环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.11
第41卷 第11期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第11期
2020年11月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期 2020年11月
Vol.41, No.11 Nov., 2020

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险

沈城[1], 刘馥雯[2], 吴健[1*], 黄沈发[1], 王敏[1], 黄波涛[1]
(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 选取上海市普陀、宝山、闵行和嘉定这4个区内50块典型场地,测定1 847个不同垂直剖面深度土壤样品中重金属Hg、Cd、Pb、Cr和As含量,并通过内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法进行评价. 从总体上看,Hg、Cd、Pb、Cr和As在表层土壤样品中的平均含量分别为0.33、0.37、74.55、69.23和9.05 mg·kg^{-1},其中Hg、Cd和Pb均超过上海市土壤背景值,分别是背景值的2.75、2.85和2.93倍; 5种重金属含量随着土壤垂直剖面深度的增加逐渐降低,深层和饱和带土壤重金属含量接近或低于背景值水平,这表明人类活动扰动影响主要局限于表层. 普陀区表层土壤中Hg、Cd和Pb的累积程度最为明显,平均含量是背景值的4.25、4.85和3.09倍; 宝山区的Hg和Pb平均含量则为背景值的4.92和6.43倍. 宝山区和普陀区的内梅罗综合指数分别为3.70和3.20,属重污染等级; 普陀区潜在生态风险指数最高为398.59,具有很强风险,宝山潜在生态风险指数为303.08,具较强风险. 闵行和嘉定土壤重金属含量和生态风险水平相对较低. 综上,再开发利用工业场地土壤重金属污染受企业生产年限、行业类型及历史管理水平等因素的综合影响,工业发展较早的普陀和宝山土壤重金属累积程度明显高于闵行和嘉定. 工业场地土壤中重金属Hg、Cd和Pb的污染值得关注.

关键词: 再开发利用工业场地; 土壤; 重金属; 内梅罗综合指数; 潜在生态风险指数
中图分类号: X53; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)11-5125-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202003267

Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites

SHEN Cheng[1], LIU Fu-wen[2], WU Jian[1*], HUANG Shen-fa[1], WANG Min[1], HUANG Bo-tao[1]
(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Fifty typical redevelopment industrial sites in the Putuo, Baoshan, Minhang, and Jiangding districts of Shanghai were chosen to evaluate the ecological risk of heavy metals in the soil. The contents of heavy metal (Hg, Cd, Pb, Cr, and As) in 1847 soil samples, taken from vertical sections, were determined, and their risks were evaluated using the Nemero composite index and Hakanson potential ecological risk index. The average contents of Hg, Cd, Pb, Cr, and As in topsoil samples were 0.33, 0.37, 74.55, 69.23, and 9.05 mg·kg^{-1}, respectively. The contents of Hg, Cd, and Pb exceeded the soil background values of Shanghai, which were 2.75, 2.85, and 2.93 times the background values, respectively. The contents of five heavy metals in soil decreased gradually with increased depth. The contents of heavy metals in deep and saturated soils were close to, or below, the background values, indicating that the anthropic activity disturbance was mainly confined to the topsoil. The accumulation of Hg, Cd, and Pb was the most obvious in Putuo topsoil, with the average contents being 4.25, 4.85, and 3.09 times the background values, respectively. The average contents of Hg and Pb in Baoshan were 4.92 and 6.43 times the background values, respectively. The Nemero Composite Index of Baoshan and Putuo districts were 3.70 and 3.20, respectively, representing heavy pollution level at these sites. The Hakanson potential ecological risk indexes of the Putuo and Baoshang districts were 398.59 and 303.08, respectively, with considerable ecological risk levels. The content and ecological risk of heavy metals at the Minhang and Jiading sites were relatively low. In summary, the pollution of heavy metal in the redeveloped industrial sites is influenced by the operating time, industry type, and past management level of the enterprises. The heavy metal accumulation in the Putuo and Baoshan districts, whose industries developed earlier, were higher than those in the Minhang and Jiading districts. The pollution of heavy metal Hg, Cd, and Pb in soil should be a focus of future work.

Key words: redevelopment industrial sites; soil; heavy metals; Nemero composite index; potential ecological risk index

城市土壤是城市生态环境中重要的组成部分,与水体、大气相互作用共同维持城市生态系统的平衡,但同时也汇聚了大量人为排放的污染物[1~4]. 汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)与砷(As)因具有较强的毒性被合称为重金属污染物中的"五毒"[5~7],其具有累积性、不可降解性以及生物毒性等特征,能够在土壤中发生迁移转化,进入到其他环境介质及生物体内,最终可能作用于人体并造成严重的健康危害[8~10]. 上海作为我国最早的老工业基地城市之

收稿日期: 2020-03-26; **修订日期**: 2020-05-13
基金项目: 上海市生态环境局重大科研项目(沪环科[2018]第3号,沪环科[2019]第22号); 上海市科学技术委员会重大项目(17DZ1202200)
作者简介: 沈城(1993~),男,硕士,主要研究方向为城市土壤环境管理,E-mail: shencheng@saes.sh.cn
* 通信作者,E-mail: wuj@saes.sh.cn

一,近年来随着城市化进程的不断推进,产业结构和布局加速调整,工业用地转型再开发利用速率加快,大量转化为居住和学校等敏感用地类型,由于历史上工业用地在长期运营过程中的污染累积程度各异,导致不同的再开发利用工业场地的潜在健康风险也存在差异[11~14]. 现有研究多关注于单地块重金属主成分分析及机制研究,对于区域性、较大样本总体分析及评价的相关研究较少,因此,为保障土地再开发利用的安全性和城市可持续健康发展,亟需深入探究城市化进程中再开发利用工业场地中典型土壤重金属的污染特征及风险水平. 本研究选取上海市普陀、宝山、闵行和嘉定区内典型行业的 50 块再开发利用工业场地,分析阐明土壤重金属汞、镉、铅、铬和砷在不同区域内的污染分布特征,探究城市化发展进程中重金属污染的累积和风险差异,以期为城市再开发利用工业场地的科学管理与有效治理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

上海市地处东经 120°52′~122°12′,北纬30°40′~31°53′,本研究关注的普陀、宝山、闵行和嘉定这 4 个区均有较长的工业发展历史,其中普陀作为中心城区,拥有桃浦等老工业园区,宝山作为宝山钢铁的所在地,聚集了大量钢铁冶炼等相关产业,闵行和嘉定承载了近郊最早一批兴起的工业企业,以上区域的长期工业发展给城市环境造成一定影响. 本研究选取上述 4 个行政区内 50 块典型再开发利用工业场地的调查数据进行统计分析,其中闵行研究地块数量最多为 18 块,占总地块数量 36%,其次为嘉定 13 块占比 26%,普陀 11 块占比 22%,数量最少的为宝山区 8 块占比 16%,典型地块涉及行业类型主要包括有色金属冶炼、化学原料和化学制品制造、皮革鞣制加工、电镀等多种涉重行业,地块位置分布如图 1 所示.

1.2 布点采样与实验室检测

2016~2018 年,针对 50 块典型再开发利用工业场地进行了布点采样. 在工业场地再开发利用前,根据不同行业工业场地污染特征分布及现场踏勘实际情况,重点针对原辅材料、产品、化学品以及有毒有害物质的生产、贮存、装卸和使用处置的区域,污水处理、固废危废堆放和贮存区域以及其他存在明显污染痕迹或异味的区域进行布点采样工作,采集各区域土壤点位表层(0~0.5 m),深层(0.5 m~地下水位线)及饱和带(≥地下水位线)土壤,同时采集的土壤质控平行样不少于每个场地总样品数的

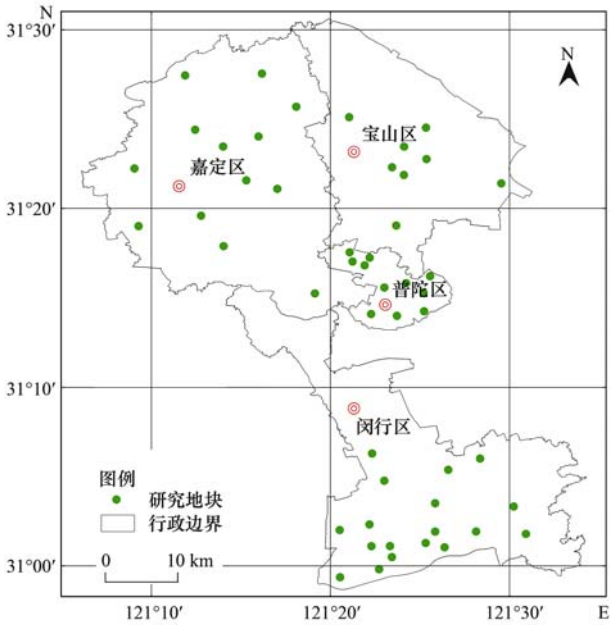

图 1 样品所在地块地理位置示意

Fig. 1 Study location sampling sites

10%,样品数总计2 067个,其中平行样 220 个不纳入后续统计分析. 土壤样品在自然条件下风干,去除植物残体与碎石,研磨过 10 目尼龙筛后充分混合,再从中多点取样进一步研磨过 100 目筛后置于塑料瓶中备用. As、Cd、Cr 和 Pb 的含量参照 USEPA 6010C-2007 并采用 USEPA3051A-2007 沉积物、淤泥、土壤和油类的微波辅助酸消解法前处理后进行测定,实验室检出限分别为 1.00、0.01、0.25 和 2.50 $mg \cdot kg^{-1}$; Hg 的含量参照 GB/T 17136-1997 并采用硫酸-硝酸-高锰酸钾消解法前处理后进行测定,实验室检出限为 0.001 $mg \cdot kg^{-1}$. 5 种重金属的加标回收率控制在 83.6%~106.0%,平行样品间的相对标准偏差均小于 20%.

1.3 重金属生态风险评价

1.3.1 内梅罗综合指数法

采用内梅罗综合指数法[15~18]研究土壤重金属的污染程度,不仅能全面评价土壤中不同污染物的综合污染水平,而且能反映高含量污染物对环境造成的危害[19],其计算方法如下:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中,P_i 表示土壤中重金属污染物 i 的环境质量指数; C_i 表示土壤中重金属污染物 i 的测试含量, $mg \cdot kg^{-1}$; S_i 表示土壤中重金属污染物的评价标准, $mg \cdot kg^{-1}$. 本研究选用上海市土壤环境背景值作为评价标准[20,21],具体数值如表 1 所示.

$$P_N = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2_{max} + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2_{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中，P_N 表示内梅罗综合指数；$(C_i/S_i)_{max}$ 表示土壤中各重金属污染物的环境质量指数最大值；$(C_i/S_i)_{ave}$ 表示土壤中各重金属污染物的环境质量指数平均值.

内梅罗综合指数(P_N)法将土壤重金属污染划分为 5 个等级：若 $P_N \leqslant 0.7$，为安全等级，处于清洁水平；若 $0.7 < P_N \leqslant 1$，为警戒线等级，处于尚清洁水平；若 $1 < P_N \leqslant 2$，为轻污染等级；若 $2 < P_N \leqslant 3$，为中污染等级；若 $P_N > 3$，为重污染等级.

表 1　上海市土壤重金属环境背景值

Table 1　Environmental background values of heavy metals in the soil of Shanghai

重金属元素	Hg	Cd	Pb	Cr	As
土壤背景值/mg·kg^{-1}	0.12	0.13	25.47	75	9.1

1.3.2　潜在生态风险指数法

本文采用瑞典地球化学家 Hakanson 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法[22~24]对土壤重金属的潜在生态风险进行评价. 其计算公式如下：

$$C_f^i = C_i / C_n^i \tag{3}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{4}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{5}$$

式中，C_i 表示重金属 i 的实测含量；C_n^i 表示重金属 i 的背景值；C_f^i 表示重金属的污染系数；T_f^i 表示重金属的毒性响应系数，5 项重金属的毒性系数由大到小依次为 Hg(40) > Cd(30) > As(10) > Pb(5) > Cr(2)；E_r^i 表示重金属 i 的潜在生态风险系数；RI 表示潜在生态风险指数.

本文研究对象为 Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 这 5 项重金属，毒性系数之和为 87，经文献比较[25,26]，本文将 RI 第一级阈值设为 98，余下各级阈值逐级扩大 2 倍，具体数值如表 2 所示.

表 2　土壤重金属潜在风险分级标准

Table 2　Potential risk level of heavy metals in the soil

潜在生态风险	轻度	中度	较强	很强	极强
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
RI	<98	98~196	196~392	≥392	

1.4　数据分析

本研究利用 Excel 2013 软件对数据进行处理，其中对低于分析方法检出限的测定结果以“ND”报出，参与统计分析时按二分之一检出限计算，利用 SPSS 20.0 软件采用 Duncan 多重比较进行显著性差异分析，利用 Origin 9.1 和 ArcGIS 10.6 进行制图.

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属含量分布特征

对上海市普陀、宝山、闵行和嘉定这 4 区 50 块典型再开发利用工业场地中1 847个土壤样品进行测试，5 项重金属元素的分析结果如表 3 所示. 重金属元素 Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 在不同深度土壤中均有检出，且随着土壤垂直深度的增加，5 项重金属元素的含量逐渐降低. 在表层土壤样品中的平均含量分别为 0.33、0.37、74.55、69.23 和 9.05 mg·kg^{-1}，其中前三者均超过上海市土壤背景值，分别是背景值的 2.75、2.85 和 2.93 倍；在深层土壤样品中，Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 平均含量分别为 0.12、0.18、36.21、51.06 和 7.18 mg·kg^{-1}，其中 Cd 和 Pb 含量分别是上海市土壤背景值的 1.38 和 1.42 倍；在饱和带土壤中，Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 平均含量分别为 0.03、0.11、18.25、43.29 和 5.82 mg·kg^{-1}，均低于上海市土壤背景值. 根据显著性差异结果显示，表层土壤中 Hg、Cd 和 Pb 的含量与垂向深度中深层和饱和带含量相比差异显著($P < 0.05$)，表明 Hg、Cd 和 Pb 在场地表层土壤中存在明显的富集.

从表征不同量纲数据离散程度的变异系数来看，随着土壤深度的加深，5 项重金属含量的变异系数逐渐降低，重金属 Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 在表层土壤中的变异系数分别为 0.52、0.65、0.81、0.75 和 0.45，均属于高度变异，表明在表层土壤中 5 项重金属元素受人类活动影响较大. 深层和饱和带土壤中各项重金属含量变异系数基本较小.

2.2　不同区域土壤重金属污染累积分析

对再开发利用工业场地不同深度土壤重金属含量按 4 大区域进行统计分析，计算结果如图 2 所示.

从统计结果来看，嘉定除表层土壤 Hg、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 0.14、0.23 和 33.68 mg·kg^{-1}，是背景值的 1.17、1.77 和 1.32 倍，其余均低于背景值；闵行除表层土壤 Hg 和 Cd 的平均含量为 0.13 和 0.28，是背景值的 1.08 和 2.15 倍；宝山各项重金属在表层土壤中均超过背景值，其中 Hg 和 Pb 的累积程度最为明显，平均含量为 0.59 mg·kg^{-1} 和 163.83 mg·kg^{-1}，是背景值的 4.92 和 6.43 倍，同时 Pb 在深层土壤的平均含量为 79.80，也达到背景值的 3.13 倍；普陀区中除 Cr 外其余重金属在表层

表 3 上海市再开发利用工业场地土壤重金属含量描述性统计(N = 1 847)

Table 3 Heavy metal concentrations in the soil at Shanghai re-development industrial sites

重金属	样品个数	采样位置	最大值 /mg·kg^{-1}	最小值 /mg·kg^{-1}	中位数 /mg·kg^{-1}	算术平均值 /mg·kg^{-1}	标准差	变异系数	土壤背景值 /mg·kg^{-1}
Hg	1 325	表层	0.72	0.03	0.31	0.33	0.17	0.52	0.12
	1 192	深层	0.37	0.02	0.09	0.12	0.04	0.33	
	995	饱和带	0.12	ND	0.07	0.03	0.004	0.13	
Cd	1 769	表层	0.98	0.05	0.20	0.37	0.20	0.65	0.13
	1 645	深层	0.62	0.05	0.09	0.18	0.06	0.33	
	1 451	饱和带	0.38	ND	0.07	0.11	0.02	0.18	
Pb	1 847	表层	597.83	6.10	36.47	74.55	60.48	0.81	25.47
	1 795	深层	231.59	4.37	16.38	36.21	15.44	0.43	
	1 537	饱和带	48.36	2.55	15.33	18.25	4.19	0.23	
Cr	1 129	表层	138.74	9.40	60.19	69.23	51.92	0.75	75
	1 056	深层	127.55	2.57	45.71	51.06	32.68	0.64	
	827	饱和带	108.43	3.61	41.64	43.29	18.62	0.43	
As	1 847	表层	16.97	1.21	8.73	9.05	4.05	0.45	9.1
	1 675	深层	15.74	1.40	5.88	7.18	3.59	0.50	
	1 293	饱和带	12.88	1.22	5.79	5.82	1.80	0.31	

土壤中均超过背景值,其中 Hg、Cd 和 Pb 的富集程度最为明显,平均含量为 0.51、0.63 和 78.69 mg·kg^{-1},是背景值的 4.25、4.85 和 3.09 倍,其中重金属 Cd 在深层和饱和带土壤中均不同程度超过背景值.从重金属元素来看,各区 Hg 和 Cd 含量均超过上海市土壤环境背景值,其中宝山土壤 Hg 含量最高,普陀的 Cd 含量最高;重金属 Cr 仅宝山略微超过背景值;宝山的 Pb 和普陀的 Cd 均存在土壤重金属垂直污染累积现象.

结合实际调查情况,再开发利用的 50 个工业场地中金属制品业数量最多,占比 38.79%,其次为化学原料和化学制品制造业,占比 29.42%,这部分企业存在涉重金属原料使用量大[27]、企业环境管理水平不足等原因,对场地土壤环境造成较大的影响,其中重金属 Hg、Cd 和 Pb 的贡献最为明显,本研究中 Hg 的最大值出现在宝山原钢铁冶炼企业内,原有工艺涉及大量煤燃烧工艺,具有 25a 的生产历史,燃煤的大气沉降对该场地 Hg 的累积具有很大的贡献,Cd 的最大值出现在普陀原化工企业内,该企业生产工艺涉及大量镉化合物原料,且有 21 a 的生产历史,Pb 的最高含量高达 597.83 mg·kg^{-1},出现在宝山区一家原金属冶炼企业内,该企业有 29 a 的生产历史,同时历史资料显示该企业曾发生环境污染泄漏事件.这表明工业场地土壤重金属累积受企业生产年限、特征行业类型和企业历史管理水平等综合因素影响[28~33].

2.3 土壤重金属生态风险评价

鉴于上海市再开发利用工业场地土壤重金属累积影响主要集中于表层,所以通过内梅罗综合指数法和潜在生态指数法对表层土壤重金属生态风险进行评价,计算结果如图 3 所示.

结合内梅罗综合指数划分重金属污染土壤等级,结果显示闵行和嘉定的综合污染指数分别为 1.42 和 1.96 均属轻污染等级,宝山和普陀综合污染指数最高分别为 3.70 和 3.20 均属重污染等级,该指数评价方式是一种兼顾最大值的计权型多因子环境质量指数,容易受到极大值的影响,根据单因子污染指数发现,Pb 对宝山的贡献最为突出.结合城市工业生产发展历程[34,35],宝山与普陀生产历史悠久,且多为化工、冶炼等重工业,嘉定与闵行工业运营年限相对较短,而工业场地历史越长,土壤受到重金属污染的风险就越大,这与本研究结果一致[36~40].

表层土壤重金属潜在生态风险指数计算结果表明,闵行综合风险指数为 87.58 属轻度风险范围,嘉定综合风险指数为 124.29 属中度风险范围,宝山综合风险指数为 303.08 属较强风险范围,普陀综合风险指数为 398.59 属很强风险范围.该项风险指数评价受到污染物毒性响应参数的影响,根据单项潜在生态风险系数发现,Hg 和 Cd 对普陀的贡献最为突出.对比相关研究,莱芜市钢城区土壤 RI 的值为 282.79[41],天津市大港工业区土壤 RI 值为 221.12[42],四川石棉工业区周边土壤值在 114.73 ~ 452.55[43],贵阳市蓬莱仙界园区土壤 RI 值在 124.33 ~ 222.00[44],温州灵昆岛围垦区土壤 RI 值在 344.36 ~ 650.50[45].可以发现上海市再开发利用工业场地土壤重金属总体潜在风险值处于相对中等的水平,工业生产历史越悠久的区域,其再开发利用

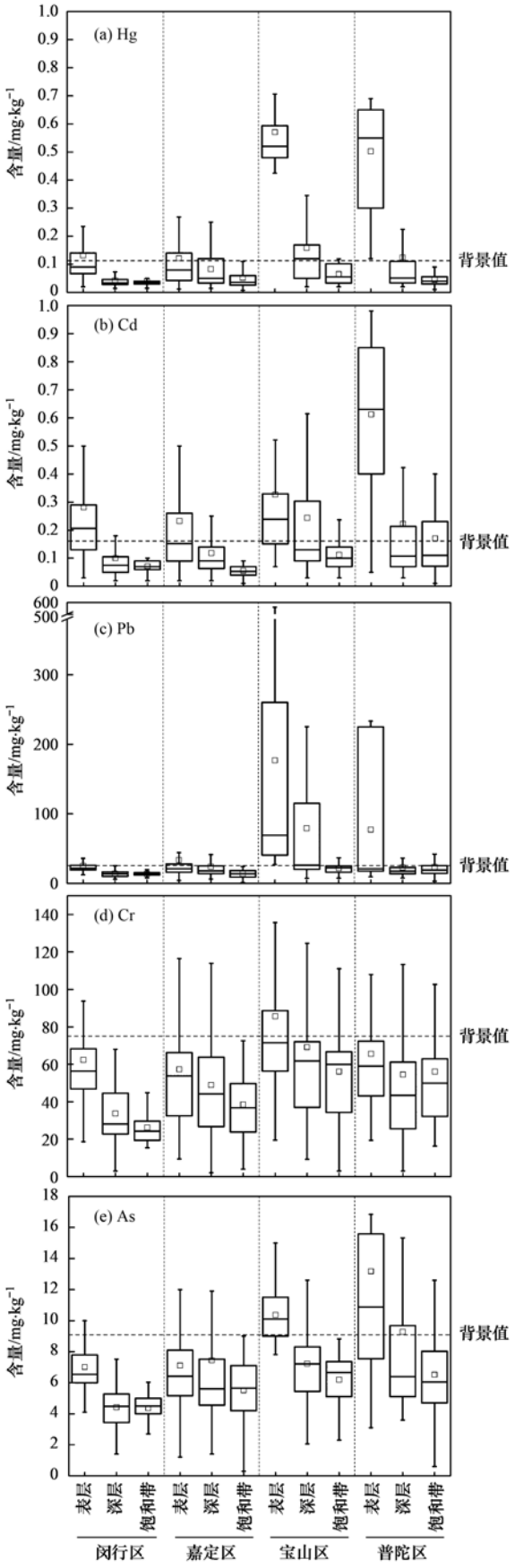

图 2　再开发利用工业场地土壤重金属含量统计

Fig. 2　Heavy metal concentrations in the soil at re-development industrial sites

工业场地土壤重金属生态风险越高.

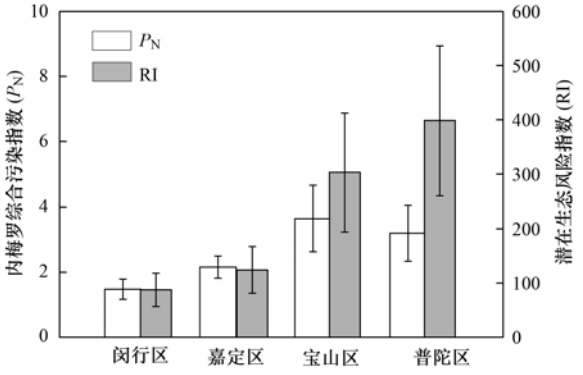

图 3　再开发利用工业场地表层土壤重金属污染评价

Fig. 3　Heavy metal pollution evaluation in the topsoil at re-development industrial sites

3　结论

(1)近年来在闵行、嘉定、宝山和普陀这 4 个区的再开发利用工业场地调查结果表明,土壤重金属 Hg、Cd 和 Pb 在表层土壤中存在明显累积,含量分别是上海市土壤背景值的 2.75、2.85 和 2.93 倍,各项重金属含量变异系数较大,表明受人类活动影响较大. 随着土壤垂直深度的加深, 5 项重金属含量逐渐降低,深层和饱和带土壤重金属含量接近或低于背景值水平,受人类活动扰动影响趋小.

(2)闵行、嘉定、宝山和普陀这 4 个区的再开发利用工业场地土壤重金属污染受各自企业生产年限、特征行业类型及历史管理水平的综合影响. 普陀作为工业发展最早的区域之一,以化学工业制造作为主导行业,表层土壤重金属 Hg、Cd 和 Pb 的富集程度最为明显,平均含量为 0.51、0.63 和 78.69 $mg \cdot kg^{-1}$,是背景值的 4.25、4.85 和 3.09 倍,重金属 Cd 在深层和饱和带土壤中均存在不同程度超过背景值的现象; 宝山以金属冶炼作为主导行业,Hg 和 Pb 的累积程度最为明显,平均含量为 0.59 和 163.83 $mg \cdot kg^{-1}$,是背景值的 4.92 和 6.43 倍; 嘉定和闵行工业发展历史相对较短,土壤重金属含量相对较低.

(3)再开发利用工业场地中土壤重金属元素的生态风险各异,结合内梅罗综合指数和潜在生态风险指数,宝山和普陀内梅罗综合指数分别为 3.70 和 3.20,均属重污染等级,其中 Pb 的贡献最为突出; 普陀潜在生态指数最大为 398.59,属很强风险范围,其中 Hg 和 Cd 的贡献最为突出,宝山潜在生态风险指数等级为较强; 闵行和嘉定两项指数表征的生态风险水平均较低. 土壤重金属中 Hg、Cd 和 Pb 值得关注,应进一步加强工业场地再开发利用的风险管控.

参考文献:

[1]　张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境

效应[J]. 生态学报, 2003, **23**(3): 539-546.
Zhang G L, Zhu Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts-a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, **23**(3): 539-546.

[2] 谢天, 侯鹰, 陈卫平, 等. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, **39**(4): 1154-1164.
Xie T, Hou Y, Chen W P, *et al*. Impact of urbanization on the soil ecological environment: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(4): 1154-1164.

[3] 刘钊钊, 唐浩, 吴健, 等. 土壤汞污染及其修复技术研究进展[J]. 环境工程, 2013, **31**(5): 80-84, 109.
Liu Z Z, Tang H, Wu J, *et al*. Review of mercury-contaminated soil and the remediation techniques [J]. Environmental Engineering, 2013, **31**(5): 80-84, 109.

[4] Tóth G, Hermann T, Da Silva M R, *et al*. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety[J]. Environment International, 2016, **88**: 299-309.

[5] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 中国城市土壤重金属污染研究现状及展望[J]. 土壤与作物, 2016, **5**(1): 42-47.
Ji X F, Zheng N, Wang Y, *et al*. Heavy metal contamination of urban soils in China: recent advances and prospects[J]. Soils and Crops, 2016, **5**(1): 42-47.

[6] 赵玉林, 王晓, 武倩倩. 我国土壤重金属污染现状与治理方法[J]. 中国资源综合利用, 2014, **32**(3): 55-57.
Zhao Y L, Wang X, Wu Q Q. Analysis of the status and the treatment methods of heavy metal contaminated soil in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2014, **32**(3): 55-57.

[7] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 692-703.
Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al*. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 692-703.

[8] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.
Li C F, Cao J F, Lü J S, *et al*. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, **39** (12): 5628-5638.

[9] Peng W Q, Lei M, Yang S C, *et al*. Development of a model to simulate soil heavy metals lateral migration quantity based on SWAT in Huanjiang watershed, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **77**: 115-129.

[10] 骆占斌, 陈浮, 张旺园, 等. 再生铅厂土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(4): 197-204.
Luo Z B, Chen F, Zhang W Y, *et al*. Heavy metal contamination and health risk assessment in the soil surrounding a secondary lead plant[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(4): 197-204.

[11] 徐志豪, 吴健, 王敏, 等. 典型复垦工业场地土壤垂直剖面重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(2): 43-47, 55.
Xu Z H, Wu J, Wang M, *et al*. Characteristics and potential ecological risk of heavy metal in vertical soil profiles of typical reclaimed industrial sites [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, **39**(2): 43-47, 55.

[12] 黄沈发, 杨洁, 吴健, 等. 城市再开发场地污染风险管控研究及实践[J]. 环境保护, 2018, **46**(1): 31-35.
Huang S F, Yang J, Wu J, *et al*. Research and application of risk management of urban redevelopment land contamination[J]. Environmental Protection, 2018, **46**(1): 31-35.

[13] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2869-2876.
He B, Zhao H, Wang T Y, *et al*. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2869-2876.

[14] Kosheleva N E, Vlasov D V, Korlyakov I D, *et al*. Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development [J]. Science of the Total Environment, 2018, **636**: 854-863.

[15] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 湖南省某冶炼厂周边农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(3): 77-83.
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils near a smelting area in Hunan Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(3): 77-83.

[16] 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.

[17] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 225-233.
Wang F, Huang Y Z, Wang X L *et al*. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: comparison of different evaluation methods [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 225-233.

[18] 李吉玫, 张毓涛. 乌鲁木齐不同功能区林带土壤重金属污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1859-1866.
Li J M, Zhang Y T. Characteristics of heavy – metal pollution in forest belt soil of different functional zones in Urumqi, Xinjiang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(9): 1859-1866.

[19] 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.

[20] 王云, 汪雅谷, 罗海林, 等. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[21] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5620-5627.
Wu J, Wang M, Zhang H P. *et al*. Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and surrounding river sediments[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5620-5627.

[22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[23] Pan L B, Wang Y, Ma J, *et al*. A review of heavy metal pollution levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(2): 1055-1069.

[24] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来

源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4620-4627.
Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak-cluster depression area, southeast of Yunnan Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4620-4627.

[25] 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, **33**(1): 147-153.
Jia Y, Fang M, Wu Y J, *et al*. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in river sediments of Shanghai[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 147-153.

[26] 巩万和, 王志强, 阚建鸾. 长三角典型农业区耕地土壤重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 湖北农业科学, 2017, **56**(23): 4493-4496, 4518.
Gong W H, Wang Z Q, Kan J L. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of cultivated soil in the typical agricultural region of Yangtze river delta[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, **56**(23): 4493-4496, 4518.

[27] 顾睿, 舒艳, 刘一帆, 等. 有色金属冶炼企业建设项目土壤环评分析与展望[J]. 环境影响评价, 2015, **37**(3): 65-69, 76.
Gu R, Shu Y, Liu Y F, *et al*. Problems and prospects of soil environmental impact assessment for nonferrous metal smelting projects[J]. Environmental Impact Assessment, 2015, **37**(3): 65-69, 76.

[28] 谢贤健, 韩光中. 基于普通克里格和投影寻踪模型的城市土壤重金属污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(9): 1584-1590.
Xie X J, Han G Z. Evaluation of soil heavy metal pollution in Neijiang city based on ordinary Kriging and Projection Pursuit Model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(9): 1584-1590.

[29] 李小平, 王昕. 城市典型工业区土壤重金属分布与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(10): 100-104.
Li X P, Wang X. Contamination assessment and distributions of heavy metals from Weinan typical industrial urban soil, P. R. China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, **24**(10): 100-104.

[30] 段慧敏, 朱丽东, 李凤全, 等. 浙江省永康城市土壤重金属元素富集特征[J]. 土壤通报, 2012, **43**(4): 956-961.
Duan H M, Zhu L D, Li F Q, *et al*. Heavy metals' enrichment and their sources of urban soils in Yongkang[J]. Chinese Journal of Soil Science, **43**(4): 956-961.

[31] 彭皓, 马杰, 马玉玲, 等. 天津市武清区农田土壤和蔬菜中重金属污染特征及来源解析[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(7): 2102-2112.
Peng H, Ma J, Ma Y L, *et al*. Characteristics and source identification of heavy metal pollution in agricultural soils and vegetables in Wuqing District, Tianjin City, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(7): 2102-2112.

[32] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3532-3539.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3532-3539.

[33] 卢新哲, 谷安庆, 张言午, 等. 基于环境地球化学基线的农用地重金属累积特征及其潜在生态危害风险研究[J]. 土壤学报, 2019, **56**(2): 408-419.
Lu X Z, Gu A Q, Zhang Y W, *et al*. Sources and risk assessment of heavy metal in agricultural soils based on the environmental geochemical baselines [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(2): 408-419.

[34] 石亚朝. 上海市城市化与环境保护协调耦合关系研究[J]. 山西建筑, 2017, **43**(16): 196-197.
Shi Y C. On coordinative coupling relationship between urbanization and environment protection in Shanghai[J]. Shanxi Architecture, 2017, **43**(16): 196-197.

[35] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 348-354.
Fan W H, Bai Z K, Li H F, *et al*. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(1): 348-354.

[36] 常文静, 李枝坚, 周妍姿, 等. 深圳市不同功能区土壤表层重金属污染及其综合生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 999-1007.
Chang W J, Li Z J, Zhou Y Z, *et al*. Heavy metal pollution and comprehensive ecological risk assessment of surface soil in different functional areas of Shenzhen, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(3): 999-1007.

[37] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 105-111.
Wu X M, Li L Q, Pan G X, *et al*. Soil pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing[J]. Environmental Science, 2003, **24**(3): 105-111.

[38] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
Liu Y, Yue L L, Li J C. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(6): 1285-1293.

[39] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al*. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1037-1044.

[40] 李炜, 周笑白, 王斌, 等. 天津市不同土地利用方式下土壤重金属污染特征及评价[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(6): 200-205.
Li W, Zhou X B, Wang B, *et al*. Pollution characteristics and assessment of heavy metal in different land-use types in Tianjin city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(6): 200-205.

[41] 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.

[42] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4232-4240.
Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, *et al*. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4232-4240.

[43] 赵兵, 王玉云, 徐德江, 等. 四川石棉工业园区周边土壤重

金属污染及生态风险评价研究[J]. 四川环境, 2019, **38**(6): 138-142.
Zhao B, Wang Y Y, Xu D J, *et al*. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk of soils near a industrial park in Shimian Sichuan province[J]. Sichuan Environment, 2019, **38**(6): 138-142.
[44] 杨珍, 周玮, 朱大雁, 等. 蓬莱仙界园区土壤重金属含量及其潜在生态风险评价[J]. 贵州科学, 2018, **36**(3): 7-12.
Yang Z, Zhou W, Zhu D Y, *et al*. Distribution of heavy metals in soil in Penglai Xianjie park and evaluation on the potential ecological risk[J]. Guizhou Science, 2018, **36**(3): 7-12.
[45] 童敏, 黄民生, 何岩, 等. 温州灵昆岛围垦区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, (2): 75-83.
Tong M, Huang M S, He Y, *et al*. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in reclamation district of Lingkun island in Wenzhou[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2015, (2): 75-83.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2020

CONTENTS