

## 杭州湾不同围垦年限农田土壤重金属污染风险分析

辛福萌<sup>1</sup>, 吕笑非<sup>1,2,3,4\*</sup>, 徐琳雅<sup>3,4</sup>, 李昊泽<sup>1</sup>, 杨瑜周<sup>1</sup>, 张玉楠<sup>1</sup>, 江梦颖<sup>1</sup>, 戚可欣<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 3. 浙江大学水土资源与环境研究所, 浙江杭州 310058; 4. 浙江省农业资源与环境重点实验室, 浙江杭州 310058)

**摘要** 以杭州湾滨海围垦湿地为研究对象, 采用空间代时间的方法对不同围垦年限(50、100、300、500、700、1 000、2 000年)的农田土壤重金属铬(Cr)、镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)含量及分布特征进行分析, 并应用地累积指数( $I_{geo}$ )法、内梅罗(Nemoro)指数法进行土壤污染评价。结果表明, 重金属含量在不同围垦年限农田土壤中的变化趋势相似, 随着围垦年限的增加而呈现上升趋势。土壤重金属含量与土壤pH、电导率、总磷含量呈负相关, 与总碳、总氮含量呈正相关; 各重金属元素之间也呈现出一定的相关性。跨度长达2 000年的围垦时间梯度更准确地揭示了土壤理化性质及重金属变化规律, 为促进杭州湾滨海湿地农田高效可持续发展利用、把握杭州大湾区建设整体污染状况、实现对围垦滩涂的安全利用提供参考依据。

**关键词** 滨海湿地; 围垦年限; 重金属污染; 地累积指数; 内梅罗指数; 相关性分析

中图分类号 X 131; X 53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)03-0059-06

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2022. 03. 016



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Risk Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil with Different Reclamation Years in Hangzhou Bay

XIN Fu-meng<sup>1</sup>, LÜ Xiao-fei<sup>1,2,3,4</sup>, XU Lin-ya<sup>3,4</sup> et al (1. College of Quality & Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008; 3. Institute of Soil Water Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058; 4. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou, Zhejiang 310058)

**Abstract** Taking the Hangzhou Bay Coastal Reclamation Wetland as the research object, the method of space to replace time was used to analyze the content and distribution characteristics of heavy metals Cr, Cd, Pb, Zn, Cu and Ni in farmland soils of different reclamation years (50, 100, 300, 500, 700, 1 000, 2 000). The results showed that the change trend of heavy metal content in farmland soils of different reclamation years was similar, and showed an upward trend with the increase of reclamation years. Soil heavy metal content was negatively correlated with soil pH, EC and TP content, and positively correlated with total carbon and TN content; there was also a certain correlation between heavy metal elements. The 2 000-year-long reclamation time gradient more accurately revealed the physical and chemical properties of the soil and the law of heavy metal changes, in order to provide reference for promoting the efficient and sustainable use of coastal wetlands, grasping the overall pollution status of the region and realizing the safe use of reclamation wetlands.

**Key words** Coastal wetlands; Reclamation years; Heavy metal pollution; Geoaccumulation index; Nemoro index; Correlation analysis

重金属污染问题随着我国经济社会的快速发展和人类活动的强烈干扰日益严重, 探寻其来源, 解决污染问题已迫在眉睫, 不容忽视<sup>[1-3]</sup>。近年来, 由于沿海大开发导致的工业化、城镇化进程加快, 人为干扰活动的加剧以及经济的快速发展, 工业、农业向自然界的排污增多使得土壤重金属含量明显升高<sup>[4-7]</sup>。据估算, 全世界每年排放到环境中的镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)、铜(Cu)、镍(Ni)分别约为 $1.0 \times 10^6$ 、 $1.500 \times 10^6$ 、 $3.4 \times 10^6$ 、 $1.0 \times 10^6$  t<sup>[8]</sup>。土壤中重金属的来源及其污染程度受人类活动影响较大, 滩涂湿地土壤受镉、锌、镍等重金属污染十分严重, 给滩涂围垦带来了严重的生态风险<sup>[9-10]</sup>。重金属污染很难因自然退化过程发生迁移和降解, 更有可能在沉积物和土壤中产生长时间的积累, 其具备隐蔽性、长期性、不可逆性等特点<sup>[11-12]</sup>, 其经由污水灌溉、大气沉

降、污泥农用等途径进入土壤, 再通过食物链的放大效应而产生富集作用, 进而可以在生物体内产生积累对生命健康产生潜在的危害<sup>[13-15]</sup>, 已引起人们的广泛关注<sup>[16]</sup>。近年来, 国内外一些学者对各种不同场地的重金属污染进行了分析并开展风险评估。如段嘉欣等<sup>[17]</sup>采用地累积指数( $I_{geo}$ )方法对四川宜宾市富硒酸化水稻土的重金属污染程度进行表征, 发现土壤中铬和镍几乎没有污染, 砷、铜、锌、铅、汞为无污染—轻度污染, 镉属于中度—强度污染; 潘存庆等<sup>[18]</sup>在金川区某土壤重金属污染的调查中采用内梅罗(Nemoro)综合指数法, 发现调查区土壤铜、镍、镉和砷存在环境风险。通过重金属污染评价可以充分了解土壤的污染现状以及风险程度, 为保育土壤质量、维持滨海湿地生态的可持续发展和土壤环境重金属污染的防治提供理论支持和科学依据。

作为我国海陆交错带生态系统的南北分界线, 杭州湾的生态安全对我国东南沿海的可持续发展至关重要<sup>[19]</sup>。杭州湾滨海湿地是我国重要湿地之一, 也是我国滨海湿地的南北过渡带, 其生物多样性丰富且具有重要的生态系统和生物多样性保护作用; 同时对沪、杭、甬城市群的水质净化和生态安全具有极其重要的意义。杭州湾南岸具有很长的滨海湿地改造历史, 围塘造田历史悠久, 是我国农业种植等人类生产活动影响最剧烈的区域之一。同时, 作为我国经济最为发达的区域之一, 杭州湾海洋开发活动极为频繁, 近几年来, 浙江

**基金项目** 浙江省自然科学基金项目(LQ20C030006, LD19D060001); 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所)2020年度开放基金项目(SEPR2020-11); 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金项目(2020KFJJ08); 浙江省农业绿色生物制造核心菌种改良重点实验室开放课题(2020KFKT07); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202010356040); 中国计量大学开放实验项目(XL2020069)。

**作者简介** 辛福萌(1999—), 女, 江西赣州人, 从事土壤重金属污染和湿地微生物研究。\*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事滨海湿地土壤研究。

**收稿日期** 2021-05-11; **修回日期** 2021-06-25

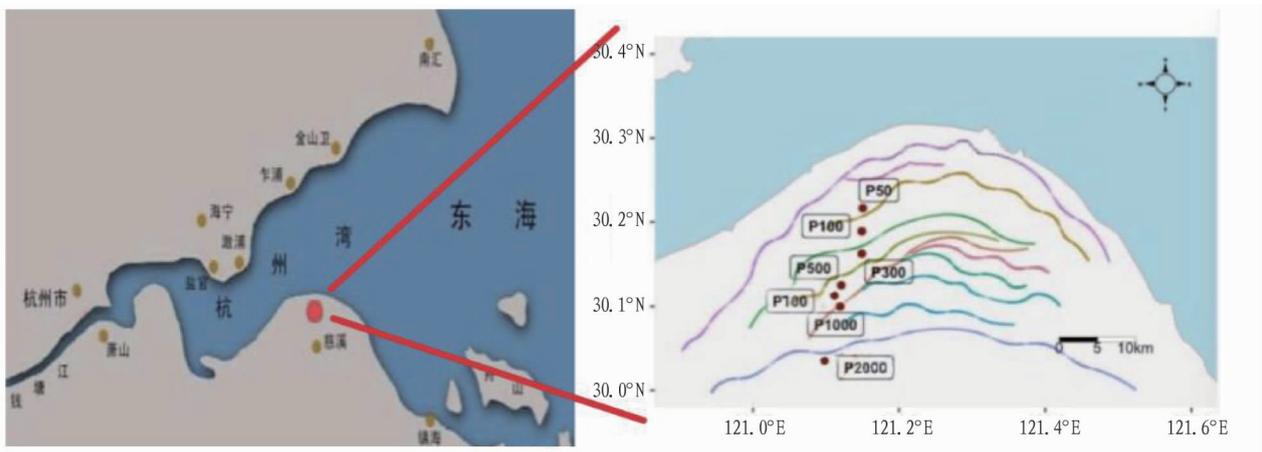
省千里高标准海塘的建设工程、杭州湾跨海大桥工程以及杭州湾新城建设工程等的实施都已经或正在对杭州湾海岸带产生重大影响,为城市建设和经济发展拓展了道路。但滨海湿地围垦导致长期的生态破坏,其严重破坏了沿海生态系统的结构,有研究表明,土地围垦创造的经济效益无法补偿生态系统服务价值的损失<sup>[20]</sup>。滨海湿地改造虽然带来了可观的经济利益,但是由于工农业的发展和人类活动的影响,土壤重金属含量发生改变导致土壤质量产生影响<sup>[21]</sup>。因此,为探寻围垦年限是否对土壤重金属含量有影响,可设置长跨度的围垦时间梯度,对不同围垦年限的农田土壤开展杭州湾滨海湿地地区土壤重金属含量的研究,对于促进杭州湾滨海湿地农田高效可持续利用、把握区域整体污染状况、改善污染防治措施、实现生态价值和经济效益的平衡具有重要意义。该研究在杭州湾南岸设置了跨度长达2 000年的围垦时间梯度,对不同围垦年限的农田土壤中铬(Cr)、镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)等重金属含量及变化趋势进行分析,并运用地积累指数法和内梅罗指数法进行重金属污染评价、重金属相关性分析,以此调查评估杭州湾南岸区域内农田土壤重金属的污染状况。该研究可以更好地揭示理化因子与重金属含量存在的关系,为杭州湾围垦农

田土壤合理利用和可持续发展提供思路方法,为滨海围垦区域土壤重金属污染研究提供更多的案例依据,为即将用于农业生产的滨海滩涂资源以及现有土地利用状况的发展方向提供指导。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区域概况** 杭州湾位于浙江省东部,形状为喇叭口形状,是延伸的河口海湾,其西面与钱塘江接壤、东部延伸至东海。该区域内气候为北亚热带海洋性季风气候,年平均气温为16℃,年平均降水量为1 273 mm,日照时数为2 038 h,无霜期为244 d。研究区选在杭州湾南岸的慈溪三北滩涂湿地核心地块(图1)。

**1.2 样品采集** 根据资料收集以及现场勘察,以空间代时间的方法沿着杭州湾南岸海岸线方向由北向南选择7处不同围垦年代的农田土壤作为采样点(图1和表1)。根据围垦历史分别采集围垦50、100、300、500、700、1 000和2 000年样点。对每一个取样点随机布设3个样方(5 m×5 m),且样方间隔不小于10 m,每个样方按照梅花型取5个土壤样品(0~20 cm)混合为一个样。土壤样品采集后放入聚乙烯袋中,密封以避免样品被破坏或被污染。样品经冷冻干燥仪冻干、研磨、过筛(2 mm)后,密封冷藏保存。



注:P50代表围垦50年,P100代表围垦100年,以此类推

Note:P50 represents 50 years of reclamation, P100 represents 100 years of reclamation, and so on.

图1 研究区域地理位置及样点布设

Fig. 1 Geographical location and sample point layout of the study area

表1 采样点环境描述

Table 1 Sampling point environment description

围垦年限 Reclamation years//a	采样坐标 Sampling coordinates	土地利用 Land use	潜在污染源(周边工厂) Potential pollution source (Surrounding factories)
50	121°09'40"E, 30°17'14"N	油菜	塑料模具、纺织
100	121°08'55"E, 30°15'35"N	空地	小电器、机械五金、纺织
300	121°08'55"E, 30°13'59"N	油菜	纺织、机械五金、汽配产业
500	121°07'13"E, 30°11'44"N	空地	汽配产业、机械五金
700	121°09'20"E, 30°10'21"N	空地	小电器、塑料模具
1 000	121°07'08"E, 30°10'13"N	水稻	纺织、塑料模具、机械五金
2 000	121°09'40"E, 30°09'05"N	空地	小电器、塑料模具、机械五金

## 1.3 分析方法

**1.3.1 样品分析.** 通过测定土壤理化因子(pH、含盐量、碳、氮、磷)含量和重金属(Cd、Cu、Zn、Pb、Ni、Cr)含量进行土壤质量分析及重金属污染分析<sup>[19]</sup>。土壤pH和电导率分别用pH仪和电导仪测定。土壤总碳、总氮测定:取过100目筛的风干土壤100 mg左右,用元素分析仪(Vario Micro cube,德国Elementar)测定土壤中总碳、总氮的百分含量。土壤全磷测定:采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法。土壤重金属含量测定:先用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解提取土壤重金属全量,再用于测定Cd、Cu、Zn、Pb、Ni、Cr,其中Cd、Cu、Zn、Pb、Ni先用硝酸-高氯酸消解,再选用原子吸收分光光度计进行测定,采用原子吸收法;Cr则选用火焰原子吸收分光光度法

进行测定。

### 1.3.2 重金属污染评价。

**1.3.2.1 地累积指数( $I_{geo}$ )法。**地累积指数是一种反映沉积物中重金属富集程度的常用定量指标。该指数不仅考虑了人为污染因素和环境地球化学背景值,还特别考虑到自然成岩作用对背景值的影响,被广泛应用于重金属(大气沉降、土壤和现代沉积物)的污染评价。其表达公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{\alpha B_n} \right) \quad (1)$$

式中, $C_n$ 为样品中元素 $n$ 的浓度; $B_n$ 为背景浓度; $\alpha$ 为修正指数,通常取1.5。地累积指数污染程度可分为7级,污染程度由无至极强, $I_{geo} < 0$ 表示无污染, $0 \leq I_{geo} < 1$ 表示轻度污染, $1 \leq I_{geo} < 2$ 表示中度污染, $2 \leq I_{geo} < 3$ 表示中度污染—强度污染。在该研究中,选用浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值(滨海相)作为地累积的参比标准( $B_n$ 值),分别为Cr 92.3 mg/kg、Ni 40 mg/kg、Cu 28.4 mg/kg、Zn 92.4 mg/kg、Cd 0.111 mg/kg、Pb 26.4 mg/kg<sup>[22]</sup>。

**1.3.2.2 内梅罗(Nemoro)指数法。**内梅罗指数法是目前国内外综合污染指数计算的最常用的方法之一。其表达公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(P_i)^2 + P_{imax}^2}{2}} \quad (3)$$

式中, $P_i$ 为 $i$ 重金属元素的污染指数; $C_i$ 为重金属含量实测值; $S_i$ 为土壤环境质量标准值[以《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)为标准]; $P_{综}$ 是采样点的综合污染指数; $P_{imax}$ 为 $i$ 采样点重金属污染物单项污染指数中的最大值; $\bar{P}_i$ 为单因子指数平均值。 $P_{综}$ 数值越大,土壤受污染程度越严重。

表3 杭州湾滨海围垦湿地农田土壤pH、盐分及养分含量变化

Table 3 Changes of soil pH, salinity and nutrient content of farmland soil in Hangzhou Bay Coastal Reclamation Wetland

围垦年限 Reclamation years//a	总磷 TP mg/kg	有效磷 Available P mg/kg	可溶性有 机碳 DOC mg/kg	总碳 TC %	可溶性 有机氮 DON mg/kg	总氮 TN %	pH	电导率 EC μS/cm
50	1 101±78	78.65±3.23	87.59±3.33	1.29±0.03	65.17±3.91	0.081±0.004	7.720±0.050	181.0±5.2
100	1 725±66	74.00±5.19	145.42±15.38	1.19±0.05	44.53±4.60	0.096±0.003	7.685±0.078	227.5±52.0
300	1 364±49	65.67±13.26	72.10±2.31	0.74±0.01	60.37±7.26	0.059±0.002	7.790±0.107	119.9±17.8
500	1 040±8	67.90±6.97	138.07±1.98	0.86±0.03	29.79±1.38	0.087±0.002	6.594±0.066	85.3±7.5
700	964±84	57.84±4.13	212.94±35.36	1.66±0.04	38.87±4.72	0.185±0.007	6.259±0.054	132.5±23.8
1 000	814±60	50.71±5.68	158.69±26.14	1.33±0.09	46.14±12.37	0.143±0.014	6.458±0.152	84.4±24.8
2 000	524±8	31.87±2.79	102.55±5.80	1.67±0.06	84.49±4.85	0.199±0.008	6.533±0.055	152.2±19.9

**2.2 重金属含量及变化规律** 从图2可以看出,全量Cr、Cu、Cd含量变化相似,均在围垦300年的农田土壤中含量最低,在围垦700年的农田土壤中含量最高;Cd含量在围垦500~700年的农田土壤增加极显著( $P < 0.01$ ),Cu含量在围垦1 000~2 000年的农田土壤下降显著( $P < 0.05$ )。全量Ni含量除了围垦50~100年的农田土壤变化与全量Cr、Cu、Cd含量不同,其余年限变化相似。全量Pb、Zn含量变化相似,均在围垦300年的农田土壤含量最低,在围垦1 000年的农

土壤分级标准见表2。

表2 土壤环境质量分级标准

Table 2 Soil environmental quality classification standards

等级 Grading	$P_i$	$P_{综}$	污染等级 Pollution degree	污染水平 Pollution level
1	$P_i \leq 0.7$	$P_{综} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻污染	污染物超过起初污染值,作物开始污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中污染	土壤和作物污染明显
5	$P_i > 3.0$	$P_{综} > 3.0$	重污染	土壤和作物污染严重

**1.4 数据处理** 利用Microsoft Excel软件进行试验数据和统计数据检验,进行农田土壤理化特征及重金属污染变化规律分析。

## 2 结果与分析

**2.1 土壤理化性质变化** 从表3可以看出,农田土壤的pH从围垦50年到围垦2 000年由弱碱变成弱酸。围垦300年到围垦700年的样地pH差异极显著( $P < 0.01$ )。前人对围垦土壤理化性质的各类相关研究表明,滩涂围垦后土壤pH整体呈现下降,其原因可能是在农业生产时投入的化学氮肥具有致酸效果导致的<sup>[23]</sup>。农田土壤的电导率(EC)总体也会呈现下降趋势,其原因可能是围垦后降雨和灌溉带走了土壤中的盐分<sup>[24-25]</sup>。围垦过程中,农田土壤中的总磷和有效磷的含量持续降低;总碳、总氮含量在围垦前期(围垦500年)波动较大,到了围垦700年的农田土壤总碳、总氮含量都较高且变化较稳定,可能与土壤的利用方式相关。长跨度的围垦时间梯度展现了在2 000年围垦过程中土壤理化性质发生的改变,揭示了在长时间尺度内围垦农田土壤理化性质的变化规律,为增强土壤肥力、改良土壤利用方式和管理方法提供思路。

田土壤含量最高。研究表明,土壤重金属含量受大型排污口、围垦、大型工程设施、近海养殖等污染源的影响<sup>[26]</sup>。在长达2 000年围垦时间梯度的围垦过程中全量重金属含量发生的改变,揭示了在长时间尺度内围垦农田土壤重金属含量的变化规律,结合杭州湾区域周围产业的布局(表1)有利于平衡产业发展创造的经济效益与生态环境受到的破坏,并探寻重金属污染的可能来源。全量重金属含量可能与产业布局相关,重金属元素含量上升,可能是因为建设生产过程中

重金属污染土壤,土壤腐殖质中的部分官能团在螯合物形成过程中将重金属离子积累在土壤中。

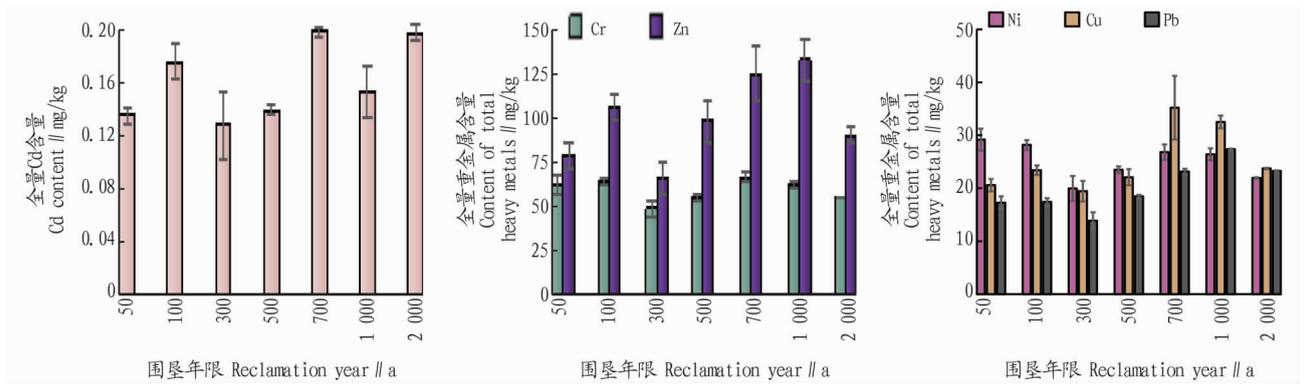


图2 杭州湾滨海围垦湿地农田土壤全量重金属含量

Fig. 2 Content of total heavy metals of the farmland in Hangzhou Bay Coastal Reclamation Wetland

从图3可以看出,大部分有效态重金属的含量总体呈现随着围垦年限的增加而升高的趋势,其中有效态Cr在围垦300~500年的农田土壤增加显著( $P < 0.05$ );有效态Cu在围垦300~500年的农田土壤增加显著( $P < 0.05$ ),700~1000年增加极显著( $P < 0.01$ );有效态Cd在围垦50~700年的农田土壤增加显著( $P < 0.05$ )。长跨度的围垦时间梯度展现了在长期围垦过程中土壤有效态重金属含量的改变,揭示了在长时间尺度内有效态重金属含量的变化规律。土壤中有有效态

重金属含量不仅与土壤中全量重金属含量相关,还与重金属在土壤环境中的行为相关,研究表明,土壤理化性质的改变会直接影响重金属在土壤环境中的行为<sup>[27-29]</sup>。该研究同样显示有效态重金属含量与土壤理化因子含量(表3)的变化相关。另外,有效态重金属也可能被土壤生物吸收或迁移,从而含量存在波动。长达2000年的围垦时间梯度更有利于探寻土壤理化因子与有效态重金属含量的相关性,为修复土壤和减少有效态重金属含量提供依据。

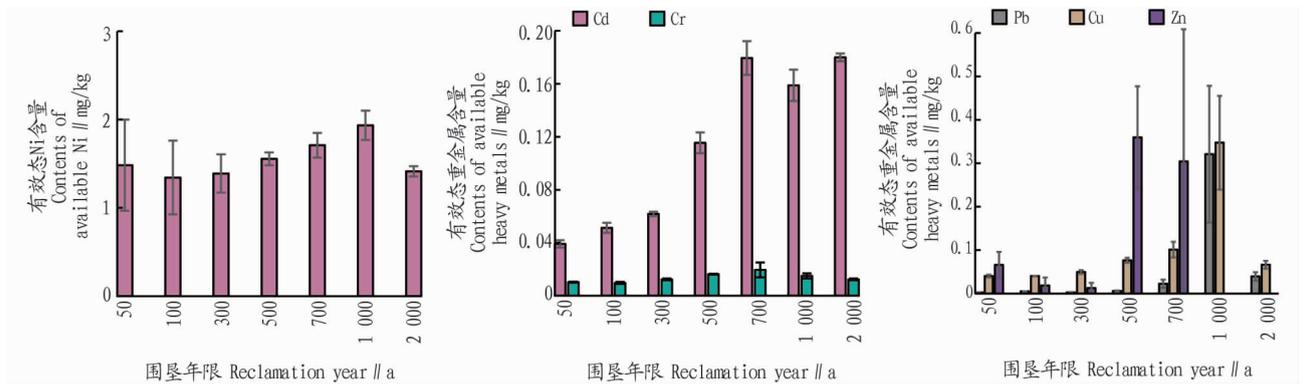


图3 杭州湾滨海围垦湿地农田土壤有效态重金属含量

Fig. 3 Contents of available heavy metals in farmland soil of Hangzhou Bay Coastal Reclamation Farmland

**2.3 重金属污染分析评价** 地累积指数指出(表4),杭州湾滨海围垦湿地农田土壤中Cd污染在围垦100、700和2000年区域存在轻度污染。根据内梅罗指数法计算出的重金属污染指数(表5)可以发现,大部分重金属在围垦过程中污染等级为安全( $P < 0.7$ ),Cu在围垦700年时污染指数达0.704,

到达警戒线水平。计算土壤综合污染指数( $P_{综}$ )发现,水稻土在围垦过程中污染等级保持安全。通过2种评价方法得出,目前杭州湾围垦湿地土壤中重金属污染程度较低,但是仍存在潜在风险,说明在今后土地利用过程中需要密切关注土壤的重金属污染风险。

表4 杭州湾滨海围垦湿地农田土壤各重金属地累积指数

Table 4 Accumulation index of heavy metals in farmland soil of Hangzhou Bay Coastal Reclamation Wetland

围垦年限 Reclamation years//a	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
50	-1.156 3	-1.040 4	-1.049 9	-0.807 7	-0.300 4	-1.197 1
100	-1.123 4	-1.090 9	-0.863 5	-0.394 6	0.079 7	-1.185 9
300	-1.501 5	-1.588 7	-1.131 2	-1.069 9	-0.376 8	-1.514 4
500	-1.328 0	-1.352 6	-0.947 8	-0.499 0	-0.251 7	-1.099 8
700	-1.056 9	-1.162 0	-0.275 1	-0.153 7	0.253 9	-0.774 4
1 000	-1.160 6	-1.184 2	-0.389 9	-0.067 2	-0.128 3	-0.533 9
2 000	-1.339 6	-1.452 7	-0.844 4	-0.625 1	0.243 5	-0.768 2

表 5 杭州湾滨海围垦湿地农田土壤各重金属污染指数

Table 5 Heavy metal pollution index of farmland soil in Hangzhou Bay Coastal Reclamation Wetland

围垦年限 Reclamation years//a	$P_i$						$P_{\text{综}}$
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
50	0.177	0.154	0.206	0.264	0.169	0.072	0.223
100	0.182	0.148	0.234	0.351	0.220	0.073	0.286
300	0.140	0.105	0.194	0.220	0.160	0.058	0.187
500	0.184	0.235	0.221	0.392	0.233	0.132	0.323
700	0.266	0.383	0.704	0.623	0.496	0.232	0.591
1 000	0.248	0.377	0.650	0.661	0.381	0.274	0.559
2 000	0.182	0.219	0.237	0.359	0.329	0.166	0.309

**2.4 相关性分析** 从表 6~7 可以看出,土壤中重金属含量与土壤理化因子含量之间以及土壤重金属含量之间都存在一定相关性,但相关系数大小有一定差异。大部分重金属含量与土壤中的盐分、总磷含量呈现负相关,与土壤中的总碳、总氮含量呈现正相关;全量 Cu 与全量 Zn 相关系数达 0.906,

呈显著正相关( $P<0.05$ );全量 Ni 与全量 Cr 相关系数达 0.907,呈显著正相关( $P<0.05$ );有效态 Cd 与 pH 相关系数达-0.951,呈显著负相关( $P<0.05$ );有效态 Cu 与有效态 Pb 相关系数达 0.986,呈显著正相关( $P<0.05$ )。

表 6 重金属元素全量含量和土壤理化因子的相关关系

Table 6 Correlation between total content of heavy metal elements and soil physicochemical factors

因子 Factor	pH	盐分 Salinity	总磷 TP	总碳 TC	总氮 TN	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
pH	1										
盐分 Salinity	0.590	1									
总磷 TP	0.746	0.524	1								
总碳 TC	-0.546	0.228	-0.570	1							
总氮 TN	-0.786	-0.090	-0.715	0.902*	1						
Cr	-0.243	0.347	0.071	0.602	0.357	1					
Ni	0.080*	0.475	0.239	0.368	0.020	0.907*	1				
Cu	-0.736	-0.296	-0.357	0.623	0.689	0.664	0.334	1			
Zn	-0.699	-0.230	-0.225	0.501	0.561	0.718	0.467	0.906*	1		
Cd	-0.540	0.297	-0.316	0.838*	0.873*	0.459	0.136	0.563	0.490	1	
Pb	-0.828*	-0.365	-0.704	0.709	0.807*	0.458	0.207	0.813*	0.815*	0.534	1

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ )

Note: \* means significant correlation ( $P<0.05$ )

表 7 重金属元素有效态含量和土壤理化因子的相关关系

Table 7 Correlation between available content of heavy metal elements and soil physicochemical factors

因子 Factor	pH	盐分 Salinity	有效磷 Available P	可溶性有 机碳 DOC	可溶性有 机氮 DON	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
pH	1										
盐分 Salinity	0.590	1									
有效磷 Available P	0.672	0.331	1								
可溶性有机碳 DOC	-0.671	-0.149	-0.113	1							
可溶性有机氮 DON	0.232	0.305	-0.467	-0.654	1						
Cr	-0.811*	-0.674	-0.282	0.734	-0.543	1					
Ni	-0.671	-0.645	-0.253	0.610	-0.410	0.652	1				
Cu	-0.515	-0.573	-0.362	0.392	-0.231	0.354	0.897*	1			
Zn	-0.479	-0.379	0.204	0.539	-0.682	0.747	0.217	-0.157	1		
Cd	-0.951*	-0.509	-0.843*	0.570	0.006	0.719	0.578	0.486	0.262	1	
Pb	-0.429	-0.488	-0.390	0.278	-0.100	0.204	0.823*	0.986*	-0.310	0.429	1

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ )

Note: \* means significant correlation ( $P<0.05$ )

各重金属元素全量与总氮含量之间有不同程度的正相关,全量 Pb、Cd 元素与总氮含量呈显著正相关( $P<0.05$ ),全量 Cr、Cu、Zn 元素与总氮含量呈一定程度正相关。表明重金属与总氮具有相似的来源或地球化学过程。一般认为氮主

要来源于陆源碎屑颗粒的输送,因此可以认为陆源输送对重金属元素含量有重要影响。各重金属元素有效态与有机碳含量之间有不同程度的正相关,表明有机碳含量的升高可促进重金属 Cr、Cd、Pb、Zn、Cu、Ni 在沉积物中的蓄积作用。

长达2 000年的围垦时间梯度能更好地揭示重金属含量与土壤理化因子的相关性,其相关性分析与赵一鸣等<sup>[30-31]</sup>的研究结果相似,土壤理化性质会影响重金属结合形态,且影响程度较大。重金属参与土壤中氧化还原、离子交换、专性吸附和溶解平衡等一系列反应,其形态、生物有效性也发生变化。因此,这些重金属元素的生物有效性也受土壤pH、盐分、土壤中碳氮磷等元素含量变化的影响。土壤中重金属的释放特性与重金属的赋存状态存在较为密切的相关,例如土壤中绝大多数重金属的可溶性受土壤pH控制。土壤pH降低可导致溶解、释放碳酸盐和氢氧化物结合态重金属,同时也趋于增加释放吸附态重金属。土壤理化性质的变化会引起土壤重金属结合形态的改变,使得已受污染的土壤具有较好的修复潜力,因此可以通过调控土壤理化因子达到降低土壤重金属含量的目的,恢复和保护受污染土壤的生态功能。长跨度的围垦时间梯度展现了在2 000年围垦过程中土壤理化性质的改变影响重金属含量的变化,揭示了在长时间尺度内两者的相关性及其变化规律,为削减土壤重金属含量和修复土壤提供方向。

### 3 结论与讨论

(1)在跨度长达2 000年的围垦时间梯度,随着围垦年限的增加,杭州湾滨海湿地农田土壤理化性质发生改变,土壤重金属含量总体呈现增加趋势。较长的时间梯度重现了长时间围垦过程中土壤理化性质及重金属变化规律,更好地揭示了理化因子与重金属含量存在的相关性,为探索杭州湾围垦农田土壤生态恢复方法提供了数据支撑和科学依据,对于指导围垦农田土壤的生产布局和结构调整具有重要意义。

(2)地累积指数法、内梅罗指数法进行重金属污染评价,结果表明不同重金属含量在不同围垦年限农田土壤中的变化相似,随着围垦年限的增加而呈现出上升趋势,偶有出现轻污染的情况,其污染来源与工业发展息息相关,存在潜在的风险,须引起高度重视。就我国出台的《土壤污染防治行动计划》(简称《土十条》)展开土壤防治工作,制定安全高效的修复方案并实现重金属污染有效减排和土壤生态恢复,在今后的土地利用过程中也需要密切关注土壤的重金属污染风险,避免造成环境和人类健康的巨大风险。

(3)土壤重金属含量与土壤pH、电导率及营养元素含量等环境因子之间存在密切的相关关系,可以通过调控环境因子达到削减土壤重金属含量的目的,采取相应的监测手段并且对受污染土壤进行修复,减少重金属元素被植物或其他生物吸收,从而进入食物链影响人类生命健康。同时为滨海围垦区域土壤重金属污染研究提供更多的案例依据,为即将用于农业生产的滨海滩涂资源以及现有土地利用状况的发展方向提供指导,为后期针对性地调控农田土壤肥力、保育土壤质量、维持滨海湿地生态的可持续发展提供理论依据。

### 参考文献

[1] 柴磊,王新,马良,等.基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J].中国环境科学,2020,40(9):3919-3929.  
[2] HAN Z X,ZHU Z,WU D D,et al. Distribution and implications of heavy metal in Jiangsu coastal sediments in China[J]. Advanced materials re-

search,2012,549:957-960.  
[3] 姚荣江,杨劲松,孟庆峰,等.苏北沿海某滩涂区土壤重金属含量及其污染评价[J].环境科学学报,2012,25(5):512-518.  
[4] BI X Y,LI Z G,ZHUANG X C,et al. High levels of antimony in dust from e-waste recycling in Southeastern China[J]. Science of the total environment,2011,409(23):5126-5128.  
[5] IP C C M,LI X D,ZHANG G,et al. Over one hundred years of trace metal fluxes in the sediments of the Pearl River Estuary, South China[J]. Environmental pollution,2004,132(1):157-172.  
[6] WANG S L,CAO X Z,LIN C Y,et al. Arsenic content and fractionation in the surface sediments of the Guangzhou section of the Pearl River in Southern China[J]. Journal of hazardous materials,2010,183(1/2/3):264-270.  
[7] CHEN B,FAN D J,LI W R,et al. Enrichment of heavy metals in the inner shelf mud of the East China Sea and its indication to human activity[J]. Continental shelf research,2014,90:163-169.  
[8] MONTANARELLA L,CHUDE V,YAGI K,et al. Status of the World's Soil Resources (SWSR)-Main Report[R]. 2015.  
[9] 李取生,楚蓓,石雷,等.珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1422-1426.  
[10] 付红波,李取生,骆承程,等.珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染[J].农业环境科学学报,2009,28(6):1142-1146.  
[11] 汪琳琳,方凤满,蒋炳言.中国菜地土壤和蔬菜重金属污染研究进展[J].吉林农业科学,2009,34(2):61-64.  
[12] 杨晶,赵云利,甄泉,等.某灌区土壤与蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J].生态与农村环境学报,2014,30(2):234-238.  
[13] 孟庆峰,杨劲松,姚荣江,等.滩涂围垦区土壤重金属调查及生态风险评估:以盐城市滨海港镇为例[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2249-2257.  
[14] 郑江平,肖长峰,李复煌.重金属元素对动物和生态环境的影响研究[J].饲料研究,2020,43(8):152-157.  
[15] 师荣光,周启星,刘凤枝,等.天津郊区土壤-蔬菜系统中Cd的积累特征及污染风险[J].中国环境科学,2008,28(7):634-639.  
[16] 刘洋,潘国浩,赵永强,等.滨海滩涂不同围垦年代垦区农作物重金属累积特征及其与氮、磷的关系[J].生态毒理学报,2018,13(6):186-201.  
[17] 段嘉欣,梁斌,李忠惠,等.川南兴文梵王山酸化土壤重金属污染特征及来源解析[J].四川环境,2020,39(4):129-135.  
[18] 潘存庆,焦绍明,孙花,等.金川区某镇农用田土壤重金属污染状况调查[J].农业技术与装备,2020(8):159-160.  
[19] 李楠,李龙伟,张银龙,等.杭州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J].浙江农林大学学报,2019,36(1):118-129.  
[20] QIU L F,ZHANG M,ZHOU B B,et al. Economic and ecological trade-offs of coastal reclamation in the Hangzhou Bay, China[J/OJ]. Ecological indicators,2021,125[2021-01-17]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107477.  
[21] 张华国,郭艳霞,黄韦良,等.1986年以来杭州湾围垦淤涨状况卫星遥感调查[J].国土资源遥感,2005,17(2):50-54,81.  
[22] 汪庆华,董岩翔,周国华,等.浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):81-88.  
[23] KÖLBL A,SCHAD P,JAHN R,et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China)[J]. Geoderma,2014,228/229:67-89.  
[24] 张蛟,汪波,翟彩娇,等.气候因子对滩涂围垦区不同盐分水平下土壤盐分季节性变化的影响[J].中国农学通报,2020,36(2):97-103.  
[25] 李鹏,濮劭杰,朱明,等.江苏沿海不同时期滩涂围垦区土壤剖面盐分特征分析:以江苏省如东县为例[J].资源科学,2013,35(4):764-772.  
[26] 闫晓露,孙立志,胡远满,等.围垦对辽东湾北部滨海湿地土壤重金属含量的影响及生态风险评估[J].生态学报,2021,41(3):1055-1067.  
[27] LUCHO-CONSTANTINO C A,PRIETO-GARCÍA F,DEL RAZO L M,et al. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico[J]. Agriculture ecosystems and environment,2005,108(1):57-71.  
[28] 许艳,濮劭杰,张润森,等.江苏沿海滩涂围垦耕地地质质量演变趋势分析[J].地理学报,2017,72(11):2032-2046.  
[29] 王琪琪,濮劭杰,朱明,等.沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究:以江苏省如东县为例[J].地理科学,2016,36(2):256-264.  
[30] 赵一鸣,董颖博,林海,等.土壤理化性质对重金属形态的影响[J].农业工程,2018,8(12):38-43.  
[31] 赵阿娟,曾维爱,蔡海林,等.长沙烟区烟叶重金属含量与土壤重金属含量及其性质的相关性分析[J].中国烟草学报,2020,26(5):90-97.