文章编号:1000-5854(2026)05-0514-10

黄泛区大气降尘中的元素特征

董明明[1]， 孟 琳[1]， 邢先双[1]， 李广杰[2]， 蒋 宁[3]

(1.山东省水文中心,山东 济南 250002; 2.聊城市水文中心,山东 聊城 252023; 3.北京师范大学 地理科学学部/地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心,北京 100875)

摘 要:土壤风蚀引发的地表沙尘释放与输移过程是干旱半干旱区最为重要的地表过程,也是区域大气可吸入颗粒物的重要来源.基于山东省冠县清水土壤风蚀监测站半月度大气降尘连续监测数据,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy,ICP-AES)测定大气降尘中元素含量,探究区域降尘量与主要元素含量特征,判别元素富集程度,并评价降尘重金属的污染程度及潜在生态风险.结果表明:1) 传统土壤风蚀期黄泛区大气降尘模数为 87.53 t/(km^2 · a);2) Al、Ca、Fe、Mg、Ti、P 为大气降尘 18 种测定元素的主要组分,合计占降尘总量的 10.39%,其余 12 种元素(As、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、S、Pb、V、Zn)总含量仅为前 6 种主要元素的 1.45%;大气降尘元素含量具有明显的季节分异,Fe、Mn、Cr 冬季含量最高,Al、Ca、Ba 春季含量最高,Mg、Ti、P、S、Pb、Zn、V、Ni、Cu、As、Co、Cd 秋季含量最高;3) 黄泛区大气降尘中仅 Mg、Ni、V、Ca 以自然源输入为主,其余元素均不同程度受人为活动干扰,其中 Al、Pb、Cr 受人为影响尤为突出;以下 9 种重金属元素中,V、Co、As 为轻度污染,Zn、Cd、Cu、Ni 为中度污染,Pb、Cr 为较高污染;4) 重金属单因子污染指数(P_i)存在显著季节变化规律,自秋季至次年春季,Pb、Zn、Cu、As、Cd 污染指数持续下降,Cr 污染指数先上升后下降,V、Ni、Co 污染指数先下降后上升;此外,秋、冬季 Cd 的单项潜在生态风险系数(E_r^i)与 9 种重金属综合潜在生态风险指数(potential comprehensive ecological risk index,RI)均表明,黄泛区整体处于中等潜在生态风险.

关键词:黄泛区; 大气降尘; 电感耦合等离子体原子发射光谱法; 元素富集特征

中图分类号:X 513 **文献标志码**:A **DOI**:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202505011

Characterization of elements in atmospheric dust deposition in the Yellow River flood area

Dong Mingming[1], Meng Lin[1], Xing Xianshuang[1], Li Guangjie[2], Jiang Ning[3]

(1.Hydrology Center of Shandong Province,Jinan Shandong 250002,China; 2.Hydrology Center of Liaocheng City, Liaocheng Shandong 252023,China; 3.Faculty of Geographical Science/State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction/MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control,Beijing Normal University,Beijing 100875,China)

Abstract: The emission and transportation of surface sand and dust caused by soil wind erosion is the most important surface process in arid and semi-arid regions of China, and it is an important source of atmospheric PM in the region. Based on the semi-monthly monitoring of atmospheric dust at Qingshui soil wind erosion monitoring station in Guan County, Shandong Province, and the determination of elements in atmospheric dust by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy(ICP-AES), this paper investigated the atmospheric dust and its major elemental contents, determined the degree of elemental enrich-

收稿日期:2024-01-18; **修回日期**:2025-05-09

基金项目:国家自然科学基金(42171003)

作者简介:董明明(1982-),男,山东济南人,高级工程师,研究方向为区域土壤侵蚀监测.

ment of the atmospheric dust, and evaluated the pollution of heavy metal elements in atmospheric dust and the potential ecological risks. The main conclusions were as follows: 1) The modulus of dust deposition in soil wind erosion season in the Yellow River flood area was 87.53 t/(km^2 · a). 2) Al, Ca, Fe, Mg, Ti, and P were the main elements of the 18 measured elements in atmospheric dust deposition, which accounted for 10.39% of the total elemental measured content, and the remaining 12 elements (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, S, Pb, V, and Zn) were only 1.45% of the former. There were obvious seasonal characteristics of the element content for dust deposition. The contents of Fe, Mn, and Cr were the largest in winter; Al, Ca, and Ba arrived at the largest contents in spring; and other elements reached the largest values in autumn. 3) Only Mg, Ni, V, and Ca in atmospheric dust in the Yellow River flood plain originated from natural sources, while the sources of other elements were affected by humans to varying degrees, especially Al, Pb, and Cr. Among the nine heavy metal elements, V, Co, and As belonged to low pollution degree, while Zn, Cd, Cu, and Ni belonged to medium pollution degree, and Pb and Cr belonged to high pollution degree. 4) The pollution coefficients (P_i) of different heavy metal elements showed obvious seasonal characteristics. From autumn to the following spring, the values of P_i for Pb, Zn, Cu, As, and Cd gradually decreased, that for Cr increased first and then decreased, and those for V, Ni, and Co were opposite to Cr. In addition, the potential ecological risk indices of single heavy metal element (E_r^i) for Cd in fall and winter and the potential comprehensive ecological risk index(RI) of nine heavy metals all showed that the potential ecological risk of the Yellow River flood area was medium.

Key words: Yellow River flood area; atmospheric dust deposition; ICP-AES; element enrichment characteristics

土壤风蚀是中国北方风蚀区最重要的生态环境问题.国务院第一次全国水利普查报告显示,中国风蚀区土壤风蚀面积超过 165 万 km^2.大面积土壤风蚀引发的地表沙尘释放,是中国北方风蚀区最重要的地表过程;地表释放的沙尘颗粒在风力作用下沿下风向输送、周转,是区域大气可吸入颗粒最主要来源.根据北京市生态环境监测中心监测数据,2021 年 3 月 14 日至 15 日发生在中国北方的沙尘暴,造成北京市大部分地区 PM_{10} 质量浓度超过 2 000 μg/m^3.大气可吸入颗粒物浓度急剧升高,对沙尘源地及其下游地区的陆地生态系统、海洋生态系统、人类健康以及工农业生产均具有显著负面影响[1].已有研究证实,中国东部大气可吸入颗粒物含量与上风向沙尘活动密切相关[2-3].此外,随着中国工业化水平提升、城市化进程推进,工业粉尘、建筑粉尘与化石燃料燃烧排放持续加剧,大气颗粒物污染已成为我国突出的环境问题之一[4].由此可见,开展长期连续的大气降尘监测、解析沙尘物源[5-6],揭示各类沙尘源的时空演化特征[1],定量区分土壤风蚀引起地表沙尘释放等自然源[7-9]以及工业粉尘、建筑粉尘、化石燃料燃烧、机动车尾气排放等人为源[4,10-12]对大气可吸入颗粒物的贡献,是实现大气环境精准防控的重要基础[13-14].黄泛区是中国半湿润区地表沙尘释放的重要区域,冬、春季植被覆盖度较低[15],同时起沙风风速大、出现频次较高[16];截至 2019 年,黄泛区土壤风蚀面积已达 2 252 km^2[17],区域土壤风蚀问题突出[18-19].已有研究表明,黄泛区裸土地表风蚀模数高达 2 375 t/(km^2 · a),侵蚀等级为中度[16].但目前针对黄泛区地表沙尘释放机制、大气降尘原位观测、沙尘源解析等方面的研究仍较为薄弱.本研究以山东省冠县为例,基于冠县清水镇风蚀监测场连续大气降尘监测数据,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy,ICP-AES)测定降尘中元素含量,探究大气降尘量及其动态变化特征,对比降尘中与表层土壤中的主要元素组分差异,判别大气降尘元素富集程度,评估降尘重金属污染水平与潜在生态风险,为制定区域沙尘污染管控可行措施提供支撑.

1 研究方法

1.1 研究区概况

山东省冠县属于黄泛平原风沙区(见图 1,下文简称"黄泛区"),全域地势整体平坦开阔,地形自西南向东北微倾;土壤类型以潮土、风沙土和盐土为主[20].区域土地利用类型主要为耕地,约占黄泛区总面积的 80%,其次为城乡、工矿及居民用地,另有少量草地、林地和园地[21].当地气候类型为暖温带半湿润季风气候,四季分明、雨热同期[22];多年平均气温约 14 ℃,多年平均降水量约 561 mm,境内主要水系为马颊河和京

杭运河[23].该地区起沙风集中于冬、春季,该时段风速大、发生频次高,区域年均起沙风速为 5.53～6.08 m/s,风向以 NE 和 S 为主[16].

1.2 大气降尘量测量

本研究选取山东省冠县清水土壤风蚀监测场开展大气降尘观测工作.结合黄泛区土地利用现状,试验设置 3 类下垫面处理样地,分别为天然草地(Ⅰ、Ⅱ)、割草草地(地表残茬高度 5～8 cm)与裸土地表,共计 4 块试验样地.各类下垫面均布设矩形样地,样地沿主风向长 50 m、垂直主风向宽 10 m;在各样地中心距地面 2 m高度布设大气降尘缸(内径 15 cm、深 30 cm),用于采集大气降尘样品并测定降尘量(见图 1).常规每月 2 次大气降尘取样,采样时间分别为每月 15 日 16 时和当月末日 16 时,整体监测时段为 2019 年 9 月 30 日—2020 年 5 月 31 日.

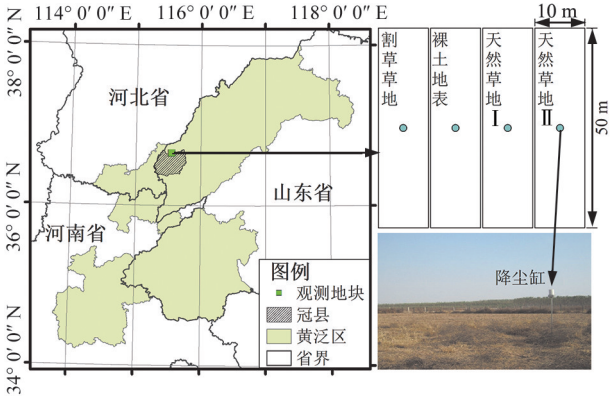


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1.3 大气降尘元素测定

本研究采用法国 HORIBA Jobin Yvon 公司 ULTIMA 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定大气降尘样品中各元素含量,仪器检出限可达 0.01 μg/mL.不同大气降尘元素在含量、赋存形态与来源特征上存在显著差异.在此基础上,借鉴王汝幸[1]开展的大气降尘源解析相关研究,选取 Al、As、Ba、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、P、Pb、S、Ti、V、Zn 共 18 种元素,定量测定大气降尘中上述元素的含量.

1.4 数据处理

为区分大气降尘中与区域表层土壤中各元素含量差异,识别大气降尘中元素的物质来源,本研究运用富集因子法[1]开展源解析.该方法选取化学性质稳定、测试精度良好的 Ti 作为参考元素,富集因子 $\varepsilon=R_{dust}/R_{soil}$,其中 R_{dust}、R_{soil} 分别代表大气降尘中、区域表层土壤中目标元素与 Ti 的含量比值.当 $\varepsilon\leqslant1$ 时,大气降尘中该元素来源于自然源;当 $1<\varepsilon\leqslant10$ 时,大气降尘中该元素同时受自然源与人为源共同影响;当 $\varepsilon>10$ 时,大气降尘中该元素来源于人为源[1,24-25].

大气降尘中重金属来源复杂,其对区域土壤环境及人体健康带来的潜在风险已受到学术界广泛关注[26-31].为此,学界提出单因子污染指数(P_i)、单项潜在生态风险系数(E_r^i)以及综合潜在生态风险指数(potential comprehensive ecological risk index,RI)3 类评价参数,实现对重金属污染程度与潜在生态风险的定量表征.$P_i=C_i/S_i$,其中 C_i 为大气降尘中重金属 i 的含量,S_i 为研究区表层土壤中重金属 i 的参比含量.单因子污染指数的污染等级划分标准:$P_i<1$ 为轻度污染;$1\leqslant P_i<3$ 为中度污染;$3\leqslant P_i<6$ 为较高污染;$P_i\geqslant6$ 为很高污染[1].$E_r^i=T_r^iP_i$,其中 T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数(本研究采用的素性响应系数赋值:Zn=1、Cr=V=2、Co=Cu=Ni=Pb=5、As=10、Cd=30、Hg=40)[26-27].潜在生态风险分级标准:$E_r^i<40$ 为低潜在生态风险;$40\leqslant E_r^i<80$ 为中等潜在生态风险;$80\leqslant E_r^i<160$ 为较强潜在生态风险;$160\leqslant E_r^i<320$ 为强潜在生态风险;$E_r^i\geqslant320$ 为很强潜在生态风险.$RI=\sum E_r^i$,依据 RI 数值划分为低、中等、较强、强、很强 5 个潜在生态风险等级,分级临界值分别为 80、160、320 和 640[28,31].

2 结果与讨论

2.1 大气降尘量

裸土地表、割草草地及天然草地(Ⅰ、Ⅱ)的降尘缸收集到的降尘量整体稳定,对应降尘量分别为1.52、1.59、1.51、1.57 g,平均值为 1.55 g,测定误差为−2.48%～2.63%.考虑到研究区土地利用类型以耕地为主,农作物与草地在植被生长期(6—9 月)长势迅速,且割草草地残茬高度(常年维持在 5～8 cm)难以控制,本研究未开展农田、割草草地植被生长期的大气降尘监测.另外,该时段虽对天然草地开展了大气降尘监测,但降尘缸内易混入大量非降尘杂质,如昆虫、落叶及农作物碎片等,会干扰元素测定结果(见图 2).因此,本研究剔除野外大气降尘监测数据中植被生长期的样本.基于实测降尘量并结合降尘缸采集面积,计算得到黄泛区大气降尘模数为 87.53 t/(km^2 · a),表明黄泛区大气降尘输入强度偏高.后续相关研究可重点对比土壤风蚀量与降尘量的相对大小,厘清土壤风蚀引发的土壤养分迁移规律,为定量分析土壤风蚀对区域农业生产的影响奠定基础.

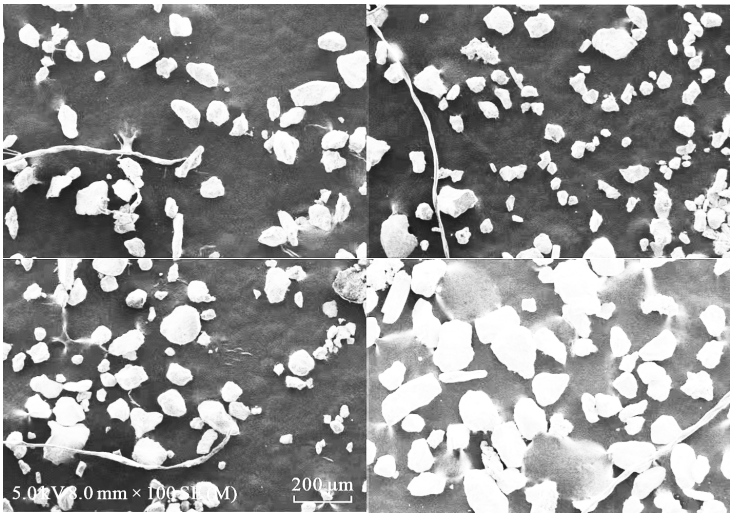


图 2 生长季大气降尘中收集到的非降尘物质示意图

Fig.2 Non deposition material collected in atmospheric dust deposition during the growing season

受疫情影响,2020 年 1 月 31 日、2 月 15 日及 2 月 28 日未能开展大气降尘量监测,因此采用 2020 年1 月 15 日监测数据进行推算,得到 2019 年 10 月—2020 年 5 月共 8 个月大气降尘量的月动态变化,结果见图 3.由图 3 可知,黄泛区 3 月降尘量最大,达 0.47 g,占监测期降尘总量的 26.61%;11 月、12 月及 4 月降尘量相近,均为 0.20～0.22 g,占比达 11.40%～12.68%;5 月、10 月降尘量较小,为 0.123～0.124 g,占比达 6.96%～7.05%.由此可见,黄泛区降尘量月变化规律与中国大气降尘整体特征一致[1],与区域气候、土地利用及植被覆盖状况密切相关[32].

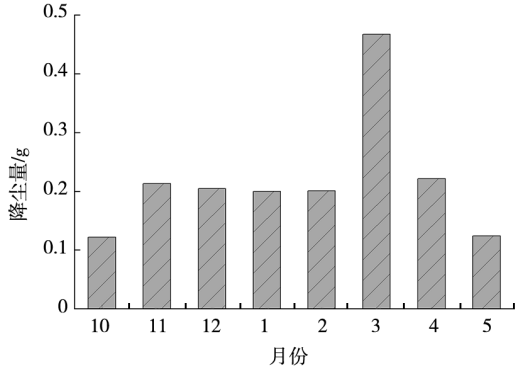


图 3 黄泛区不同月份大气降尘量变化规律

Fig.3 Variation of atmospheric dust deposition in different months in the Yellow River flood area

2.2 大气降尘中的元素含量

大气降尘中包含 Al、As、Ba、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、P、Pb、S、Ti、V、Zn 共 18 种元素，其总质量占大气降尘总量的 10.54%.其中，Al、Ca、Fe、Mg、Ti、P 为主要组成元素，合计占降尘总量的 10.39%，其余 12 种元素仅占降尘总量的 0.15%.6 种含量较高的元素中 Al 含量最高(见图 4a)，为38 953～50 722 μg/g，平均值为42 425 μg/g；其次为 Ca，含量为23 130～34 587 μg/g，平均值为30 749 μg/g；之后依次为 Fe、Mg、Ti、P，平均值分别为19 355、7 504、3 060、790 μg/g.12 种含量较少的元素中 Mn 含量相对较高，为 394～1 186 μg/g，平均值为 520 μg/g；之后依次为 Ba、S、Cr、Zn、Pb、V、Ni、Cu、Co、As、Cd，平均值分别为 487、141、107、87、61、53、19、14、7、7、0 μg/g.18 种元素含量存在明显的季节性差异(见图 4b)，春、秋、冬季对应的月份分别为 3—5 月、10—11 月、12 月—次年 2 月.Fe、Mn、Cr 含量表现为冬季最高、秋季次之、春季最低；Al、Ca、Ba 含量春季最高，其中 Al 含量秋季高于冬季，Ca、Ba 含量则冬季高于秋季.Mg、Ti、P、S、Pb、Zn、V、Ni、Cu、As、Co、Cd 含量秋季最高，Mg、Ti、S、V、Co、As 含量春季高于冬季，P、Pb、Zn、Ni、Cu、Cd 含量冬季高于春季.

大气降尘中 Al、Ca、Fe、Mg、Ti、P、Mn、Ba、S、Pb、Zn、Cr、V、Ni、Cu、As、Co、Cd 的含量与区域土壤对应元素含量的比值分别为 0.93、0.86、0.96、0.92、0.95、1.18、1.23、1.00、1.35、3.52、1.81、3.00、0.95、1.04、1.15、0.86、0.92、1.32，平均值为 1.33(见图 4b)，其中大气降尘中元素含量高于区域土壤背景值，即发生富集的元素有 P、Mn、S、Pb、Zn、Cr、Ni、Cu、Cd，富集倍数平均值为 1.73.Pb、Cr 富集倍数达 3.00～3.52，表明大气降尘中这些元素受人为活动影响显著.此外，不同时段大气降尘中各元素含量的变异系数具有明显差异(见图 4a)，印证了研究区大气降尘中元素具有多来源特征.Al、Fe、Mg、Ti、Ba、V、Co 元素含量的变异系数均小于0.1，说明这些元素来源稳定，含量波动微弱，时间稳定性较强；Mn、Zn、Pb、Cr 元素含量的变异系数均大于 0.4，其中 Pb、Cr 元素含量的变异系数大于 0.87，表明这些元素在时间尺度上稳定性较差；其余元素含量变异系数为 0.1～0.3，说明这些元素在时间尺度上存在一定的含量波动，稳定性较弱.

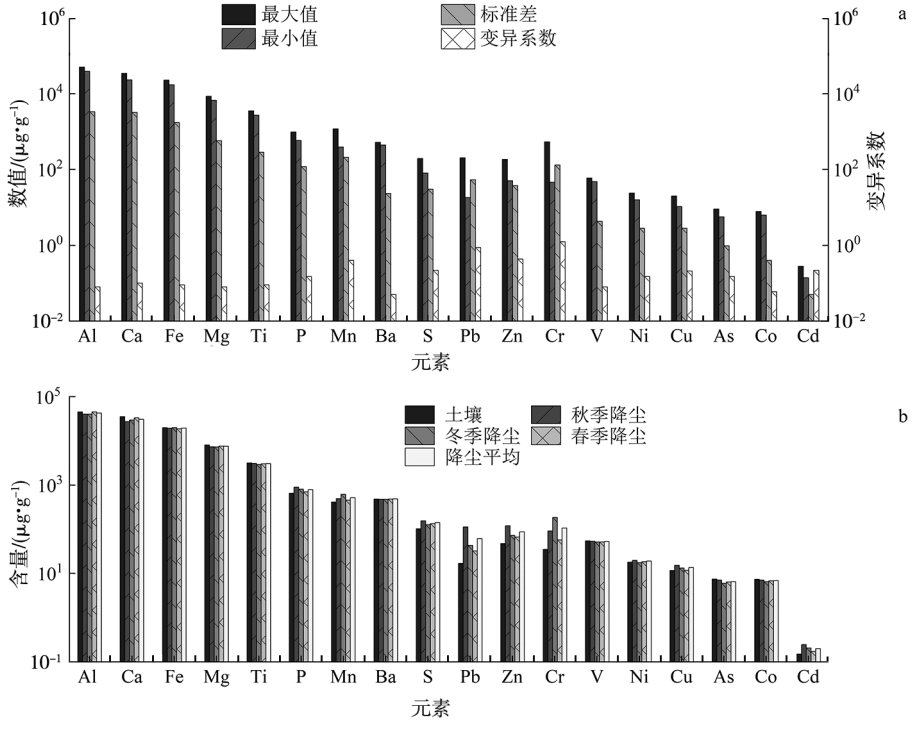


图 4 黄泛区大气降尘元素含量的基本参数(a)和不同季节大气降尘元素含量(b)

Fig.4 Statistical parameters of elemental contents of atmospheric dust deposition in the Yellow River flood area(a) and elemental contents of atmospheric dust deposition in different seasons(b)

2.3 大气降尘中的元素富集

黄泛区大气降尘中元素富集因子平均值为 1.45，按元素富集程度由高至低依次为 Pb、Cr、Zn、Cd、S、

Mn、P、Cu、Ni、Ba、Fe、V、Ti、Al、Co、Mg、Ca、As，对应富集因子分别为 3.80、3.70、1.94、1.43、1.42、1.36、1.28、1.23、1.10、1.06、1.02、1.00、1.00、0.97、0.97、0.97、0.90、0.89.由此可见，除 Al、Co、Mg、Ca、As 富集因子小于 1 外，其余元素富集因子均大于 1，表明黄泛区大气降尘中 Al、Co、Mg、Ca、As 主要来源于自然源，几乎不受人为活动干扰；其余元素受人为活动影响显著，尤其是富集因子相对较大的 Pb、Cr、Zn.事实上，除 Zn 外，不同时期大气降尘中 Pb、Cr 含量的变异系数分别达到 0.87 和 1.23(见图 4a)，正如上节所述，这些元素含量时间波动较大，受人为活动扰动特征突出.Pb、Cr、Zn 峰值出现时间并不同步，Pb、Zn 峰值出现在秋季，Cr 峰值出现在冬季.此外，其余富集因子大于 1 的元素，其富集因子平均值为 1.19，低于 S(1.42).通常情况下，S 是表征人类污染程度的重要指标[1,33-34]，主要来源于工业生产与化石燃料燃烧.考虑到黄泛区无大规模工业生产，且机动车数量远少于北京、上海等国际大都市[35-36]，因此在后续研究中，需扩大大气降尘监测范围，并辅以工业冶炼、垃圾焚烧、建筑施工、燃煤及化石燃料品质等方面的调查，进而精准判别大气降尘的人为来源.

黄泛区大气降尘中不同元素的富集因子存在显著季节分异特征(见图 5).自秋季至次年春季，S、Ba、Al、Co、Mg、As 与 Cr、Fe、Mn 的富集因子呈现相反的季节分异趋势，前者为先下降后上升，后者为先上升后下降；Pb、Zn、Cd、P、Cu、Ni、V 的富集因子呈下降趋势，Ca 的富集因子呈上升趋势.大气降尘中各元素富集因子的季节分异，直接导致各元素富集因子变率存在显著差异.不同季节元素富集因子变率指该季节元素富集因子值减去全年富集因子平均值得到的差值与全年富集因子平均值的比值.秋季，Al、Ca、Fe、Mn、Ba、Cr 富集因子变率为 −27.23%～−0.10%，平均值为 −8.56%，其中 Cr、Mn 富集因子变率分别为 −27.23%、−10.22%；其余元素富集因子变率为 0.31%～70.31%，平均值为 15.08%，其中 Pb、Zn、Cd 富集因子变率分别为 70.31%、34.60%、14.53%，Mg 富集因子变率极低，仅 0.31%.冬季元素富集因子变率大于 0 的元素有 Fe、P、Mn、Cr、Cu、Cd，为 2.86%～81.78%，平均值为 20.51%；其余元素富集因子变率均小于 0，为 −21.31%～−0.13%，平均值为 −5.11%，富集因子变率低于平均值的元素有 S、Zn、Pb、As，分别为 −6.41%、−11.18%、−21.31%、−7.37%.春季富集因子变率大于 0 的元素有 Al、Ca、Mg、Ba、As，分别为 7.05%、10.44%、0.37%、0.23%、0.02%，平均值为 3.62%；其余元素富集因子变率均小于 0，为 −54.47%～−0.70%，平均值为 −16.62%，富集因子变率小于平均值的元素有 Mn、Cr、Zn、Pb、Cd，分别为 −16.95%、−54.47%、−23.42%、−49.01%、−18.52%.

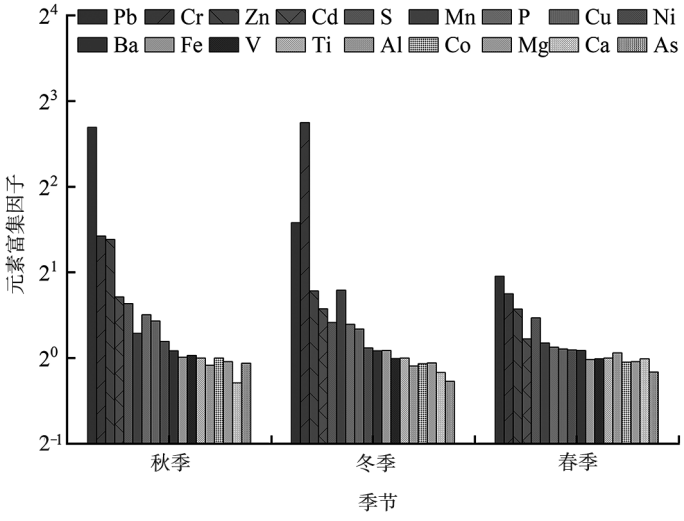


图 5　不同季节黄泛区大气降尘中元素富集因子的变化

Fig.5　Changes of elemental enrichment in atmospheric dust deposition in the Yellow River flood area in different seasons

2.4　大气降尘中重金属污染及潜在生态风险评价

黄泛区大气降尘中 9 种重金属含量由高至低依次为 Cr、Zn、Pb、V、Ni、Cu、Co、As、Cd，其含量分别为 107、87、61、53、19、14、7、7、0 μg/g(见图 4b)，对应元素富集因子分别为 3.70、1.94、3.80、1.00、1.10、1.23、0.97、0.89、1.43.由此可见，除了 Co、As 主要来源于自然源外，其余元素均受到不同程度的人为源影响.监测期内 9 种重金属元素(Cr、Zn、Pb、V、Ni、Cu、Co、As、Cd)的单因子污染指数平均值依次为 3.00、1.81、3.52、

0.95、1.04、1.15、0.92、0.86、1.32(见表 1).参照胡恭任等[37]、王汝幸[1]提出的大气降尘重金属 P_i 的等级划分标准可知,V、Co、As 属于轻度污染,Zn、Cd、Cu、Ni 属于中度污染,Pb、Cr 属于较高污染.此外,9 种重金属元素的 P_i 存在显著季节分异特征.自秋季至次年春季,Pb、Zn、Cu、As、Cd 污染指数持续下降,Cr 污染指数先上升后下降,V、Ni、Co 污染指数先下降后上升.在此,使用污染指数变率表征单因子污染指数在不同季节的变化情况.污染指数变率指某季节单因子污染指数减去全年单因子污染指数平均值得到的差值与全年单因子污染指数平均值的比值.秋季,仅 Cr 污染指数变率为负值(−25.24%),其余 8 种重金属污染指数变率均为正值(2.55%～74.59%),平均值为 19.83%,其中 Pb、Zn 污染指数变率高于平均值,V、Ni、As、Co 污染指数变率为 2.55%～8.69%.冬季仅 Cr、Cd、Cu 污染指数变率为正值,分别为 79.91%、2.91%、1.67%,其余重金属污染指数变率均为负值(−24.11%～−1.65%),平均值为−8.51%,其中 Pb、Zn 污染指数变率低于平均值.春季 9 种重金属污染指数变率均为负值(−54.67%～−0.40%),平均值为−18.54%,Pb、Zn、Cr、Cd 污染指数变率低于平均值,V 和 Co 污染指数变率接近−1.00%.

表 1　黄泛区大气降尘中 9 种重金属元素单因子污染指数

Tab.1　Pollution coefficients of nine heavy metals in atmospheric dust deposition in the Yellow River flood area

重金属元素	污染指数变率/%			P_i
	秋季	冬季	春季	
Pb	74.59	−24.11	−50.48	3.52
Zn	37.20	−12.56	−24.64	1.81
Cr	−25.24	79.91	−54.67	3.00
V	2.55	−1.65	−0.90	0.95
Ni	4.93	−1.92	−3.01	1.04
Cu	11.21	1.67	−12.88	1.15
As	8.69	−8.29	−0.40	0.86
Co	3.54	−2.51	−1.03	0.92
Cd	15.90	2.91	−18.81	1.32

监测期内 9 种重金属元素(Cr、Zn、Pb、V、Ni、Cu、Co、As、Cd)对应的单项潜在生态风险系数分别为6.01、1.81、17.61、1.91、5.20、5.74、4.62、8.55、39.70(见图 6),均处于低风险,其中 Cd 的 E_r^i 显著高于其余重金属,其数值接近中度潜在生态风险临界值[1,28,31].此外,各种重金属元素的 E_r^i 存在显著季节分异特征.仅 Cr 的 E_r^i 峰值出现在冬季,其余重金属元素的 E_r^i 均在秋季达到最大;V、Ni、As、Co 的 E_r^i 谷值出现在冬季,其余元素均在春季最小.Cd 在秋、冬季处于中度潜在生态风险,春季为低风险;其余元素在所有季节均表现为低潜在生态风险.由此可见,Cd 是黄泛区大气降尘 9 种重金属中最主要的潜在风险元素.

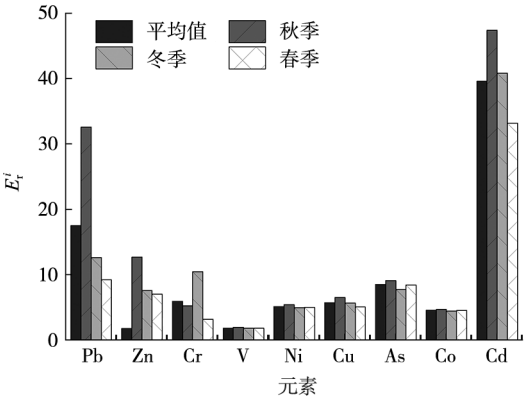


图 6　黄泛区大气降尘中不同重金属潜在生态风险系数

Fig.6　Potential ecological risk index for different heavy metals in atmospheric dust deposition in the Yellow River flood area

黄泛区大气降尘 9 种重金属的综合潜在生态风险指数(RI)为 91.14,表明区域生态风险等级为中等.秋、冬季黄泛区大气降尘 9 种重金属的 RI 高于中等潜在生态风险临界值,春季 RI 低于该临界值,秋、冬、春季 RI 分别为 126.19、96.52、77.84.

大气降尘重金属不同风险评价指标的分级标准存在差异,因此同种元素在不同评价体系下对应不同风险等级,如依据 P_i 分级标准,Pb、Cr 达到较高污染,但 2 者的 E_r^i 均处于低风险等级;Cd 的 P_i 为中等污染,其 E_r^i 在秋、冬季处于中等风险等级,春季则回落为低风险等级.由此可见,在众多重金属污染评价指标体系中,选择适宜的评价方法对判别大气降尘重金属污染程度、辨析污染物来源及制定污染防控措施等至关重要.黄泛区耕地面积广阔,大气降尘重金属污染评价指标的选取直接影响区域耕地利用布局与粮食安

全[38-39]，该问题在后续研究中应予以重点关注.

3 结 论

1）传统土壤风蚀期黄泛区大气降尘模数为 87.53 t/(km^2 · a).

2）Al、Ca、Fe、Mg、Ti、P 是大气降尘测定元素的主要组分，约占降尘总量的 10.39%；As、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、S、Pb、V、Zn 含量仅占 0.15%.大气降尘中各元素含量存在显著季节分异，Fe、Mn、Cr 含量冬季最高，Al、Ca、Ba 含量春季最高，Mg、Ti、P、S、Pb、Zn、V、Ni、Cu、As、Co、Cd 含量秋季最高.

3）大气降尘中元素富集因子平均值为 1.45，除 Al、Co、Mg、Ca、As 富集因子小于 1 外，其余元素富集因子介于 1～10，表明多数元素受不同程度人为活动影响，Pb、Cr 受人为干扰尤为突出.

4）大气降尘中 V、Co、As 为轻度污染，Zn、Cd、Cu、Ni 为中度污染，Pb、Cr 为较高污染.各重金属元素污染指数存在显著季节分异特征：由秋季到次年春季，Pb、Zn、Cu、As、Cd 污染指数持续下降，Cr 污染指数先上升后下降，V、Ni、Co 污染指数先下降后上升.此外，秋、冬季 Cd 的 E_r^i 与 9 种重金属的 RI 均表明，黄泛区大气降尘中重金属元素处于中等潜在生态风险.

参考文献：

[1] 王汝幸.北京市春季大气降尘及源解析(2008—2015)[D].北京：北京师范大学，2017.
Wang Ruxing.Spatial distribution and source apportionment of atmospheric dust fall in Beijing during spring of 2008—2015[D].Beijing：Beijing Normal University，2017.

[2] 朱坦，白志鹏，陈威.秦皇岛市大气颗粒物来源解析研究[J].环境科学研究，1995，8(5)：49-55.DOI：10.13198/j.res.1995.05.49.zhut.011.
Zhu Tan，Bai Zhipeng，Chen Wei.Source analysis of air particulate in Qinhuangdao City[J].Research of Environmental Sciences，1995，8(5)：49-55.

[3] 李成才，毛节泰，刘启汉，等.利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J].科学通报，2003，48(19)：2094-2100.
Li Chengcai，Mao Jietai，Liu Qihan，et al.Using MODIS to study the distribution and seasonal variation characteristics of aerosol optical thickness in Eastern China[J].Chinese Science Bulletin，2003，48(19)：2094-2100.

[4] Chan C Y，Xu X D，Li Y S，et al.Characteristics of vertical profiles and sources of $PM_{2.5}$，PM_{10} and carbonaceous species in Beijing[J].Atmospheric Environment，2005，39(28)：5113-5124.DOI：10.1016/j.atmosenv.2005.05.009.

[5] 秦保平，解辉，韩静.天津市空气污染物 PM_{10}/TSP 比例研究[J].城市环境与城市生态，2002，15(6)：20-21.
Qin Baoping，Xie Hui，Han Jing.Study on the ratio of air pollutant PM_{10} to TSP in Tianjin[J].Urban Environment & Urban Ecology，2002，15(6)：20-21.

[6] Guo H，Wang T，Simpson I J，et al.Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in Eastern China[J].Atmospheric Environment，2004，38(27)：4551-4560.DOI：10.1016/j.atmosenv.2004.05.004.

[7] Pollack J B，Toon O B，Ackerman T P，et al.Environmental effects of an impact-generated dust cloud：implications for the Cretaceous-Tertiary extinctions[J].Science，1983，219(4582)：287-289.DOI：10.1126/science.219.4582.287.

[8] 张丹，张卫东，蒋吕潭.环境中大气颗粒物的源解析方法[J].重庆工商大学学报(自然科学版)，2006，23(2)：124-127.DOI：10.3969/j.issn.1672-058X.2006.02.005.
Zhang Dan，Zhang Weidong，Jiang Lütan.The methods of source apportionment of airborne particulate matter in environment[J].Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science)，2006，23(2)：124-127.

[9] 徐文帅，魏强，冯鹏，等.2010 年春季沙尘天气对北京市空气质量的影响及其天气类型分析[J].中国环境监测，2012，28(6)：19-27.DOI：10.19316/j.issn.1002-6002.2012.06.005.
Xu Wenshuai，Wei Qiang，Feng Peng，et al.The effects of dust weather on air quality and its synoptic type in spring 2010 of Beijing[J].Environmental Monitoring in China，2012，28(6)：19-27.

[10] 杨丽萍，陈发虎.兰州市大气降尘污染物来源研究[J].环境科学学报，2002，22(4)：499-502.DOI：10.13671/j.hjkxxb.2002.04.017.
Yang Liping，Chen Fahu.Study on the source apportionment of atmospheric dust pollutants in Lanzhou[J].Acta Scientiae Circumstantiae，2002，22(4)：499-502.

[11] Sezgin N，Ozcan H K，Demir G，et al.Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway[J].Environment International，2004，29(7)：979-985.DOI：10.1016/S0160-4120(03)00075-8.

[12] 施泽明，倪师军，张成江.成都市近地表大气尘的地球化学特征[J].地球与环境，2004，32(增刊 1)：53-58.DOI：10.14050/

j.cnki.1672-9250.2004.z1.010.
Shi Zeming, Ni Shijun, Zhang Chengjiang. The geochemical characteristics of air dust near the ground in Chengdu[J]. Earth and Environment, 2004, 32(Sup 1): 53-58.

[13] Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W, et al. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(16): 2495-2509. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.01.039.

[14] 孙林，商晓青，孙长奎，等.城市地区气溶胶光学厚度与空气污染指数的相关性分析[J].山东科技大学学报(自然科学版)，2008，27(3)：9-13. DOI：10.16452/j.cnki.sdkjzk.2008.03.014.
Sun Lin, Shang Xiaoqing, Sun Changkui, et al. Analysis on the correlation of AOT and API in the urban areas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2008, 27(3): 9-13.

[15] 邱冠军.豫东半湿润黄泛区土壤风蚀及其影响因子特征[D].泰安：山东农业大学，2016.
Qiu Guanjun. Characteristics of soil wind erosion and its impact factors in sub-humid Yellow River alluvial area in Eastern Henan[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.

[16] 邢先双，蒋宁，董明明，等.黄泛风沙区风沙活动特征[J].河北师范大学学报(自然科学版)，2025，49(5)：520-531. DOI：10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202405030.
Xing Xianshuang, Jiang Ning, Dong Mingming, et al. Characteristics of aeolian sand activities in the flooded area of the Yellow River[J]. Journal of Hebei Normal University(Natural Science), 2025, 49(5): 520-531.

[17] 高睿瑜，李文龙，魏文杰，等.豫东北黄泛区易风蚀性土壤特征[J].水土保持学报，2021，35(6)：55-61. DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.008.
Gao Ruiyu, Li Wenlong, Wei Wenjie, et al. Characteristics of wind-erodible soil in the Yellow River alluvial area of Northeast Henan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 55-61.

[18] 樊爱鹏.山东黄泛平原风沙区风沙化状况与生态建设发展研究[D].泰安：山东农业大学，2013.
Fan Aipeng. Study on the status of wind desertification and ecological construction development in Shandong Yellow River floodplain wind-sand region[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.

[19] 孟凡荣.鲁西北黄泛平原区水土流失特征及防治对策[J].山东水利，2016(2)：17-19. DOI：10.16114/j.cnki.sdsl.2016.02.009.
Meng Fanrong. Characteristics of soil and water loss and its control countermeasures in the Yellow River floodplain area of Northwest Shandong Province[J]. Shandong Water Resources, 2016(2): 17-19.

[20] 常彬，孙彦伟，赵涵，等.山东冠县土壤元素地球化学特征与质量评价[J].山东国土资源，2022，38(11)：31-36. DOI：10.12128/j.issn.1672-6979.2022.11.004.
Chang Bin, Sun Yanwei, Zhao Han, et al. Geochemical characteristics and quality evaluation of soil elements in Guanxian County in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2022, 38(11): 31-36.

[21] 贾丰源.山东省黄泛平原风沙区土地利用与景观生态风险时空变化分析[D].泰安：山东农业大学，2023.
Jia Fengyuan. Analysis of spatiotemporal changes in land use and landscape ecological risk in the Huangfan plain wind and sand area in Shandong Province[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.

[22] 高睿瑜，袁利，张荣华，等.豫东北黄泛区 2019 年土壤侵蚀特征：以河南省兰考县为例[J].水土保持通报，2021，41(5)：166-173. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.023.
Gao Ruiyu, Yuan Li, Zhang Ronghua, et al. Soil erosion characteristics in Yellow River alluvial area in Northeast Henan Province in 2019: taking Lankao County as a case[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 166-173.

[23] 孙彦伟，常彬，刘根驿，等.黄河下游流域土壤-作物系统硒元素地球化学特征：以山东省冠县为例[J].山东国土资源，2023，39(1)：40-46. DOI：10.12128/j.issn.1672-6979.2023.01.005.
Sun Yanwei, Chang Bin, Liu Genyi, et al. Geochemical characteristics of selenium in soil-crop system in the lower reach of the Yellow River: taking Guanxian County in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 2023, 39(1): 40-46.

[24] Loska K, Cebula J, Pelczar J, et al. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, 93(1): 347-365. DOI: 10.1023/A: 1022121615949.

[25] 刘广通.呼和浩特市大气降尘及源分析[D].呼和浩特：内蒙古师范大学，2008.
Liu Guangtong. Atmospheric dust fall and source analysis in Hohhot[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008.

[26] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research,

1980,14(8):975-1001.DOI:10.1016/0043-1354(80)90143-8.

[27] 徐争启,倪师军,庹先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2008.02.030.
Xu Zhengqi,Ni Shijun,Tuo Xianguo,et al.Calculation of heavy metals′ toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J].Environmental Science & Technology,2008,31(2):112-115.

[28] 于瑞莲,胡恭任,戚红璐,等.泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价[J].环境化学,2010,29(6):1086-1090.
Yu Ruilian,Hu Gongren,Qi Honglu,et al.Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the dustfall from different functional areas of Quanzhou City[J].Environmental Chemistry,2010,29(6):1086-1090.

[29] 崔邢涛,栾文楼,牛彦斌,等.石家庄城市近地表降尘重金属污染及潜在生态危害评价[J].城市环境与城市生态,2011,24(1):27-30.
Cui Xingtao,Luan Wenlou,Niu Yanbin,et al.Assessment of heavy metal pollution and potential ecological hazard in atmospheric dust near ground of Shijiazhuang City[J].Urban Environment & Urban Ecology,2011,24(1):27-30.

[30] 崔邢涛,染文楼,郭海全,等.石家庄城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J].现代地质,2011,25(1):169-175.DOI:10.3969/j.issn.1000-8527.2011.01.023.
Cui Xingtao,Ran Wenlou,Guo Haiquan,et al.Assessment of the heavy metal pollution and the potential ecological hazard in urban soil of Shijiazhuang City[J].Geoscience,2011,25(1):169-175.

[31] 温先华,胡恭任,于瑞莲,等.厦门市大气降尘中重金属生态风险评价与源解析[J].地球与环境,2015,43(1):1-7.DOI:10.14050/j.cnki.1672-9250.2015.01.001.
Wen Xianhua,Hu Gongren,Yu Ruilian,et al.Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dustfall of Xiamen City,China[J].Earth and Environment,2015,43(1):1-7.

[32] Zou X Y,Li H R,Liu W,et al.Application of a new wind driving force model in soil wind erosion area of Northern China[J].Journal of Arid Land,2020,12(3):423-435.DOI:10.1007/s40333-020-0103-9.

[33] 胡敏,唐倩,彭剑飞,等.我国大气颗粒物来源及特征分析[J].环境与可持续发展,2011,36(5):15-19.DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.2011.05.004.
Hu Min,Tang Qian,Peng Jianfei,et al.Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China[J].Environment and Sustainable Development,2011,36(5):15-19.

[34] Tang A H,Zhuang G S,Wang Y,et al.The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing[J].Atmospheric Environment,2005,39(19):3397-3406.DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.02.001.

[35] 纪亮,袁盈,李刚,等.我国机动车排放标准的大气污染物减排效果研究[J].环境工程技术学报,2011,1(3):237-242.DOI:10.3969/j.issn.1674-991X.2011.03.039.
Ji Liang,Yuan Ying,Li Gang,et al.Study on emission reduction effect of motor vehicle emission standards in China[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2011,1(3):237-242.

[36] 王新明,田志坚,张艳利.我国油品对机动车尾气排放的影响及升级经济性分析[J].中国科学院院刊,2015,30(4):535-541.DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.2015.04.013.
Wang Xinming,Tian Zhijian,Zhang Yanli.Influence of fuel quality on vehicle emission and economic analysis of upgrading fuel quality in China[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2015,30(4):535-541.

[37] 胡恭任,戚红璐,于瑞莲,等.大气降尘中重金属形态分析及生态风险评价[J].有色金属,2011,63(2):286-291.DOI:10.3969/j.issn.1001-0211.2011.02.070.
Hu Gongren,Qi Honglu,Yu Ruilian,et al.Speciation analysis of heavy metal in atmospheric dust and ecological risk assessment[J].Nonferrous Metals,2011,63(2):286-291.

[38] 王玉军,吴同亮,周东美,等.农田土壤重金属污染评价研究进展[J].农业环境科学学报,2017,36(12):2365-2378.DOI:10.11654/jaes.2017-1317.
Wang Yujun,Wu Tongliang,Zhou Dongmei,et al.Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J].Journal of Agro-Environment Science,2017,36(12):2365-2378.

[39] 贾中民.渝西北土壤重金属污染特征、源解析与生态健康风险评价[D].重庆:西南大学,2020.
Jia Zhongmin.Characteristics,source apportionment,and ecological health risk assessment of soil heavy metals contamination in Northwest Chongqing[D].Chongqing:Southwest University,2020.

(责任编辑　柴　键)