

doi: 10.11720/wtyht.2024.1136

姜冰,张德明,刘阳. 大气降尘对土壤主要环境元素的累积影响及评价——以山东省高密市为例[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 228-236. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1136>Jiang B, Zhang D M, Liu Y. Cumulative effects of atmospheric dust fall on major environmental elements in soils and their evaluation: A case study of Gao-mi City, Shandong Province, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 228-236. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1136>

大气降尘对土壤主要环境元素的累积影响及评价

——以山东省高密市为例

姜冰^{1,2,3}, 张德明¹, 刘阳¹

(1. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021; 2. 山东省地质矿产勘查开发局 海岸带地质环境保护重点实验室, 山东 潍坊 261021; 3. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为研究山东省高密市大气降尘主要环境元素的污染分布特征, 探究其对表生环境中土壤的影响效应, 对高密市大气降尘进行了系统采集、测试, 取得了 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg、Se 等 9 种环境元素测试数据, 计算其年沉降通量、年增量, 模拟了各元素达到限定值所需的最小年沉降通量, 并对污染水平进行了评价。结果表明, 大气降尘中各元素含量平均值均高于土壤背景值, 表现为不同程度的富集。年沉降通量 Cu 与 Pb 呈显著正相关, Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg 多呈现两两正相关, Se 与其他元素相关性不显著, 相关性越强则同源性越高。大气降尘是土壤主要环境元素的一个输入端元, 其导致的表层土壤各元素年增速率为 0.03% ~ 0.52%, 多年后 Cd 最接近土壤限定值。地累积指数评价显示, Ni、As、Cr 为无污染至轻度污染, Se 以重度污染为主, Cd、Zn 为中度污染至重度污染, Hg、Cu、Pb 以轻度污染至中度污染为主, 污染程度排序为 Se > Cd > Zn > Hg > Cu > Pb > Ni > As > Cr。

关键词: 大气降尘; 环境元素; 年沉降通量; 年增量; 地累积指数

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0228-09

0 引言

大气降尘是依靠重力自然沉降于地表的空气颗粒物, 是地球表层地气系统物质交换的一种形式, 在生态系统的物质交换过程中具有重要作用^[1-3]。大气降尘也是环境空气中各类二次反应的载体^[4-5], 其污染对象包括表生环境的土壤、水体等介质以及动植物。大量的外来降尘输入会改变当地表层土壤原有的理化性质, 进而影响生态环境系统^[6-7]; 沉降于水体不断积累后会导致水体富营养化、有机物污染、水质恶化等^[8-9]; 沉降于植物表面会影响其光合作用和正常生理功能, 且重金属等有害物质被植物吸收后还会通过食物链影响人体健康^[10-11]。此外, 降尘中的重金属、有机污染物等也能通过接触、呼吸

等途径被人类摄入, 对人体健康产生危害^[12-14]。许多学者研究发现, 大气降尘中元素含量与当地土壤背景值相比, 呈现不同程度富集的情况较为普遍。如赵西强等^[15]研究发现济南市 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 在大气降尘中富集程度较高, 并计算了大气降尘对表层土壤重金属含量的贡献; 栾慧君等^[16]研究发现徐州北郊降尘中 Pb、Cu、Cr、As、Cd 均超过土壤背景值, 分别达 12.35、12.85、2.01、2.86、3.95 倍; 张夏等^[17]对比了重庆主城区大气降尘中的 Cd、Cr、Ni、Pb 含量与重庆土壤背景值, 比值分别为 11.4、1.5、0.6、4.3。降尘中的重金属污染特征评价、来源解析等也广受关注, 如杨新明等^[18]采用地累积指数对济南市降尘的重金属进行了评价, 并结合正定矩阵因子分析模型解析了其贡献源; Ma 等^[19]采用绝对主成分/多元线性回归模型对垃圾焚烧厂附

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-06-09

基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查引领示范和科技创新项目(KC202207)

第一作者: 姜冰(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事生态环境地球化学研究工作。Email: jbing08@163.com

近表层土壤重金属来源进行了识别,并分析了各污染源的贡献率;陈莹等^[5]采用富集因子法、潜在生态风险指数法评价了西安市大气降尘重金属污染特征,并将其来源分为人为源、自然源和复合源3类。大气降尘已成为生态环境系统中重要的评价和研究对象。

目前国内外多数研究侧重于大气降尘中的重金属元素,而将硒同时列入环境元素进行评价和研究却极为少见。硒虽然是健康的微量元素,但人体摄入过多会导致急性硒中毒^[20],同时其还是化石燃料燃烧的指示元素^[21],对大气污染有一定的指示意义。另外,通过模拟计算达到污染限定值所需的最小年沉降通量,对比当前年沉降通量,可指导大气污染精准防控。本文利用山东省高密市2018年6月~2019年6月的大气降尘采集测试数据,选取Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg等8种重金属元素及Se作为主要环境元素,研究该区主要环境元素的年沉降通量及其对表生环境土壤的影响,模拟筛选污染风险较大的元素,同时采用地累积指数法开展污染评价,为改善大气污染防治和保护人体健康提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

高密市隶属于山东省潍坊市,地处山东半岛腹地,地理极值坐标东经119°26'~120°00',北纬36°08'~36°41',面积1525.7 km²,属暖温带半湿润季风气候,年均降水量689.1 mm,南部雨量偏大,一般为700~720 mm,北部偏小,为645~680 mm,年均蒸发量1227.6 mm。支柱产业以纺织服装、机械电子、制鞋劳保、食品加工、化工建材等为主,对工业经济贡献率接近70%。

1.2 样品采集

研究区内共布设大气降尘样品30件。布设位置涵盖城镇区、主要公路、基本农田等环境类型,实际放置位置在保证全区基本均匀分布的前提下,按交通、村落情况进行了适当调整(图1)。采样器选择内径高30 cm、直径15 cm的圆筒形玻璃接尘缸,使用前,用10%(V/V) HCl浸泡24 h,再用纯净水洗净,安装在高度1.5 m的固定支架上,支架放置在距地面10~15 m处的屋顶平台,以避免地面和平台扬尘的影响。

接尘缸放置时间为2018年6月~2019年6月,接收时间为12个月。在夏季多雨季节,根据缸内积水情况,为防水满溢出,及时更换新缸,采集的样品

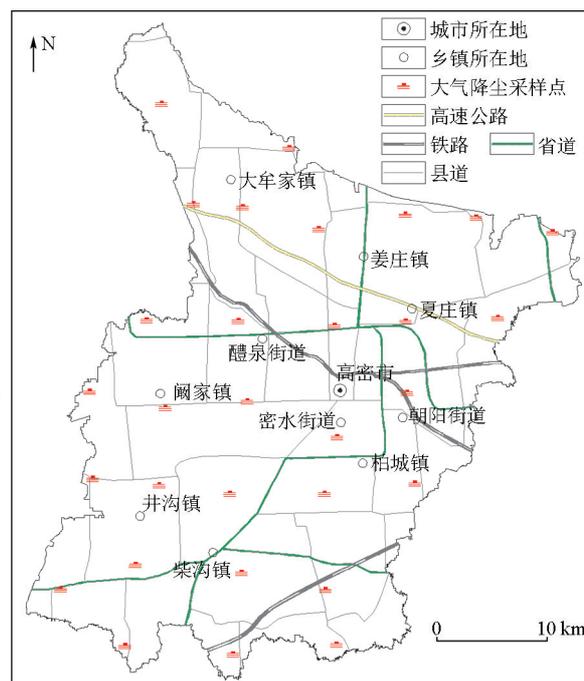


图1 研究区采样点位

Fig. 1 Sampling sites of the study area

合并后测定。研究区内蒸发量显著大于降水量,30个点位大气降尘样品均为干沉降。

1.3 样品加工测试

样品的加工与测试工作在山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室完成。干沉降经烘干处理后称取总质量,而后分析指标Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Cd的试样经HNO₃预消解24 h,微波加压消解,赶酸,定容,采用混合标准制备工作曲线,在2%的HNO₃溶液中用iCAP RQ型电感耦合等离子体质谱仪测定;分析指标As、Se、Hg的试样用王水分解,50% HCl提取,在10%盐酸介质中,用硫脲作预还原剂,硼氢化钾作还原剂,As、Se采用PF53原子荧光光度计测定,Hg采用XGY-1011A型原子荧光光度计测定。所有样品的各项分析指标均有检出。使用国家标准物质(GBW07305a和GBW07407)控制样品的准确度和精密度,对标准物质进行12次分析,计算平均值与标准值的对数偏差 $\Delta \lg C$,结果均<0.05,计算每一个标准物质的相对标准偏差RSD,结果均<8%。每件样品进行100%重复分析计算相对偏差RE,结果均<30%。本次样品分析满足相关规范质量要求。

1.4 分析方法与数据处理

1.4.1 大气降尘中主要环境元素的年沉降通量计算

采用下列公式计算大气降尘中主要环境元素的年沉降通量:

$$M_{ij} = \frac{C_{ij} \times W_j}{S \times n} \times N, \quad (1)$$

式中: M_{ij} 为某点位 j 大气降尘中主要环境元素 i 的年沉降通量, mg/m^2 ; C_{ij} 为某点位 j 大气降尘中主要环境元素 i 的实测值, 10^{-6} ; W_j 为某点位 j 接尘缸中降尘的总质量, mg ; S 为接尘缸的底面积, m^2 ; n 为采样天数, d ; N 为计量天数, $N=365 \text{ d}$ 。

1.4.2 降尘导致的表层土壤主要环境元素的年增量计算

为研究大气降尘对表层土壤主要环境元素含量的影响,假设大气降尘全部落在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 表层土壤中,且暂不考虑元素的输出效应,则大气降尘导致的表层土壤主要环境元素的年增量计算公式为

$$\Delta Z_{ij} = \frac{M_{ij}}{\rho_b \times h}, \quad (2)$$

式中: ΔZ_{ij} 为某点位 j 单位质量土壤中主要环境元素 i 的年增量, 10^{-9} ; M_{ij} 为某点位 j 大气降尘中主要环境元素 i 的年沉降通量, mg/m^2 ; ρ_b 为土壤容重, g/cm^3 ,研究区内取 $1.28 \text{ g}/\text{cm}^3$ [22]; h 为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 表层土壤的厚度,取 20 cm 。

1.4.3 达到污染限定值所需的最小年沉降通量计算

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中的硒过剩下限值作为限定值,进一步研究大气降尘对表层土壤主要环境元素的影响,计算通过10年大气降尘,主要环境元素达到限定值所需要的最小年沉降通量,公式为

$$M_{i,\min} = \frac{(S_i - B_i)}{Y} \times \rho_b \times h, \quad (3)$$

式中: $M_{i,\min}$ 为主要环境元素 i 达到限定值的的最小年沉降通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; S_i 为限定值, 10^{-6} ; B_i 为研究区土壤背景值, 10^{-6} ; Y 为年限时间节点, a 。

1.4.4 地累积指数法评价

地累积指数(geoaccumulation index)最初是一种研究水环境沉积物中重金属污染特征的评价方法,现已被广泛应用于土壤和大气降尘重金属污染评价[23-24]。其计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{k \times B_i} \right), \quad (4)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数, $I_{\text{geo}} \leq 0$ 为无污染, $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 为轻度污染, $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 为中度污染, $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 为偏

重度污染, $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 为重度污染, $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 为偏极度污染, $I_{\text{geo}} > 5$ 为极度污染[25]; C_i 为大气降尘中主要环境元素 i 的实测值, 10^{-6} ; B_i 为主要环境元素 i 的土壤背景值, 10^{-6} ; k 为考虑区域地质背景差异可能引起土壤背景值波动而取的系数, $k=1.5$ [26]。

1.4.5 数据处理

采用IBM SPSS Statistics 22.0软件处理原始数据,包括单变量的描述性统计和双变量之间的Pearson相关性分析。采用Microsoft Excel 2010制作双变量的相关性散点图。利用MapGIS 6.7中的Kring泛克立格法网格化进行空间分布制图。

2 结果与分析

2.1 大气降尘量及其主要环境元素含量特征

研究区大气降尘中主要环境元素含量特征统计见表1。变异系数反映大气降尘中主要环境元素含量数据的离散程度,变异系数越大,空间差异性越大[27],主要环境元素变异性依次为 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Se} > \text{Cd} = \text{Hg} > \text{As} > \text{Ni}$ 。以0.16和0.36为界限值将变异系数划分为3个区间,分别表示弱变异、中等变异和强变异[28],其中 Pb 、 Cu 、 Cr 、 Zn 、 Se 属于强变异,离散程度高,空间分布差异性大,尤其以 Pb 变异系数1.68最高,其他元素属于中等变异。降尘中各元素含量平均值均高于研究区土壤背景值[29],达1.09~18.94倍,其中降尘中 Cd 、 Se 含量平均值显著高于土壤背景值,分别达12.20倍和18.94倍,而 Cd 属于重金属污染元素,应引起重视。

表1 大气降尘中主要环境元素统计参数

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	土壤背景值[29]
Cu	296.2	30.7	67.4	59.4	0.88	17.7
Pb	899.4	21.3	91.8	153.9	1.68	23.67
Zn	746.5	157.2	374.5	188.3	0.50	45.29
Ni	53.4	14.8	32.6	9.4	0.29	21.9
Cr	153.5	19.3	64.7	38.5	0.60	59.62
Cd	1.95	0.33	1.22	0.42	0.34	0.10
As	20.30	2.58	10.33	3.44	0.33	8.75
Hg	0.180	0.028	0.098	0.033	0.34	0.0266
Se	5.41	0.08	3.22	1.22	0.38	0.17

2.2 大气降尘主要环境元素的年沉降通量

按式(1)计算得出研究区大气降尘中主要环境元素的年沉降通量,如表2所示。元素含量与降尘量的乘积和年沉降通量呈严格的线性关系,因此元素的年沉降通量除了与降尘量有关外,还与元素含

量有关。各元素的年沉降通量差异大,平均值在 0.008 4~33.85 mg/(m²·a) 之间,Hg 最低,Zn 最高,对比表 1 可知,各元素年沉降通量与含量的变异系数差异小,即各元素年沉降通量与含量的空间变异具有相似性,各元素年沉降通量空间分布如图 2 所示。主成分分析可以揭示元素间的相互关系和来源^[30],通过降维,筛选出特征根大于 1 的 3 个主因子(表 3),所包含的原始变量的信息为 76.851%。主因子 F1 代表的变量组合为 Ni、As、Zn、Cd、Cr、Hg,主因子 F2 代表的变量组合为 Pb、Cu,主因子 F3 代表的变量为 Se。从表 4 的相关性分析可知,Cu、Pb 的年沉降通量呈显著正相关,相关系数达 0.840($P < 0.01$),Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg 的年沉降通量多呈现两两正相关,Se 与其他元素的年沉降通量相关性不显著。相关性越显著则同源性越高,来源可能越一致^[31-32],相关分析验证了因子分析结果。Cu、Pb 的年沉降通量空间分布具有相似性,Cu 主要与冶炼排放烟尘、燃煤、汽车尾气等有关^[33],Pb 与燃煤、含铅涂料、燃油、铸造等有关^[34]。因此认为 Cu、Pb 的年沉降通量高度相关,是燃煤、机动车燃油导致的结果,阚家镇西部的高值区可能与双羊工业园有关,其他高值区与 NW 向密集的交通线分布相吻合。Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg 的年沉降通量空间分布亦具有相似性,多数高值区集中分布在市区、街道、乡镇及交通线密集区,表明受人类活动的影响。Se 的年沉降通量呈现东高西低的趋势,大气中的 Se 与煤炭燃烧密切相关,表明研究区煤炭燃烧量的区域性差异。另外,在南部工业经济相对欠发达区,也是主要环境元素年沉降通量低值区。

2.3 大气降尘对表层土壤主要环境元素的影响

在不考虑元素输出效应的情况下,按式(2)计算得出研究区大气降尘导致的表层土壤主要环境元素的年增量参数,如表 5 所示。Zn 的年增量最大,

为 132.21 μg/(kg·a),其次为 Pb、Cr 和 Cu,分别为 31.55 μg/(kg·a)、22.15 μg/(kg·a) 和 22.15 μg/(kg·a),Hg 的年增量最小,为 0.032 9 μg/(kg·a),与济南市大气降尘导致的表层土壤元素年增量排序基本一致,但年增量显著小于济南市^[15],在一定程度上反映了传统工业的发展程度。各元素年均增长速率均较小,仅占当前表层土壤背景值的 0.04%~0.61%,因此在日积月累的土壤发育过程中,大气降尘只是土壤主要环境元素的一个输入端元。

表 2 主要环境元素年沉降通量
Table 2 Annual sedimentation flux of main environmental elements

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
Cu	26.66	2.04	5.67	4.77	0.84
Pb	91.23	2.44	8.08	15.76	1.95
Zn	100.05	10.49	33.85	21.11	0.62
Ni	5.41	1.63	2.78	1.00	0.36
Cr	14.98	1.86	5.67	3.55	0.63
Cd	0.15	0.04	0.10	0.02	0.20
As	3.20	0.30	0.91	0.54	0.59
Hg	0.0174	0.0045	0.0084	0.0035	0.42
Se	0.44	0.00	0.27	0.08	0.30

表 3 主因子旋转载荷

Table 3 Rotational load of main factor

元素	主因子		
	F1	F2	F3
Ni	0.919	0.072	0.168
As	0.877	0.054	-0.193
Zn	0.760	-0.019	0.139
Cd	0.749	-0.028	0.164
Cr	0.705	-0.012	0.285
Hg	0.627	0.471	0.199
Pb	-0.097	0.956	0.157
Cu	0.093	0.935	-0.148
Se	0.225	0.031	0.952
特征根	3.709	2.021	1.187
方差/%	41.210	22.457	13.184
贡献率/%	41.210	63.667	76.851

表 4 主要环境元素年沉降通量相关性分析

Table 4 Correlation analysis of annual sedimentation fluxes for main environmental elements

元素	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	Cd	As	Hg	Se
Cu	1								
Pb	0.840**	1							
Zn	0.087	-0.063	1						
Ni	0.100	0.014	0.641**	1					
Cr	0.021	-0.001	0.427*	0.720**	1				
Cd	0.108	-0.103	0.629**	0.652**	0.387*	1			
As	0.114	-0.053	0.528**	0.724**	0.548**	0.531**	1		
Hg	0.342	0.360	0.410*	0.672**	0.404*	0.286	0.577**	1	
Se	-0.079	0.160	0.300	0.328	0.356	0.333	0.078	0.340	1

注:“**”表示相关性在 0.01 显著;“*”表示相关性在 0.05 显著。

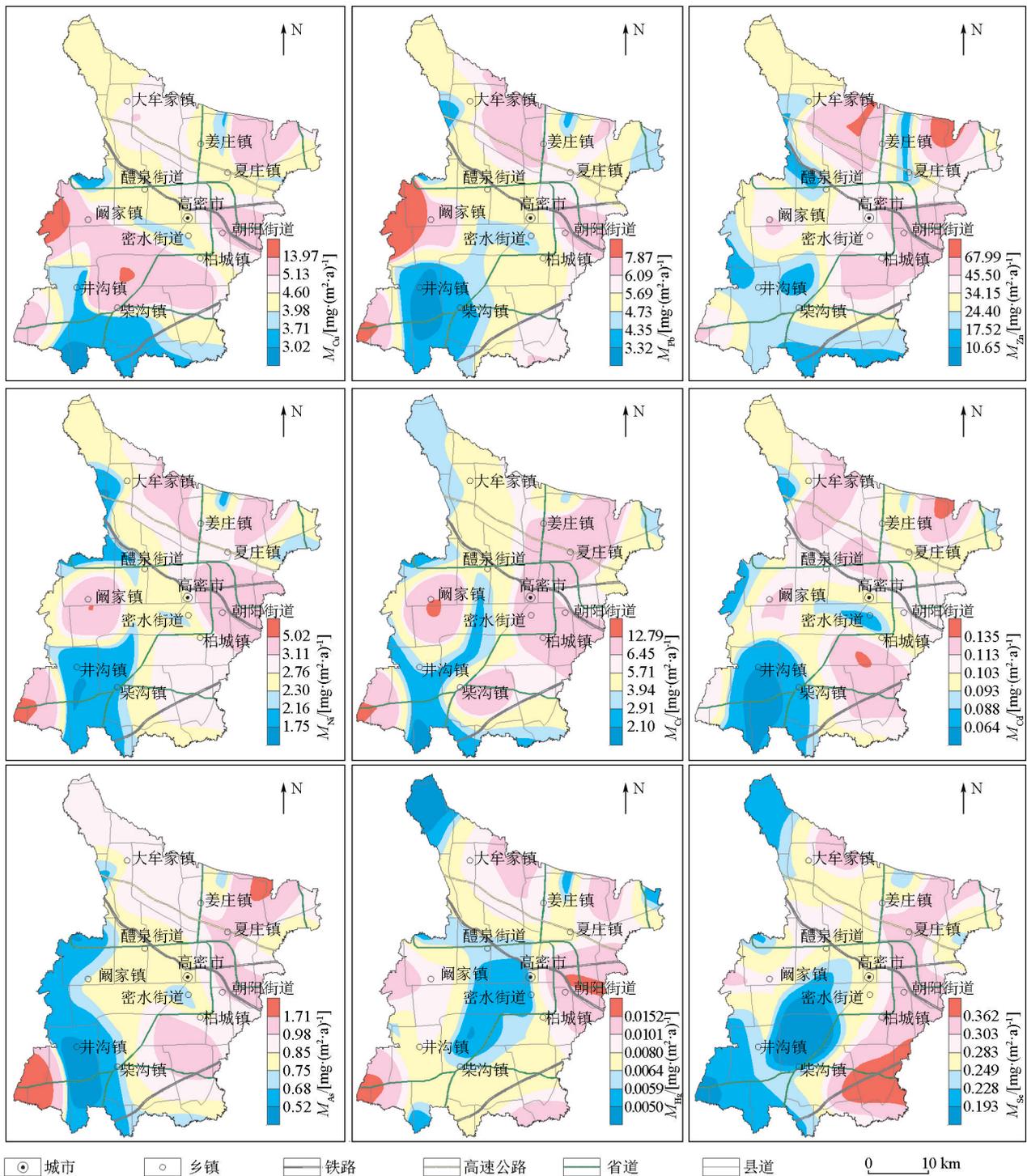


图2 主要环境元素年沉降通量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual sedimentation fluxes for main environmental elements

按式(3)计算10年时间节点各元素达到限定值所需的最小年沉降通量,如表6所示。以当前研究区主要环境元素土壤背景值为起点,10年后达到限定值,则各元素年沉降通量值Zn最大,应为3 961.00 mg/(m²·a),Cd最小,应为5.10 mg/(m²·a),当前年沉降通量均值与其相比,Cd最大,比值0.019 5,Hg最小,比值0.000 3。当前各元素年沉降通量远低于达到限定值的最小年沉降通量,对土

壤环境质量下降影响不大,但多年后Cd最接近限定值,是风险最大的环境元素,且Cd的毒性和危害性很大,进入土壤后不易淋溶和降解,生物富集作用明显^[35],可能会导致局部的污染风险。

2.4 大气降尘主要环境元素地累积指数污染评价

按式(4)计算大气降尘主要环境元素的地累积指数,由图3可见,污染程度依次为Se>Cd>Zn>Hg>Cu>Pb>Ni>As>Cr。Ni、As、Cr的I_{geo}中位数均小于

表 5 大气降尘导致的表层土壤主要环境元素年增量

Table 5 Annual increment of main environmental elements in topsoil caused by atmospheric dust fall $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	年均增长率/%
Cu	104.13	7.98	22.15	18.63	0.84	0.13
Pb	356.39	9.52	31.55	61.56	1.95	0.13
Zn	390.81	40.96	132.21	82.46	0.62	0.29
Ni	21.15	6.38	10.87	3.90	0.36	0.05
Cr	58.53	7.27	22.15	13.87	0.63	0.04
Cd	0.57	0.15	0.39	0.09	0.23	0.39
As	12.52	1.15	3.57	2.09	0.59	0.04
Hg	0.0678	0.0175	0.0329	0.0137	0.42	0.12
Se	1.74	0.02	1.04	0.30	0.29	0.61

表 6 达到限定值所需的最小年沉降通量及其与当前年沉降通量的对比

Table 6 Minimum annual sedimentation fluxes required to reach the limit value and its comparison with the current annual sedimentation fluxes

元素	土壤背景值	限定值	当前年沉降通量	所需最小年沉降通量(10年)
	10^{-6}	10^{-6}	$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
Cu	17.7	50.0	5.67	827.0
Pb	23.67	70.00	8.08	1186.00
Zn	45.29	200.00	33.85	3961.00
Ni	21.9	60.0	2.78	975.0
Cr	59.62	150.00	5.67	2314.00
Cd	0.10	0.30	0.10	5.10
As	8.75	30.00	0.91	544.00
Hg	0.0266	1.3000	0.0084	32.6000
Se	0.17	3.00	0.266	72.40

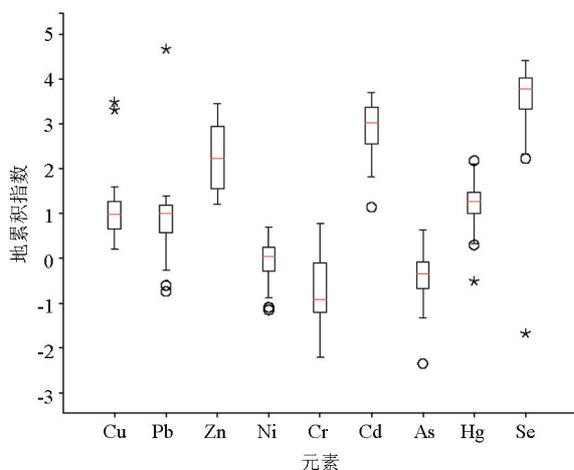


图 3 主要环境元素地累积指数箱式图

Fig. 3 Box diagram of geoaccumulation index for main environmental elements

0, 最大值均小于 1, 表现为无污染至轻度污染, 说明这 3 种元素受到人为污染影响较小。其他元素从空

间分布看(图 4), Se 的偏极度污染区主要沿交通干线及人口密集区分布, 区内以重度污染为主, 表明与燃料的燃烧、工业生产有关; Cd、Zn 的重度污染区沿交通干线及人口密集区分布的特点亦较为明显, 表现为中度污染至重度污染, Cd 主要与有色金属的冶炼和煅烧、市政焚烧、含镉废弃物的处理等有关, Zn 主要与冶炼、废物焚烧、橡胶轮胎的磨损等有关^[36-37]; Hg、Cu、Pb 以轻度污染至中度污染为主, 存在点源状的污染源, Hg 主要受医药、交通、燃煤等因素影响^[38], Cu、Pb 如前文所述, 与燃煤密切相关。因此, 为改善主要环境元素污染状况, 应大力推广清洁能源, 减少煤炭、燃油消耗量, 同时寻找污染源, 制定污染防控措施。

3 结论

1) 研究区大气降尘中主要环境元素 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg、Se 的平均含量分别为 67.4×10^{-6} 、 91.8×10^{-6} 、 374.5×10^{-6} 、 32.6×10^{-6} 、 64.7×10^{-6} 、 1.22×10^{-6} 、 10.33×10^{-6} 、 0.098×10^{-6} 、 3.22×10^{-6} , 分别是土壤背景值的 3.81、3.88、8.27、1.49、1.09、12.20、1.18、3.68、18.94 倍。

2) 大气降尘中 Zn、Ni、Cr、Cd、As、Hg 的来源相似, 划入主因子 F1; Cu、Pb 的来源相似, 划入主因子 F2; Se 的年沉降通量呈现东高西低, 作为单一变量划入主因子 F3。

3) 大气降尘是土壤主要环境元素的重要来源, 各元素年增量平均值 Hg 最小, 为 $0.0329 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, Zn 最大, 为 $132.21 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$; 年均增长速率 Cr、As 最小, 为 0.04%, Se 最大, 为 0.61%。多年后表层土壤中的 Cd 由于大气降尘的积累, 相对于其他元素最接近限定值。

4) 地累积指数法评价结果显示, 大气降尘主要环境元素 Ni、As、Cr 表现为无污染至轻度污染; Se 的偏极度污染区主要沿交通干线及人口密集区分布, 其他地区以重度污染为主; Cd、Zn 表现为中度污染至重度污染; Hg、Cu、Pb 以轻度污染至中度污染为主, 存在点源状污染。

参考文献 (References):

- [1] 庞绪贵, 王晓梅, 代杰瑞, 等. 济南市大气降尘地球化学特征及污染源研究[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 285-293.
Pang X G, Wang X M, Dai J R, et al. Geochemical characteristics and pollution sources identification of the atmospheric dust-fall in Jinan city[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 285-293.

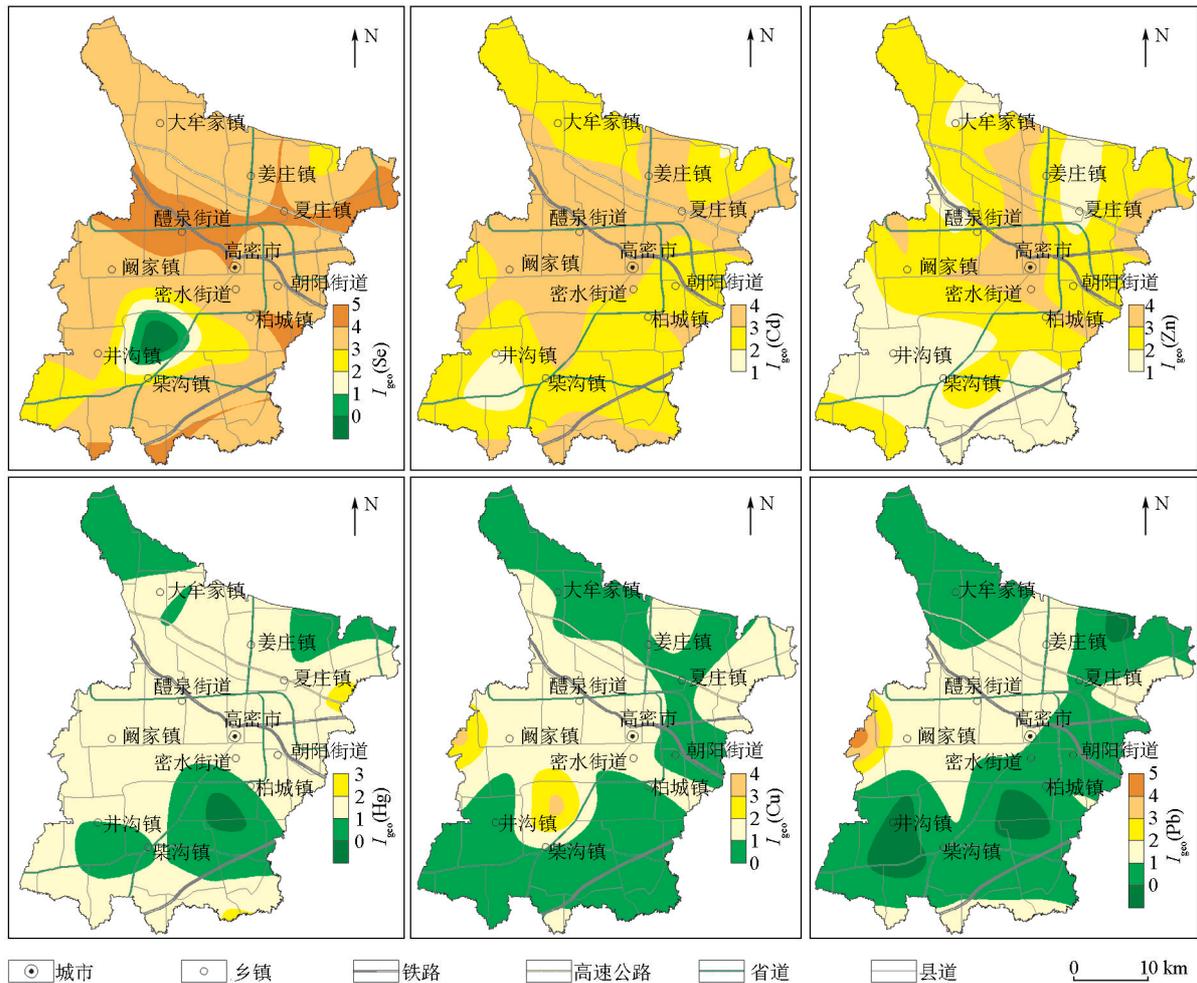


图 4 主要环境元素地累积指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of geoaccumulation index for main environment elements

- [2] Žibret G. Influences of coal mines, metallurgical plants, urbanization and lithology on the elemental composition of street dust[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(3): 1489–1505.
- [3] 李晋昌,董治宝. 大气降尘研究进展及展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(2): 102–109.
Li J C, Dong Z B. Research progress and prospect of dustfall research[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(2): 102–109.
- [4] 姚瑶,张丽,施杨. 连云港市大气降尘时空分布特征[J]. *环境监控与预警*, 2021, 13(1): 56–60.
Yao Y, Zhang L, Shi Y. Temporal and spatial distribution characteristics of atmospheric dust fall in Lianyungang City[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2021, 13(1): 56–60.
- [5] 陈莹,赵剑强,汤丹娜,等. 西安市大气降尘重金属污染特征与生态风险[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 154–159.
Chen Y, Zhao J Q, Tang D N, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk of dust fall in Xi'an City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6): 154–159.
- [6] Zhao H, Xia B, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417–418: 45–54.
- [7] 任玉成,阮丽,李欣,等. 基于粒度方法的大气降尘对浙江省新嵎盆地土壤的物源输入研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 865–873.
Ren Y C, Ruan L, Li X, et al. Atmospheric dust input to soils in Xinsheng Basin, Zhejiang Province based on grain size analysis[J]. *Soils*, 2021, 53(4): 865–873.
- [8] 赵亚伟. 邯郸市大气干湿沉降特征及对水体影响研究[D]. 天津: 河北工程大学, 2019.
Zhao Y W. Study on characteristics of atmospheric dry and wet deposition and its influence on water body in Handan[D]. Tianjin: Hebei University of Engineering, 2019.
- [9] 戴青云,贺前锋,刘代欢,等. 大气沉降重金属污染特征及生态风险研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(3): 56–64.
Dai Q Y, He Q F, Liu D H, et al. Progress in research on heavy metals in atmospheric deposition: Pollution characteristics and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(3): 56–64.
- [10] Chen B, Stein A F, Maldonado P G, et al. Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(2): 234–244.
- [11] 王鸿钰,俞炳琨,李阳,等. 降尘对乌鲁木齐市地产萝卜中 Pb

- 含量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 128-134.
- Wang H Y, Yu B K, Li Y, et al. Effect of dustfall on Pb content in radish produced in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(10): 128-134.
- [12] 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 等. 上海市大气颗粒物生物毒性及二噁英呼吸暴露风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1961-1969.
- Song P C, Lu S Y, Wei Y J, et al. Biototoxicity effects and respiratory risk assessment of PCDD/Fs exposed to atmospheric particulates in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1961-1969.
- [13] Rachwał M, Wawer M, Jabłońska M, et al. Geochemical and mineralogical characteristics of airborne particulate matter in relation to human health risk [J]. Minerals, 2020, 10(10): 866-866.
- [14] Salim Akhter M, Madany I M. Heavy metals in street and house dust in Bahrain [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 66(1/2): 111-119.
- [15] 赵西强, 庞绪贵, 王增辉, 等. 利用原子荧光光谱—电感耦合等离子体质谱法研究济南市大气干湿沉降重金属含量及年沉降通量特征[J]. 岩矿测试, 2015, 34(2): 245-251.
- Zhao X Q, Pang X G, Wang Z H, et al. Study on the characteristics of heavy metal contents and annual fluxes of atmospheric dry and wet deposition in Jinan City using AFS and ICP-MS [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(2): 245-251.
- [16] 栾慧君, 塞古, 徐蕾, 等. 徐州北郊大气降尘重金属污染特征与风险评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4679-4687.
- Luan H J, Mohamed-Conde S, Xu L, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in northern suburban of Xuzhou [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4679-4687.
- [17] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5288-5294.
- Zhang X, Liu B, Xiao B L, et al. Pollution characteristics and assessment of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas, Chongqing [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5288-5294.
- [18] 杨新明, 钟雅琪, 李国锋, 等. 典型工业城市大气降尘中重金属分布特征及其来源解析——以济南市为例[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 94-103.
- Yang X M, Zhong Y Q, Li G F, et al. Distribution characteristic and source apportionment of heavy metals in atmospheric dust in a typical industrial city—A case study of Jinan [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 94-103.
- [19] Ma W C, Tai L Y, Qiao Z, et al. Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: A case study in North China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 348-357.
- [20] 赵成义. 土壤硒的生物有效性研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 57-60.
- Zhao C Y. Studies on the bioavailability of soil selenium [J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 57-60.
- [21] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319-336.
- Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 319-336.
- [22] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- Chai H, He N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [23] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1361-1369.
- [24] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1021-1028.
- Li P, Xue S Y, Wang S L, et al. Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1021-1028.
- [25] 韦炳干, 虞江萍, 曹志强, 等. 唐山市设施菜地土壤重金属累积与有效态含量的影响特征[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2649-2657.
- Wei B G, Yu J P, Cao Z Q, et al. Factors impact on accumulation and availability of heavy metals in greenhouse vegetable soil from Tangshan City [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(9): 2649-2657.
- [26] 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.
- Fan S X, Gan Z T, Li M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(17): 310-315.
- [27] 师荣光, 蔡彦明, 郑向群, 等. 天津郊区农田降雨径流重金属的污染特征及来源分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 213-217.
- Shi R G, Cai Y M, Zheng X Q, et al. Contamination characteristics and source analyses on heavy metals in farmland runoff of the Tianjin suburban areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(5): 213-217.
- [28] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 198-206.
- Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 198-206.
- [29] 刘阳. 高密市土壤地球化学背景值研究[J]. 上海国土资源, 2019, 40(4): 89-92.
- Liu Y. Study on geochemical background value of soil in Gaomi city [J]. Shanghai Land & Resources, 2019, 40(4): 89-92.
- [30] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 基于不同参比值的土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2964-2971.
- Jiang B, Wang S T, Sun Z B, et al. Potential ecological risk assessment of soil heavy metals based on different reference ratios [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2964-2971.
- [31] 赵西强, 王增辉, 王存龙, 等. 济南市近地表大气降尘元素地球

- 化学特征及污染评价[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 154-159.
Zhao X Q, Wang Z H, Wang C L, et al. Geochemical characteristics and pollution assessment of near-surface atmospheric dust in Jinan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 154-159.
- [32] 孙厚云, 吴丁丁, 毛启贵, 等. 新疆东天山某铜矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(12): 2690-2699.
Sun H Y, Wu D D, Mao Q G, et al. Soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in a copper mining area in East Tianshan, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(12): 2690-2699.
- [33] 闫晓露, 郑欢, 赵烜杭, 等. 辽东湾北部河口区土壤重金属污染源识别及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(8): 3028-3039.
Yan X L, Zheng H, Zhao X H, et al. Source identification and health risk assessment of soil heavy metal in the estuary of Northern Liaodong Bay, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(8): 3028-3039.
- [34] 刘杰, 高敏, 梁俊宁, 等. 陕西省某工业园区春季大气降尘重金属污染特征及评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(7): 1195-1203.
Liu J, Gao M, Liang J N, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in spring atmospheric dust of an industrial park in Shanxi Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(7): 1195-1203.
- [35] 卢红玲, 肖光辉, 刘青山, 等. 土壤镉污染现状及其治理措施研究进展[J]. 南方农业学报, 2014, 45(11): 1986-1993.
Lu H L, Xiao G H, Liu Q S, et al. Advances in soil Cd pollution and solution measures [J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(11): 1986-1993.
- [36] 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 等. 临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2036-2043.
Lu P, Zhao X Y, Yin B H, et al. Distribution characteristics and source apportionment of elements bonded with PM_{2.5} and PM₁₀ in Linyi [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2036-2043.
- [37] 黄子茵, 管东生, 王刚. 海南岛社会经济发展对红树林表层土壤重金属污染的影响[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(6): 831-837.
Huang Z Y, Guan D S, Wang G. Heavy metal contents of mangrove surface soils affected by the social and economic development in Hainan Island [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(6): 831-837.
- [38] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 713-725.
Lyu J S. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai coastal zone [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 713-725.

Cumulative effects of atmospheric dust fall on major environmental elements in soils and their evaluation: A case study of Gaomi City, Shandong Province, China

JIANG Bing^{1,2,3}, ZHANG De-Ming¹, LIU Yang¹

(1. Shandong Provincial No. 4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang 261021, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection of Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Weifang 261021, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: This study aims to investigate the pollution distribution of major environmental elements of atmospheric dust fall in Gaomi City, Shandong Province, as well as its effects on soils in a supergene environment. Hence, this study systematically collected and tested the atmospheric dust fall from Gaomi City, obtaining the testing data of nine environmental elements, including Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Cd, As, Hg, and Se. Furthermore, this study calculated the annual sediment fluxes and annual increments of these elements, simulated the minimum annual sediment fluxes for them to reach limit values, and evaluated their pollution levels. The results show that the average contents of various elements in atmospheric dust fall all exceeded their soil background values, exhibiting different degrees of enrichment. In terms of annual sediment fluxes, Cu was significantly positively correlated with Pb, while Zn, Ni, Cr, Cd, As, and Hg were mostly positively correlated in pairs, and Se showed a non-significant correlation with other elements. A higher correlation suggests a higher homology. Atmospheric dust fall, serving as an input end member of major environmental elements in soils, resulted in annual growth rates of various elements in topsoils ranging from 0.03%~0.52%. Cd would be the closest to its soil limit value over a few years. As revealed by geoaccumulation index-based evaluation, Ni, As, and Cr exhibited non-pollution to slight pollution, Se primarily manifested heavy pollution, Cd and Zn displayed moderate to heavy pollution, and Hg, Cu, and Pb mainly showed slight to moderate pollution, corresponding to a pollution order of Se>Cd>Zn>Hg>Cu>Pb>Ni>As>Cr.

Key words: atmospheric dust fall; environmental element; annual sediment flux; annual increment; geoaccumulation index

(本文编辑:蒋实)