



安徽旌德-宁国地区大气干湿沉降地球化学特征及评价研究

吴 正,邢润华,陈富荣,李明辉,刘 超,李 杨

安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所),安徽 合肥 230001

摘 要:以安徽旌德-宁国地区大气干湿沉降物为研究对象,共采集 6 处干湿沉降物样品 24 件,对大气干湿沉降元素含量特征、通量特征进行对比分析,对干湿沉降元素含量及分布特征加以统计研究,并开展大气干湿沉降环境地球化学评价。结果显示:1)大气干湿沉降元素主要以矿物相形式存在或吸附在固体颗粒上,且受周边环境的影响;2)干沉降中 Cd、Se 的高含量会对研究区土壤污染造成较大影响,湿沉降中部分样点 pH 超灌溉水水质标准,所有点均达到地表水 II 类环境质量标准;3)区内重金属元素年沉降通量密度为,As 年沉降通量低,Hg、Ni、Pb、Cr、Cu、Cd 偏低,Zn 偏高;4)大气干湿沉降重金属元素通量一般表现为丘陵山区小于城镇及工矿区,主要受燃煤燃烧、尾气排放及人为活动等影响;5)大气干湿沉降物环境地球化学单指标和综合指标评价结果均为一等。

关键词:大气干湿沉降;元素含量;沉降通量;重金属;土壤地球化学;安徽省

GEOCHEMISTRY AND EVALUATION OF ATMOSPHERIC DRY AND WET DEPOSITION IN JINGDE-NINGGUO AREA, ANHUI PROVINCE

WU Zheng, XING Run-hua, CHEN Fu-rong, LI Ming-hui, LIU Chao, LI Yang

Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230001, China

Abstract: Taking the atmospheric dry and wet deposition in Jingde-Ningguo area of Anhui Province as study object, a total of 24 samples are collected from 6 sites to comparatively analyze the element content and flux characteristics of atmospheric dry and wet deposition, statistically study the element content and distribution features of dry and wet deposition, and carry out the environmental geochemical evaluation as well. The results show that atmospheric dry and wet deposition elements mainly exist in the form of mineral facies or adsorbed on solid particles, and they are affected by surrounding environment. The high Cd and Se contents in dry deposition have great impact on soil pollution in the study area, the pH values of some wet deposition sampling sites exceed the irrigation water quality criteria, and all sites reach the Grade II surface water environmental quality standard. As to the annual deposition flux density of heavy metal elements, the deposition flux of As is low, Hg, Ni, Pb, Cr, Cu and Cd lower, and Zn higher. The flux of heavy metal elements in dry and wet atmospheric deposition is generally smaller in hilly areas than in towns and industrial/mining areas, mainly affected by coal combustion, exhaust gas emission and human activities. The evaluation results of environmental geochemistry single index and comprehensive index for atmospheric dry and wet deposition are both Grade I.

Key words: atmospheric dry and wet deposition; element content; deposition flux; heavy metal; pedogeochemistry; Anhui Province

收稿日期:2021-03-09;修回日期:2021-04-07. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局地质调查专项“皖南岳西-宁国(旌德-宁国片)1:25 万土地质量地球化学调查”(12120115049601).

作者简介:吴正(1988—),男,硕士,工程师,主要从事勘察地球化学、生态地球化学研究,通信地址 安徽省合肥市包河区宁国路 19 号,E-mail//zww881107@126.com

0 引言

大气干湿沉降是有害物质进入土壤的一种重要途径,是影响农田生态系统安全的重要因素^[1-2],主要指存在于空气中的细小颗粒物(粒径大于 10 μm)由于重力作用自然降落于地面,长时间悬浮于大气或在风的作用下进行长距离、大范围的传输,通过干、湿沉降的方式进入土壤,并在土壤中不同程度地累积,对土壤环境质量带来较大的影响^[3-4]。国内外研究表明:1)大气沉降物对土壤重金属元素 Hg 和 Pb 的输入贡献并不低于污水灌溉^[5];2)许多工业发达国家,大气沉降对土壤系统中重金属累积贡献率在各种外源输入因子中排在首位^[6-8];3)经干湿沉降进入土壤的重金属元素,与当地经济发展模式、产业结构等有直接关系^[9-10]。

本研究通过分别采集区内大气干、湿沉降物,对比分析元素含量特征、通量特征,统计研究干、湿沉降元素含量及分布特征,并对大气干湿沉降环境地球化学进行评价,以期为该地区土壤污染整治提供科学依据^[11-13]。

1 研究区概况

研究区位于安徽省东南部,行政区划隶属于宣城市管辖,该区地处皖南山区,跨长江、钱塘江两大流域,地表水资源丰富。地貌形态以山地和丘陵为主,地势总体南高北低(图1),属于“以林为主,稻麦杂一年二熟北亚热带”农业气候区。

研究区大地构造位置处于下扬子陆块皖南褶冲带东南部,构造线以北东向为主,属扬子地层区江南地层分区,地层自新元古代至第四纪发育齐全,岩浆岩较为发育,成矿地质条件良好。土壤母质以浅色碎屑岩风化物母质和酸性岩类风化物母质为主,遍布全区。土壤类型主要为红壤,占整个研究区面积的 60.04%左右。

2 样品采集与测试

2.1 样点布设

研究区共布设了 6 件大气干湿尘降物取样点 (广德市、泾县和绩溪县各 1 处, 宁国市 3 处), 放置周期为 1 a。样点均布设于农耕区、城镇近郊区及矿产较集中地区, 兼顾空间分布的均匀性, 周边无遮挡的高大树木或建筑物, 并避开烟囱、交通道路等污染源。集尘缸选

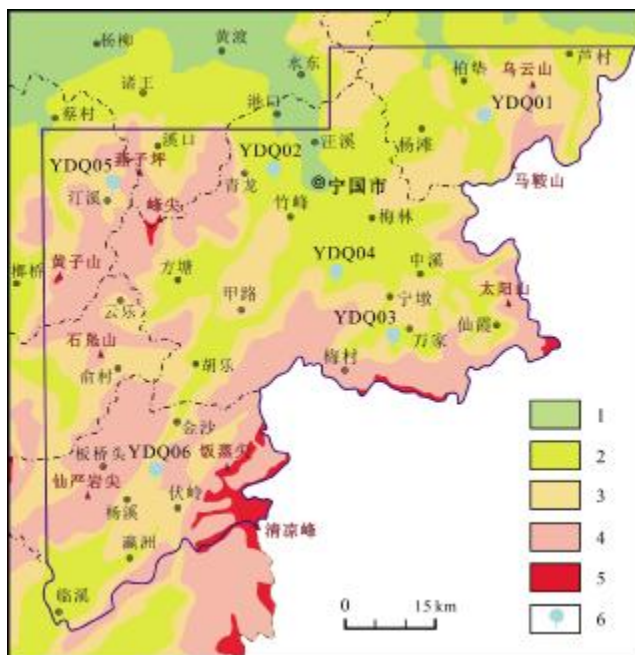


图 1 研究区地貌图

Fig. 1 Geomorphological map of the study area

1—平原(plain); 2—岗地(downland); 3—丘陵(hills); 4—低山(low mountain); 5—中山(middle mountain); 6—大气干湿沉降物取样点(sampling site of atmospheric dry and wet deposition)

用上口径 51.5 cm、下口径 44 cm、高 70 cm 无污染塑料桶,用 1 m 高三脚架固定放置在距地面 5 m 以上居民楼顶平台,并罩上尼龙网,放置前用蒸馏水清洗桶壁,

2.2 样品采集

因大气干湿沉降物较多，采用虹吸法抽取静置的集尘缸中上部澄清溶液至另一容器，测定上清液的总体积或重量，按照检测指标的不同分别采集不同的样品^[14-15]。

①取上清液 500 mL 注入塑料容器中, 加入 1:1 硝酸 10 mL, 用于检测溶液中金属元素;

②取上清液 500 mL 注入另外一个塑料容器中，加入 5%重铬酸钾(保护剂)溶液 5 mL,用于检测溶液中汞元素：

③取 1 500 mL 上清液移至塑料容器中,检测溶液中其他元素;

④剩余的沉淀物和悬浊液转移至合适的容器中,测定其总体积和质量,搅拌均匀,取全部浑浊液至塑料容器中密封。将上述密封好的上清液样品与沉淀物和悬浊液样品及时送至实验室处理分析。

2.3 样品测试

样品分析测试工作由安徽省地质实验研究所承担,主要以中国地质调查局地质调查技术标准《区域地球化学样品分析方法》(DD2005-03)为依据,结合《生态地球化学评价样品分析外部检查质量控制暂行规定》和《生态地球化学评价样品分析技术要求补充规定》等相关技术标准^[16],测试方法如表 1 所示。

表 1 干湿沉降滤液分析方法

Table 1 Analysis methods of atmospheric dry and wet deposition filtrate		
测定项目	处理方法	分析方法
As、Hg	1+1 王水溶样	AFS
Se	高氯酸冒烟	AFS
F	直接取样	ISE
Cd、Cr、Cu、Pb、Zn	直接取样	ICP-MS

3 大气干湿沉降物地球化学特征与评价

3.1 大气干湿沉降中元素含量特征

通过分析测试数据(表 2)不难看出,研究区内干沉降的元素含量值远高于湿沉降元素含量(假定湿沉降密度为 1 计算)^[17-18],说明大气中这些元素主要以矿物相形式存在或吸附在固体颗粒上,然后通过大气沉降等途径持续地大量输入到地表环境中,对环境的生物地球化学循环造成持久的负面影响^[19-20]。

表 2 研究区大气干湿沉降中元素含量特征

Table 2 Element contents of atmospheric dry and wet deposition in the study area

元素	湿沉降/(μg/L)			干沉降/10 ⁻⁶		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
As	<0.4			9.1	13.2	5.8
Hg	<0.05			0.381	1.035	0.149
Cd	0.233	0.430	0.075	4.699	8.723	0.877
Cr	5.35	12.17	2.69	151.7	196.4	106.3
Ni	0.30	0.49	0.18	54.2	62.4	47.1
Cu	1.92	3.56	1.13	179.2	261.8	101.1
Pb	1.86	3.99	0.13	301.0	456.6	133.5
Zn	107.81	199.25	15.65	567.2	955.4	183.0
Se	0.49	0.72	0.38	4.91	6.94	3.95
F	<0.1	0.10		369	444	310
pH	6.14	7.22	5.26			

结合点位分布情况,对干、湿沉降进行对比分析(图 2)。宁国市万家乡(YDQ03)湿沉降中 Cd、Ni、Pb、Zn 含量相对高,该点周边矿点、矿化点较多,钨钼矿、铅锌银矿、铅矿、钨矿、萤石矿等均有分布,同时该点的酸碱度最低、酸性较强;广德市四合乡(YDQ01)干沉降中 As、Ni、F 含量高,该点北部有一中型萤石矿,南部有稀土矿和萤石矿,干沉降中 F 高含量可能与其有关;宁国市青龙乡(YDQ02)干沉降中 Hg、Se、Cr、Zn 含量高,

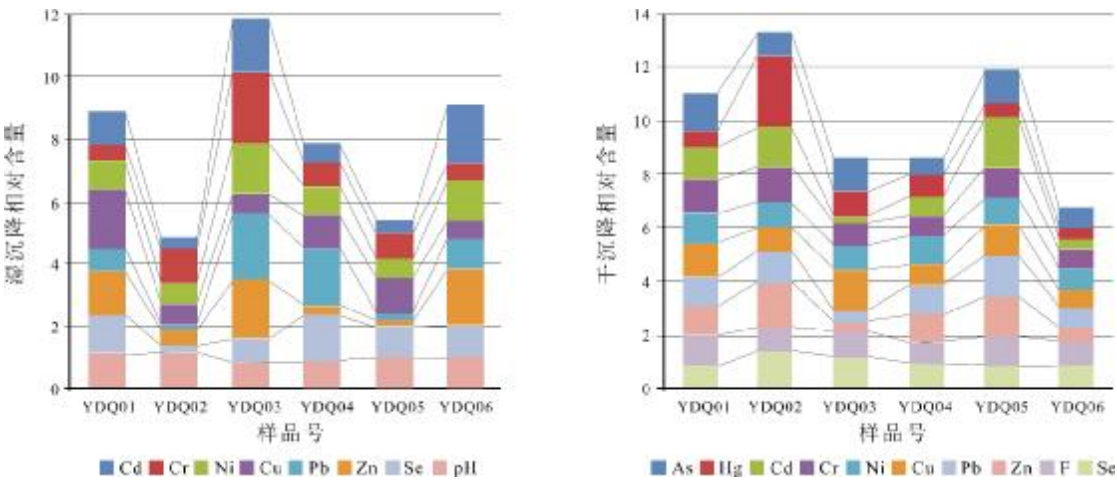


图 2 研究区不同样点大气湿沉降和干沉降相对含量对比柱状图

Fig. 2 Comparison of relative contents between atmospheric dry and wet deposition at different sampling sites

该点位于宁国市城郊,附近有公路和铁路,北部有石灰岩矿及煤矿。

3.2 湿、干沉降中元素含量及分布特征

大气沉降是大气圈物质下沉或降落到地表面的过程或现象,通过降水过程表现的大气沉降为湿沉降,通过气体扩散、固体物降落表现的大气沉降为干沉降。国内外学者开展的相关研究^[21-23]表明,大气干湿沉降是元素在环境中迁移、循环的重要环节,与生态、农业、健康、气候等领域都关系密切。

3.2.1 湿沉降中元素含量及分布

湿沉降中 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Se、F、pH 含量与《农田灌溉水质标准》(GB5084—2005)中标准值相比较,宁国市万家乡(YDQ03)、霞西镇(YDQ04)两个点湿沉降 pH 超标,其他点位指标均未超标。采用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行评价,广德市四合乡(YDQ01)、宁国市青龙乡(YDQ02)、宁国市万家乡(YDQ03)、绩溪县杨溪镇(YDQ06)4 个点湿沉降中 Zn 达到Ⅱ类水,宁国市万家乡(YDQ03)湿沉降中 Cd 达到Ⅱ类水,宁国市万家乡(YDQ03)、霞西镇(YDQ04)两个点湿沉降 pH 超标,其他点位均达到Ⅰ类水质标准(表 3)。一般认为,湿沉降的加入对表层土壤质量(或体积)的影响较小,所以湿沉降对农田土壤重金属的累积是正向的,高重金属含量水平的大气湿沉降会直接造成研究区土地质量的下降^[24]。

表 3 研究区湿沉降元素含量特征

Table 3 Characteristics of wet deposition element content in the study area

大气沉降点号	地理位置	灌溉水水质标准	地表水环境质量标准
YDQ01	广德市四合乡张家湾		Zn Ⅱ类水
YDQ02	宁国市青龙乡		Zn Ⅱ类水
YDQ03	宁国市万家乡云山村	pH 超标	Cd、Zn Ⅱ类水,pH 超标
YDQ04	宁国市霞西镇山门村	pH 超标	pH 超标
YDQ05	泾县汀溪乡棋盘村		
YDQ06	绩溪县杨溪镇牛皮石达		Zn Ⅱ类水

3.2.2 干沉降中元素含量及分布

干沉降中 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 含量采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)中筛选值和管制值进行评价,其中

筛选值和管制值均从严取值,Se、F 采用《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中 Se、F 过剩等级标准进行评价^[25-27]。通过比较分析,干沉降中除 As 外,其余 7 种重金属元素的含量均超过土壤环境质量标准。具体如下:As 均低于筛选值,Hg、Ni 均只有 1 个点位高于筛选值,Cr、Zn、Cu 部分或全部样点高于筛选值,Pb、Cd 全部样点高于筛选值,其中 Pb 有 1 个样点高于管制值,Cd 有 5 个样点高于管制值,Se 均达到过剩等级,F 均在过剩等级以下。因此,干沉降中 Cd、Se 的高含量会对研究区土壤污染造成较大影响。

3.2.3 大气干湿沉降中重金属元素的来源

对干、湿沉降的分析显示,研究区内的 Cd、Pb 等重金属元素含量较高。通过开展实地调查和综合分析,认为主要是因为区内分布有较多的矿点及矿化点,小型钨钼矿、铅锌银矿、铅矿、钨矿、萤石矿的开采可能会导致 Cd、Pb 等重金属含量增多;同时,部分点布设于城镇周边或者公路铁路附近,汽车尾气的排放及人为活动也会带来一定的重金属污染;此外,研究区的主要经济产业为汽车零部件产业、耐磨铸件和精密制造产业等,主要位于宁国市周边地区(研究区西北方向),锅炉燃烧、工业焚烧产生大量的烟尘,在区内主导风向偏东风的作用下,可能会给区内的大气环境带来一定的影响^[28-29]。

3.3 大气干湿沉降元素通量特征

参照《土地质量地球化学评价规范》附录 F,对研究区大气干湿沉降物元素年沉降通量密度地球化学参数进行统计(见表 4)。大气干湿沉降物元素通量密度即一年时间内单位面积中大气干湿沉降物中元素的质量 $[mg/(m^2 \cdot a)]$ 。

研究区年沉降通量平均值与全国平均值相比,As 年沉降通量低,Hg、Ni、Pb、Cr、Cu、Cd 偏低,Zn 偏高。

针对研究区内大气干湿沉降通量情况,统计对比了区内不同土地利用类型及国内不同地区的大气通量值,并开展了综合研究。对比统计情况如表 5 所示。

对比分析研究区内不同土地利用类型,除 Pb 外,其余 7 种重金属元素沉降通量值均表现为丘陵地区小于城镇及工矿区,说明丘陵山区总体环境优于城镇及工矿区。Pb 超标主要集中在 YDQ04 号点,为研究区最高值,可能与近期村委会的整体装修(如焊接、油漆等)有关;同时,村委会东边有一条道路,汽车尾气的排放

表 4 研究区大气干湿沉降物元素年沉降通量密度地球化学参数统计表

Table 4 Geochemical parameters of annual deposition flux density of atmospheric dry and wet deposition elements

元素	算术均值	标准偏差	最大值	最小值	几何均值	全国几何均值	区内均值/全国均值	所处百分位数
As	0.2247	0.0790	0.3740	0.1350	0.2150	2.4500	0.09	0.5~10
Hg	0.0108	0.0107	0.03120	0.0031	0.0076	0.0360	0.21	0.5~50
Cd	0.2332	0.0960	0.3740	0.1150	0.2160	0.4820	0.45	10~75
Cr	5.9190	1.4900	8.1880	4.4160	5.7690	15.0800	0.38	10~50
Ni	1.5315	0.3500	2.0730	1.1250	1.4990	5.9000	0.25	0.5~25
Cu	5.5534	1.969	8.9070	2.9940	5.3500	13.0900	0.41	10~50
Pb	8.2050	2.8220	12.3010	5.2820	7.8130	22.9900	0.34	5~50
Zn	71.9156	54.8600	150.7050	23.7680	55.8710	70.1100	0.80	10~80
Se	0.3605	0.1450	0.5580	0.2090	0.3360			
F	15.5980	15.7600	47.4070	7.3330	11.8250			

注:①区内均值/全国均值中的均值为几何均值;②所处百分位数是指区内大气干湿沉降重金属元素年沉降通量密度位于全国大气干湿沉降物重金属元素年沉降通量密度频率统计中位置;③通量密度单位:mg/(m²·a)。

表 5 不同地区大气干湿沉降重金属元素沉降通量对比统计表

Table 5 Comparison of deposition flux of heavy metal elements in atmospheric dry and wet deposition among different regions

地区		As	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	资料来源
研究区	城镇及工矿区	0.2357	0.0156	0.2443	6.5532	1.5796	5.6303	7.2231	83.8201	本文
研究区	丘陵山区	0.2137	0.0060	0.2221	5.2848	1.4834	5.4765	9.1869	60.0111	本文
研究区	全区	0.2247	0.0108	0.2332	5.9190	1.5315	5.5534	8.2050	71.9156	本文
	北京平原区	2.9000	0.0240	0.2400	11.8600	6.6000	14.2000	21.0000	54.4900	文献[13]
	河北南部	3.1690	0.0700	0.8550	15.6520	7.2410	13.7110	30.4880	168.9720	文献[10]
	成都经济区	2.7700	0.1000	1.7700	—	—	—	45.9500	147.8300	文献[8]
	南京市	4.0500	0.0400	0.7000	16.9000	—	46.0000	48.5000	248.0000	文献[30]
	长江三角洲	1.5700	0.0300	0.4100	13.2000	4.6000	13.9000	35.9000	89.5000	文献[31]
	全国均值	2.4500	0.0360	0.4800	15.0800	5.9000	13.0900	22.9900	70.1100	

通量单位:mg/(m²·a)。

也可能带来一定的污染。

通过与北京平原区、河北南部、成都经济区、南京市、长江三角洲等地大气干湿沉降通量对比分析,研究区内全部 8 种重金属元素沉降通量均低于以上 5 个地区,说明相对于我国人口密集的经济区、工业较发达地区和中部平原区,研究区内重金属对土壤的污染程度较低。该现象产生的原因主要是由于工业的快速发展导致燃煤的大量燃烧,以及汽车尾气的大量排放和人为密集活动等^[32]。

3.4 大气干湿沉降环境地球化学评价

依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016),进行大气干湿沉降物 Cd、Hg 环境地球化学等级划分评价,划分标准见表 6。

大气干湿沉降物环境地球化学综合等级以单指标环境地球化学等级为基础,按照一票否决原则,取 Cd、Hg 单指标环境地球化学最差等级。当大气干湿沉降物评价指标年沉降通量密度小于或等于该值时为一等,表示大气干湿沉降物沉降对土壤环境质量影响不大;

表 6 大气干湿沉降通量环境地球化学等级分级标准值
Table 6 Environmental geochemical grading values
of atmospheric dry and wet deposition flux

评价指标	年通量/(mg/m ² ·a)	
等级	一等	二等
Cd	≤3	>3
Hg	≤0.5	>0.5

当大气干湿沉降物评价指标年沉降通量密度大于该值时为二等,表示大气干湿沉降物沉降对土壤环境质量影响较大^[33]。

研究区大气干湿沉降通量密度统计结果显示,6件样品 Cd、Hg 年通量密度均小于表 6 中的标准值,划定为一等。因此研究区大气干湿沉降环境地球化学综合等级为一等。

4 结论

(1)研究区干沉降的元素含量值远高于湿沉降元素含量,元素主要以矿物相形式存在或吸附在固体颗粒上,且其含量与周围环境(如工矿企业、道路、人为活动)有一定影响,这一点应引起足够重视。

(2)对干、湿沉降元素含量及分布特征分别进行研究分析,干沉降中 Cd、Se 的高含量会对研究区土壤污染造成较大影响,湿沉降中 YDQ03 和 YDQ04 样点 pH 超灌溉水水质标准,所有点均达到地表水Ⅱ类环境质量标准。

(3)区内重金属元素年沉降通量密度与全国年沉降通量密度相比,As 年沉降通量低, Hg、Ni、Pb、Cr、Cu、Cd 偏低,Zn 偏高。

(4)大气干湿沉降重金属元素通量一般表现为丘陵山区小于城镇及工矿区,主要受燃煤燃烧、尾气排放及人为活动等影响。

(5)根据大气干湿沉降环境地球化学评价结果,大气干湿沉降物环境地球化学单指标和综合指标评价结果均为一等,表明研究区大气环境质量很好。

参考文献(References):

[1]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.
[2]秦先燕,彭苗枝,焦团理,等.基于GIS的环巢湖地区地质环境承载力评价[J].地质与资源,2020,29(2):180-186.
Qin X Y, Peng M Z, Jiao T L, et al. Assessment of GIS-based geological environment carrying capacity in circum-Chaohu Lake area, Anhui, China[J].Geology and Resources, 2020, 29(2): 180-186.
[3]黄春雷,宋金秋,潘卫丰.浙东沿海某地区大气干湿沉降对土壤重金属元素含量的影响[J].地质通报,2011,30(9):1434-1441.
Huang C L, Song J Q, Pan W F. Impact of dry and wet atmospheric deposition on content of heavy metals in soils along coastal areas of eastern Zhejiang Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9): 1434-1441.
[4]李延生.黑龙江省松嫩平原南部大气降尘地球化学特征[J].物探与化探,2011,35(4):536-540.
Li Y S. Geochemical characteristics of atmospheric dust in southern Songnen Plain, Heilongjiang Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 536-540.
[5]崔邢涛,栾文楼,宋泽峰,等.石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J].中国地质,2016,43(2):683-690.
Cui X T, Luan W L, Song Z F, et al. A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 683-690.
[6]Kelly J, Thornton I, Simpson P R. Urban geochemistry: A study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain [J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(1/2): 363-370.
[7]Lawlor A J, Tipping E. Metals in bulk deposition and surface waters at two upland locations in northern England[J]. Environmental Pollution, 2003, 121(2): 153-167.
[8]汤奇峰,杨忠芳,张本仁,等.成都经济区As等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J].地学前缘,2007,14(3):213-222.
Tang Q F, Yang Z F, Zhang B R, et al. A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu economic region[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 213-222.
[9]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.
[10]李随民,栾文楼,宋泽峰,等.河北省南部平原区大气降尘来源及分布特征[J].中国地质,2010,37(6):1769-1774.
Li S M, Luan W L, Song Z F, et al. The distribution and source of atmospheric dust fall in the southern plain of Hebei Province [J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1769-1774.
[11]刘国栋,杨泽,戴慧敏,等.黑龙江省海伦市长发镇土地质量地球化学评价及开发建议[J].地质与资源,2020,29(6):533-542.
Liu G D, Yang Z, Dai H M, et al. Geochemical evaluation of land

- quality and development suggestion of land in Hailun City, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 533-542.
- [12]刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1048-1059.
- Liu P, Hu W Y, Huang B, et al. Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1048-1059.
- [13]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.
- [14]刘国栋, 张立, 杨泽, 等. 嫩江流域水体及悬浮物重金属元素分布特征及环境指示意义[J]. *地质与资源*, 2021, 30(1): 53-61.
- Liu G D, Zhang L, Yang Z, et al. Distribution characteristics of heavy metals in the water and suspended substance of Nenjiang River basin: Environmental implication[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(1): 53-61.
- [15]戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 507-515.
- Dai B, Lü J S, Zhan J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 507-515.
- [16]赵君, 汪月华, 张哲寰. 多目标地球化学调查数据在松嫩平原油气藏远景预测的应用[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 635-640, 626.
- Zhao J, Wang Y H, Zhang Z H. Application of multi-target geochemical survey data in prospect prediction of the oil-gas reservoirs in Songnen Plain [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 635-640, 626.
- [17]王卫星, 曹淑萍, 李攻科, 等. 津北大气干湿沉降重金属元素通量与评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, 42(5): 46-51.
- Wang W X, Cao S P, Li G K, et al. Sedimentation flux and its evaluation of dry and wet atmospheric deposition of heavy metal elements in North Tianjin[J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(5): 46-51.
- [18]王琦. 辽东湾北部浅海沉积物铅地球化学评价[J]. *地质与资源*, 2019, 28(5): 477-481.
- Wang Q. Geochemical evaluation of lead in the neritic sediments of northern Liaodong Bay [J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(5): 477-481.
- [19]崔邢涛, 栾文楼, 李随民, 等. 石家庄市大气降尘重金属元素来源分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 1108-1115.
- Cui X T, Luan W L, Li S M, et al. An analysis of the sources of heavy metals in atmospheric dust fall of Shijiazhuang city[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 1108-1115.
- [20]孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, et al. Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1093-1104.
- [21]Nriagu J O. Changing metal cycles and human health [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 113-141.
- [22]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 & Geochemical Exploration*, 2020, 44(4): 839-846.
- [23]魏明辉, 许江, 李秋燕, 等. 内蒙古鄂伦春旗土壤钼元素的分布特征及主要影响因素[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 609-613.
- Wei M H, Xu J, Li Q Y, et al. Distribution characteristics and main influencing factors of soil molybdenum in Oroqen Qi, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 609-613.
- [24]徐宏林, 李定远, 杨军, 等. 湖北省云梦县重金属元素大气干湿沉降通量初探[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(6): 816-821.
- Xu H L, Li D Y, Yang J, et al. Preliminary study on flux of atmospheric dry and wet deposition of heavy metal elements in Yunmeng County, Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(6): 816-821.
- [25]王锐, 张风雷, 徐姝姝, 等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法: 以 Cd 为例[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 5082-5089.
- Wang R, Zhang F L, Xu S S, et al. Method of dividing the value of soil heavy metal pollution risk screening: Using Cd as an example [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5082-5089.
- [26]李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 934-944.
- Li F, Liu S Y, Li Y, et al. Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 934-944.
- [27]王硕, 蔡立梅, 王秋爽, 等. 中国城市地表灰尘中重金属的富集状况及空间分布特征[J]. *地理研究*, 2018, 37(8): 1624-1640.
- Wang S, Cai L M, Wang Q S, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in urban surface dust of China [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1624-1640.
- [28]龚香宜, 祁士华, 吕春玲, 等. 福建省兴化湾大气重金属的干湿沉降[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 31-34.
- Gong X Y, Qi S H, Lv C L, et al. Atmospheric deposition of heavy metals to Xinghua Bay, Fujian Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(6): 31-34.

- on weighted information model[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(3): 266–272.
- [14] Zhao B, Wang Y S, Su L J, et al. Directional seismic response to the complex topography: A case study of 2013 Lushan Ms 7.0 earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2049–2067.
- [15] 杨栓成, 王运生. 基于 GIS 的涪江上游南坝-水晶流域滑坡危险性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(6): 15–22.
- Yang S C, Wang Y S. GIS-based landslide risk assessment along the Nanba-Shuijing reaches in the Fujiang River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 15–22.
- [16] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495–5504.
- Li H X, Liu G H, Fu B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the three-river headwaters region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5495–5504.
- [17] 薛强, 张茂省, 高波. 斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1904–1914.
- Xue Q, Zhang M S, Gao B. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1904–1914.
- [18] 杜军, 杨青华, 严嘉, 等. 基于 GIS 与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 324–330.
- Du J, Yang Q H, Yan J, et al. Hazard evaluation of secondary geological disaster based on GIS and information value method [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 324–330.
- [19] 夏开宗, 陈从新, 鲁祖德, 等. 软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2013, 37(4): 729–732, 736.
- Xia K Z, Chen C X, Lu Z D, et al. Analysis of sensitivity factors to stability of inter-beddings of soft and hard rock slope[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(4): 729–732, 736.
- [20] 杜晓晨. 基于 ArcGIS 和 SPSS 的德昌县滑坡危险性评价研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- Du X C. Hazard assessment of landslide in Dechang based on ArcGIS and SPSS [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [21] 韩蓓. 基于 GIS 的岷江上游汶川-叠溪河段滑坡灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Han B. Landslide geological disaster hazard assessment in Minjiang River from Wenchuan to Diexi based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

(上接第 739 页/Continued from Page 739)

- [29] 刘娜, 余晔, 马学谦. 西宁市大气污染来源和输送季节特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1268–1279.
- Liu N, Yu Y, Ma X Q. Seasonal characteristics of air pollutant sources and transport pathways in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1268–1279.
- [30] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, et al. Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 650–661.
- [31] Huang S S, Tu J, Liu H Y, et al. Multivariate analysis of traceelement concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(36): 5781–5790.
- [32] 严晓瑜, 缙晓辉, 武万里, 等. 银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1727–1738.
- Yan X Y, Gou X H, Wu W L, et al. Analysis of atmospheric particulate transport path and potential source area in Yinchuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1727–1738.
- [33] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥. 长春市城区重金属大气干湿沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 28–34.
- Yang Z P, Lu W X, Long Y Q. Atmospheric dry and wet deposition of heavy metals in Changchun City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(1): 28–34.