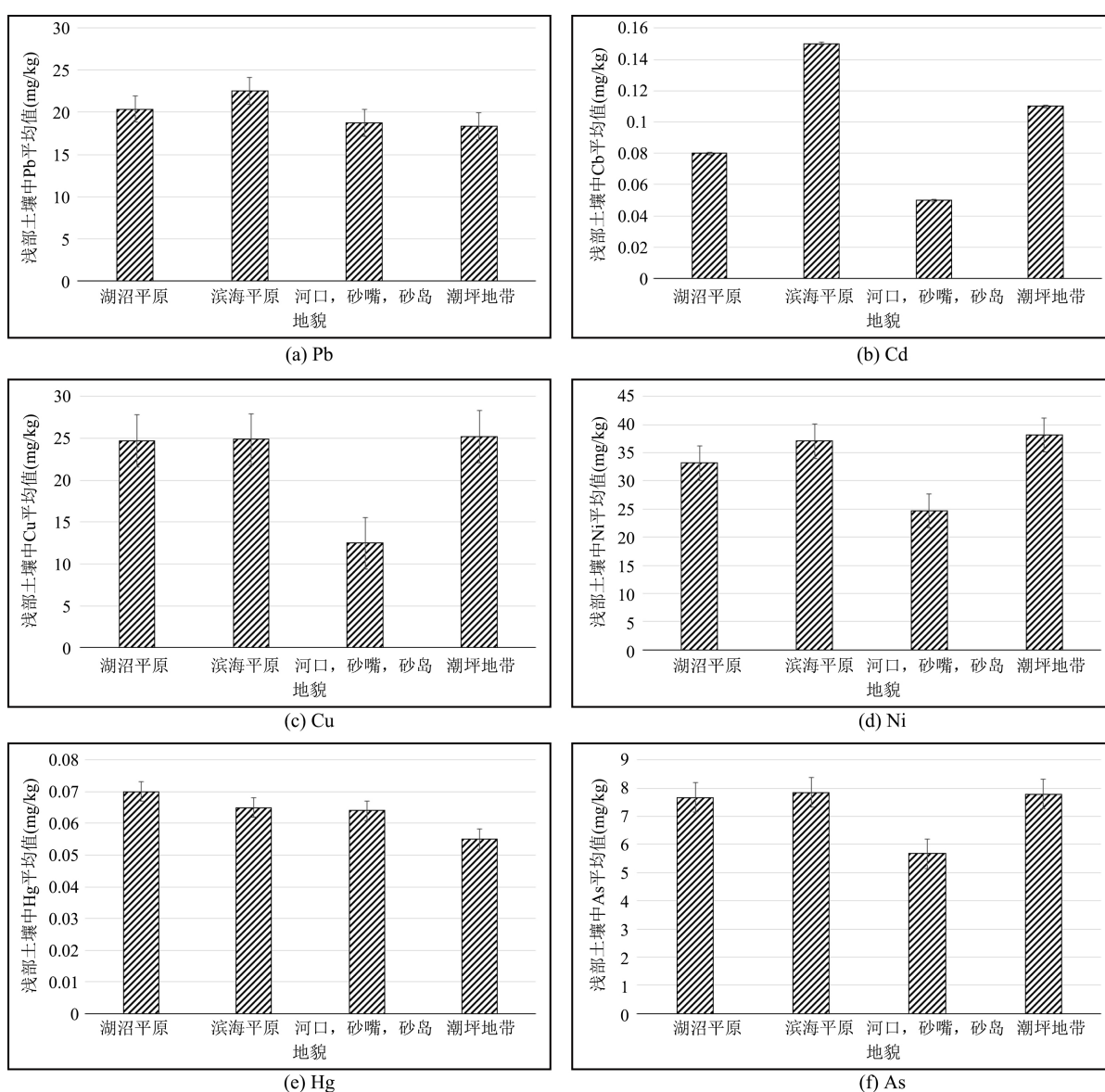


Figure 2. Metals in various landform  
图 2. 各地貌重金属含量

湖沼平原, 滨海平原, 河口、砂嘴、砂岛由于成型原因不同, 浅部土壤中淤泥质土的含量有所差异。淤泥质土指天然含水率大于液限、天然孔隙比在 1.0~1.5 之间的粘性土, 属于有机土的范畴之内。一般情况下, 土壤有机质含量的增加并不会增加土壤中重金属的含量。但是由于土壤有机质在重金属的络合与螯合过程中会起到一定作用, 因此在一定程度上能够影响重金属的迁移转化过程, 进而影响重金属在土壤中的积累[12]。许多研究表明[13], 土壤有机质含量与土壤有效态重金属含量大多呈显著正相关。田兆君等就发现 Pb、Cd、Cu 等重金属在土壤颗粒有机质中都有显著的富集, 且在不同土壤类型中的富集程度有所不同[14]。这可能也是滨海平原中重金属含量总体最高, 河口、砂嘴、砂岛中重金属含量总体最低的原因。

由于上海地区的东、南沿海地区, 有着显著的潮汐作用, 面向大海的地波能缓坡带及长江丰富的粉砂供应, 在上海东南沿海区域发育了潮坪地带。潮坪地带浅部砂性土和粉砂遍布。由于潮滩滩面上的沉降滞后效应以及区域内水深和动力条件的差异使其区域内沉积物颗粒的粒径较河口、砂嘴、砂岛区域内的更细, 因此其对重金属的结合能力也更强, 区域内浅部土壤中重金属含量也总体较河口、砂嘴、砂岛区域更多[11]。

### 3.3. 不同深度重金属含量特征

不同地貌、不同深度所采集的土壤样品重金属含量统计结果见图 3。土壤中重金属浓度总体随采样深度增加而降低。

虽然站在地质历史的角度上, 上海地区深层土壤与表层土壤都属于第四系沉积物的范畴, 同一区域位置的土壤都是在同一沉积来源、沉积环境沉积形成, 但是两者在粒度、结构上表现出了些许不同。在沉积来源保持不变的情况下, 原始的地球化学含量会存在一些细小差异。这是因为水动力条件的变化, 产生分异, 从而造成局部的沉积物的粒度、结构发生变化, 进而使表层和深层土壤中元素含量产生些许差别。根据杨楠楠等[8]的研究发现, 上海地区深层土壤中的 As 等重金属含量低于表层土壤中的含量。除此之外, 虽然本项目选择采样点位均选择农田或空地区域, 但是表层土壤中重金属含量除了受到周边人为扰动外, 仍在一定程度受大气中重金属影响, 少量重金属随大气沉降富集在表层土壤之中[11], 这些都可能也是土壤中重金属浓度总体随采样深度增加而降低的原因之一。

### 3.4. 重金属污染程度分析

#### 3.4.1. 地积累指数法

6 种重金属的地积累指数见表 6-9 [15]。所有重金属样品的各种重金属污染程度均不超过偏轻度污染, 河口, 砂嘴, 砂岛处的土壤样品最为洁净, 除了 Hg 外, 其余均为无污染, 湖沼平原 Pb 和 Cu 也无污染, 其余重金属样品均有部分属于轻度污染。统计  $I_{geo}$  平均值后发现 6 种重金属在湖沼平原的污染程度由高到低依次为: Cd > Pb > Cu > Ni > Hg > As; 滨海平原的污染程度由高到低依次为: Pb > Hg > Cu > Ni > As > Cd; 河口, 砂嘴, 砂岛的污染程度由高到低依次为: Cd > Cu > Ni > Pb > As > Hg; 潮坪地带的污染程度由高到低依次为: Pb > Hg > Cu > Cd > Ni > As。

#### 3.4.2. 潜在生态风险指数法

不同地貌下 6 种重金属的潜在生态风险指数贡献见图 4。根据不同地貌浅部土壤中重金属平均潜在生态风险系数值, 湖沼平原处土壤中各重金属 RI 介于 4~37 之间, 平均值为 13, RI 从高到低依次为: Hg > Cd > As > Ni > Cu > Pb; 滨海平原处土壤中各重金属 RI 介于 4~38 之间, 平均值为 16, RI 从高到低依次为: Cd > Hg > As > Ni > Cu > Pb; 河口, 砂嘴, 砂岛处土壤中各重金属 RI 介于 2~34 之间, 平均值为 11, RI 从高到低依次为: Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu; 潮坪地带处土壤中各重金属 RI 介于 3~29 之间, 平均值为 14, RI 从高到低依次为: Hg > Cd > As > Ni > Cu > Pb。不同地貌下浅部土壤中 6 种重金属在所有样品中的  $E_{r,i}$  均小于 40, 均属于低生态风险。Hg 和 Cd 的含量虽然较低, 但其潜在生态风险占比却最高。

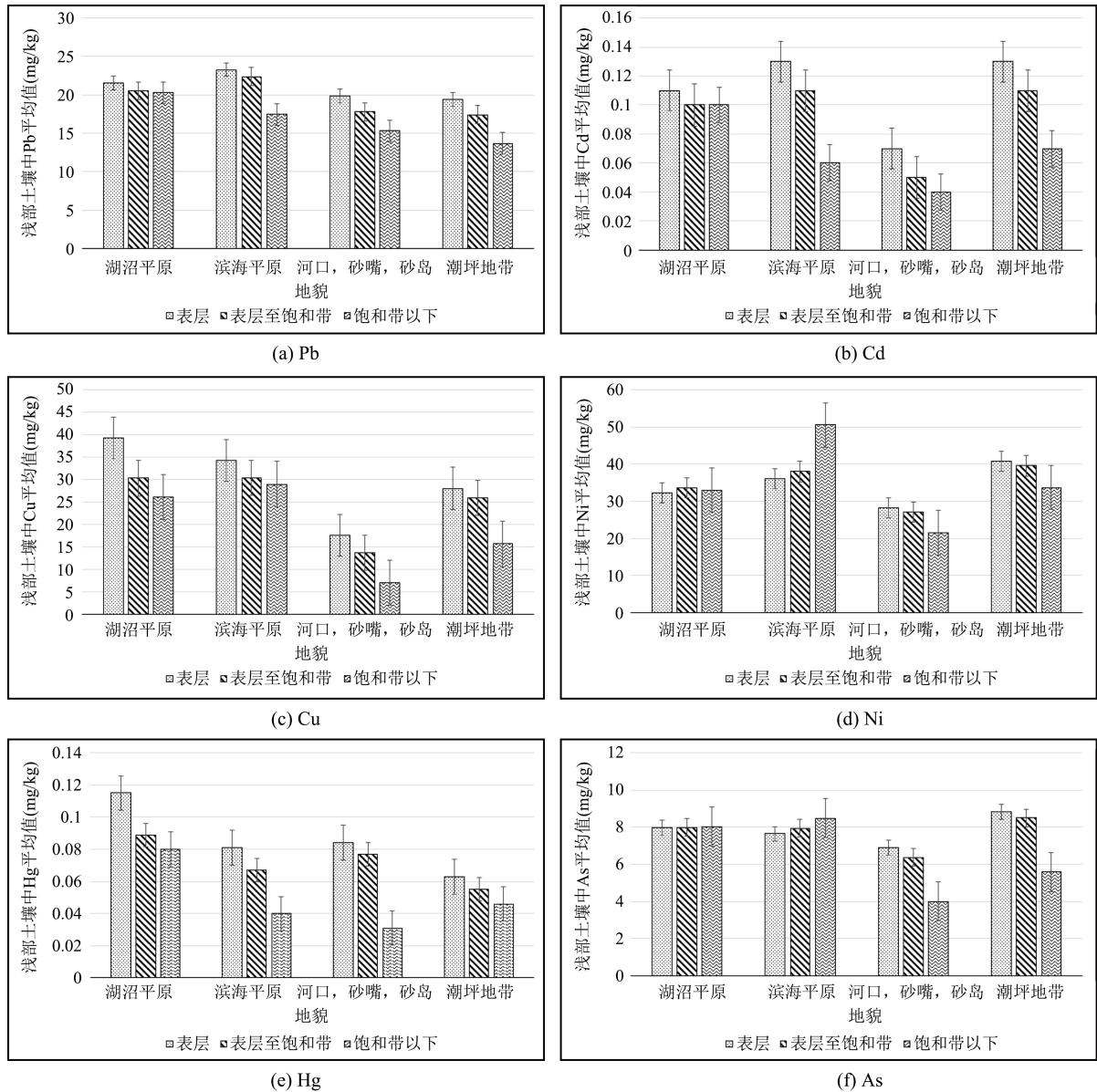


Figure 3. Metals of different depth in various landform  
图 3. 各地貌不同深度重金属含量

Table 6. Pollution evaluation results of heavy metals geo-accumulation index in limnological plain  
表 6. 湖沼平原重金属地积累指数污染评价结果

地累积指数( $I_{geo}$ )	污染等级	污染程度	所占比例(%)					
			Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	As
$\leq 0$	0	无污染	100	91	100	100	79	97
0~1	1	轻度污染	0	9	0	0	21	3
1~2	2	偏中度污染	0	0	0	0	0	0
2~3	3	中度污染	0	0	0	0	0	0
3~4	4	偏重污染	0	0	0	0	0	0
4~5	5	重污染	0	0	0	0	0	0
>5	6	严重污染	0	0	0	0	0	0
平均值	-	-	-0.99	-1.18	-0.77	-0.74	-0.68	-0.45

**Table 7.** Pollution evaluation results of heavy metals geo-accumulation index in littoral plain  
**表 7.** 滨河平原重金属地积累指数污染评价结果

地累积指数( $I_{geo}$ )	污染等级	污染程度	所占比例(%)					
			Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	As
≤0	0	无污染	98	92	99	97	96	98
0~1	1	轻度污染	2	8	1	3	4	2
1~2	2	偏中度污染	0	0	0	0	0	0
2~3	3	中度污染	0	0	0	0	0	0
3~4	4	偏重污染	0	0	0	0	0	0
4~5	5	重污染	0	0	0	0	0	0
>5	6	严重污染	0	0	0	0	0	0
平均值	-	-	-0.85	-0.23	-0.76	-0.58	-0.79	-0.42

**Table 8.** Pollution evaluation results of heavy metals geo-accumulation index in estuary, sand spit, sand island  
**表 8.** 河口, 砂嘴, 砂岛重金属地积累指数污染评价结果

地累积指数( $I_{geo}$ )	污染等级	污染程度	所占比例(%)					
			Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	As
≤0	0	无污染	100	100	100	100	95	100
0~1	1	轻度污染	0	0	0	0	5	0
1~2	2	偏中度污染	0	0	0	0	0	0
2~3	3	中度污染	0	0	0	0	0	0
3~4	4	偏重污染	0	0	0	0	0	0
4~5	5	重污染	0	0	0	0	0	0
>5	6	严重污染	0	0	0	0	0	0
平均值	-	-	-1.11	-1.81	-1.75	-1.17	-0.81	-0.89

**Table 9.** Pollution evaluation results of heavy metals geo-accumulation index in tidal flat  
**表 9.** 潮坪地带重金属地积累指数污染评价结果

地累积指数( $I_{geo}$ )	污染等级	污染程度	所占比例(%)					
			Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	As
≤0	0	无污染	97	94	94	97	99	95
0~1	1	轻度污染	3	6	6	3	1	5
1~2	2	偏中度污染	0	0	0	0	0	0
2~3	3	中度污染	0	0	0	0	0	0
3~4	4	偏重污染	0	0	0	0	0	0
4~5	5	重污染	0	0	0	0	0	0
>5	6	严重污染	0	0	0	0	0	0
平均值	-	-	-1.14	-0.67	-0.74	-0.54	-1.03	-0.43



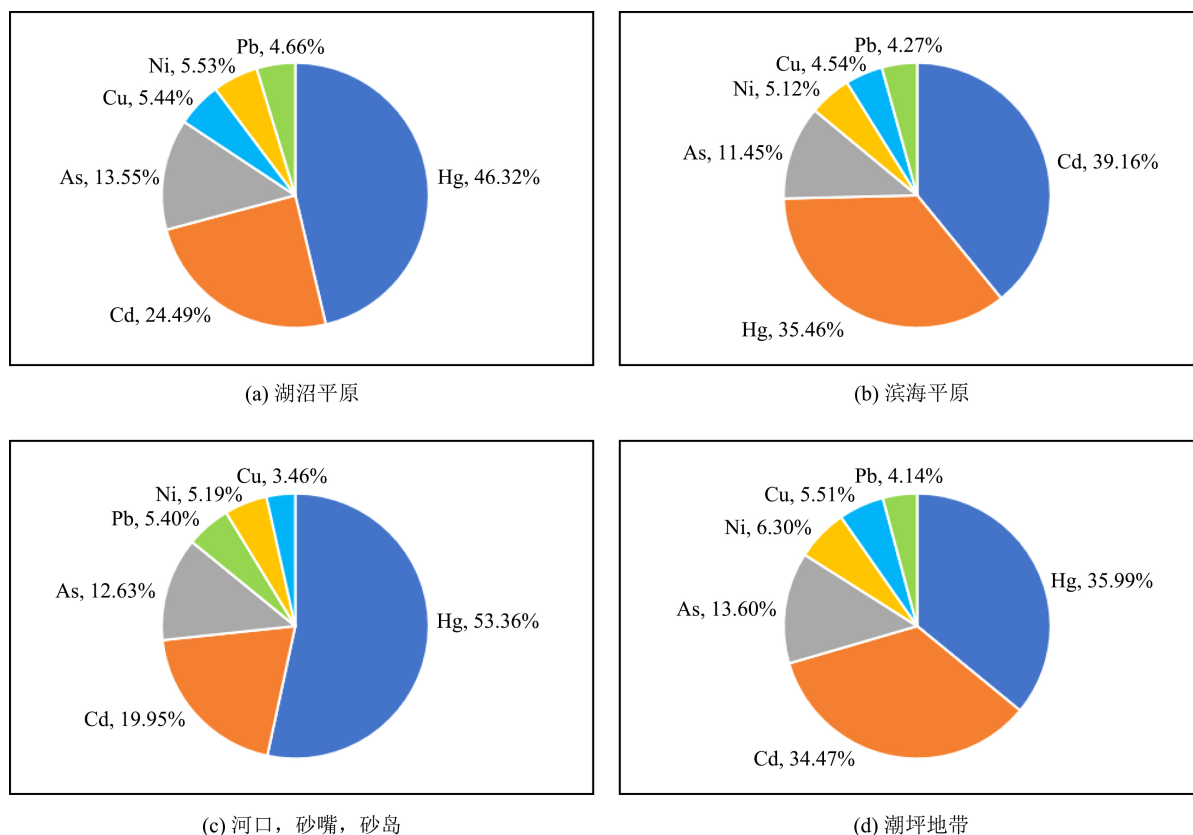


Figure 4. Contribution of different heavy metals to potential ecological risk index

图 4. 不同重金属对潜在生态风险指数的贡献

## 5. 结论

1) 调查范围内土壤样品重金属的含量由高到低依次为:  $Ni > Cu > Pb > As > Cd > Hg$ 。所有土壤样品中重金属含量平均值与背景值较为接近。所有土壤样品中重金属含量平均值均低于 GB15618-2018 中农用地土壤污染风险筛选值。

2) 滨海平原、湖沼平原、潮坪地带、河口、砂嘴、砂岛的重金属含量依次递减。

3) 表层土壤样品中的重金属含量总体高于较深土壤中的含量。

4) 地积累指数法评价结果表明, 所有土壤样品的各种重金属污染程度均不超过偏轻度污染。潜在生态风险评价结果表明, 所有土壤样品的各种重金属均属于低生态风险。

## 基金项目

典型场地有机物污染快速检测技术集成及示范(上海市科委——社会发展领域课题, 编号 19DZ1205304)。

## 参考文献

- [1] 上海岩土工程勘察设计院有限公司. DGJ 08-37-2012 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] Muller, G. (1969) Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- [3] 舒伟, 高阳俊. 基于 3 种方法对河流底泥重金属污染评价[J]. 上海第二工业大学学报, 2018, 35(1): 1-9.
- [4] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013(1):



---

147-153.

- [5] 龙佳, 张宁, 崔佳. 黑臭水体底泥污染源调查及污染特性评价方法研究[J]. 市政技术, 2018, 36(6): 171-173.
- [6] 陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比: 以福建浅海沉积物为例[J]. 地质与资源, 2008, 17(3): 213-218, 228.
- [7] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- [8] Håkanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [9] 生态环境部. GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [10] 杨楠楠. 长三角地区土壤重金属的空间分异特征及风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2010: 35-47.
- [11] Pan, Y.P. and Wang, Y.S. (2014) Atmospheric Wet and Dry Deposition of Trace Elements at 10 Sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 20647-20676. <https://doi.org/10.5194/acpd-14-20647-2014-supplement>
- [12] 林铁亲, 朱伟浩, 陈志良, 等. 土壤重金属的形态分析及生物有效性研究进展[J]. 广东的工业大学学报, 2013, 30(2): 113-118.
- [13] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(8): 82-86.
- [14] 俞天命, 田兆君, 谢正苗, 等. 铅锌矿污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用[J]. 科技通报, 2007, 23(4): 597-602.
- [15] 王磊, 向甲甲, 殷瑶, 等. 河道底泥重金属的含量特征与潜在生态风险[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 162-167, 172.