

沿海碱性农田土壤pH、重金属分布及污染分析

夏沪彬^{1,2}

¹上海建工环境科技有限公司, 上海

²上海申环环境工程有限公司, 上海

收稿日期: 2025年11月5日; 录用日期: 2025年12月20日; 发布日期: 2026年1月4日

摘要

对上海市沿海某地块农田土壤中pH、As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni的分布及污染特征进行研究。结果表明, 土壤pH值范围为8.36~9.89, 偏碱性, As、Cd、Cu、Hg和Ni 5项重金属最大浓度高于国家和上海的土壤背景值, Pb最大浓度和平均浓度均低于国家和上海市土壤背景值。重金属变异系数Hg > As > Cu > Cd > Pb = Ni。以国家土壤背景值为基准时, Cd、Cu、Ni、Hg呈现污染; 以上海市土壤背景值为基准时, As、Cu、Hg呈现污染; 以GB 15618-2018的风险筛选值为基准时, 土壤的环境质量为清洁。pH与Cd、Cu、As、Ni、Pb等5种重金属存在显著负相关性, Cd、Cu、As、Ni、Pb重金属间存在显著正相关性, 且同源性较强, Cu-Cd相关性系数最高(0.81)。Hg与大部分重金属不存在相关性, Hg受人为影响比较大。

关键词

pH, 重金属, 污染分析

Analysis of Soil pH, Heavy Metal Distribution and Pollution in Coastal Alkaline Farmland

Hubin Xia^{1,2}

¹Shanghai Construction Engineering Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai

²Shanghai Shenhuan Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: November 5, 2025; accepted: December 20, 2025; published: January 4, 2026

Abstract

The distribution and pollution characteristics of pH, As, Cd, Cu, Pb, Hg and Ni in the farmland soil of a coastal area in Shanghai were studied. The results showed that the pH value of the soil ranged from 8.36 to 9.89, which was slightly alkaline. The maximum concentrations of As, Cd, Cu, Hg and Ni exceeded the national and Shanghai soil background values. The maximum and average concentra-

tions of Pb were lower than the national and Shanghai soil background values. The coefficient of variation of heavy metals followed the order: Hg > As > Cu > Cd > Pb = Ni. When the national soil background value was used as the benchmark, Cd, Cu, Ni and Hg were polluted. When the Shanghai soil background value was used as the benchmark, As, Cu and Hg were polluted; when the risk screening value of GB 15618-2018 was used as the benchmark, the soil environmental quality was found to be clean. pH was significantly negatively correlated with the five heavy metals of Cd, Cu, As, Ni and Pb, and there was a significant positive correlation among Cd, Cu, As, Ni and Pb, with strong homology. The correlation coefficient between Cu and Cd was the highest (0.81). Hg showed no significant correlation with most of the heavy metals, indicating that Hg was more strongly influenced by anthropogenic sources.

Keywords

pH, Heavy Metals, Pollution Analysis

Copyright © 2026 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. 引言

土壤是一种重要资源，外源污染物的引入会加剧土壤污染，对农业生产和土壤环境产生严重的影响。农田土壤环境中的重金属污染具有不可逆性、生物蓄积性以及对作物生产的抑制作用，可能对国家粮食安全构成威胁[1]。土壤重金属可能通过食物链转移到农作物中，进而对人类健康造成危害。美国环境保护署将锌、铬、镉、砷、汞、铅、铜和镍等列为优先控制污染物[2]。中国重金属的使用量巨大，重金属的开采和使用会伴随着一系列环境问题，其主要由于工业废气排放、煤炭、石油等燃料的燃烧、生产污水排放和灌溉等[3]，重金属往往很大程度限制着区域的生态文明发展。农业土壤与人体健康密切相关，研究农田土壤重金属污染成因与来源对其污染防治具有重要的意义。张雨涵等[4]对重庆渝西地区的农业集中区表层土壤进行研究，发现镉、汞、砷、铅、铬、铜、锌和镍等元素浓度均高于当地土壤环境背景值，自然母质、交通运输和矿业开采是主要的3种污染源。李文明等[5]对青海省泽库县典型高山农业土壤样品进行了重金属污染分析，发现自然源对Cr、Co、Mn、Ni贡献率较大，交通污染源对Cd、Pb、Zn影响较大，矿业冶炼污染源对于As、Cu影响明显，大气沉降污染源对Hg影响显著，且仍存在其他不明的污染源对地块重金属有影响。

当前基于理论模型和评价技术的污染评估往往忽略了沿海碱性地区土壤特性和数据背景的差异，研究主要集中在内陆常规农田土壤与人体暴露风险的关系上，沿海碱性土壤的农田土壤重金属分析与评价研究相对较少。

2. 材料与方法

2.1. 区域布点采样

所在区域为临港新片区，其土地为江、海、湖、河沉积物迭置在古三角洲上所形成。临港新片区的吴淞高程为4~4.5 m之间。研究地块位于上海市奉贤区海湾镇(临港新片区内)，占地面积约19.9万平方米，历史为蔬菜大棚用地，区域地貌属于滨海平原地貌[6]。区域采用系统布点法(1个/6400 m²)进行布点，共设置32个土壤采样点位，土壤点位编号为SS1~SS32(见图1)。地块农业灌溉可能取用潜水，根据本地

块工程勘察数据, 潜水主要分布在①₁层素填土、①₃层吹填土(粉质黏土)、②₃层砂质粉土, 因此使用GeoProbe@7822DT的DT32采样系统进行钻探取样, 并使用配套的采样管采集无扰动土壤样品, 每个点位分别采集了1个表层素填土层(0~0.5 m)土壤样品、1个吹填土层(0.5~1.0 m)土壤样品、1个砂质粉土层(5.5~6.0 m)土壤样品, 共采集96个土壤样品。土壤样品采样阶段, 现场人员均佩有一次性的采样手套, 并且在采样每套样品后均更换新的一次性手套, 预防土壤采样存在交叉污染。

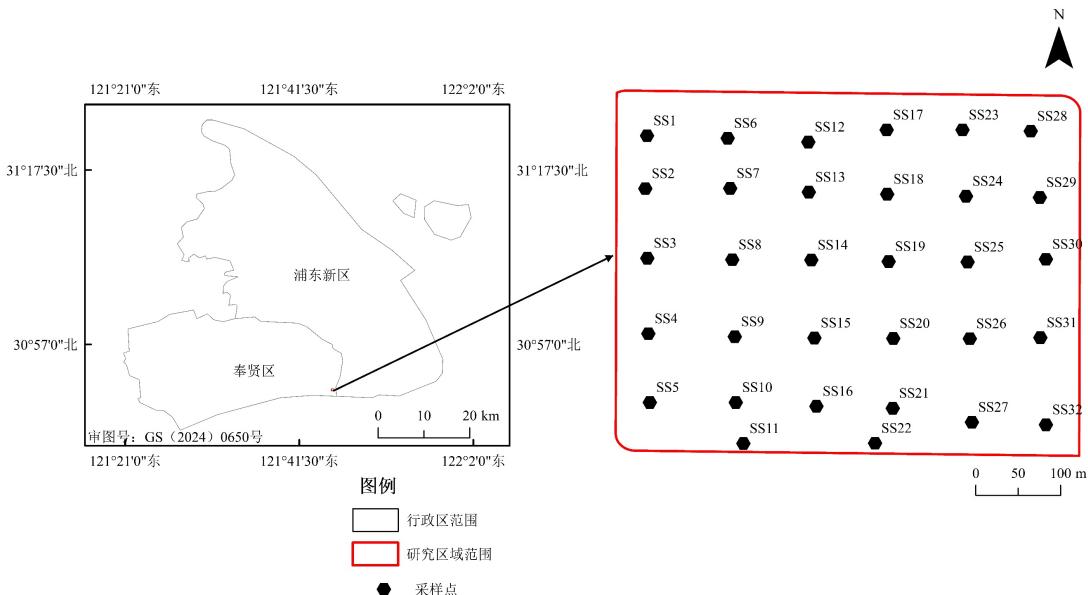


Figure 1. Sampling points in the research area
图 1. 研究区域布点

2.2. 样品处理和检测

将现场的土壤样品在风干室置于盘内, 薄层摊开, 拣出石块、砂砾、有机物残体等。风干后压碎, 拣出杂质, 过20目的尼龙筛。筛后样品混匀, 取10 g用于土壤pH值分析。剩余继续研磨, 过100目筛后, 分成两份, 一份用于土壤元素重金属As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni分析, 一份留样保存, 检测方法如表1所示。

在土壤样品检测过程中, 按规定要求的比例分批次设置空白样品、空白加标、有证标准样品、平行双样、基质加标、替代物加标等质控样品, 并保证质控样品数据全部达标。

Table 1. Detection methods of pH and heavy metals in soil

表 1. 土壤pH和重金属分析方法

因子	分析方法	检出限($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
pH	HJ 962-2018 土壤pH值的测定 电位法	-
As	HJ 803-2016 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
Cd	GB/T 17141-1997 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法	0.01
Cu、Pb、Ni	HJ 491-2019 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、10、3
Hg	HJ 680-2013 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法	0.002

2.3. 质量评价方法

2.3.1. 污染累计指数

污染累计指数呈现的是土壤单个污染物的人为污染程度：

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

P_i 为某个重金属 i 的污染指数, C_i 为重金属 i 的实际检测浓度, S_i 为重金属 i 的背景值或筛选值。

2.3.2. 内梅罗指数法

内梅罗指数法不仅反映的是单个污染物的综合污染状况, 更显现单个污染物对土壤环境质量的影响:

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i / S_i)_{ave}^2 + (C_i / S_i)_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

P_N 为重金属的综合污染指数, $(C_i / S_i)_{ave}$ 为重金属 i 污染指数的平均值, $(C_i / S_i)_{max}$ 为重金属 i 污染指数的最大值。内梅罗指数 $P_N \leq 0.7$, 代表清洁; 内梅罗指数 P_N 为 $0.7 \sim 1.0$, 代表警戒线; 内梅罗指数 P_N 为 $1.0 \sim 2.0$, 代表轻度污染; 内梅罗指数 P_N 为 $2.0 \sim 3.0$, 代表中度污染; 内梅罗指数 $P_N \geq 3.0$, 代表重污染。

3. 结果与分析

3.1. pH 与重金属含量分析

土壤样品的 pH 值范围为 8.36~9.89 (见表 2), 总体偏碱性, 这可能与区域距离海洋较近, 土壤受到海水性地下水的影响有关。王彤等[7]对苏北滨海土壤特征进行研究发现, 土壤 pH 值在 8.21~9.48 范围, 并且 pH 值随土层深度的变深而增大。其分析认为, 土壤中的碱性物质主要为含有钠、钙、镁的碳酸盐与碳酸氢盐, 以及含吸附交换性 Na^+ 的表面胶体基团, 其中吸附交换钠的胶体水解出 OH^{-1} , 也是碱性土的一个重要的特征; 碱性离子基团富集在深层的土壤, 呈现出下层的土壤 pH 值相对更高且碱化程度更明显、更稳定的特征。凌玲等[8]同样发现, 临港区域存在土壤含水量较高、密度较高、通气孔隙度较低以及 pH 值较高的特点, 并且土壤的盐渍化性状十分显著。Cu、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等重金属在采集的 96 个土壤样品中都有检出, 并且 Cu、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等重金属的检出浓度均小于 GB 15618-2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》的风险筛选值, 表明区域土壤满足农业环境质量要求。6 项重金属变异强弱依次为 $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb} = \text{Ni}$, 变异系数越大, 代表重金属分布不均匀, 来自外源污染的可能性越大。土壤中 As、Cd、Cu、Hg 重金属最大浓度高于国家和上海市土壤背景值, As、Cd、Cu、Hg 平均浓度均低于国家和上海市土壤背景值, 表明研究区部分土壤受外部输入的影响, 但是影响较小。Ni 最大浓度和平均浓度高于国家土壤背景值, 但低于上海背景值。Pb 最大浓度和平均浓度均低于国家和上海市土壤背景值, 表明重金属 Pb 在该区域未受到外源污染的影响。

Table 2. Statistics of heavy metal concentrations

表 2. 重金属浓度数据统计

因子	最小值 /(mg·kg ⁻¹)	最大值 /(mg·kg ⁻¹)	平均值 /(mg·kg ⁻¹)	中位数 /(mg·kg ⁻¹)	标准偏差	变异系数	国家背景值 [9]	上海市土壤背景值 [10]	GB 15618-2018 的筛选值 /(mg·kg ⁻¹)
pH	8.36	9.89	8.87	8.79	0.31	0.03	-	-	-
As	3.32	12.3	7.08	6.95	2.23	0.32	11.2	9.11	25
Cd	0.05	0.15	0.09	0.09	0.02	0.26	0.097	0.133	0.6

续表

Cu	6	36	22	22	6.65	0.31	22.6	28.6	100
Pb	9.8	25.3	16.1	15.9	3.22	0.20	26.2	25.48	170
Hg	0.018	0.262	0.054	0.044	0.04	0.66	0.065	0.102	3.4
Ni	14	46	33	33	6.55	0.20	26.7	40	190

3.2. 污染分析

3.2.1. 重金属污染指数

对比以国家背景值、上海市土壤背景值、GB 15618-2018 筛选值为基准的单因子重金属污染指数，6类重金属呈现不同的污染情况，分析结果如表 3 所呈现。以国家土壤背景值为基准时，Ni 的污染累计指数大于 1，Cu、Pb、Cd、As、Hg 的污染累计指数均小于 1，As、Pb 的综合污染指数处于警戒线，Cd、Cu、Ni 的综合污染指数呈现轻度污染，Hg 的综合污染指数呈现中度污染，表明 Cd、Cu、Ni、Hg 可能存在外部污染源。以上海市土壤背景值为基准时，Ni、Cu、Pb、Cd、As、Hg 的污染累计指数均小于 1，As、Cu、Hg 的综合污染指数为轻度污染，表明 3 种重金属在地区背景值条件下可能存在外部污染源。以 GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》的风险筛选值为基准时，6类重金属的污染累计指数和综合污染指数小于 1，表明土壤环境质量相对农用地土壤标准为清洁，重金属含量均满足农业种植的土壤环境质量要求。

Table 3. The pollution index of heavy metals under different criteria

表 3. 不同标准条件下重金属污染指数数据

类型	污染指数	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni
以国家土壤背景值为基准	P_i	0.63	0.95	0.96	0.61	0.83	1.22
	P_N	0.90	1.28	1.32	0.81	2.91	1.49
	综合污染程度	警戒线	轻度污染	轻度污染	警戒线	中度污染	轻度污染
以上海市土壤背景值为基准	P_i	0.78	0.69	0.76	0.63	0.53	0.82
	P_N	1.10	0.94	1.04	0.83	1.85	1.00
	综合污染程度	轻度污染	警戒线	轻度污染	警戒线	轻度污染	警戒线
以 GB 15618-2018 筛选值为基准	P_i	0.28	0.15	0.22	0.09	0.02	0.17
	P_N	0.40	0.21	0.30	0.12	0.06	0.21
	综合污染程度	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁

3.2.2. 相关性分析

土壤 pH 与重金属、重金属之间进行皮尔森相关性分析，其相关性结果如图 2 所示。

pH 与重金属 Cd、Cu、As、Ni、Pb 等 5 种存在显著相关性，且为负相关，显著相关性系数从大到小依次为 pH-Pb (-0.36) > pH-Ni (-0.43) > pH-As (-0.47) > pH-Cd (-0.55) = pH-Cu (-0.55)。

pH 值是控制重金属元素地球化学行为的重要因素，重金属存在多种形态，土壤为固液气三相体系，重金属会随着 pH 值变化在多相体系中形成吸附解析动态平衡[11]。pH 值增加可减少土壤中 Pb、Cd 等重

金属离子交换态，造成吸附的重金属解析，进入地下水，因此 pH 值与土壤重金属呈现负相关关系，由于 Pb 存在专性吸附，pH 值偏碱性对 Pb 解析的影响相对其他重金属较弱[12]。

大部分重金属间存在不同程度的显著相关性，且显著相关性均为正。Hg 与大部分重金属不存在相关性，仅与 As、Ni 存在正相关，Hg 表现出的相关性与南京某农用地土壤[13]结果较一致。As、Ni 均与其他 5 种重金属均呈现很好的显著相关性，相关性系数最高为 As-Ni (0.79)、相关性系数最低为 Hg-Ni (0.27)。此外，Cu-Cd、Pb-Cd、Pb-Cu 也存在显著相关性，Cu-Cd 相关性系数最高(0.81)。

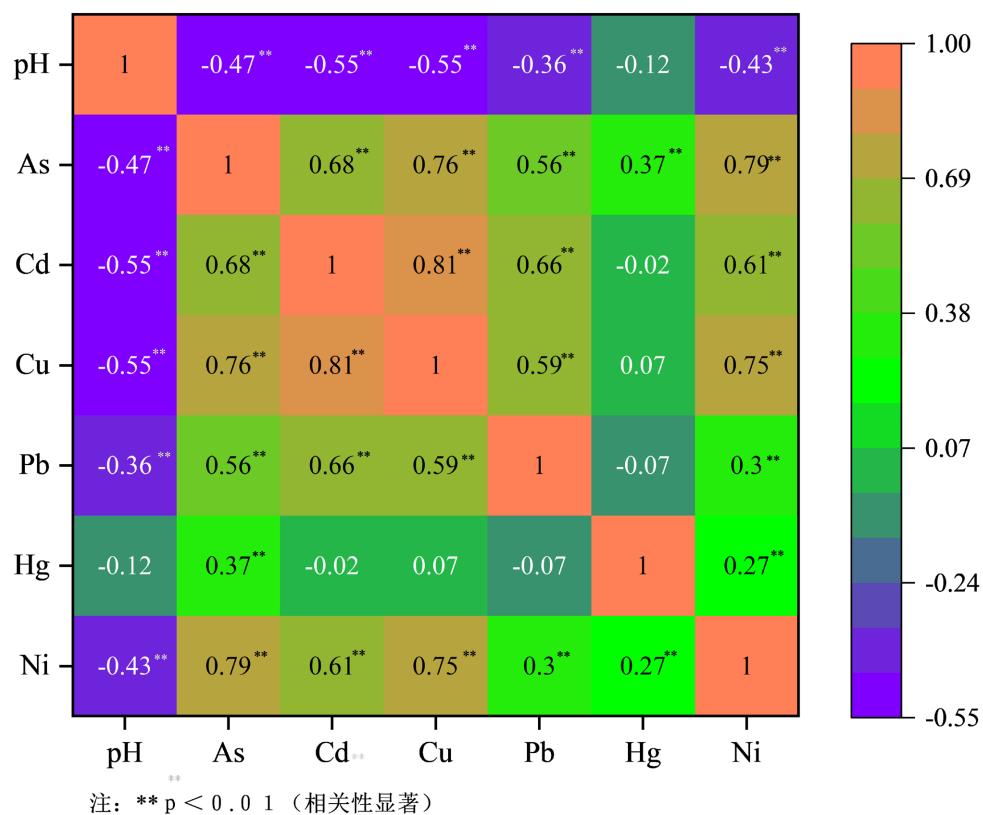


Figure 2. Correlation analysis of pH and heavy metals in soil ($n = 96$)
图 2. 土壤 pH 与重金属的相关性分析($n = 96$)

3.2.3. 主成分分析

主成分分析对识别环境介质中重金属的来源有重要帮助，众多研究均采用此方法开展重金属污染溯源分析[14] [15]。利用 SPSS 软件对土壤 pH、重金属含量进行主成分分析，KMO 值为 0.792，Bartlett 值为 0.00 ($P < 0.001$)，表明 pH、重金属含量之间的关联性较大，适合进行主成分分析。分析中提取初始特征值大于 1.0 的主成分 1 和主成分 2，结果显示，2 项的累计方差贡献率 74.988%，2 个主成分依次解释因子的 57.691%、17.297% (见表 4)。

在主成分 1 上，载荷最高的因子依次为 pH、Cu、As、Cd、Ni、Pb，绝对值均大于 0.5，且 pH 和 5 种重金属显著的正相关，表明 pH 与 5 种元素同源性比较强，说明 pH、Cu、As、Cd、Ni、Pb 背景值属性较高。Hg 的绝对值小于 0.5，表明 Hg 与其他因子非同源，可能存在其他外部形成因素影响。

在主成分 2 上，Hg 载荷最高，其他因子绝对值均小于 0.5，显示 Hg 具有强孤立性，与其他因子无显著相关，主成分 2 来源主要为人为源，例如农业活动中化肥、药剂、农业机械设备的使用。

Table 4. Principal component analysis of pH and heavy metals in soil
表 4. 土壤 pH 与重金属主成分分析

因子	主成分 1	主成分 2
pH	-0.667	0.026
As	0.894	0.239
Cd	0.878	-0.260
Cu	0.919	-0.102
Pb	0.687	-0.422
Hg	0.205	0.904
Ni	0.816	0.282
初始特征值	4.038	1.211
方差贡献率/%	57.691	17.297
累计方差贡献率/%	57.691	74.988

4. 结论

对比国家背景值、上海背景值、农用地筛选值, 与沿海农田土壤的 32 个点位 96 个土壤样品的数据, 并进行 pH、重金属的分析与评价, 得到以下结论:

(1) pH 值范围为 8.36~9.89, 总体偏碱性, As、Cd、Cu、Hg 和 Ni 5 项重金属最大浓度高于国家和上海土壤背景值, Pb 最大浓度和平均浓度均低于国家和上海土壤背景值, 重金属变异系数 $Hg > As > Cu > Cd > Pb = Ni$ 。

(2) 重金属污染指数表明: 以国家土壤背景值为基准时, Cd、Cu、Ni、Hg 呈现污染; 以上海土壤背景值为基准时, As、Cu、Hg 呈现污染; 以 GB 15618-2018 的风险筛选值为基准时, 土壤的环境质量为清洁。

(3) pH 与 Cd、Cu、As、Ni、Pb 等 5 种重金属存在显著负相关性, Cd、Cu、As、Ni、Pb 重金属间存在显著正相关性, 且同源性较强, Cu-Cd 相关性系数最高(0.81)。Hg 与大部分重金属不存在相关性, Hg 受人为源影响比较大。

参考文献

- [1] Mai, X., Tang, J., Tang, J., Zhu, X., Yang, Z., Liu, X., *et al.* (2025) Research Progress on the Environmental Risk Assessment and Remediation Technologies of Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil. *Journal of Environmental Sciences*, **149**, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.045>
- [2] Nde, S.C., Felicite, O.M., Aruwajoye, G.S. and Palamuleni, L.G. (2024) A Meta-Analysis and Experimental Survey of Heavy Metals Pollution in Agricultural Soils. *Journal of Trace Elements and Minerals*, **9**, Article 100180. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2024.100180>
- [3] 张璐莹, 于洋, 郑玉婷, 等. 发达国家金属环境风险评估方法研究[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(1): 350-357.
- [4] 张雨涵, 李瑜, 官开江, 等. 重庆某农业集中区土壤重金属污染评价与来源解析[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 10-18.
- [5] 李文明, 孙朝, 陈霄燕, 等. 青海省典型高山农业区域土壤重金属污染评价及来源探析[J]. 岩矿测试, 2023, 42(3): 598-615.
- [6] 李超, 戴雪荣. 上海城市地貌形变的生态环境效应及应对策略[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 81-86.
- [7] 王彤, 封超年, 靳瑞萍, 等. 苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(19): 339-343.
- [8] 凌玲. 上海临港新城道路土壤特征及改良对策[J]. 上海建设科技, 2018(4): 88-90.
- [9] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 166-172.

-
- [10] 张施阳. 基于 GIS 的上海市不同功能区土壤重金属污染评价及健康风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1226-1236.
 - [11] 李仁声, 花修艺, 董德明, 等. 由 pH 值改变引起的水环境多种固相物质共存体系中重金属的再分布行为[J]. 吉林大学学报(理学版), 2009, 47(4): 852-858.
 - [12] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 67-73.
 - [13] 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.
 - [14] 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 等. 太原市蔬菜中重金属污染特征及健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 327-336.
 - [15] 滕吉艳. 上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 927-933.