

doi: 10.11720/wtyht.2024.2432

蔡柯柯, 赵志强, 蒙丽, 等. 重庆市秀山县北部大气干湿沉降重金属元素分布特征及来源分析[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 237-244. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2432>Cai K K, Zhao Z Q, Meng L, et al. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals from dry and wet atmospheric deposition in northern Xishui County, Chongqing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 237-244. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2432>

重庆市秀山县北部大气干湿沉降重金属元素分布特征及来源分析

蔡柯柯¹, 赵志强¹, 蒙丽^{2,3}, 王孝萌¹, 刘健¹, 罗仁凤¹

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局 607 地质队, 重庆 400054; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120; 3. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044)

摘要: 为了解秀山北部大气干湿沉降物中重金属含量情况, 使该区环境污染防治和农田土壤安全利用更具针对性, 2019 年 4 月~2020 年 4 月, 连续接收秀山县北部 18 个样点大气干湿沉降物, 并分析测试其中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 等 7 种重金属元素的含量; 结合地形、地貌特点, 分析秀山县北部大气干湿沉降中重金属的分布规律及来源, 并采用地累积指数法评估大气干湿沉降中重金属对土壤的污染状况。结果表明: 除 Hg 外, 6 种重金属元素存在明显的分区性, 沉降高值区集中分布在川河盖两翼及东部, 该区域大气干湿沉降物中 6 种重金属含量远高于全国及重庆市平均值; 其余一般沉降区 6 种元素沉降通量均小于全国均值 25% 百分位。川河盖两翼较高的大气干湿沉降通量受东部花垣县铅锌矿开采及特殊地形地貌的综合影响, 陡增的地形使得沉降中 7 种重金属通量增加了 49 倍, 应加强该类型地貌区环境安全的监测与评估工作。经地累积指数法评估, 川河盖两翼大气干湿沉降重金属中 Cd 为中度污染—严重至极度污染, Pb 为轻度污染—中度污染, Zn 为轻度污染—中度至严重污染。

关键词: 大气干湿沉降; 重金属; 来源分析; 秀山**中图分类号:** X142**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)01-0237-08

0 引言

大气沉降分为干沉降和湿沉降两种方式, 干沉降是指大气中的颗粒物在重力或与其他物体碰撞后发生沉降, 湿沉降是指通过降雨、降雪等方式使颗粒物从大气中去除的过程^[1]。气源重金属颗粒是造成土壤重金属侵袭、累积或污染的重要途径之一^[2], 更有研究显示在许多工业发达国家, 大气沉降对土壤系统中重金属累计贡献率在各种外源输入因子中排在首位^[3-5]。随着对环境质量的日益关注, 国内开展了较多关于大气沉降中重金属对土壤重金属富集影响的相关研究。熊秋林等^[6]对北京市表层土壤重金属污染分布及大气贡献的研究表明, 北京表层土壤中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Pb

的大气沉降平均贡献率分别为 17.4%、21.2%、14.6%、12.2%、16.0% 和 20.0%。大气沉降中重金属的来源也是近年来研究的热点问题, 多项基于大中型城市、工业型城市、燃煤城市以及平原大田区的研究认为, Cd 多来源于燃煤冶金、化学工业、交通以及矿产开采, Zn、Pb 多来源于道路源、铅锌矿开采、燃煤、冶金, Cr 多来源于燃煤、电镀、皮革业, Ni 多来源于化石燃料燃烧、钢铁冶炼, Hg 多来源于汞矿开采、废物焚烧^[7-18]。现有研究认为, 影响大气沉降通量和沉降速率的因素主要有排放源、距排放源的距离和采样点的气象条件等^[6-7], 较少地关注地形、地貌条件对大气沉降重金属的影响。本次研究针对重庆市秀山县北部地区开展, 研究区位于著名的锰三角区, 东部湖南省花垣县也是著名的铅锌矿产区。本文通过为期 1 年的监测, 研究秀山县北部大气干湿沉降中

收稿日期: 2022-08-29; **修回日期:** 2023-07-03**基金项目:** 重庆市规划和自然资源局项目“重庆 1:5 万石堤幅、溶溪幅、龙池幅、花垣幅、秀山幅、石耶幅 6 幅土地质量地质调查”(渝规资[2020]188 号)**第一作者:** 蔡柯柯(1985-), 女, 2011 年毕业于成都理工大学, 主要研究方向为地质矿产、物化遥地质。Email: 345789102@qq.com

7 种重金属的沉降总量及分布特征,结合地形、地貌特点对重金属来源进行分析,并对沉降超标区土壤及农产品的安全性进行初步评估,期望对山区大气沉降重金属来源的分析,为有效防治环境污染提供参考,并对秀山县北部地区环境污染防治和农田土壤安全利用提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市秀山县北部,东经 $108^{\circ}42'36''\sim 109^{\circ}18'53''$,北纬 $28^{\circ}27'21''\sim 28^{\circ}53'11''$,属武陵山二级隆起带南段,地形、地貌受地质构造控制明显,山脉多呈 NE—SW 向展布,整体呈“三山夹三槽”的格局,最高海拔 1 663 m,最低点海拔 245.7 m。年平均气温 16.5°C ,主导风向为东南风,土壤类型以黄壤为主。研究区内地层出露齐全,多为沉积岩,有少量浅变质岩。研究区位于渝湘黔锰矿集中产区,东部湖南省花垣县为著名的铅锌矿产区(图 1)。

1.2 样品采集

按照 1 个点/ 69 km^2 的密度布设接沉缸,接沉缸选择放置在周围无更高建筑的民房房顶,一般距离地面约 11 m,将其垫高 1.5 m 防止扬尘进入并固

定,记录每个接沉缸质量。接沉时间为 2019 年 4 月 1 日至 2020 年 4 月 1 日,共布设 18 个大气干湿沉降采样点。

收样前,先称取装有干湿沉降物的接沉缸的总质量,测量接沉缸缸口直径。随后用玻璃棒充分搅拌均匀,取 1 000 mL 装入塑料瓶,分别称取装水前后塑料瓶的质量。记录样品编号,装箱送检。

1.3 分析测试

分析测试 Cd、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 等 7 种重金属元素,测试工作由重庆市地质矿产测试中心负责。用虹吸法将经过沉淀的上清液、悬浮物及沉淀物进行分离并测量质量及体积,悬浮物及沉淀物用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酯纤维滤膜全部过滤,记录滤液质量及体积。固体物中 Pb、Zn 采用 X 射线荧光光谱法, Cd、Cu、Ni、Cr 采用等离子体质谱法, Hg 采用氢化物发生—原子荧光光谱法进行分析,分析插入准确度控制的国家一级标准物质 2 件。上清液中 Cd、Cu、Ni、Cr、Pb、Zn 采用电感耦合等离子体质谱法, Hg 采用原子荧光法进行分析,分析插入准确度控制的国家一级标准物质 2 件。国家一级标准物质测定值准确度合格率均为 100%,重复性检验合格率 100%。样品皆采取 100% 重复样分析,双样结果的相对偏差 $RE/\%$ 均小于 30%。

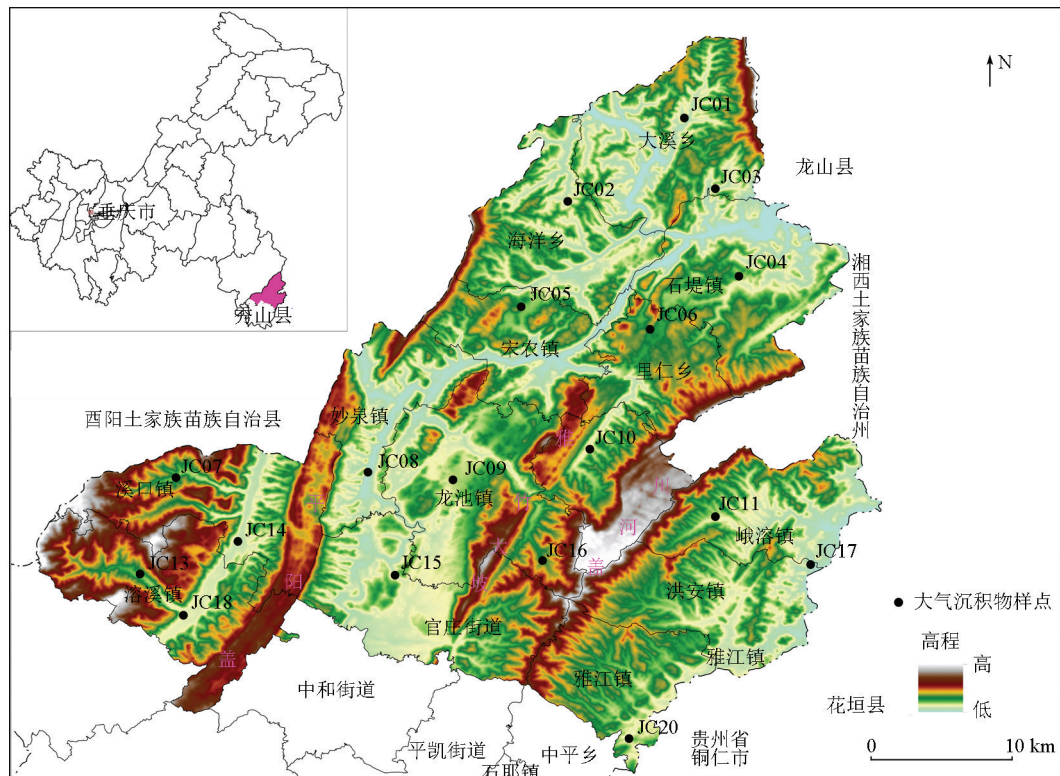


图 1 研究区范围及大气沉降采样点位分布

Fig. 1 Study area and distribution of atmospheric dust sampling sites

2 结果及分析

2.1 大气干湿沉降重金属分布及含量特征

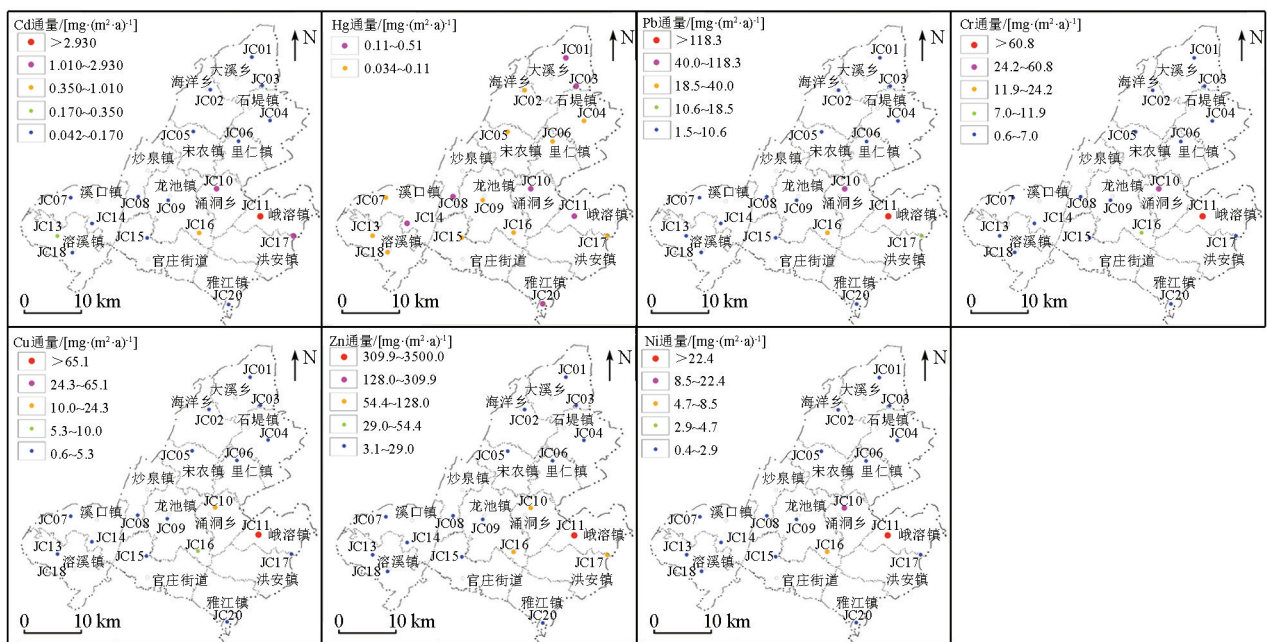
按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)^[19]附表 F1“全国大气干湿沉降物中砷等重金属元素年沉降通量密度统计表”所列 25%、50%、75%、90%百分位数将区内各点大气干湿沉降通量进行分级,如图 2 所示,秀山县北部大气干湿沉降重金属通量具有明显的分区性。高值区集中分布在川河盖两翼,即观测点 JC10、JC11、JC16、JC17 处,一般沉降区重金属沉降通量较低。分别统计两个区域重金属沉降通量如表 1 所示。

一般沉降区包含了 14 个沉降观测点,除 Hg 外的 6 种重金属元素沉降通量均远低于全国平均值^[20]及重庆市主城区降水中沉降通量^[21-22]。其中,Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 的年沉降通量小于全国大气干湿沉降物 5%百分位数,Cd 平均值小于 25%百分位数,Hg 小于 75%百分位数。一般沉降区内 Hg 沉降通量较全国平均水平偏高,推测与秀山县 Hg 地质高背景相关,来源于自然源^[23-24]。

川河盖两翼高值区包含了 JC10、JC11、JC16、JC17 共 4 个观测点,该区 Hg 沉降通量与一般沉降区较为接近,平均值略高于全国平均值,其余 6 种重

金属元素沉降通量平均值远高于全国平均值及重庆主城区降水中的平均值。其中,Cd 沉降通量平均值高达 20.981 mg/(m²·a),是全国平均值的 30 倍,重庆主城区平均值的 48 倍;Cr 沉降通量平均值高达 117.633 mg/(m²·a),是全国平均值的 6 倍,重庆主城区平均值的 41 倍;Cu 沉降通量平均值高达 85.052 mg/(m²·a),是全国平均值的 5 倍,重庆主城区平均值的 7 倍;Ni 沉降通量平均值高达 64.271 mg/(m²·a),是全国平均值的 8 倍,重庆主城区平均值的 29 倍;Pb 沉降通量平均值高达 376.904 mg/(m²·a),是全国平均值的 10 倍,重庆主城区平均值的 12 倍;Zn 沉降通量平均值高达 960.891 mg/(m²·a),是全国平均值的 6 倍,重庆主城区平均值的 13 倍。

表 2 为大气干湿沉降样点周边 1 km 范围内土壤中 7 种重金属元素含量的平均值。对比发现,大气干湿沉降物中重金属元素的含量与周围土壤中重金属元素的含量并不呈简单的线型相关。在一般沉降区,地质背景相同、人类活动程度相近的样点,土壤与大气干湿沉降物中重金属元素含量接近,例如同位于志留系泥页岩分布区,以农林业为主的 JC01 和 JC03 样点;同位于溶溪槽谷,以寒武系碳酸盐岩为主,工农业活动程度较强的 JC14 和 JC18 样点,其土壤和大气干湿沉降物中重金属元素含量均较为接



注:蓝色点表示低于25%百分位;绿色点表示位于25%~50%百分位;橙色点表示位于50%~75%百分位;玫色点表示位于75%~90%百分位;红色点表示高于90%百分位

Note: blue points are below 25% percentile; green points are in 25%~50% percentile; orange points are in 50%~75% percentile; rose points are in 75%~90% percentile; red points are above 90% percentile

图2 各样点重金属元素沉降通量点位符号

Fig. 2 Symbol diagram of heavy metal element deposition flux at various points

表 1 各样点大气干湿沉降中重金属元素沉降通量
Table 1 Flux of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition

		mg · (m ² · a) ⁻¹						
分区	样品编号	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
一般区	JC01	0.077	0.935	1.150	0.550	2.014	4.765	0.155
	JC02	0.059	0.948	0.909	1.597	1.506	3.664	0.040
	JC03	0.042	1.067	1.091	1.179	1.528	4.723	0.129
	JC04	0.113	2.505	1.046	0.628	1.762	5.096	0.048
	JC05	0.058	0.679	0.617	0.441	1.459	3.689	0.042
	JC06	0.053	0.656	0.649	0.492	1.532	3.131	0.065
	JC07	0.120	0.766	1.053	0.433	2.432	5.658	0.059
	JC08	0.071	1.371	1.141	0.788	5.550	5.516	0.173
	JC09	0.061	1.353	1.024	1.653	1.695	3.753	0.083
	JC13	0.213	2.043	3.109	1.558	4.678	13.765	0.063
	JC14	0.138	0.784	1.209	0.459	2.853	6.769	0.162
	JC15	0.082	3.491	1.478	1.041	3.199	6.476	0.079
	JC18	0.115	0.837	1.065	0.341	3.393	4.935	0.102
	JC20	0.162	0.643	0.655	0.352	2.647	8.851	0.176
	平均值	0.097	1.291	1.157	0.822	2.589	5.771	0.098
川河盖两翼沉降量高值区	JC10	2.500	40.500	17.200	14.500	65.400	108.000	0.138
	JC11	76.100	388.800	298.400	237.900	1395.600	3482.200	0.146
	JC16	0.737	9.689	8.284	5.076	21.439	66.948	0.101
	JC17	1.250	3.530	3.542	1.621	15.753	93.506	0.078
	平均值	20.981	117.633	85.052	64.271	376.904	960.891	0.097
全区	最大值	76.100	388.8	298.400	237.900	1395.6	3482.2	0.176
	最小值	0.042	0.643	0.617	0.341	1.459	3.131	0.024
	平均值	4.554	25.585	19.087	15.032	85.246	212.859	0.102
	标准差	17.31	88.54	67.85	54.14	318.15	793.58	0.05
	变异系数	3.81	3.46	3.55	3.60	3.73	3.73	0.45
全国 ^[19]	平均值	0.71	18.21	15.55	7.57	36.72	147.85	0.07
重庆主城区降水 ^[20]	平均值	0.44	2.9	13	2.22	30.25	76.26	

表 2 大气干湿沉降样点周围土壤中重金属元素含量

Table 2 The content of heavy metal elements in the soil around the atmospheric dry and wet deposition sample site 10⁻⁶

样品编号	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	样品编号	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
JC01	0.20	68.0	27.8	0.08	34.4	32.6	84.1	JC13	0.40	81.2	32.4	0.24	33.6	33.9	99.1
JC02	0.21	71.1	28.5	0.06	34.4	32.1	89.5	JC14	0.34	72.9	28.3	0.57	34.5	42.8	95.1
JC03	0.19	68.6	25.3	0.07	33.0	29.8	86.4	JC15	0.36	86.7	26.0	0.21	33.5	40.7	95.8
JC04	0.16	59.2	19.0	0.07	25.8	26.3	69.5	JC18	0.43	77.9	29.2	0.55	32.9	39.9	102.6
JC05	0.33	82.3	29.5	0.17	34.1	46.9	88.6	JC20	0.39	77.6	32.6	0.17	39.0	44.0	104.0
JC06	0.46	69.5	27.0	0.30	30.2	47.6	90.2	JC10	0.28	75.2	28.2	0.09	34.2	33.7	85.9
JC07	0.94	98.1	50.2	1.46	49.9	29.1	122.2	JC11	0.32	74.0	47.7	0.07	34.5	35.7	87.9
JC08	0.26	76.1	28.6	0.35	35.5	31.1	84.3	JC16	0.33	74.5	46.7	0.07	39.3	34.9	89.8
JC09	0.39	83.0	26.8	0.23	32.9	46.0	94.9	JC17	0.53	71.4	32.1	0.22	34.4	48.8	94.2

近。位于锰矿产区的 JC13 样点,土壤中重金属元素含量与区域平均值接近,但大气干湿沉降物中重金属元素含量较一般沉降区偏高。在沉降高值区,大气干湿沉降物中重金属元素含量与周围土壤中重金属元素含量差异较大。这说明大气干湿沉降物中重金属元素的含量除受周围土壤中重金属元素含量的影响外,更受人类活动的影响。

2.2 大气干湿沉降重金属来源分析

研究区内一般沉降区重金属元素沉降通量显著低于全国和重庆市主城区,而川河盖两翼重金属沉降通量远高于全国和重庆市主城区,故本次对大气

沉降重金属来源分析只针对川河盖两翼的沉降高值区。

川河盖及其东部的洪安镇是秀山县重点发展的旅游区,峨溶镇是重要的农业镇,上述区域工矿企业分布少,而本次观测接收的重金属沉降量却最多。

2019~2020 年度,川河盖顶部有川河盖景区配套工程施工,相对集中在川河盖中部道路沿线。将川河盖两翼 JC10、JC11、JC16、JC17 点沉降重金属中各元素占比与川河盖顶部采集的表层土壤样品中相应重金属占比进行比对发现,大气干湿沉降物中 Cd、Pb、Zn 等 3 种元素占比远高于川河盖顶部土壤

样品的占比,Hg 占比基本与土壤样品持平,其余元素占比明显低于土壤样品(表 3)。川河盖海拔较高,景区配套工程工期集中在春、夏、秋 3 个季节,风向以东风及东南风为主。JC11 点距川河盖东缘约 3.2 km,JC10 点距川河盖西缘约 3.3 km,两点大气干湿沉降总量差别很大,前者 7 种重金属的沉降总量约为后者的 23.7 倍。有研究表明,建筑主体建设降尘中 Zn、Cr、Pb、Ni 的高值区出现在主体建设中心附近,并有沿场地中心向四周扩散的趋势^[25]。因此,上述 4 个观测点大气干湿沉降量的异常高值来源

于川河盖顶部的可能性小。

表 3 JC10、JC11、JC16、JC17 与川河盖顶部土壤样品中重金属占比对比

Table 3 Proportion comparison of heavy metals between JC10、JC11、JC16、JC17 and soil of Chuanhegai

样品编号	占比/%						
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
JC10	1.01	16.30	6.93	5.84	26.35	43.51	0.06
JC11	1.29	6.61	5.08	4.05	23.74	59.23	<0.01
JC16	0.66	8.63	7.38	4.52	19.09	59.63	0.09
JC17	1.05	2.96	2.97	1.36	13.21	78.39	0.07
川河盖顶土壤	0.26	30.73	9.91	12.77	12.37	33.90	0.06

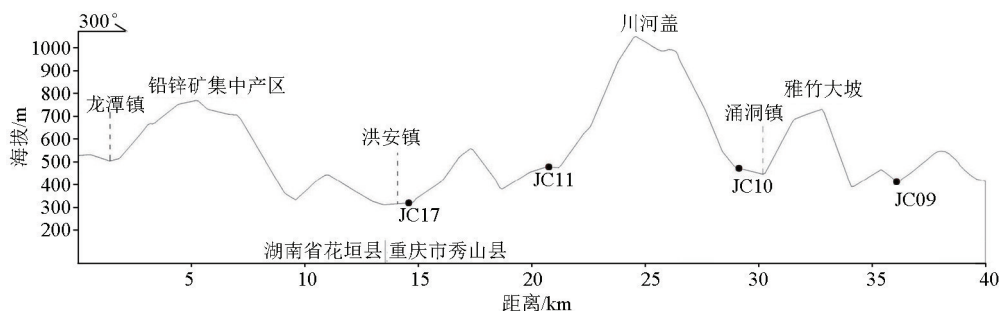


图 3 大气干湿沉降观测点分布剖面示意

Fig 3 Section of atmospheric dry and wet deposition points

连接 JC10 和 JC11,向东经 JC17 附近延伸至湖南省花垣县龙潭镇,向西经过一般沉降区的 JC19 附近横切地形剖面。如图 3 所示,以川河盖为界,JC17 位于东部浅丘区域,地势相对平坦,地形起伏较小,7 种重金属年度沉降总量为 $119.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,是一般沉降区均值的 10 倍;JC11 位于川河盖东翼第一级沟谷内,7 种重金属年度沉降总量为 $5879.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,是一般沉降区均值的 497 倍;JC10 位于川河盖西翼与雅竹大坡之间的沟谷内,7 种重金属年度沉降总量为 $248.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,是一般沉降区均值的 21 倍;JC09 为一般沉降区观测点,位于雅竹大坡西部的浅丘区域,7 种重金属年度沉降总量为 $9.6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,与一般沉降区均值相当。秀山县属亚热带湿润季风气候区,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风。根据上述 4 个点位 7 种重金属沉降总量分布来看,川河盖两翼大气沉降重金属来源于东南部。研究区东南部湖南省花垣县为著名的花垣铅锌矿产区,并拥有多家冶炼加工企业。在东南风的影响下,来自东南方携带 Zn、Pb、Cd 等多种重金属元素的空气在下风向沉降,遇到海拔陡增的川河盖时,受山体阻挡及山谷风等作用的影响下,在川河盖东翼沟谷富集沉降,少数翻越川河盖后,在川河盖和雅竹大坡之间的沟谷沉降^[1,26]。

地形、地貌通过影响水汽、热量循环从而对大气干湿沉降产生影响,JC11 位于 JC17 观测点西北方

向 6.9 km,在不考虑与污染源距离远近的条件下,认为 JC11 相对于 JC17 的高沉降是由于地形引起,前者 7 种重金属沉降总通量是后者的 49 倍。因此,建议加强对污染源下风向该类型地貌区大气沉降重金属的监测及环境安全性评估工作。

2.3 大气沉降高值区沉降物污染程度及环境地球化学等级评价

地累积指数法由德国科学家 Muller 提出,现多应用于研究物质中重金属污染程度的定量指标^[27-28],本次采用地累积指数法对川河盖两翼 JC10、JC11、JC16、JC17 点的 7 种重金属沉降对土壤污染程度进行评估。公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (1.5 \times B_n)]$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为大气沉降中重金属元素 n 的含量; B_n 为土壤中重金属元素 n 的地球化学背景值。 $I_{\text{geo}} \leq 0$ 表示无污染, $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 表示轻度污染, $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 表示中度污染, $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 表示中度至严重污染, $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 表示严重污染, $4 < I_{\text{geo}} < 5$ 表示严重至极度污染, $I_{\text{geo}} > 5$ 表示极度污染。

如表 4 所示,Cr、Ni 无污染,Cu 为无污染—轻度污染,Hg 为无污染—中度污染,Cd 为中度污染—严重至极度污染,Pb 轻度污染—中度污染,Zn 为轻度污染—中度至严重污染。从单元素看,可能对土壤造成中度以上污染的元素为 Cd、Zn。从位置看,位

表 4 川河盖两翼大气沉降重金属地累积指数
Table 4 Geoaccumulation index of atmospheric dry
and wet deposition in two wings of Chuanhegai

项目	地累积指数						
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
JC10	3.6	-0.2	-0.1	0.7	-0.6	1.5	0.9
JC11	4.6	-0.8	0.2	-3.1	-0.4	2.0	2.0
JC16	2.5	-1.6	-0.4	1.0	-1.4	0.6	0.9
JC17	4.2	-2.1	-0.7	1.5	-2.1	1.1	2.3

于川河盖东翼的 JC11、JC17 大气沉降 Cd、Zn 污染程度明显较西翼 JC10、JC16 严重,其中污染最严重的是 JC11 点。

《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中规定,Cd 年沉降通量密度大于 $3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的观测点大气干湿沉降物环境地球化学综合等级为二等,表示大气干湿沉降物沉降对土壤环境质量影响较大。JC11 观测点 Cd 的沉降通量高达 $76.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,远高于二等划分标准,该点具有较高的环境风险。此外,JC11 观测点 Zn 的年沉降通量已接近《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)附表 F2 中所列 10 年后达到 GB 15618—2018 标准中土壤限定值大气干湿沉降物中 Zn 的最小年沉降通量密度。其余观测点的大气干湿沉降物环境地球化学等级皆为一等。

2.4 大气沉降高值区重金属生态效应评价

已有多项研究表明,大气沉降重金属可通过植物体茎叶表面,直接被吸收入植物体内,大气沉降是植物重金属污染的重要来源^[29-30]。本次在沉降通量最高的 JC11 点东北方向 242、802、953、965 m 分别采集玉米、水稻、红薯、油菜 4 种大宗农作物样品各一件(图 4),其中水稻、红薯样品可食用部分 Cd 含量分别为 0.216×10^{-6} 、 0.135×10^{-6} ,超过《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中的限量。

该点周围 1 km 范围内采集的 20 件土壤样品(图 4)中,Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别为 0.33×10^{-6} 、 74.5×10^{-6} 、 46.7×10^{-6} 、 0.07×10^{-6} 、 39.3×10^{-6} 、 34.9×10^{-6} 、 89.8×10^{-6} 。其中,有 6 件土壤样品 Cd 含量超过《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)的筛选值,最大值为 0.83×10^{-6} ;Cu 有 7 件超过筛选值,最大为 98.98×10^{-6} 。按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)评价规范,土壤环境质量类别为清洁—轻微污染。说明 JC11 点处,较大量的大气重金属沉降暂未改变土壤环境质量等级,但已影响农产品安全。

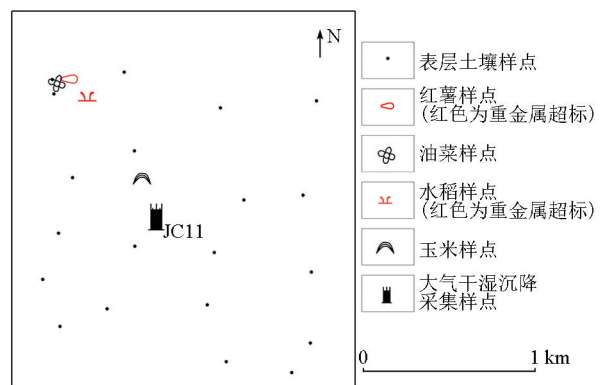


图 4 JC11 观测点及周围 1 km 范围内表层土壤及农作物样点分布

Fig 4 Surface soil and crop sample points around JC11 within 1 km

3 结论

1)通过对秀山县北部大气干湿沉降物进行为期一年的采集测试,发现不同区域大气干湿沉降量差异较大,一般沉降区 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等 6 种重金属元素年沉降通量较全国和重庆市主城区低。川河盖两翼的异常高值区,除 Hg 以外的上述 6 种重金属元素的沉降通量远高于全国及重庆市平均值。区内 Hg 沉降分布较为均匀,略高于全国平均值,推测与秀山县 Hg 地质背景值较高相关。

2)秀山北部川河盖两翼较高的大气干湿沉降受东部花垣县铅锌矿开采及特殊地形、地貌的综合影响。经本次估算,下风向陡增的地形使得大气干湿沉降物中 7 种重金属通量增加 49 倍,应加强该类型地貌区环境安全的监测与评估工作。

3)经地累积指数法估算,川河盖两翼大气干湿沉降物中 Cr、Ni 无污染,Cu 为无污染—轻度污染,Hg 为无污染—中度污染,Cd 为中度污染—严重 4 至极度污染,Pb 为轻度污染—中度污染,Zn 为轻度污染—中度至严重污染。

4)沉降通量最大的 JC11 点处,Cd 的沉降通量高达 $76.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,远高于《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)二级标准,该点具有较高的环境风险;现阶段该重金属尚未改变土壤环境质量等级,但对农作物安全造成了一定影响。

参考文献 (References):

- [1] 陈岳龙,杨忠芳.环境地球化学[M].北京:地质出版社,2017:85-91.
Chen Y L, Yang Z F. Environmental geochemistry[M]. Beijing:Geology Press, 2017:85-86.

- [2] 陈满怀,朱永官,董元华,等. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2018:9-10.
Chen M H, Zhu Y G, Dong Y H, et al. Environmental soil science [M]. Beijing: Science Press, 2018:9-10.
- [3] 张乃明. 大气沉降对土壤重金属累积的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 91-93.
Zhang N M. Effects of air settlement on heavy metal accumulation in soil[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(2): 91-93.
- [4] Goforth M R, Christoforou C S. Particle size distribution and atmospheric metals measurements in a rural area in the South Eastern USA [J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1): 217-227.
- [5] Nriagu J O. Changing metal cycles and human health[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1984: 114-142.
- [6] 熊秋林,肖红伟,程朋根,等. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 816-824.
Xiong Q L, Xiao H W, Cheng P G, et al. A pollution distribution of topsoil heavy metals in Beijing and its atmospheric deposition contribution[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4): 816-824.
- [7] 邹天森,康文婷,张金良,等. 我国主要城市大气重金属的污染水平及分布特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(7): 1053-1061.
Zou T S, Kang W T, Zhang J L, et al. Concentrations and distribution characteristic of atmospheric heavy metals in urban areas of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(7): 1053-1061.
- [8] 戴青云,贺前峰,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.
- [9] Mijic Z, Stojic A, Perisic M, et al. Seasonal variability and source apportionment of metals in the atmospheric deposition in Belgrade [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(30): 3630-3637.
- [10] 赖木收,杨忠芳,王洪翠,等. 太原盆地农田区大气沉降对土壤重金属元素累积的影响及其来源探讨[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 240-245.
Lai M S, Yang Z F, Wang H C, et al. Effects of atmospheric fallouts on heavy metal elements accumulation in soils in farmland areas in the Taiyuan basin, Shanxi, China and sources of fallouts[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 240-245.
- [11] 丛源,陈岳龙,杨忠芳,等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 257-264.
Cong Y, Chen Y L, Yang Z F, et al. Dry and wet atmospheric deposition fluxes of elements in the plain area of Beijing municipality, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 257-264.
- [12] 汤洁,韩维峥,李娜,等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3087-3091.
Tang J, Han W Z, Li N, et al. Multivariate analysis of heavy metal element concentrations in atmospheric deposition in Harbin City, northeast China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(11): 3087-3091.
- [13] 李山泉,杨金玲,阮心玲,等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 22-29.
Li S Q, Yang J L, Ruan X L, et al. Atmospheric deposition of heavy metals and their impacts on soil environment in typical urban areas of Nanjing[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 22-29.
- [14] 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估[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1021-1028.
Li P, Xue L Y, Wang S L, et al. pollution evaluation and health risk assessment of heavy metal from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1021-1028.
- [15] 杨磊,熊黑刚. 新疆准东煤田土壤重金属来源分析及风险评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 273-281.
Yang L, Xiong H G. Soil heavy metal sources analysis and risk evaluation of Zhundong coal mine in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 273-281.
- [16] 张国忠,黄威,潘月鹏,等. 河北典型农田大气重金属干沉降通量及来源解析[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(8): 1245-1254.
Zhang G Z, Huang W, Pan Y P, et al. Dry deposition flux of atmospheric heavy metals and its source apportionment in a typical farmland of Hebei Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1245-1254.
- [17] 江华亮,王宗爽,武雪芳,等. 我国大气 PM_{2.5} 中砷的污染特征、来源及控制[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(6): 464-470.
Jiang H L, Wang Z S, Wu X F, et al. Pollution characteristics, sources and control of arsenic in PM_{2.5} in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(6): 464-470.
- [18] 王增辉. 鲁西南平原区大气干湿沉降元素输入通量及来源浅析: 以巨野县为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 839-846.
Wang Z H. An analysis of the input flux and source of elements in dry and wet atmospheric deposition of southwest plain of Shandong: A case study of Juye County [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 839-846.
- [19] DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S].
DZ/T 0295—2016 Determination of land quality geochemical evaluation[S].
- [20] 王梦梦,原梦云,苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4085-4096.
Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China [J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4085-4096.
- [21] 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2490-2496.
Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, et al. Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in core urban areas, Chongqing [J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2490-2496.
- [22] 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.
- [23] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 503-530.
Feng X B, Chen J B, Fu X W et al. Progresses on environmental geochemistry of mercury[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5): 503-530.
- [24] 张龙,林先辉,刘俏,等. 秀山汞矿开采对当地土水环境的影响[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2011, 36(6): 105-109.
Zhang L, Lin X H, Liu Q, et al. Effects of mercury mine exploitation on local soil and water environment in Xiushan[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2011, 36(6): 105-109.
- [25] 王丽丽,金国因,武志宏,等. 不同类型施工降尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1055-1065.
Wang L L, Jin J N, Wu Z H, et al. Heavy metal pollution characteristics and associated health risk assessment in different types of construction dust[J]. China Environmental Science, 2021, 41(3): 1055-1065.
- [26] 李霞,贾健. 复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 1-10.
Li X, Jia J. Research of the influences of the air flows on multiple scales on the transport and diffusion mechanisms of urban air pollution over the complex terrains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(6): 1-10.
- [27] 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.
- [28] 刘志坚,张绣. 银川市大气降尘重金属污染状况评价[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 316-321.
Liu Z J, Zhang X. Contamination status assessment of heavy metals from atmospheric dust falls in Yinchuan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 316-321.
- [29] 程珂,杨新萍,赵方杰. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1835-1845.
Cheng K, Yang X P, Zhao F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 1835-1845.
- [30] 章明奎,刘兆云,周翠. 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属累积的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2010, 36(2): 221-229.
Zhang M K, Liu Z Y, Zhou C. Effect of atmospheric deposition on heavy metal accumulation in vegetable crop near a lead-zinc smelt mine[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2010, 36(2): 221-229.

Distribution characteristics and source analysis of heavy metals from dry and wet atmospheric deposition in northern Xiushan County, Chongqing

CAI Ke-Ke¹, ZHAO Zhi-Qiang¹, MENG Li^{2,3}, WANG Xiao-Meng¹, LIU Jian¹, LUO Ren-Feng¹

(1. Chongqing Geological and Mineral Resource Exploration and Development Bureau 607 Geological Team, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China; 3. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This study aims to determine the contents of heavy metals from dry and wet atmospheric deposition in northern Xiushan County for targeted environmental pollution prevention and control and safe farmland soil utilization. Based on the dry and wet atmospheric deposition samples continuously received from 18 sampling sites in northern Xiushan County from November 2019 to November 2020, this study tested the contents of seven heavy metal elements, including Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and Hg. Considering the topographic features, this study analyzed the distribution patterns and sources of heavy metals from dry and wet atmospheric deposition in northern Xiushan County. Moreover, this study assessed the soil pollution caused by heavy metals from dry and wet atmospheric deposition using the geoaccumulation index method. The results show that except Hg, the other six heavy metal elements exhibited significant zoning, with their high-value deposition areas distributed primarily in the flanks and eastern segment of Chuanhegai, where their contents were much higher than the national and Chongqing's averages. In contrast, their depositional fluxes in other general deposition areas were less than the national averages by 25%. The high dry and wet atmospheric deposition in the flanks of Chuanhegai was subjected to both the mining of the lead-zinc deposit in Huayuan County in the east and the special topography. The abrupt topography increased the fluxes of the seven heavy metals in the dry and wet atmospheric deposition by 49 times. Therefore, the monitoring and assessment of environmental safety in this type of landform area should be strengthened. According to the assessment results of the geoaccumulation index method, the flanks of Chuanhegai were moderately-severely to extremely polluted by Cd, slightly-moderately polluted by Pb, and slightly-moderately to severely polluted by Zn.

Key words: dry and wet atmospheric deposition; heavy metal; source analysis; Xiushan