

# 上海市典型圩区底泥重金属污染风险与空间特征\*

刘逸竹<sup>1, 2</sup>

(1. 上海亚新城市建设有限公司, 上海 200436; 2. 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200436)

**摘要:**【目的】河道底泥是土壤和水体重金属在地球化学循环中的特殊载体, 而农业河道底泥作为农业生态系统中重金属污染的重要来源却被鲜少注意到。【方法】文章选取水系发达的上海市某处典型农业圩区, 收集河道底泥, 依照相关技术要求和标准进行镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)和锌(Zn)等8项重金属的含量检测, 采用地积累指数结合检测结果的空间分异特征分析和讨论了研究区域内重金属的环境风险和特点。【结果】结果表明, 研究区内农业河道底泥中重金属含量符合国家标准; 部分样点Cu、Hg和Pb超出当地背景值1倍以上, 且Cu和Hg的地积累指数达到或接近了中风险; 但样点检测值在空间上关联不明显。【结论】研究区农业河道重金属以点源来源积累为主的Cu和Hg为首、一定程度上受环境影响的Pb积累为次的重金属环境风险。

**关键词:** 圩区河道; 底泥; 重金属; 环境风险

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20210604

## 0 引言

重金属作为污染物在环境中具有毒性大、易蓄积、隐蔽性强以及难代谢的特点。近年来, 由于重金属污染的严峻形势和社会环境意识的提高, 土壤和水体作为重金属的主要载体成为关注的焦点。而河道底泥作为重金属在土壤和水体之间的过渡媒介, 显得尤为特殊: 一方面包括重金属在内的污染物经底泥—河水界面的浮泥层吸附后向底泥中转移并蓄积后, 使底泥成为重金属的“汇”。而从另一方面——污染源的角度来看, 底泥中蓄积的重金属在河道水体环境改善时会再次释放到水体中, 成为河道水体二次污染的隐患, 降低环境治理效果。同时, 由于不定期疏浚产生的河道底泥多还田还林, 重金属再一次直接进入地球化学循环, 成为土壤尤其是农田土壤重金属污染的重要来源。

上海市地处长江下游入海口, 属于典型的平原感潮水网地区, 市内水网密布, 不仅有大量直接利用深沟小河改造的圩田, 还有水田, 疏浚底泥也基本用于还田还林, 农田与水体尤其是底泥的物质交换循环更为密切。早在20世纪80年代, 就有学者注意到上海

收稿日期: 2021-11-18

作者简介: 刘逸竹(1989—), 博士, 工程师。研究方向: 国土空间规划、环境修复和自然资源管理。

Email: liuyizhu1989@qq.com

\* 基金项目: 上海市科学技术委员会“高新区地表水环境绿色生态建设技术研究”(19DZ1207903); 上海市地矿工程勘察院“环境安全视角下工业地块规划转型利用方向研究——以静安区为例”(Gky202108)

2021年12月

市长江口土壤和底泥中重金属在不同类型河道和农业区的分布差异<sup>[1]</sup>,讨论了苏州河中底泥重金属的再释放与迁移,预测重污染底泥对水质的影响<sup>[2]</sup>。近些年一些学者对市内养殖水体<sup>[3]</sup>、水库和市区主要河道<sup>[4]</sup>的底泥重金属的空间分布和环境风险进行了讨论,鲜有注意到农田河道底泥的研究;而针对农田土壤的分析则聚焦在农田土壤本身,如张丽勃<sup>[5]</sup>、李双喜<sup>[6]</sup>、谢小进<sup>[7]</sup>和袁文悦<sup>[8]</sup>等分别就上海市某区域或就特定作物需求,对农田土壤重金属进行了讨论。

因此,文章依托上海市某生态工程,选取其中典型圩田讨论上海市农业河道底泥的重金属在数值和空间上的分布特点,并分析和提示相关环境风险,提出应对措施建议。

## 1 研究区概况

研究区位于上海市西郊的青浦区朱家角镇。青浦区地处上海市、江苏省和浙江省3省(市)的交接处,与江苏省苏州市的吴江区和昆山市相连,和浙江省嘉兴市嘉善县接壤,北部和东部主要与上海市嘉定区和松江区毗邻(图1)。

青浦区位于太湖下游、黄浦江上游,属黄浦江水系。主要呈现湖沼平原地貌,境内地势平坦,海拔高度在2.8~3.5 m之间,受外营力(指河流、湖泊、海水)相互作用而形成。青浦区与上海市一样,是平原感潮水网地区,水系丰富,境内河港下受黄浦江潮汐影响,上承江、浙两省客水,最终入黄浦江归海。

青浦区长期以来都是上海市的传统农作区,目前区内耕地面积超过全区总面积的1/3,主要作物是蔬菜,其次是粮食和水果,面积相当。该文所选圩田位于青浦区中部,在上海市郊主要湖泊淀山湖附近,研究区四周均为灌溉农田,远离青浦区城镇中心和工业生产,是上海市乃至长三角地区典型的圩田耕作区。

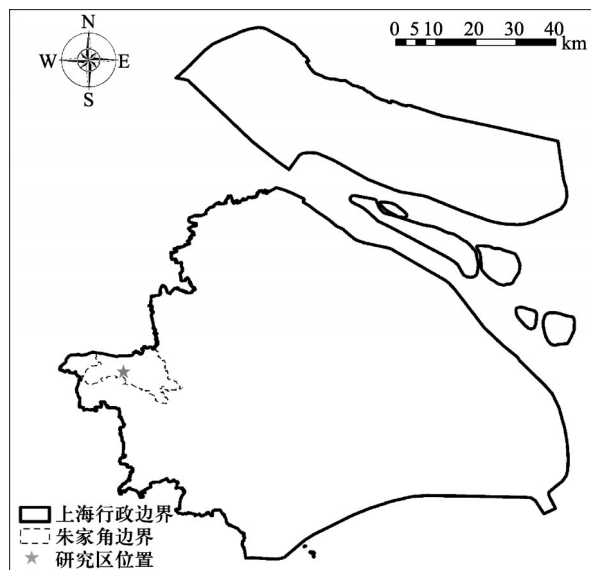


图1 研究区位置

Fig 1 Position of study area and land use around

## 2 数据与方法

### 2.1 数据收集与检测

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）中所列的污染物项目，该文河道底泥研究关注的是 8 项重金属：镉（Cd）、汞（Hg）、砷（As）、铅（Pb）、铬（Cr）、铜（Cu）、镍（Ni）和锌（Zn）。以下未指明元素类型时，简称重金属。

按照《上海市规范中小河道整治疏浚底泥消纳处置的指导意见》（沪水务〔2018〕1109 号），研究以河道为基本单元，按照最少保证每 1 万 m<sup>2</sup> 有一个样品的标准，对河道进行分区，每个区内按照之字形布点法较均匀地设置 5 个样点，一个分区内 5 个样点的样品制成混合样作为该采样区的检测样送检。

研究区内共涉及 20 条河道，总面积约 52.2 万 m<sup>2</sup>，单体河道面积在 0.35 万 ~ 9.5 万 m<sup>2</sup> 之间。按照上述要求，该文所包含 20 条河道被分为 65 个区，即共获取送检样品 65 个。

### 2.2 对照标准

研究选取相关土壤利用的重金属环境质量和土壤背景值等两类数据作为检测结果评价和分析的对照，具体如下：

#### 2.2.1 相关土壤环境质量标准

考虑到河道底泥主要用于还田还林，该文主要参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018，以下称《管控标准》）和《绿化种植土壤》（GJ/T 340-2016，以下称《绿化标准》）。

其中，《管控标准》适用于耕地土壤污染风险筛查和分类，满足标准的底泥可以用于《土地利用现状分类》（GB/T 21010-2017）中耕地（01）、园林（02）和草地（04）；《绿化标准》的适用对象为一般绿化种植土壤和绿化养护用土壤，按照重金属浓度分为 4 级，其中 II 级标准针对植物园、公园、学校、居住区等与人密切接触的绿（林）地，III 级标准针对道路绿化、工厂附属等有潜在污染源的、与人群接触较少的绿（林）地，常作为一般河道底泥再利用的比对标准。

#### 2.2.2 环境背景值

背景值是评价污染物在环境中积累水平和污染风险的主要参量。重金属环境或生态风险评价研究中常用到的地积累指数、内梅罗指数、生态风险指数等方法中，环境背景值都是影响计算结果的根本和关键<sup>[6]</sup>。

但国家尚未以强制性技术标准的形式出台国家或分区划的土壤重金属背景参考值。目前能够收集到的上海市重金属背景值有 3 个来源（表 1），被广泛了解且使用较多的是 1987 年上海市调查成果<sup>[9]</sup>和 20 世纪 90 年代中国环境监测总站（以下简称“总站”）发布的背景值（范围）调查结果<sup>[10-11]</sup>，此外还有 2014 年成杭新等<sup>[12]</sup>完成的全国城市土壤化学元素普查。其中上海市与总站结果吻合程度很高，由于总站成果在土壤、水体

2021年12月

等多种环境风险评估中应用更多,考虑到研究间的可比性,该文选择其作为对照标准。

表1 上海地区重金属背景值

Table 1 Background values of heavy metals in references

| 年份/名称    | Cu     | Ni    | Pb    | Zn     | Cr     | Cd    | As    | Hg    |
|----------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1987/代表值 | 28.37  | 31.19 | 25.35 | 83.68  | 74.88  | 0.12  | 8.76  | 0.092 |
| 1990/背景值 | 28.590 | 31.90 | 25.45 | 86.100 | 75.000 | 0.125 | 9.100 | 0.100 |
| 2014/背景值 | 28     | 37    | 27    | 107    | 88     | 0.12  | 7     | 0.075 |

## 2.3 数据分析

研究首先将检测结果与环境标准和背景值的对比。重金属污染的评价基于沉淀学原理提出,目前普遍使用的有地积累指数、潜在生态污染指数、污染负荷指数、内梅罗指数法和综合生态风险指数等。鉴于研究的目的是了解农业河道底泥中各项重金属的风险状况,同时地积累指数侧重评价单项重金属污染,元素环境背景值是唯一计算参量,不会受到其他主观参量的数值选择对结果的影响,因此研究选择地积累指数。具体计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 C_i / (1.5 \times C_n^i) \quad (1)$$

式(1)中, $C_i$ 为元素*i*的实测值, $C_n^i$ 为工业化前重金属最高背景值,单位均为mg/kg。 $I_{geo} \leq 0$ 时,表明该重金属没有污染风险,0~1、1~2、2~3、3~4、4~5、5~6和6~7分别代表着无风险、无风险-中风险、中风险、中-强、强、强-极强和极强等7个等级。

同时,研究还关注检测结果的空间分布特征。由于地积累指数采用的对数计算会缩小数值的绝对差异,不利于观察数值的连续变化,因此研究通过观察样点重金属检测浓度在空间上的分布和变化情况,表征的是重金属的迁移扩散规律。由于该文研究对象并非单一河道,整体上不具备线或面状空间的连续性,无法直接采用空间分析技术,因此这部分只做定性观察,作为背景值对比分析的辅助手段。

## 3 结果与分析

### 3.1 底泥重金属检测

图2展示的是对8种重金属的检测结果。Cu元素在22.761~95.716 mg/kg,主要浓度范围为30~40 mg/kg,但数值分布较为分散;Ni和Pb、Cd和Hg的浓度范围较一致,分别约在25~60 mg/kg和0.05~0.25 mg/kg;Zn和Cr的浓度变化在所有元素中最明显,二者最低均为65.5 mg/kg左右,极差分别为115 mg/kg和60 mg/kg;As是唯一检测浓度主要分布在个位数量级的元素,最小值为4.443 mg/kg,最大为13.289 mg/kg。

从再利用的角度来看,对比2.2.1所述土壤标准,所有样点检测结果均满足GB 15618-2018和GJ/T 340-2016中II类土壤质量标准,能够直接用于还田还林。

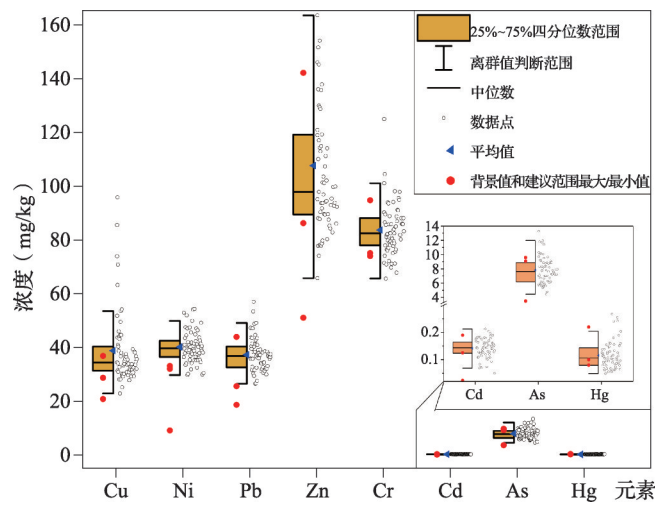


图2 底泥重金属浓度检测结果  
Fig.2 Concentrations of heavy metals in sediment mud samples

3.2 背景值对比

单与背景值对比来看，8种元素均有不同比例的样点超过了背景值（表2）。其中最典型的是Pb，所有样点均超出了背景值；其次为Cu、Ni、Cr、Zn和Cd，均有最少7成的样点超过背景值，Hg和As最少，分别为55%和23%。但是从超过背景值的水平上看，Cu、Hg和Pb是一类，尤其是Cu，表现为大量样点值与背景值接近，但部分样点超出了检测结果的最大异常值判断标准，且超过背景值1倍以上；Ni、Zn、Cr和Cd为一类，样点值较集中地分布在背景值-0.2~0.6倍区间内；As单独为一类，只有少部分样点超出了背景值且超出水平均低于0.6（图3）。

表2 底泥重金属对比和分析  
Table 2 Analysis of heavy metals in bed mud

| 元素              | Cu    | Ni    | Pb     | Zn    | Cr    | Cd    | As    | Hg    |
|-----------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 超背景值<br>样点比例(%) | 92.31 | 92.31 | 100.00 | 80.00 | 84.62 | 72.31 | 23.08 | 55.38 |
| 变异系数            | 0.347 | 0.144 | 0.163  | 0.255 | 0.116 | 0.248 | 0.241 | 0.439 |

地积累指数则提示，较值得关注的是Cu和Hg（图4）。Cu有少量样品达到了“中风险”水平，Hg有部分样点接近“中风险”。其他元素地积累指数均位于低风险和无风险区间内，其中Pb和Zn分别有超过35%和15%的样点地积累指数提示了其含量水平为无风险向中风险过渡；Ni、Cr和Cd仅有少量样点地积累指数位于该区间且小于0.2；尤其是As元素，所有样点地积累指数均小于0，提示“无风险”。

综上所述，研究认为与背景值的直接对比结果和地积累指数的计算结果具有较高的一致性，提示了研究区域内农业河道底泥中Cu和Hg为主、Pb为次的重金属潜在污染风险。但Cu和Hg与Pb的风险类型有所不同：前者表现出的值较大的极差，一定数量的样点浓度甚至超过了检测值本身的最高异常值判断标准，符合较为独立的点源污染的特点；



2021年12月

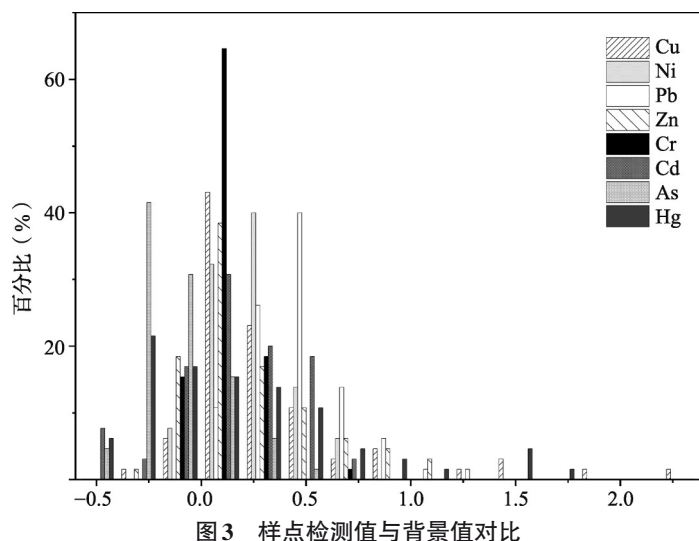


图3 样点检测值与背景值对比

Fig.3 Comparison between background values and results of determination on heavy metals

Pb的检测结果在数值分布上相对集中，更符合面源污染，或受环境整体影响的特点。对检测结果的统计参量——变异系数（表2）的观察也支持上述推论。Hg和Cu分别为重金属中变异系数最高与次高，分别为0.439和0.347，超过或接近了强变异的标准（0.36）。但Pb的变异系数为0.163，在这些重金属中偏小。

然而，上述对照重金属污染风险水平的观察结果与以往研究结论不完全一致。甘婷婷等对长江三角洲的检测分析中提出，青浦区农用地Hg处于轻微污染水平，是青浦区乃至整个上海市积累水平最高的重金属。同时，在其他针对上海市内底泥或农田土壤重金属的大部分研究中，Hg也首当其冲。但是，对包括Cu和Pb在内其他重金属的判断却不尽相同：差异最大的是对Cd的判断，在当前对上海市底泥和农业土壤重研究中，Cd是除Hg外的污染风险最大的重金属，这也和20世纪90年代上海市土壤重金属背景值调查结果相同，但本研究中Cd并未明显超出背景值；而Cu与Pb在类似研究中与其他重金属一样，并没有相对固定的风险评价“排名”<sup>[3-5,7,13]</sup>，如在王磊等<sup>[13]</sup>对上海市某区河道底泥研究中，Cu和Pb的风险与Ni和As相当，谢小进等<sup>[7]</sup>分析认为Zn的污染风险仅次于Cd和Hg；袁文悦对上海市各区重金属的研究中，认为青浦区主要重金属污染风险为Hg和As，与不同类型蔬菜土壤重金属风险又不相同。不过由于以往研究均不针对河道底泥，普查研究表征的是整体平均水平，特定研究对象又多有各自的生产特征，对于本研究中所提示的重金属风险类型还需要结合圩区农业作物特定、水系贯通的生产生活特征和与之物质交换密切的水体、农田等关联对象合并讨论，才能够有效指导圩区重金属污染风险管控。

### 3.3 空间分异与分布特征

农业河道底泥样点采集具备了一般河道或者面空间的部分空间特征，因此研究从单一河道内部和整个研究区域两个视角来观察研究区域内河道重金属检测结果。同时，由前可知，由于Cu和Pb可能分别代表了不同的污染类型，因此该部分以Cu和Pb分别作为典型来阐述（图5）。

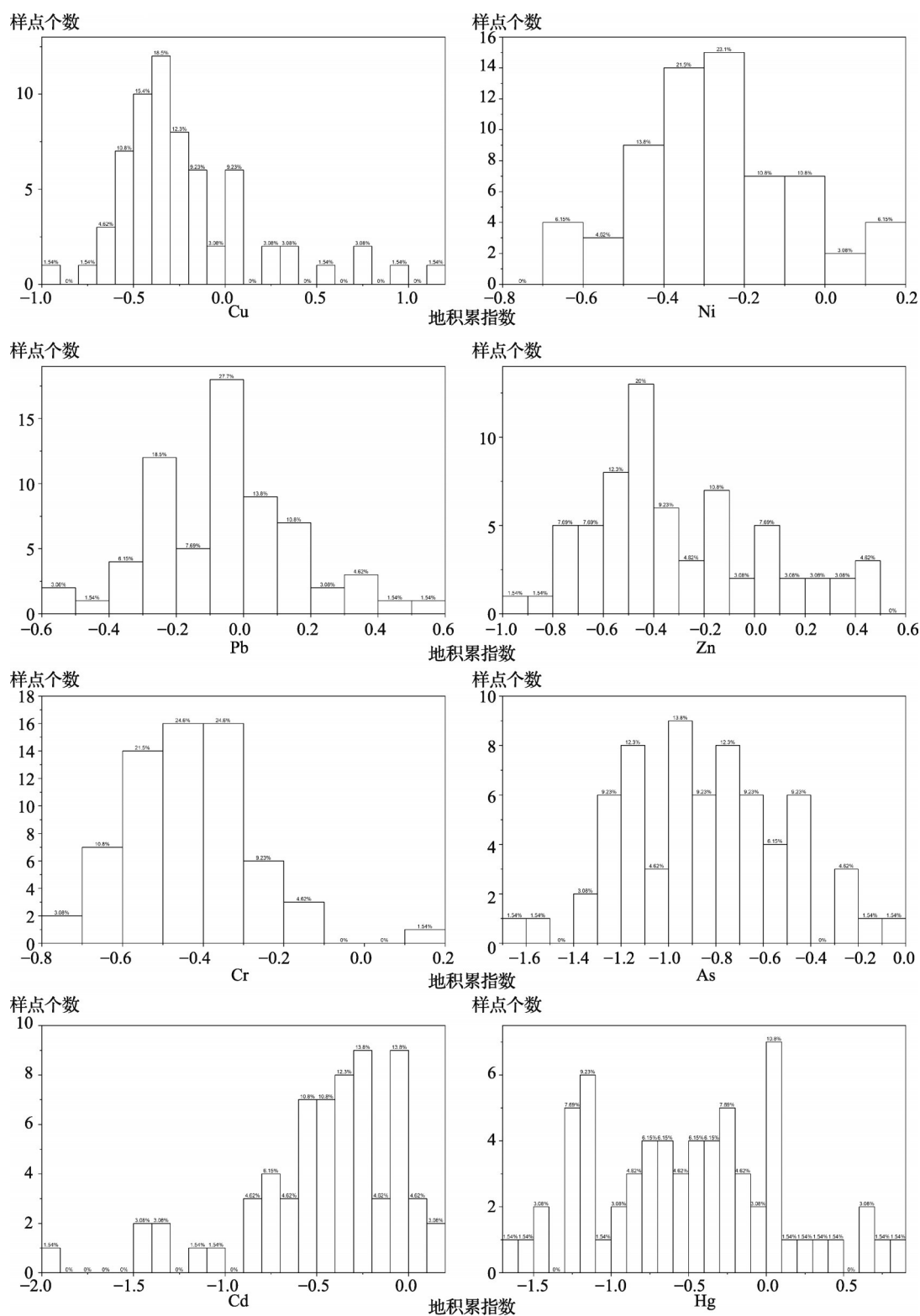


图 4 地积累指数计算结果

Fig.4 Geoaccumulation indices of heavy metals in bed mud

2021 年 12 月

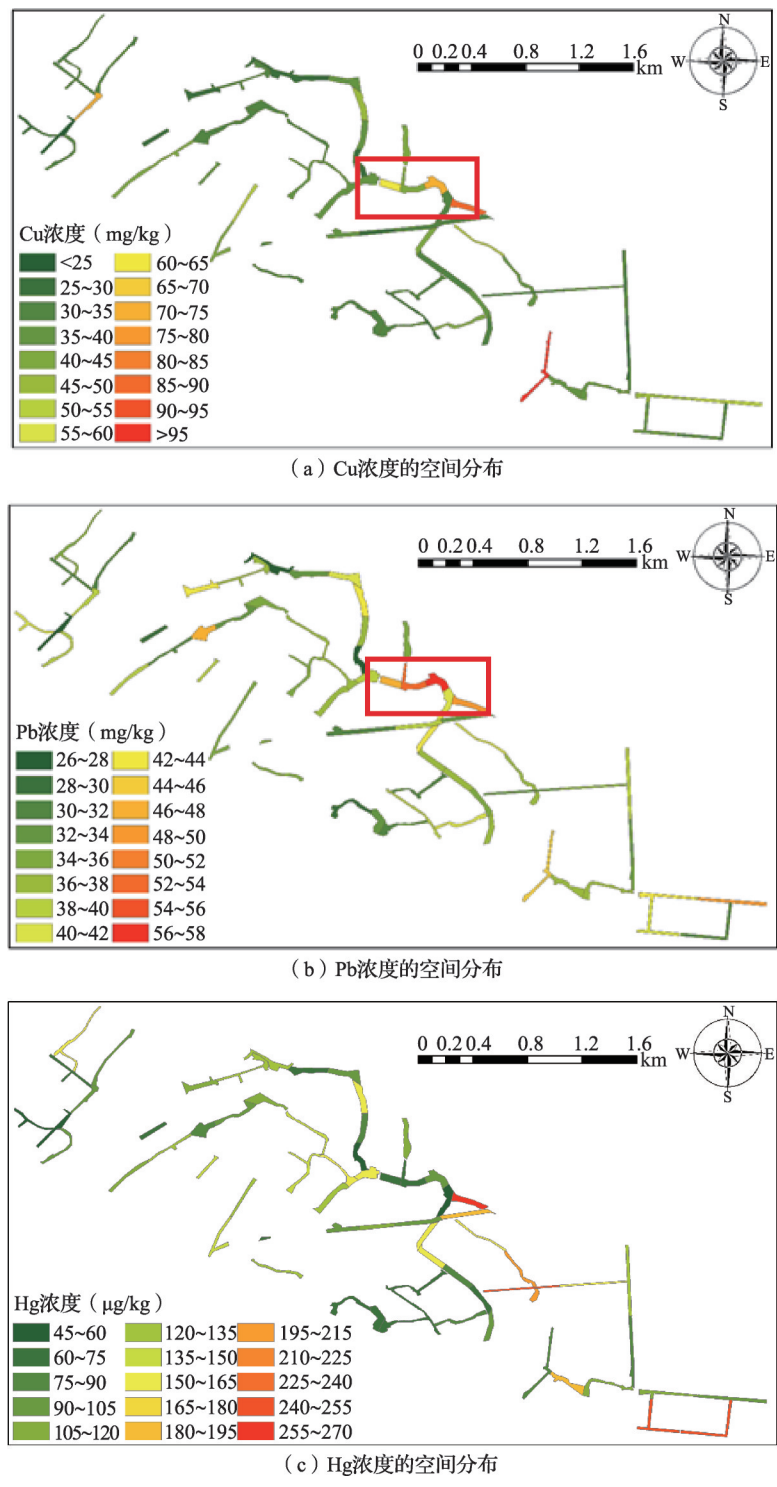


图5 Cu、Pb和Hg样点检测浓度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of detection



从河道内部来看,同一条河道中的采样分区中,Cu浓度不呈现连贯分布或较均匀分布。因为底泥中重金属来源主要为当地土壤母质和与河道水体的物质交换,而河道底泥一般难以直接接触污染源且相对稳定,这一结果意味着河道内部Cu的交换效率较低,即河道内部水体循环较慢,以点源形式进入水体的Cu有相对充裕的时间被吸附并沉积在点源附近。而Pb浓度在单一河道中相对Cu更接近连续变化,结合前述水体流动较慢的推断,研究倾向认为Pb比Cu更多地受到了整体环境变化的影响,比如广泛存在的汽车尾气等。

从整个研究区域来看,Pb浓度的整体空间分布特征提示Pb也具备了一定程度的点源污染特征,但Cu比Pb更为明显。首先,二者均有较明显的“热点”,典型如图5红框内,但Pb浓度随着距该中心点的距离而递减,较为连续,Cu浓度更为断续;同时,在两条河道的交汇处附近,Pb比Cu也观察到较明显的递变现象。

结合以上两点,对比Hg与Pb或Cu可以知道,Hg比Cu更多地具备面源污染特征,而Pb更具备点源污染特征,这也和三者变异系数上的表现一致。

## 4 结论与讨论

研究考察了上海市郊某圩区河道底泥中重金属含量,并主要利用单项环境风险评价指标——地积累指数表征和提示了重金属污染风险,定性地讨论了重金属含量的空间变异特征,并结合计算和观察结果,讨论了研究区农业河道底泥重金属污染风险的来源和类型。通过上述分析和观察,具体结论如下。

(1) 研究区域内农业河道底泥重金属含量没有超过相关再利用标准,可以直接用于一般的还田还林。

(2) 与背景值对比和地积累指数计算结果提示Cu、Hg和Pb是需要关注的主要重金属风险。其中Cu和Hg表现为检测结果变异系数较大,少量点位地积累指数较高,偏向点源污染;Pb浓度变异系数较低,多数点位地积累系数处于无风险向中风险过渡期,较多地提示了受环境中整体含量变化影响的特点。

(3) Cu、Hg和Pb浓度在空间分布的表现支持了(2)中推论,同时也提示了Pb所具备的点源污染特征。

由于底泥重金属来源为相对稳定的成土母质和具有流动特征的循环水体,因此点源污染的特征提示了区域内重金属在水体中的扩散较慢,使得其向底泥的富集过程有相对充裕的时间。从环境风险管控的角度而言,这一特点使得重金属污染风险范围扩大的风险较低,有利于污染的源头控制,但对污染源的摸排工作不利。而针对Pb等受整体环境变化影响更大的重金属,随着城市建成区扩大,人为扰动对包括农业在内的环境的消极影响会越来越频繁、深入和明显,污染控制上会明显被动。而农业河道底泥本身并不是重金属污染最初的“源”,作为水体内部和水体到农田土壤的重要物质交换媒介,疏通的异位处理只能治标。因此,在当前农业河道中没有出现明显重金属污染的情况下,针对不同类型重金属富集特点,应当充分利用自然动植物,增强水体自净能力,中和、降低和延缓环境背景值变化与点源污染带来的重金属环境风险。

2021年12月

## 参考文献

- [1] 汪雅各,王玮.长江口农田土壤和底泥中的重金属分布特征.农村生态环境,1987,4:23-26,66.
- [2] 方宇翹,姚振淮,孙为民,等.城市河流中底泥再悬浮释放重金属的研究.环境科学学报,1987,7(3):289-296.
- [3] 和庆,杨丰源,杨莉.上海郊区养殖底泥重金属污染问题.区域治理,2019,43:13-15.
- [4] 张艳欣,李任政,刘莎莎.苏州河底泥典型重金属空间分布及环境风险评价.中国资源综合利用,2021,39(9):163-166.
- [5] 张丽勃,徐姗姗,宋丽丽.上海市草莓主产区土壤重金属含量的环境质量分析与评价.上海农业学报,2016,32(6):113-117.
- [6] 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.上海农业学报,2018,3(2):6-9.
- [7] 谢小进,康健成,李卫江,等.上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析.环境科学,2010,31(3):768-774.
- [8] 袁文悦.上海城郊土壤及蔬菜重金属污染情况研究.上海:上海交通大学,2017.
- [9] 吕淑萍.上海环境保护志.上海:上海社会科学院出版社,1998.
- [10] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [11] 郑春江.中华人民共和国土壤环境背景值图集.北京:中国环境科学出版社,1994.
- [12] 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.地学前缘,2014,21(3):265-306.
- [13] 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.净水技术,2020,39(10):162-168.

## Spatial distribution and environmental risk of heavy metals in sediment of polder, Shanghai

Liu Yizhu<sup>1, 2</sup>

(1. Shanghai Yaxin Urban Construction Co., Ltd., Shanghai 200436, China; 2. Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** [ **Purpose** ] River mud sediment is now getting extensive attention in recent years, for its role as a carrier between soil and water in geochemical cycle of heavy metals. However, the mud from irrigation channels are barely engaged. [ **Method** ] this research detected 8 heavy metals (Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni and Zn) which are always demanded in environmental standards in channel mud from polder in Shanghai, a typical paddy area. Compared the outcomes with local background values, Geoaccumulation Indices (GI), as well as their spatial variabilities. [ **Result** ] The results showed that all elements in the mud have met environmental standards, but Cu, Hg and Pb in some samples clearly exceeded correspondent background values, some GI of Cu and Hg reached or pretty close to medium risk level, and inconspicuously spatial association of elements. [ **Conclusion** ] The results indicated that the study area is more likely receiving pollutants from point sources, while the prime and minor risks of heavy metals are Cu and Hg, and Pb, respectively.

**Key words:** irrigation channels; sediment mud; heavy metal; environmental risk