

南通市沿江地区土壤重金属累积特征及风险评价

王 钺^{1,2}, 刘 强^{1,2}, 孟 山^{1,2}

1. 江苏省有色金属华东地质勘查局地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 南京 210007;
2. 自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心, 南京 210007)

摘要: 为掌握南通市沿江地区土壤重金属累积特征及风险程度, 在该区农用地、建设用地、沿江湿地及长江底泥等 4 种地类类型, 采集了 1114 件表层样品, 测定了 pH 及 8 种重金属含量, 采用单因子指数法进行了重金属超标评价和累积性评价。结果表明, 除 Cd 以外, 研究区土壤和长江沉积物中重金属总体质量相对较好; 局部区域存在 Cd 超标的现象, 最大超标倍数为 0.37。研究区重金属累积物主要为 Cd 和 Hg, 累积点位占比均在 20% 以上, 但二者累积点位分布不同, 表明二者来源不一。重金属 Cd 和 Hg 最大累积指数 >3, 应查清并管控污染源, 遏止土壤污染物累积趋势, 以保障农业生产和长江饮用水质安全。从全区来看, 研究区土壤环境质量整体上处于安全状态, 但局部区域的重金属累积问题须引起重视。

关键词: 沿江地区; 土壤; 重金属; 风险评价; 南通市

中图分类号: X825

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202210051

Accumulation characteristics and risk assessment of heavy metals in soil along the Yangtze River in Nantong

WANG Ju^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}, MENG Shan^{1,2}

1. Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, ECE, Nanjing 210007, China; 2. Coastal saline-alkali land ecological rehabilitation and sustainable utilization technology innovation center, MNR, Nanjing 210007, China)

Abstract: To clarify the accumulation characteristics and risk of heavy metals in the soil along the Yangtze River in Nantong, 1114 surface samples were collected from 4 lands, including agricultural land, construction land, wetland and sediment of the Yangtze River. The pH and 8 heavy metal elements were measured. The single factor index was carried out to evaluate the exceedance and accumulation. The results showed that the overall quality of heavy metals in soil and Yangtze River sediments were relatively good except Cd. Cd exceeded the standard in some areas, and the maximum exceeding multiple was 0.37. Heavy metal accumulations mainly occurred in Cd and Hg, the cumulative proportion of stations was above 20%. However, their cumulative station distribution was different, thus indicating that the two sources were different. Cd and Hg maximum cumulative index was larger than 3, and the pollution sources should be identified and controlled to prevent the accumulation trend of soil pollutants, thus ensuring the safety of agricultural production and drinking water quality. For the whole area, the soil environmental quality in the study area was generally in a safe state, while attention should be paid to the accumulation of heavy metals in local areas.

Keywords: area along the Yangtze River; soil; heavy metal; risk assessment; Nantong

CLC number: X825

南通市位于江苏东南部, 是上海大都市圈北翼门户, 长江经济带重要组成城市。沿江地区南通市经济发展的核心地带, 随着新型工业化、新型城镇化及农业现代化的深入推进^[1-4], 该区域生态环境压力日益显现, 制约了新时期南通市经济社会高质

量发展和生态文明建设。十九大以来, 党中央对长江经济带的发展提出了“共抓大保护、不搞大开发”的新理念, 要求探索出一条生态优先、绿色发展、人与自然和谐共生的新路, 这对新时期南通市沿江地区的发展提出了更高要求。土壤是筑牢人居环

收稿日期: 2022-08-26 录用日期: 2022-10-15

基金项目: 江苏省 2019 年省级地质勘查专项资金项目(苏财资环[2019]14 号); 江苏省 2021 年省级矿地融合试点项目(苏财资环[2021]45 号)资助

作者简介: 王 钺(1980-), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 岩土工程、生态地质调查及修复。Email: Tifewang@163.com

通信作者: 刘 强(1985-), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 环境地质、土壤调查及修复。E-mail: lauqung@qq.com

引用格式: 王 钺, 刘 强, 孟 山. 南通市沿江地区土壤重金属累积特征及风险评价[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 136-144.

境的首要基础,其环境质量直接关系到经济发展和生态安全^[5-6]。土壤中可溶态重金属会随着地下水、地表径流进入水体,而底泥对重金属有着较强的累积作用^[7-8]。因此,将土壤和河流底泥作为一个整体,系统研究重金属的累积特征及超标情况有助于精准评价当地生态环境安全。目前常用的土壤重金属评价方法颇多^[9-13],但各有优缺点,本文在分析已有土壤环境评价标准的基础上,以南通市沿江地区为研究对象,对研究区表层土壤和底泥中 8 种重金属地球化学分布特征进行了分析,采用单因子指数评价法开展了重金属超标评价和累积性评价,可为沿江地区土壤安全利用分区及分类利用管控提供数据支撑,同时也可沿江地区“宜耕则耕、宜林则林、宜草则草”等国土空间规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区行政区划跨如皋、通州、港闸、崇川、海门、启东等区县,见图 1。

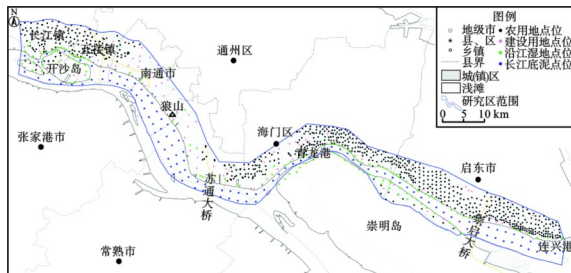


图 1 研究区位置及采样点位

Fig. 1 Location of study area and soil sampling points position

东起连兴港,西至南通、泰州交界处,南界为南通市长江行政边界,北界为江堤往外侧延伸约 5 km,总面积约为 1 000 km²,其中长江水域面积约 400 km²,长江主岸线约 166 km,洲岸 53 km。南通市沿江地区生活生态空间面临较高的被挤占、破坏风险,如目前沿江地区密集分布有启东海洋装备工业园区、启东滨江化工园区、海门精细化工园区、通州经济技术开发区等工业园区。据 2016 年度全省工业用地调查数据显示^[14],20.94% 的生态用地、58.03% 的生活用地被化工、钢铁、纺织、交通等相关企业挤占。研究区土壤多发育于长江近代冲积物上的土壤,由于发育时间较短,淋溶作用不明显,土壤 pH 和碳酸钙含量较高^[7,15-16]。

1.2 样品采集与测试

研究样品共分农用地、建设用地、沿江湿地和长江底泥等四类样品,采样点位在 2019 年遥感影像上布设,采样点位共计 1 114 点,其中农用地 764 点,建设用地 100 点,沿江湿地 130 点,长江底泥 120 点。样品采集方法参照《土地质量地球化学评价规范》,主要概述如下:表层样品采样深度为 0~20 cm,由主采样点和 4 个~5 个子样等量混合组成 1 件样品。样品加工和质控参照《农产品样品采集流转制备和保存技术规定》(2017)。重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等测试参照《全国土壤污染状况详查土壤样品分析测试方法技术规范》(2017),采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定,检出限分别为 0.03、0.4、0.6、0.3、2 和 2 mg/kg; As 和 Hg 的测试参照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定:GB/T 22105—2008》,采用原子荧光光谱仪,检出限分别为 0.01 和 0.002 mg/kg; 样品测试质控由实验室按照相关规范执行,测试精度均在允许范围内。

2 研究方法

2.1 评价标准

2.1.1 重金属超标评价标准 农用地、沿江湿地及长江底泥 8 项重金属超标评价标准采用《农用地土壤污染风险管控标准:GB15618—2018》筛选值^[17]; 建设用地采用《建设用地土壤污染风险管控标准:GB36600—2018》筛选值^[18],见表 1。

表 1 土壤污染风险筛选值

Table 1 Risk screening values for soil contamination mg·kg⁻¹

| 污染物 | 农用地 | | | | 建设用地 |
|--------|--------|------------|------------|--------|------------------|
| | pH≤5.5 | 5.5<pH≤6.5 | 6.5<pH≤7.5 | pH>7.5 | |
| 镉 (Cd) | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 20 |
| 汞 (Hg) | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 1 | 8 |
| 砷 (As) | 30 | 30 | 25 | 20 | 20 |
| 铅 (Pb) | 70 | 90 | 120 | 170 | 400 |
| 铬 (Cr) | 150 | 150 | 200 | 250 | Cr ⁶⁺ |
| 铜 (Cu) | 50 | 50 | 100 | 100 | 2 000 |
| 镍 (Ni) | 60 | 70 | 100 | 190 | 150 |
| 锌 (Zn) | 200 | 200 | 250 | 300 | — |

2.1.2 重金属累积性评价标准 根据《土壤环境质量评价技术规范》(2019), 评价标准优先采用该区域的背景值。2007 年完成的“1: 25 万南通市多目标地球化学调查”通过全市范围内获得的土壤样品计算了南通市地球化学元素的背景值^[19], 但该值是整个南通市市区域的背景值, 而研究区为南通市沿江地区, 成土母质与其他区域略有不同, 若采用全市背景值会导致评价结果出现较大的偏差。因此, 为更准确地评价重金属的累积性, 本研究背景值采用本次获得的深层样品数据, 经过一定的计算分析得出。由于土壤与底泥的环境存在较大差异, 因此分别采用不同的背景值。土壤背景值样本选择本次采集的 81 根土壤柱获得的深层样品, 每柱选择 140 ~ 160 cm 段和 160 ~ 180 cm 段的两组数据, 总样本数量为 162 个。底泥选择 22 个沉积柱的 140 ~ 150 cm、150 ~ 160 cm、160 ~ 170 cm、170 ~ 180 cm 段数据, 样本量为 88 个。采用拉依达准则和狄克逊准则法进行异常点的排查, 排查后的数据计算均值和标准偏差, 取均值与两倍标准差之和作为评价背景值, 见表 2。

表 2 土壤及底泥重金属背景值计算结果统计
Table 2 Calculation results of background values of heavy metals in soil and sediment

| 类别 | 土壤 | 底泥 |
|----|-------|-------|
| 砷 | 10.30 | 11.70 |
| 镉 | 0.22 | 0.20 |
| 铬 | 80.00 | 86.00 |
| 铜 | 36.00 | 28.00 |
| 汞 | 0.10 | 0.06 |
| 镍 | 40.00 | 39.00 |
| 铅 | 31.00 | 25.00 |
| 锌 | 99.00 | 87.00 |

2.2 评价方法

2.2.1 重金属超标评价 选用单因子指数法进行重金属超标评价, 见式(1~2):

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

$$P_{\max} = \max(P_i) \quad (2)$$

式中, P_i 为重金属 i 的单因子污染指数, C_i 为重金属 i 的含量, S_i 为 i 的评价标准(见表 1), P_{\max} 为 P_i 的最大值。

单因子污染指数 P_i 划分为 5 个等级评价结果、分级标准及表达, 见表 3。

表 3 重金属超标等级分级
Table 3 Classification of exceeding the standard

| 超标等级 | P_i | 描述 |
|------|----------|------|
| I | ≤ 1 | 未超标 |
| II | 1 ~ 2 | 轻微超标 |
| III | 2 ~ 3 | 轻度超标 |
| IV | 3 ~ 5 | 中度超标 |
| V | > 5 | 重度超标 |

2.2.2 重金属累积性评价 采用单因子累积指数法评价, 见式(3~4):

$$A_i = C_i/B_i \quad (3)$$

$$A_{\max} = \max(A_i) \quad (4)$$

式中, A_i 为 i 元素的单因子累积指数, C_i 为 i 元素的实测含量, B_i 为 i 元素的背景值(见表 2), A_{\max} 为 A_i 最大值。

根据《土壤环境质量评价技术规范》(2019)将累积指数 A_{\max} 划分为 4 个等级评价结果分级标准及表达, 见表 4。

表 4 重金属累积等级分级
Table 4 Classification of heavy metal accumulation

| 超标等级 | A_i 值 | 描述 |
|------|------------------|------|
| I | $A_i \leq 1$ | 无累积 |
| II | $1 < A_i \leq 2$ | 轻度累积 |
| III | $2 < A_i \leq 3$ | 中度累积 |
| IV | $A_i > 3$ | 重度累积 |

2.2.3 土壤(底泥)环境综合评价 根据重金属超标评价和累积性评价结果, 依据表 5 的分类将土壤环境质量划分为 4 个类别。

表 5 土壤环境质量综合评价分类
Table 5 Classification of comprehensive assessment

| 累积性评价 | 未超标 | 超标 |
|-------|------|-------|
| 无明显累积 | I 类 | III 类 |
| 有明显累积 | II 类 | IV 类 |

3 结果分析

3.1 表层土壤和底泥 pH 分布特征

对研究区表层土壤和河流底泥样品数据进行统计分析, 见表 6, 其中 pH 介于 6.1 ~ 9.2 之间, 平均为 8.2, 标准偏差为 0.4, 变异系数为 4.27%。从土地类型来看, 农用地、建设用地、沿江湿地和长江底泥 pH 平均值分别为 8.1、8.2、8.3 和 8.7, 农用地 < 建设用地 < 沿江湿地 < 长江底泥, 长江底泥明显高

于陆区,这是由于长江南通市段毗邻长江入海口,为感潮河段,受海洋潮汐作用的影响,泥沙中有一部分物质来源于海洋。总体而言,研究区陆区土壤以碱性为主,与成土母质密切相关,但在研究区西部

沪苏铁路附近有一条带状中酸性土壤分布区,见图 2,可能为人类工程活动引起的土壤酸化;长江沉积物酸碱度达到强碱性,受海洋作用的影响十分明显。

表 6 研究区表层土壤和河流底泥样品测试结果统计
Table 6 Statistical test results of surface soil and sediment

| 类型 (样品数) | 指标 | pH | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn | mg·kg ⁻¹ |
|---------------|------|---------|------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-------|--------|---------------------|
| 农用地 (764) | 含量范围 | 6.1~9.2 | 2.28~17.90 | 0.08~0.76 | 29.7~142 | 7.2~61.3 | 0.01~0.50 | 16.1~69.0 | 10~54 | 32~149 | |
| | 平均值 | 8.1 | 7.82 | 0.20 | 65.2 | 22.5 | 0.08 | 27.7 | 20 | 72 | |
| | 标准差 | 0.3 | 2.30 | 0.08 | 13.9 | 7.2 | 0.05 | 6.1 | 5 | 17 | |
| | 变异系数 | 3.89 | 29.40 | 40.55 | 21.30 | 31.93 | 67.84 | 22.13 | 23.62 | 23.15 | |
| 建设用地 (100) | 含量范围 | 6.8~8.9 | 2.67~16.60 | 0.08~0.52 | 28.0~132 | 6.5~60.2 | 0.01~0.30 | 16.2~51.9 | 10~41 | 40~153 | |
| | 平均值 | 8.2 | 6.97 | 0.17 | 63.7 | 19.6 | 0.08 | 25.9 | 20 | 66 | |
| | 标准差 | 0.3 | 2.25 | 0.07 | 12.9 | 9.8 | 0.05 | 6.5 | 6 | 20 | |
| | 变异系数 | 3.54 | 32.34 | 39.53 | 20.26 | 49.94 | 61.00 | 25.23 | 29.55 | 30.53 | |
| 沿江湿地 (130) | 含量范围 | 7.5~9.1 | 3.49~17.30 | 0.05~0.76 | 22~105 | 6.1~70.6 | 0.01~0.29 | 21.0~62.9 | 15~66 | 44~203 | |
| | 平均值 | 8.3 | 8.10 | 0.21 | 49.8 | 25.6 | 0.08 | 31.8 | 26 | 87 | |
| | 标准差 | 0.3 | 3.03 | 0.16 | 18.7 | 13.9 | 0.06 | 8.3 | 10 | 33 | |
| | 变异系数 | 3.58 | 37.45 | 74.16 | 37.46 | 54.54 | 70.82 | 26.16 | 37.35 | 37.38 | |
| 长江底泥 (120) | 含量范围 | 8.0~9.2 | 4.05~12.38 | 0.07~0.82 | 39.5~110 | 5.5~40.6 | 0.01~0.38 | 17.0~59.9 | 12~36 | 44~94 | |
| | 平均值 | 8.7 | 6.92 | 0.21 | 63.4 | 11.4 | 0.04 | 22.7 | 17 | 57 | |
| | 标准差 | 0.3 | 2.18 | 0.15 | 13.2 | 6.6 | 0.05 | 5.2 | 3 | 9 | |
| | 变异系数 | 3.64 | 31.50 | 68.53 | 20.83 | 57.74 | 138.08 | 22.78 | 20.60 | 16.59 | |
| 全区 (1114) | 含量范围 | 6.1~9.2 | 2.28~17.90 | 0.05~0.82 | 21.9~142 | 5.5~70.6 | 0.01~0.50 | 16~69 | 10~66 | 32~203 | |
| | 平均值 | 8.2 | 7.68 | 0.20 | 63.0 | 21.4 | 0.08 | 27.5 | 20 | 71 | |
| | 标准差 | 0.4 | 2.41 | 0.10 | 15.1 | 9.2 | 0.06 | 6.7 | 6 | 20 | |
| | 变异系数 | 4.27 | 31.34 | 50.64 | 24.02 | 43.06 | 73.42 | 24.48 | 29.60 | 28.45 | |

注：变异系数单位为%。

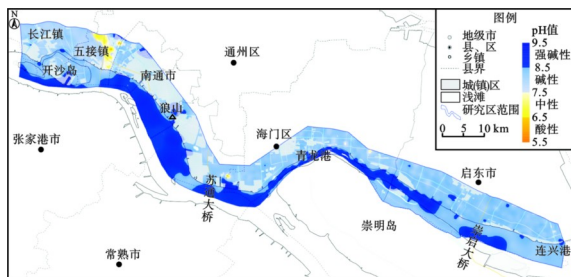


图 2 研究区表层土壤和底泥 pH 分布
Fig. 2 pH distribution diagram of surface soil and sediment

3.2 表层土壤和底泥重金属分布特征

3.2.1 表层土壤和底泥重金属含量特征 从全区来看,土壤和底泥沉积物中 8 种重金属 As、Cd、Cr、

Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别为 7.68、0.2、63、21.4、0.08、27.5、20 和 71 mg/kg,标准差分别为 2.41、0.10、15.1、9.2、0.06、6.7、6 和 20 mg/kg。变异系数以 Hg 最大,达到 73.42%,为极强变异,Cd、Cu 次之,分别为 50.64% 和 43.06%,为强变异,其他 5 种重金属在 30% 左右,反映出研究区 Hg、Cd、Cu 含量变化很大。4 种用地类型中 8 种重金属含量均值差异性并不显著,但是变异系数相差较大,表现的特征不一:As、Cr、Ni、Pb、Zn 等 5 种重金属在四类用地中变异系数相对较为稳定,差异性较小;Cd 在沿江湿地和长江底泥中的变异系数大体在 70% 左右,而纯陆区的农用地和建设用地上

40% 左右;长江底泥中 Hg 的变异系数高达 138%,而在其他类型中在 70% 左右;沿江湿地和长江底泥中 Cu 的变异系数在 50% 以上,在其他两类用地中均低于 50%。这也反映出长江底泥和沿江湿地中

重金属含量的差异性高于陆区,尤其是 Cd、Hg、Cu 等 3 种重金属。

3.2.2 表层土壤和底泥重金属地球化学分布特征 研究区 8 种重金属地球化学分布特征,见图 3。

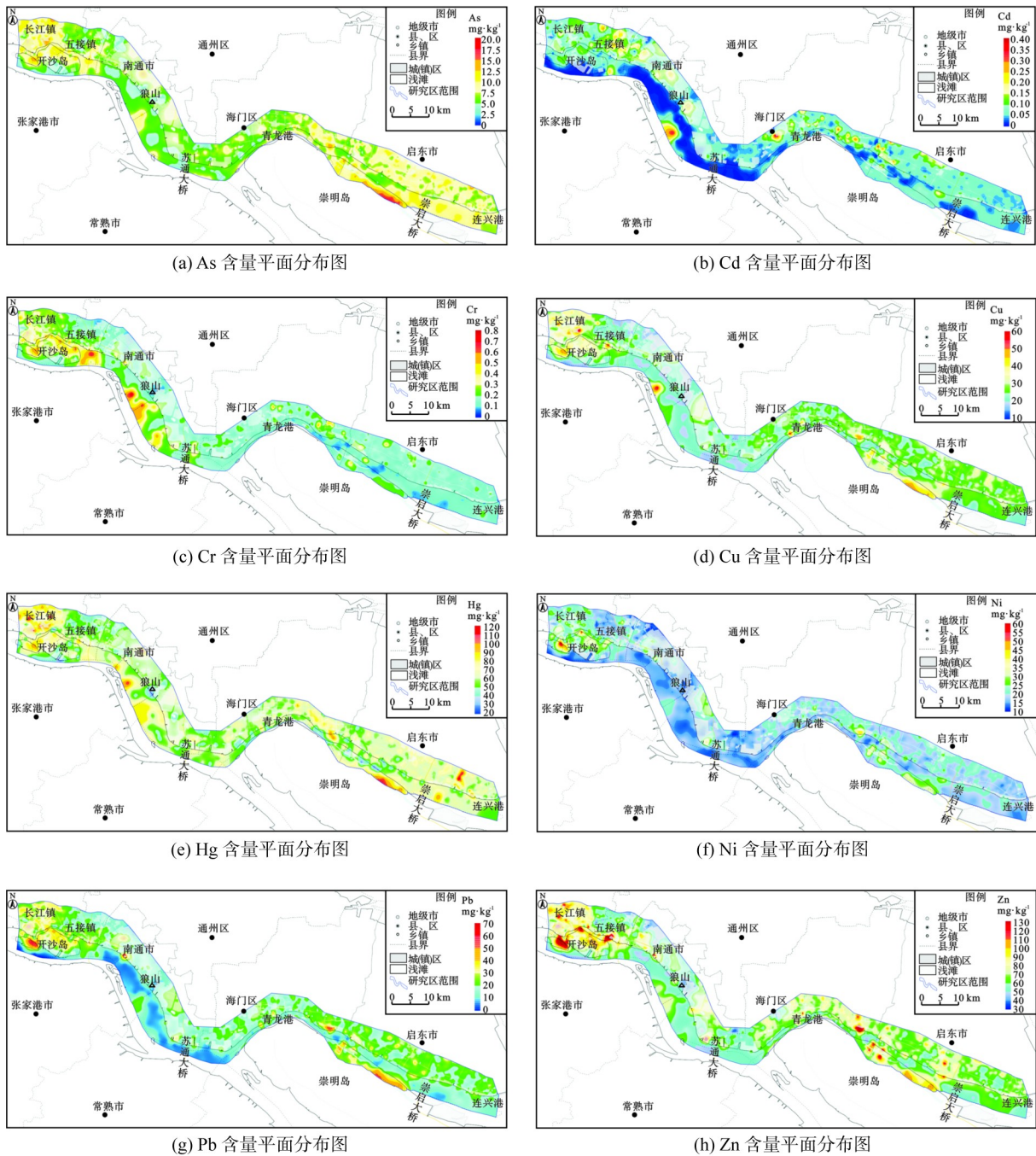


图 3 研究区表层土壤和底泥重金属地球化学分布

Fig. 3 Geochemical distribution maps of surface soil heavy metals

图 3 可知,表层土壤(含底泥)As 含量一般在 5 ~ 12.5 mg/kg 之间,高值区(>10 mg/kg)主要布于研究区东、西两侧,中部(沪苏通大桥至青龙港段)总体含量较低,区内表层土壤 As 含量与南通市区域背景值相当,均未超过 GB 15618—2018 和 GB

36600—2018 中的风险筛选值。本区总体上为砷的低背景值区,在长江镇-开沙岛及启东沿江一带砷含量相对其他区域略高,土壤中砷的来源主要是自然源和人为源,人为活动是造成土壤中砷累积的最为重要的因素^[20],在长江镇-开沙岛、启东沿江一带

分布有大量的化工园区,可能是造成砷在这些区域积累的主要原因。研究区 Cd 含量一般在 0.1~0.3 mg/kg 之间,高值区(>0.3 mg/kg),主要分布于研究区长江上游(开沙岛至苏通大桥段),且左岸高于右岸,可能与该岸段形态有关。陆区主要在如皋长江镇附近含量相对较高。农用地土壤中 Cd 含量最大值为 0.76 mg/kg,超过 0.60 mg/kg 的点位有 5 个。与南通市区域背景值相比,在上述高值区出现了 Cd 的富集。据以往资料表明^[21],从长江源头的沱沱河直至入海口,沿江及两岸平原区出现巨型 Cd 异常带。杨忠芳等^[22]指出长江流域 Cd 异常是以自然风化成为主,局部地段叠加有人为活动释放的 Cd。研究区地处长江下游,上游带来的 Cd 及当地工农业产生的 Cd 在土壤和长江底泥中出现富集,但苏通大桥以下段并未出现 Cd 的富集,这可能是由于此处为长江北支水道和南支水道的交叉点,目前两个水道存在“南侵北淤”的态,即南支水道处于侵蚀状态而北支处于淤积状态,受海洋潮汐作用的影响,北支水道沉积物以海洋沉积物为主。郭杰等^[23](2021)在分析长江宜昌-湖口段近岸沉积物重金属特征时指出该段长江底泥 Cd 含量在 0.77 mg/kg,也即在研究区上游来沙底泥已出现 Cd 的富集,此外,工农业活动造成的 Cd 也会通过支流进入长江,进而在底泥中出现累积。研究区表层土壤(底泥) Hg 含量一般在 0.05~0.15 mg/kg 之间,高值区(>0.15 mg/kg)主要分布于五接镇东部、海门城区及临江镇附近,而长江底泥沉积物 Hg 含量相对较低,一般低于 0.05 mg/kg,仅个别点位在 0.15 mg/kg 以上,陆区表层土壤 Hg 的含量总体上要高于长江底泥。文献 [4] 研究表明,汞污染的来源主要分为自然来源和人为来源,人为来源有 80% 是以元素汞蒸气的形式向大气排放的,主要来自于燃料燃烧、采矿、冶炼、垃圾焚烧等途径;另外有 15% 通过施肥、农药、生活废弃物等途径进入土壤,还有 5% 以工业废水的形式进入了水体。王信凯^[24]等在研究长三角典型城市农田土壤重金属累积特征时认为农业活动和工业活动会造成土壤中 Hg 的累积。从 Hg 的空间分布图上可以明显看出,研究区 Hg 相对高值主要分布于城镇周边的农田,因此工农业活动可能是造成 Hg 在区内分布不均的重要原因。Pb 含量一般在 10~30 mg/kg 之间,高值区(>30 mg/kg)主要分布于长江镇—开沙岛周边。土壤中的 Pb 主要来源于大气沉降,含铅汽油的使用及电

池、颜料、稳定器、塑料制品、弹药、特殊合金和焊接等工业中的应用^[25]。研究区土壤中铜、锌、铬、镍分布由于受成土母质物质来源影响,在表层土壤中分布具有极大相似性,均表现为三高两低的特点:高值区主要分布于长江镇—开沙岛、海门临江镇、启东启隆镇—大兴镇,低值区主要分布于天生港—海太汽渡段、崇海汽渡—长江口区域,总体而言长江底质沉积物含量要低于陆区土壤。据江苏省 1:25 万多目标地球化学调查资料显示^[19],南通市地区土壤中铜、锌、铬、镍、钴分布由于受成土母质物质来源影响,在深层土壤中分布具有极大相似性,此外工农业活动会造成其在地表出现不同程度的累积。

3.3 重金属风险评价

3.3.1 重金属超标评价 评价结果表明,研究区 8 种重金属中仅少量点位 Cd 超标,其他 7 项重金属均未超标。Cd 超标点位约占总评价点位数的 1.65%, P_{Cd} 指数最大值为 1.37,为 II 级轻微超标。农用地中 Cd 超标点位有 5 个,占样本量的 0.65%,含量最大达到 0.76 mg/kg,超标点主要出现在化工园区附近。研究区表层土壤(底泥)超标评价点位分布,见图 4。

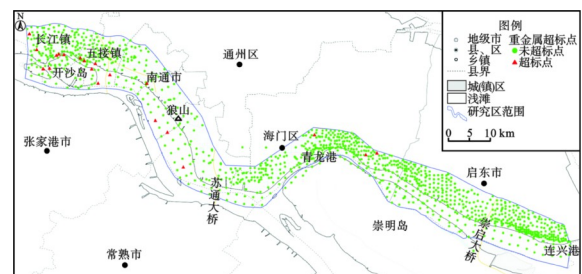


图 4 研究区表层土壤(底泥)重金属超标评价点位分布
Fig. 4 Assessment site for excessive heavy metals in surface soil and sediment

图 4 看出,超标点位主要分布于开沙岛周边及长江上游至苏通大桥段,其中尤以开沙岛周边分布最为密集。该区域分布有化工园区、海洋装备企业、港口码头等重化工企业,可能是造成 Cd 超标的原因之一,此外,据相关研究表明,湿地系统中一些植物(如柳树)能把 Cd 吸附于根系土壤,这也可能是造成 Cd 的积累。总体来看,研究区表层土壤及底泥重金属相对较为安全,但是因存在个别点位的 Cd 超标,也应该引起足够的重视,其中农用地中 Cd 的超标可能导致粮食作物出现 Cd 污染,底泥中 Cd 超标可能对长江饮用水源构成威胁。

3.3.2 重金属累积性评价 研究区虽然重金属仅存在个别点位的 Cd 超标,但重金属的累积性仍不可忽视,对于轻微污染区来说,开展累积性评价对于土壤安全利用是很有必要的。

(1)重金属富集指数。研究区 4 种用地类型中 8 种重金属平均富集指数统计,见表 7。

表 7 研究区表层土壤重金属富集指数
Table 7 Enrichment indices of heavy metals in surface soil

| 类型 | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 农用地 | 0.76 | 0.98 | 0.81 | 0.80 | 0.81 | 0.69 | 0.81 | 0.82 |
| 建设用地 | 0.68 | 0.85 | 0.80 | 0.70 | 0.82 | 0.65 | 0.78 | 0.76 |
| 沿江湿地 | 0.69 | 1.05 | 0.62 | 0.91 | 0.79 | 0.79 | 1.05 | 1.00 |
| 长江底泥 | 0.59 | 1.07 | 0.79 | 0.41 | 0.59 | 0.57 | 0.67 | 0.65 |

从表中可以看出, Cd 在沿江湿地和长江底泥中平均富集指数大于 1, 总体出现富集, 在农用地中与背景值较为接近; Pb 和 Zn 在沿江湿地中平均富集指数大于 1, 也总体出现富集; 其他几种元素平均富集指数均小于 1。

(2) 单项重金属累积特征。平均富集指数仅能反映样本总体富集情况, 并不能反映也个体之间的差异, 本文对 8 种重金属单项累积性进行了评价, 评价结果如下。

1) 8 种重金属均出现不同程度的累积, 其中 Cd 和 Hg 出现 4 个累积等级, 见图 5, Cd 约 77% 的点位无明显累积, 约 18% 的点位为轻度累积, 中度和重度累积分别占 3.5% 和 0.9%; Hg 约 80% 的点位无明显累积, 轻度、中度、重度累积分别占 16%、2.5% 和 1%。Pb 和 Zn 出现 3 个累积等级, 无明显累积点位均超过 90%, 仅个别点位出现中度累积, 轻度累积点位在 5%~8%。As、Cu、Cr 和 Ni 出现两个累积等级, 该 4 种重金属无明显累积点位一般在 90% 以上, 轻度累积点位在 10% 以下, 无中度和重度累积点位。

2) Cd 累积点位主要分布于研究区西部沿开沙岛周边湿地底泥和长江镇部分农田一带, 此外, 在长江南通市港段至苏通大桥段底泥中出有部分点位累积, 海门和启东零星出现一些累积点位, 累积程度也相对较低。

3) Hg 累积点位与 Cd 不同, 主要分布于长江镇—五接镇农田及青龙港段至崇启大桥沿江农田中, 而

长江底泥的累积性相对较低, 这也说明 Cd 和 Hg 的累积可能为不同类型的人类活动引起的。

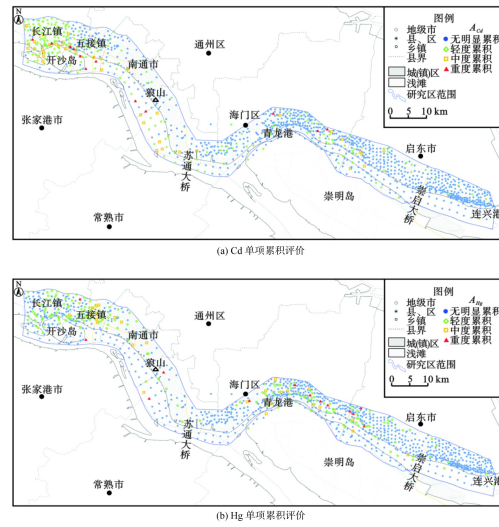


图 5 研究区表层土壤(底泥) Cd 和 Hg 单项累积点位分类
Fig. 5 Classification of single accumulation sites of Cd and Hg in surface soil and sediment

4) As、Pb、Cu、Cr、Ni、Zn 等 6 种重金属累积有一定的共性, 累积点位主要分布于研究区西部长江镇—五接镇—开沙岛一带和青龙港段至大兴镇之间, 农用地和底泥均有点位累积, 但累积程度相对较低。

综上所述, 研究区主要出现累积的重金属为 Cd 和 Hg, 其他重金属累积相对较小, 主要累积区域分布于研究区西部长江镇—五接镇—开沙岛一带以及狼山段附近江域。

(3) 多项重金属综合累积特征。研究区表层土壤(底泥)出现了较为明显的累积, 累积点位约占 42%, 其中轻度累积约占 34%, 中度和重度分别占 5.8% 和 1.9%。重金属综合累积区主要分布于长江镇—五接镇—开沙岛、长江沪苏通公铁大桥—苏通大桥段(尤以南岸侧更为明显)、海门临江镇及启东大兴镇、启隆镇一带。总体而言超过 40% 的区域出现重金属的累积, 主要为 Cd 和 Hg 的累积, 虽然这些区域尚未达到重金属超标, 但出现较为明显的重金属累积也务必引起足够的重视, 见图 6。

3.3.3 土壤(底泥)环境综合评价 在重金属超标评价和累积性评价基础上, 按表 5 进行土壤(底泥)环境综合评价, 结果表明, 研究区土壤环境识别出 3 个类别, 见图 7。

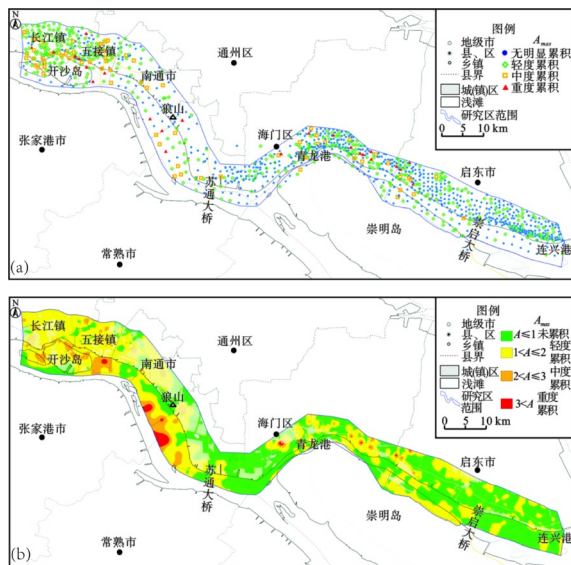


图 6 重金属综合累积指数点位分类图谱及分区

Fig. 6 Point classification and zoning map of comprehensive accumulation index of heavy metals

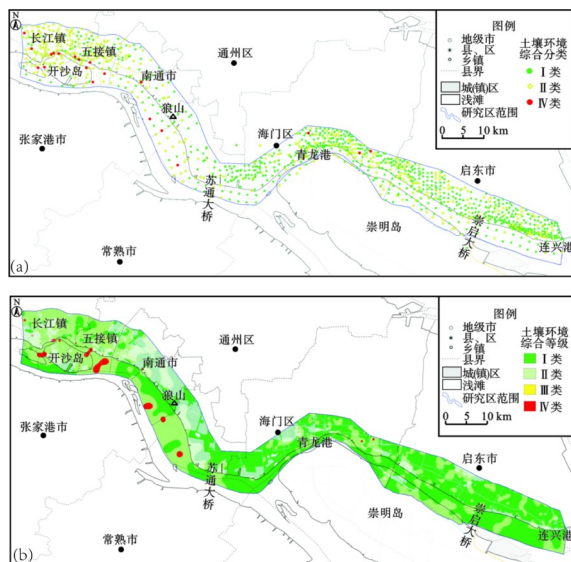


图 7 土壤环境质量综合分类图谱及分区

Fig. 7 Comprehensive classification and zoning map of soil environmental quality

图 7 可知: I 类、II 类和 IV 类, 没有 III 类区域; 以 I 类和 II 类为主, 占比分别为 58% 和 40%; IV 类区域相对较少, 仅占约 2%。

I 类: 主要分布于研究区中东部, 未出现重金属超标, 也未出现明显积累, 土壤环境相对安全, 可保障农业生产安全及长江饮用水源安全。

II 类: 主要分布于研究区西部一带及长江上游, 重金属虽未超标, 但已出现明显积累。研究区西部农用地及长江上游段出现了重金属明显积累, 应进一步开展调查监测工作, 并查清污染来源, 通过相应安全利用方式遏止重金属的累积趋势, 以保

障农产品生产安全及饮用水源安全。

IV 类: 主要分布于研究区西部一带, 以长江底泥为主, 重金属同时出现超标和累积, 需要启动详细调查与风险评价, 确定是否需要修复或治理。

4 结论

(1) 研究区农用地、湿地底泥、长江底泥等土壤环境质量整体上处于相对安全状态, 但局部区域存在重金属 Cd 超标, 最大超标倍数为 0.37, 应启动详细调查与风险评价, 同时制定相应安全利用措施。

(2) 研究区重金属累积较多的为 Cd 和 Hg, 累积点位占比 20% 以上, 最大累积指数 > 3, 应查清并管控污染源, 遏止土壤污染物累积趋势, 以保障农业生产和长江饮用水水质安全。

(3) 在重金属污染中低风险区, 重金属累积性是不可忽视的, 超标评价应与重金属超标评价相结合使用, 进而为土壤污染控制、改善措施制定等提供依据。

参考文献

- [1] 黄辉, 檀满枝, 周峰, 等. 南通市城市边缘带土壤重金属污染现状评价[J]. 土壤, 2007, 39(2): 286 - 290.
- [2] 王硕, 王湛, 魏文侠, 等. 某钢铁厂土壤重金属空间分布特征分析[J]. 环境保护科学, 2019, 45(3): 110 - 114.
- [3] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 245 - 250.
- [4] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219 - 2238.
- [5] 刘需珈, 吴克宁, 罗明, 等. 农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 254 - 262.
- [6] 曾彩明, 邓杰帆, 何觉聪, 等. 典型农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 东莞理工学院学报, 2018, 25(3): 94 - 98.
- [7] 陈豪, 左其亭, 窦明. 河流底泥重金属研究进展[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 71 - 74.
- [8] 马宏瑞, 张茜, 季俊峰, 等. 长江南京段近岸沉积物中重金属富集特征与形态分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2061 - 2065.
- [9] 刘强, 吴奇, 吴灿, 等. 南京八卦洲农用地表层土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 127 - 136.
- [10] 魏洪斌, 罗明, 鞠正山, 等. 重金属污染农用地风险分区与管控研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(2): 82 - 87.
- [11] 刘强, 项立辉, 程瑜, 等. 南京东郊沿江地区农用地土壤重金属分布特征及风险性评价[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 37 - 45.
- [12] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310 - 315.
- [13] 徐启启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学技术, 2008, 31(2): 112 - 115.

- [14] 江苏省国土资源厅, 江苏省发展和改革委员会, 江苏省工业企业用地调查分析报告[R]. 南京: 2017.
- [15] 黄辉. 城市化背景下城市边缘带土壤资源数量及质量变化研究-以南通市为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [16] 张甘霖, 黄标, 潘剑君. 中国土系志·江苏卷(2016)[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [17] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [18] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [19] 廖启林, 吴新民, 张登明, 等. 江苏省 1: 25 万多目标区域地球化学调查报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院, 2007.
- [20] 安礼航, 刘敏超, 张建强, 等. 土壤中砷的来源及迁移释放影响因素研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(2): 234 - 246.
- [21] 马振东, 张德存, 闭向阳, 等. 武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 740 - 743.
- [22] 杨忠芳, 奚小环, 成杭新, 等. 区域生态地球化学评价核心与对策[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 275 - 285.
- [23] 郭杰, 王珂, 于琪, 等. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4625 - 4636.
- [24] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 82 - 91.
- [25] 王济, 王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报, 2005, 23(2): 113 - 120.

(上接第 109 页)

- [8] 潘湘龙, 潘媛媛, 肖化云, 等. 焦作市冬季 PM_{2.5} 中水溶性离子组成特征及来源解析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(6): 755 - 759.
- [9] 孙有昌, 姜楠, 王申博, 等. 安阳市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 75 - 81.
- [10] 周敏. 上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 1997 - 2005.
- [11] 邱晨晨, 宫海星, 于兴娜, 等. 南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1718 - 1726.
- [12] 刘叶新, 陈伟华, 王雪梅, 等. 广州 PM_{2.5} 化学组分特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 53 - 63.
- [13] 任娇, 尹诗杰, 郭淑芬. 太原市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3120 - 3130.
- [14] 黄含含, 王羽琴, 李升苹, 等. 西安市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2528 - 2535.
- [15] LIU H Q, TIAN H Z, ZANG K, et al. Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of PM_{2.5} in two typical cities in the Central Plains Urban Agglomeration, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 657 - 670.
- [16] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 2977 - 2984.
- [17] 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 等. 郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3633 - 3643.
- [18] 陈慕白, 袁明浩, 林秋菊, 等. 郑州市 PM_{2.5} 组分季节性特征及来源研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 61 - 68.
- [19] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4813 - 4824.
- [20] 王媛媛, 路新燕, 高勇, 等. 郑州市大气 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 829 - 834.
- [21] 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 等. 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4774 - 4782.
- [22] TURAP Y S, TALIFU D, WANG X M, et al. Temporal distribution and source apportionment of PM_{2.5} chemical composition in Xinjiang, NW-China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 218: 257 - 268.
- [23] 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 等. 郑州市民运会期间大气 PM_{2.5} 改善效果评估[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3004 - 3011.
- [24] CHEN Y, XIE S D, LUO B, et al. Particulate pollution in urban Chongqing of southwest China: Historical trends of variation, chemical characteristics and source apportionment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 523 - 534.
- [25] ZHANG C, JING D J, WU C Z, et al. Integrating Chemical Mass Balance and the Community Multiscale Air Quality models for source identification and apportionment of PM_{2.5}[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149: 665 - 675.
- [26] 贾佳, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 及二次无机组分污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 801 - 811.
- [27] 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 等. 成都夏冬季 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3012 - 3020.
- [28] 赵丽多, 任丽红, 李军, 等. 云南省昆明市春季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1057 - 1064.
- [29] 薛凡利, 牛红亚, 武振晓, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 1885 - 1894.
- [30] 张敬巧, 罗达通, 王少博, 等. 聊城市秋季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 617 - 623.
- [31] 杨婧, 郭晓爽, 滕曼, 等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. 环境化学, 2014, 33(9): 1514 - 1521.
- [32] 贺瑶, 韩秀秀, 黄晓虎, 等. 南京市不同功能区冬季大气 PM_{2.5} 分布特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 830 - 841.