

doi: 10.12029/gc20210308003

息朝庄, 吴林锋, 张鹏飞, 杨茗钛, 范云飞, 夏浩东, 邓会娟. 2023. 贵州省惠水土壤-灌溉水-雨水-大气降尘中 Cd、As 等微量元素特征及来源讨论[J]. 中国地质, 50(1): 192-205.

Xi Chaozhuang, Wu Linfeng, Zhang Pengfei, Yang Mingtai, Fan Yunfei, Xia Haodong, Deng Huijuan. 2023. Characteristics and sources of Cd and As trace elements in soil-irrigation-rainwater-atmospheric dust-fall in Huishui County, Guizhou Province[J]. Geology in China, 50(1): 192-205 (in Chinese with English abstract).

贵州省惠水土壤-灌溉水-雨水-大气降尘中 Cd、As 等微量元素特征及来源讨论

息朝庄^{1,2}, 吴林锋³, 张鹏飞³, 杨茗钛³, 范云飞³, 夏浩东⁴, 邓会娟⁴

(1. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心, 湖南 益阳 413000; 3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院, 贵州 贵阳 550005; 4. 自然资源实物地质资料中心, 河北 燕郊 065201)

提要:【研究目的】土壤-水体-大气降尘中 Cd、As 等微量元素成因来源、富集规律为环境地质研究焦点, 开展惠水土壤-灌溉水-雨水-大气降尘系统中 Cd、As 等微量元素迁移与富集的定量研究, 对该地区农业生产和农产品种植具有重要意义。【研究方法】以贵州省惠水县表层土壤、灌溉水、雨水和大气降尘样品为研究对象, 分析样品中的 Cd、As 微量元素地球化学特征。【研究结果】结果表明: 研究区以酸性土为主, 147 件表层土壤样品中元素 Cd 与 As、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn、pH 呈正相关关系, 与 Cu、Se 呈负相关关系; 34 件灌溉水样品中含量主要为 As、B、F⁻、Se、Zn, 灌溉水重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合指数等级为 1 级, 属清洁范围, 表明灌溉水水质均达标; 5 件雨水和大气降尘样品中, 大气降尘主要为 As、Cd、Cr、Hg、Pb, 雨水中主要为 As、B、Cd、Cr⁶⁺、F⁻、Ge、Hg、Pb、Se、Zn。【结论】评价结果显示: 土壤单因子污染指数 Cd 指数最高, 内梅罗综合污染指数大小为羡塘镇红旗村>芦山镇羊马村>涟江街道大坡村>好花红镇好花红村>摆金镇立新村; 灌溉水水质均达标, 无重金属元素污染; 大气降尘年通量密度平均值大小顺序分别为 B>Se>Pb>Zn>Cr>As>F>Cd>Ge>Hg。研究区大气降尘总量平均值 89 g·m⁻²·a⁻¹, 与中国一些省市地区相比较, 总量略低; 表层土壤、大气降尘之间对比表明: 表层土壤与年雨水通量相对比来看, Cd、Cr、Pb、Zn 富集, Se 亏损, 表明雨水对 Se 的贡献较大; 大气降尘对比于雨水, 除 Hg 外, 大气降尘其他元素都高于雨水; 大气降尘年通量和表层土壤平均值比较, 除 Se 外, 其他元素均亏损; 大气降尘年通量与灌溉水含量相对比, As、Hg、Se 富集, Cr 亏损。表层土壤重金属元素 Cd 污染来自于地质背景、工业三废、燃煤的综合来源; 大气降尘主要来源于燃煤尘和交通尘。

关键词: Cd、As; 微量元素; 土壤; 灌溉水; 大气干湿沉降; 环境地质调查工程; 惠水县; 贵州省

创新点: 基于系统的地球化学数据, 应用统计学原理, 开展惠水县土壤-灌溉水-雨水-大气降尘系统中 Cd、As 等微量元素迁移与富集规律研究, 为该地区农业生产与农产品种植提供重要依据。

中图分类号: X142 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0192-14

Characteristics and sources of Cd and As trace elements in soil-irrigation-rainwater-atmospheric dust-fall in Huishui County, Guizhou Province

收稿日期: 2021-03-08; 改回日期: 2021-05-02

基金项目: 贵州省耕地质量地球化学调查评价(黔耕调 2017-03)、湖南省自然科学基金省市联合基金项目(2022JJ50277)及湖南省教育厅科学研究一般项目(20C0381)联合资助。

作者简介: 息朝庄, 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床地质、耕地质量调查研究; E-mail: xczsummmmmmm@126.com。

通讯作者: 吴林锋, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事矿产地质研究; E-mail: dkywulinfeng@163.com。

XI Chaozhuang^{1,2}, WU Linfeng³, ZHANG Pengfei³, YANG Mingtai³,
FAN Yunfei³, XIA Haodong⁴, DENG Huijuan⁴

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Structural Safety and Disaster Prevention for Urban Underground Infrastructure, Yiyang 413000, Hunan, China; 3. Nuclear Resources Geological Survey, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, Guizhou, China; 4. Cores and Samples Center of Natural Resources, Yanjiao 065201, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of ecological geological survey engineering.

[Objective] The origin and enrichment of trace elements such as Cd and As in soil-water-atmosphere dust fall are the focus of environmental geology research. The quantitative research on migration and enrichment of trace elements such as Cd and As in soil-irrigation-rain-atmosphere dust fall system was carried out in Huishui. It is of great significance for agricultural production and agricultural products planting in this region. **[Methods]** Taking the samples of surface soil, irrigation water, rainwater and atmospheric dust-fall from Huishui County of Guizhou Province as research objects, this paper analyzes the geochemical characteristics of trace elements such as Cd and As. **[Results]** The results show that the study area is dominated by acid soil. Cd is positively correlated with As, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn and pH while it is negatively correlated with Cu and Se in the 147 topsoil elements. The 34 irrigation water samples are mainly As, B, F⁻, Se and Zn. The single factor pollution index and Nemeró composite index of heavy metal elements from irrigation water are Level 1, belonging to the clean range, which indicates that the water quality of irrigation water is up to the standard. Among the 5 rainwater and atmospheric dust-fall samples, the atmospheric dust-fall mainly includes As, Cd, Cr, Hg and Pb and the main components of rainwater are As, B, Cd, Cr⁶⁺, F⁻, Ge, Hg, Pb, Se and Zn. **[Conclusions]** The evaluation results show that the Cd single factor pollution index is the highest, and the Nemeró composite pollution index is arranged as followed: Hongqi Village, Xiantang Town>Yangma Village, Lushan Town>Lianjiang Street, Dapo Village>Haohuahong Village, Haohuahong Town>Lixin Village, Baijin Town. The irrigation water quality reaches the standard without heavy metal pollution. The order of the average annual flux density of atmospheric dust-fall is B>Se>Pb>Zn>Cr>As>F>Cd>Ge>Hg. The average total amount of atmospheric dust-fall in the study area is 89 g·m⁻²·a⁻¹, which is slightly lower than that of some cities and provinces in China. The comparison between surface soil and atmospheric dust-fall shows that Cd, Cr, Pb, Zn are rich and Se is poor in terms of the comparison between surface soil and annual rainwater flux, indicating that rainwater contributes largely to Se. Compared with rainwater, elements in the atmospheric dust-fall are higher except Hg. Compared the atmospheric dust-fall annual flux to the average surface soil, all elements are in deficit except Se. And compared the atmospheric dust-fall annual flux to the irrigation water contents, As, Hg, Se are enriched while Cr is depleted. So it can be concluded that the heavy metal element Cd pollution in surface soil comes from geological background, industrial wastes and coal burning while the atmospheric dust-fall mainly comes from coal burning dust and traffic dust.

Key words: Cd, As; trace elements; soil; irrigation water; atmospheric dust-fall; ecological geological survey engineering; Huishui County; Guizhou Province

Highlights: Based on systematic geochemical data and statistical principle, migration and enrichment rules of Cd, As and other trace elements in the soil-irrigation-rainwater-atmosphere dust removal system were studied in Huishui County. It provided an important basis for agricultural production and agricultural products planting in this area.

About the first author: XI Chaozhuang, male, born in 1979, doctor, senior engineer, engaged in ore deposit geology, cultivated land quality investigation and research; E-mail: xczcsummmmm@126.com.

About the corresponding author: WU Linfeng, male, born in 1982, senior engineer, engaged in mineral exploration research; E-mail: dkywulinfeng@163.com.

Fund support: Supported by Geochemical Survey and Evaluation of Cultivated Land Quality in Guizhou Province (No.2017-03), and Provincial and Municipal United Found of the Natural Science Foudation of Hunan Province(No.2022JJ50277), and the Scientific Research General Project of Hunan Provincial Education Department (No.20C0381).

1 引 言

土壤作为土地的重要载体(周殷竹等,2020),其影响生物生产力、水质和空气质量,土壤质量与人类生产生活密不可分,是人类赖以生存的根本资源(黄勇和杨忠,2009)。随着工业化进程的加快以及化肥、农药的过度施用,使中国耕地土壤中重金属元素As、Cd、Cr、Hg、Cu、Pb、Ni、Ni受到不同程度污染(官后春等,2013;王存龙等,2015;代杰瑞等,2018;苟体忠和张文华,2019;杨文弢等,2020;鲍丽然等,2020;刘孜等,2020;邬光海等,2020)。灌溉水是重要的污染物输出-输入途径之一(任杰等,2020),快速发展的城镇化、工业化、工矿活动和交通运输等剧烈的人类活动,可以引发一系列的水安全问题,不仅影响土壤质量,还制约经济与社会发展(徐林春,2014)。近十多年来,有多位研究学者研究多个城市地区灌溉水重金属特征并开展了质量评价,如乌鲁木齐雅玛里克山国家级绿化示范基地(皎哈尔·红卫等,2020)、韶关市(刘志强和李华峰,2020)、海南省园地(张俊华等,2020)。大气降尘属于自然沉降于地表的颗粒尘埃,它不仅破坏生态系统,还可以影响动植物和人类健康(崔邢涛等,2012;阿地拉·艾来提等,2020;庞绪贵等,2020)。大气降尘中的不利因素可通过土壤或降水直接和人体接触,危害人类身体健康(李波等,2010;袁方等,2018)。土壤、大气降尘中重金属元素Cd、Pb超标,可以引发骨疼病、损害神经系统(李波等,2010)。

本研究以2017年至2019年完成的1:5万贵州省惠水县耕地质量地球化学调查评价项目的测试数据为研究基础,对研究区土壤、灌溉水、雨水、大气降尘Cd、As等微量元素进行土壤生态地球化学分析,评价土壤、灌溉水重金属污染现状,计算雨水和大气降尘年通量密度并进行系统评价,为研究区农业生产和农产品种植提供重要科学依据,也为分析黔南州有关地区土壤、灌溉水、雨水和大气降尘中Cd、As等重金属来源提供理论支撑。

2 材料与方 法

2.1 概 况

研究区为贵州省中南部的惠水县,黔南布依族苗族自治州西部,西与长顺县毗邻,南与罗甸交界,东

与平塘县、贵定县接壤,北与贵阳市花溪区和龙里县相连。惠水县(图1)介于106°23'E~107°05'E,25°41'N~26°17'N,南北长68 km,东西宽72 km。研究区为中亚热带气候,夏季凉爽舒适,冬季气候适宜,5—10月汛期雨量充沛。根据1978—2012年35年资料统计,平均气温15.9℃,年均降水量1180.1 mm,年均日照总时数1174.0 h,无霜期280 d;降雨集中在每年5月至7月,6月为最多。其中4—10月降雨占全年降雨量的80%左右。研究区位于苗岭山脉南侧,全县河流都属珠江水系。水文资源比较丰富,共有250余条河流,总长约970 km。

2.2 采 样 方 法

2.2.1 表层土壤样品

(1)采样点布设:表层土壤样点在规划耕地图斑数据库确定,采用网格法,点密度9.2点/km²。

(2)采样方法:土壤样品采集时间在收完上一季农作物后,在种植下一季农作物未施肥之前;用竹铲或竹片采取用于分析重金属元素的样品。先用洛阳铲采掘主样坑(深度约20 cm),之后用竹铲或竹片清除与洛阳铲接触的土壤,再采集出样品(图2a、b);以野外实际情况选取的采样点为中心,依据采样地块形状来确定子样的位置。如采样地块分别是长方形、正方形时布设子样点分别采用“S”形或“X”形或“棋盘”形方法。子样点都布设在同一地块内,并且距采样地块采样点记录点位距离范围为20~50 m;每个子样点的采样部位、采样深度及样品质量要求一致;将采集的各子样点的土壤用木棒敲碎,并将根系、秸秆于石块等杂物清理掉,再采用四分法挑出1.0~1.5 kg。

2.2.2 灌溉水样

(1)采样点布设:灌溉水按1点/16 km²结合评价区农田灌溉水源和灌溉面积的80%以上的水系入口或渠首、渠中和灌溉口处布置样点(图1)。

(2)采样方法:在农作物灌溉高峰期采集水样,每瓶装水90%;采集灌溉水样品必须瞬时完成采样(图2c、d、e)。采样前用取样点处的灌溉水清洗样瓶与塞盖2~3次;样品要求在7日内送达实验室。

2.2.3 雨水和大气降尘样

(1)采样点布设

结合惠水县地形地貌,雨水和大气降尘样布设在研究区主要农作物种植地区(图1);样品位置放置于民房顶上(7.10 m以上)分别为:5LSDQ1位于芦山

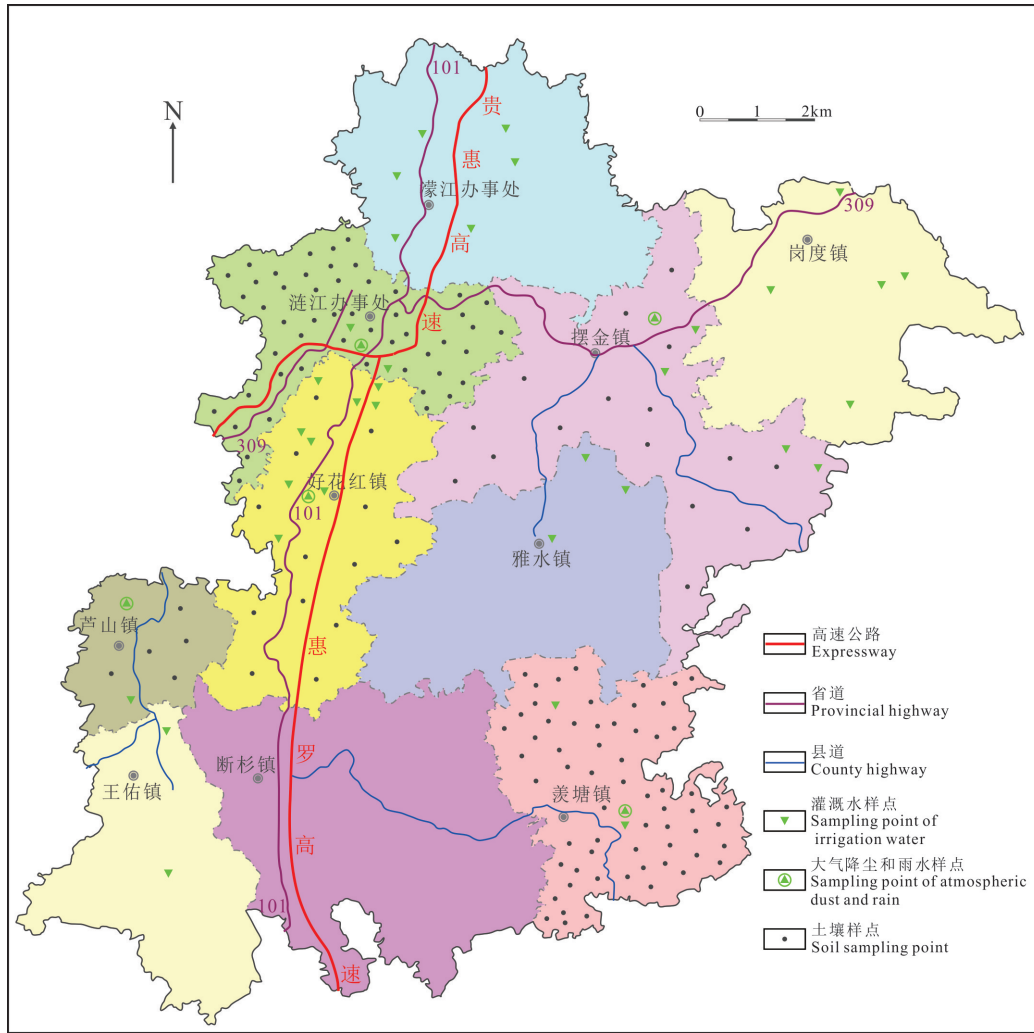


图1 惠水土壤、灌溉水、雨水和大气降尘取样位置图

Fig.1 Sampling location of soil and irrigation water, rain and atmospheric dust in Huishui

镇羊马村;4TZDQ1位于茨塘镇红旗村;6HSDQ1位于好花红镇好花红村;6HSDQ2位于涟江街道大坡村;2BJDQ1位于摆金镇立新村;放置时间为2017年11月29日至2018年12月2日;一年期间降雨主要集中在6—7月,以自然降雨为主,未出现极端天气。

(2) 样品采集

雨水和大气降尘接尘缸顶部半径为0.26 m,底部半径为0.20 m,高度为0.615 m的圆筒;放置1年后,按照规定回收样品(图2g、f)。

2.3 样品加工与分析

2.3.1 样品加工

表层土壤样品晾晒与加工场地均确保无污染。取样均及时清理登记,并悬挂在自制样品架自然风干;之后把自然风干的土壤样品放在大理石板

上,用木棒进行破碎,并将杂物挑出;然后将破碎后的土壤样品过2 mm筛;最后,过筛后将土壤样品在天平称称重后混合均匀。

大气降尘接收量较少时,首先用橡皮头的玻璃棒把桶壁擦洗干净,之后将采样桶内雨水和大气降尘都转入0.5 L纯净容器中,清理之后尽快送实验室进行测试。

2.3.2 测定项目与方法

测试项目为As、B、Cd、Cr、F、Ge、Hg、Pb、Se、Zn、pH,分析单位为云南省地质矿产勘查开发局中心实验室。测试方法分别是:As、Se、Ge和Hg选用原子荧光光谱法(AFS),F、pH选用电位法(ISE),重金属元素Cd、Pb、Cr、Zn由电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,B由交流电弧-发射光谱法(ES)



图2 表层土壤、灌溉水、雨水和大气降尘取样照片

Fig.2 Sample photographs of surface soil, irrigation water, rain and atmospheric dust

测定。样品按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258-2014)与《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)进行分析测试,样品各项元素或指标的总报出率>95%。

2.4 评价标准

研究区的表层土壤和灌溉水评价分别执行《农用地土壤环境质量标准》(GB15618-2018)与《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)(表1)。

2.5 评价方法

灌溉水和土壤重金属地球化学评价方法采用单项污染指数法与内梅罗污染综合指数法。

单项污染指数法与内梅罗污染综合指数法在土壤重金属地球化学评价中得到广泛应用(Nemerow, 1974),单项污染指数计算公式为:

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

其中: P_i 为重金属*i*元素污染物指数; C_i 为重金属*i*元素污染物测试值; S_i 为重金属*i*元素污染物风险筛选值。

内梅罗污染综合指数计算公式:

$$NP_i = \sqrt{\frac{P_{ia}^2 + P_{im}^2}{2}} \quad (2)$$

其中: NP_i 代表内梅罗污染综合指数; P_{ia} 代表*i*元素均值; P_{im} 代表*i*元素最大值。单项污染指数与内梅罗污染指数分级(高清等,2014)列于表2。

3 结果与分析

3.1 土壤、灌溉水、雨水、大气降尘含量特征

3.1.1 表层土壤元素含量特征

表层土壤重金属元素中Cd与As、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn、pH呈正相关关系(图3a、b、d-i),其 R^2 分

表1 表层土壤和灌溉水评价标准
Table1 Evaluation criterion of surface soil and irrigation water

类型	项目	风险筛选值				类型	项目	风险筛选值
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5			
表层土壤/(mg/kg)	Cd	水田	0.3	0.4	0.6	0.8	Cd	0.01
		其他	0.3	0.3	0.3	0.6		
	Hg	水田	0.5	0.5	0.6	1	Hg	0.001
		其他	1.3	1.8	2.4	3.4		
	As	水田	30	30	25	20	As	0.1
		其他	40	40	30	25		
	Pb	水田	80	100	140	240	Pb	0.2
		其他	70	90	120	170		
	Cr	水田	250	250	300	350	Cr ⁶⁺	0.1
		其他	150	150	200	250		
	Cu	水田	150	150	200	200	Cu	
		其他	50	50	100	100		
	Ni		60	70	100	190		
	Zn		200	200	250	300	Zn	2

别为0.17、0.439、0.227、0.570、0.038、0.368、0.349、0.014,表明Cd与As、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn可能具有相同的污染来源;Cd与Cu、Se呈负相关关系(图3c、j),其 R^2 分别为0.002和0.005,表明Cd与Cu、Se可能具有不同的污染来源。

采自于5个村庄的表层土壤测试结果特征参数列入表3,与贵州省表层土壤背景值(国家环境保护局,1990)相对比(图3k),其中芦山镇羊马村($n=5$)表层土壤B、Cd、Hg、Se、Mo含量平均值分别为1.21倍、1.89倍、1.49倍、2.46倍、1.99倍;羨塘镇红旗村($n=62$)表层土壤B、Cd、Hg含量平均值分别为1.19倍、2.23倍、1.24倍;好花红镇好花红村($n=13$)表层土壤Se、Cu含量平均值分别为1.63倍、1.02倍;涟江街道大坡村($n=51$)表层土壤Mo、Hg、Ni、Se含量平均值分别为2.03倍、1.32倍、1.13倍、2.49倍;摆金镇立新村($n=16$)表层土壤Hg、Se含量平均值分别为1.30倍、1.14倍。各村庄表

表2 单项与内梅罗污染指数分级标准

Table 2 Classification standards for single pollution index and Nemerow pollution index

灌溉水污染指数	等级	污染程度	土壤污染指数	分级	污染程度
$NP_i \leq 0.5$	1	清洁	< 0.7	1	安全
$0.5 < NP_i \leq 1.0$	2	尚清洁	0.7~1	2	警戒
$NP_i > 1.0$	3	超标	1~2	3	轻度污染
			2~3	4	中度污染
			> 3	5	重度污染

层土壤pH平均值分别为6.49、5.78、6.91、6.08、5.42,应为酸性土壤;变异系数范围分别为0.07%~0.60%、0.10%~1.24%、0.21%~0.71%、0.16%~0.57%、0.07%~0.39%,除了好花红镇好花红村Cd变异系数偏高以外,其他都很小,表明分异性小。

3.1.2 灌溉水含量特征

根据研究区34件灌溉水样品分析结果,灌溉水的元素特征值列入表4。本次灌溉水样品中Cd、Cr⁶⁺、Ge、Hg、Pb含量低于检测限值,其余指标检出率在62%~100%。其中各元素含量均值为As(0.0010 mg/L)、B(0.0115 mg/L)、F(0.1764 mg/L)、Se(0.0007 mg/L)、Zn(0.0087 mg/L)、pH(7.98);与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)相对比,As、B、F、Se、Zn分别为1.00%、0.58%、8.8%、3.5%、0.44%;灌溉水重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合污染指数计算结果: Cd、Cr、Hg、Pb低于检出限, P_i 和 NP_i 为0, As、Zn的 P_i 范围和 NP_i 分别为0~0.0042、0.042, 0.0015~0.0155、0.0156, 等级均为1级,属清洁范围;pH显示灌溉水以碱性为主(其中1件样品pH为6.89,其余33件样品均大于7.26),未超出农田灌溉水水质标准范围。F⁻、pH、As、B、Se、Zn元素的变异系数均较小,表明各指标在各种水源的灌溉水中是均匀分布的。

3.1.3 雨水和大气降尘含量特征

研究区共采集雨水和大气降尘样品5件,分别

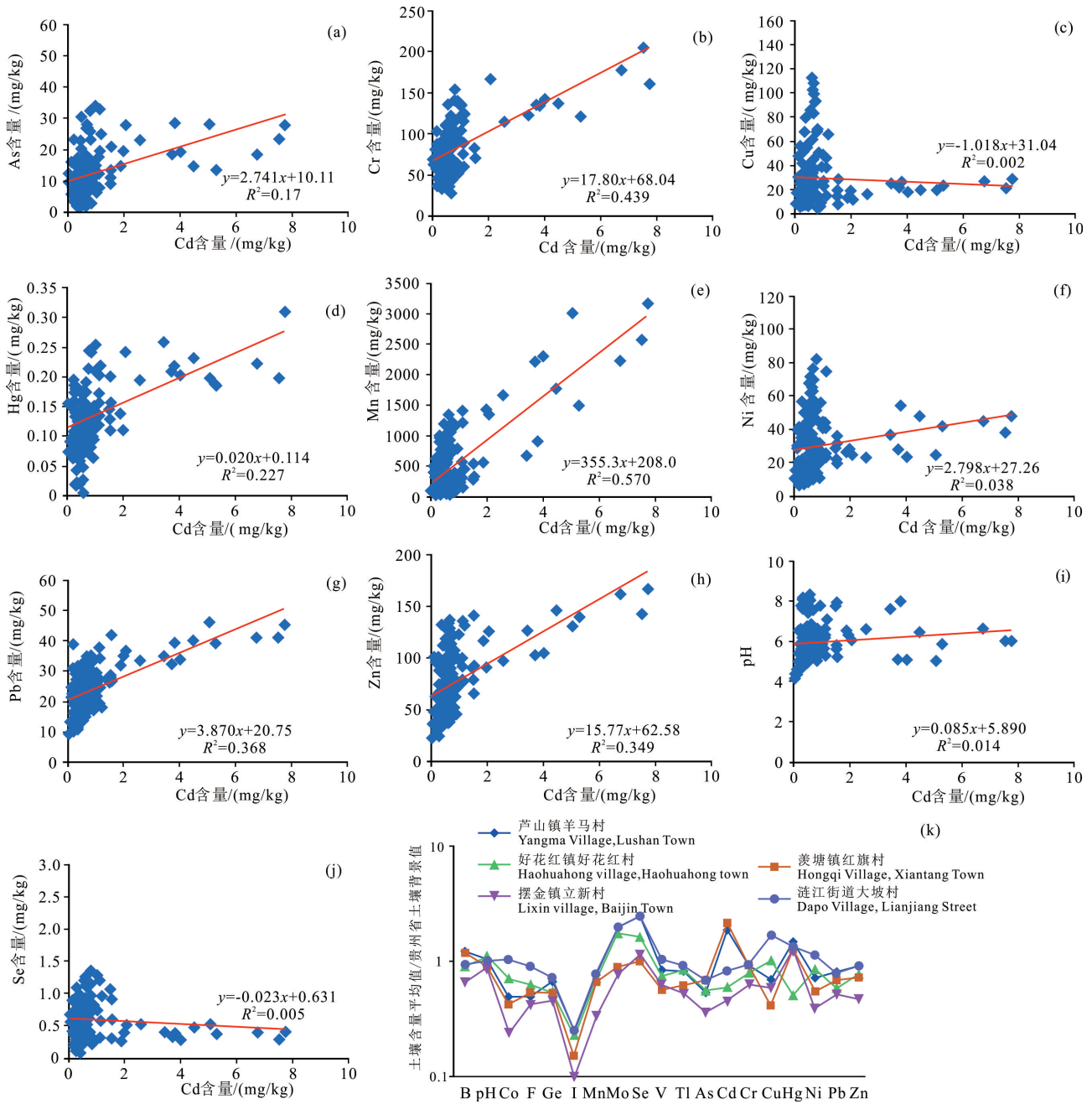


图3 土壤平均值与贵州省土壤背景值比值对数图

Fig.3 Logarithmic graph of soil average value to soil background value in Guizhou Province

测试了Pb、Cd、As、Hg、Cr、Zn、F、B、Se、Ge、Cr⁶⁺等元素含量(表5),其中Cr⁶⁺均低于检出限。据统计5件雨水和大气降尘样品测试结果,大气降尘中:As、Cd、Cr、Hg、Pb含量范围和平均值分别为16.78~19.67 mg/kg和18.20 mg/kg、1.22~4.60 mg/kg和2.96 mg/kg、30.18~46.85 mg/kg和36.06 mg/kg、0.05~0.07 mg/kg和0.06 mg/kg、60.96~115.74 mg/kg和89.69 mg/kg,含量大小顺序为Pb>Cr>As>Cd>Hg;雨水中:As、B、

Cd、Cr⁶⁺、F⁻、Ge、Hg、Pb、Se、Zn含量范围和平均值分别为0.86~4.47 mg/L和2.71 mg/L、1.63~14.71 mg/L和8.91 mg/L、0.00~0.06 mg/L和0.03 mg/L、<0.004、0.06~0.40 mg/L和0.23 mg/L、0.02~0.10 mg/L和0.04 mg/L、0.05~0.40 mg/L和0.14 mg/L、0.02~0.34 mg/L和0.16 mg/L、2.13~28.22 mg/L和6.49 mg/L、0.38~6.14 mg/L和2.16 mg/L,含量大小顺序为B>Se>As>Zn>F>Pb>Hg>Ge>Cd>Cr⁶⁺;雨水中pH为6.28~7.37,

表3 表层土壤元素含量特征表(mg/kg)
Table 3 Characteristic table of topsoil element content (mg/kg)

取样地点	样品编号	B	pH	Co	F	Ge	I	Mn	Mo	Se	V	Tl	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
芦山镇	含量范围	71.6~101.0	5.23~7.96	4.76~16.20	469~612	1.11~1.34	0.62~6.42	107~2074	2.76~5.64	0.60~1.29	95~135	0.48~0.76	4.29~21.10	0.63~1.54	60.4~104.0	18.9~28.5	0.11~0.21	18.4~36.1	22.0~42.0	61.4~141.0	
	平均值	87.9	6.49	9.37	535	1.21	2.12	605	4.78	0.92	117	0.59	10.79	1.24	86.6	22.5	0.16	28.2	28.4	91.7	
	n=5	变异系数	0.13	0.20	0.45	0.12	0.07	1.15	1.37	0.26	0.30	0.18	0.60	0.33	0.23	0.21	0.25	0.24	0.28	0.33	
	k1	1.21	1.05	0.49	0.50	0.67	0.25	0.76	1.99	2.46	0.84	0.83	0.54	1.89	0.90	0.70	1.49	0.72	0.81	0.92	
姜塘镇	含量范围	47.1~151.0	5.02~8.02	1.51~19.70	263~1281	0.63~1.44	0.24~7.76	33~3164	0.47~12.80	0.09~0.97	38~180	0.22~0.88	1.81~49.6	0.19~7.75	27.8~224.0	4.4~28.8	0.06~0.31	6.6~54.6	10.3~46.2	24.5~172.0	
	平均值	86.9	5.78	8.15	571	0.97	1.28	525	2.14	0.37	78	0.44	13.51	1.47	86.1	12.9	0.14	21.12	24.0	71.7	
	n=62	变异系数	0.20	0.10	0.66	0.36	0.17	1.35	1.55	1.20	0.43	0.34	0.80	1.24	0.53	0.47	0.43	0.53	0.40	0.53	
	k1	1.19	0.93	0.42	0.54	0.54	0.15	0.66	0.89	1.00	0.56	0.62	0.68	2.23	0.90	0.40	1.24	0.54	0.68	0.72	
好花红镇	含量范围	30.8~96.7	4.39~8.34	2.55~23.50	194~1131	0.25~1.28	0.54~3.95	111~904	1.59~12.40	0.25~1.21	38~182	0.24~0.78	5.4~18.9	0.06~0.58	36.4~97.2	14.6~59.7	0~0.12	15.5~43.8	12.6~29.1	30.1~112.0	
	平均值	66.3	6.91	13.67	670	0.99	1.99	564	4.21	0.61	104	0.61	11.3	0.40	77.0	32.6	0.06	33.6	20.8	77.3	
	n=13	变异系数	0.26	0.21	0.45	0.44	0.27	0.40	0.47	0.77	0.44	0.33	0.28	0.30	0.40	0.22	0.39	0.71	0.26	0.25	0.31
	k1	0.91	1.11	0.71	0.63	0.55	0.23	0.71	1.76	1.63	0.75	0.85	0.56	0.60	0.80	1.02	0.51	0.86	0.59	0.78	
涟江街道	含量范围	36.3~116.0	4.16~8.04	1.12~44.20	241~2542	0.66~1.75	0.38~7.45	90~1350	0.65~15.60	0.35~2.85	56~250	0.19~1.09	5.6~43.1	0.04~1.19	42.3~180.0	8.2~140.0	0.07~0.31	10.6~106.0	9.5~45.5	22.6~137.0	
	平均值	68.6	6.08	20.06	958	1.29	2.27	614	4.87	0.93	144	0.66	13.8	0.55	91.5	54.7	0.14	44.2	27.1	91.6	
	n=51	变异系数	0.23	0.16	0.58	0.50	0.20	0.68	0.54	0.74	0.57	0.34	0.25	0.50	0.26	0.57	0.34	0.47	0.25	0.32	
	k1	0.94	0.98	1.04	0.90	0.72	0.26	0.77	2.03	2.49	1.03	0.92	0.69	0.83	0.95	1.71	1.32	1.13	0.77	0.92	
摆金镇	含量范围	30.4~60.5	4.72~6.04	1.56~15.00	243~594	0.30~1.40	0.43~3.12	65~1510	1.22~2.90	0.12~0.64	45~124	0.30~0.46	4.1~14.0	0.19~0.46	36.4~83.2	12.5~26.9	0.10~0.19	10.4~20.9	15.1~22.4	32.5~61.6	
	平均值	48.8	5.42	4.60	446	0.81	0.90	270	1.84	0.42	87	0.38	7.1	0.29	60.5	18.7	0.14	15.4	18.3	46.8	
	n=16	变异系数	0.17	0.07	0.96	0.21	0.28	0.78	1.52	0.29	0.36	0.25	0.13	0.39	0.25	0.24	0.20	0.21	0.12	0.17	
	k1	0.67	0.87	0.24	0.42	0.45	0.10	0.34	0.77	1.14	0.63	0.53	0.36	0.45	0.63	0.58	1.30	0.39	0.52	0.47	
贵州省土壤背景值 (国家环境保护局,1990)		72.8	6.2	19.2	1066	1.8	8.58	794	2.4	0.373	138.8	0.712	20	0.659	95.9	32	0.11	39.1	35.2	99.5	

注:k1为表层土壤元素含量/贵州省土壤背景值。

表4 灌溉水元素含量特征值(mg/L)

Table 4 Characteristic values of element content in irrigation water (mg/L)

项目	As	B	Cd	Cr ⁶⁺	F ⁻	Ge	Hg	Pb	Se	Zn	pH
最大值	0.0042	0.0600	<0.001	0.014	0.5000	<0.001	<0.0004	0.003	0.0022	0.0310	8.39
最小值	0.0000	0.0040	<0.001	<0.004	0.0600	<0.001	<0.0004	<0.002	0.0002	0.0030	6.89
平均值	0.0010	0.0115	-	-	0.1764	-	-	<0.002	0.0007	0.0087	7.98
标准差	0.0012	0.0110	-	-	0.1026	-	-	-	0.0004	0.0068	0.33
变异系数	1.2223	0.9608	-	-	0.5816	-	-	-	0.6015	0.7773	0.04
农田灌溉水质标准	0.1	2	0.01	0.1	2		0.001	0.2	0.02	2	5.5~8.5

表5 雨水和大气降尘元素含量特征值

Table 5 Characteristic value of elements content of rain and atmospheric dust

项目	雨水											大气降尘				
	As	B	Cd	Cr ⁶⁺	F ⁻	Ge	Hg	Pb	Se	Zn	pH	As	Cd	Cr	Hg	Pb
最大值	4.47	14.71	0.06	<0.004	0.40	0.10	0.40	0.34	28.22	6.14	7.37	19.67	4.60	46.85	0.07	115.74
最小值	0.86	1.63	0.00	<0.004	0.06	0.02	0.05	0.02	0.13	0.38	6.28	16.78	1.22	30.18	0.05	60.96
平均值	2.71	8.91	0.03	<0.004	0.23	0.04	0.14	0.16	6.49	2.16	7.00	18.20	2.96	36.06	0.06	89.69
标准差	1.71	5.92	0.02	-	0.15	0.04	0.17	0.13	14.04	2.65	0.42	1.16	1.29	7.61	0.01	24.12
变异系数	0.63	0.66	0.93	-	0.64	1.03	1.20	0.80	2.16	1.22	0.06	0.06	0.44	0.21	0.14	0.27

注:雨水元素单位为mg/L;大气降尘元素单位为mg/kg;pH为无量纲。

平均值7.00,以酸性为主。

3.2 评价结果

3.2.1 表层土壤重金属评价结果

147件表层土壤重金属元素单项因子污染指数和内梅罗综合污染指数列入表6。从表6可看出,研究区内Cd单项污染指数最高,其污染贡献最大,尤其在芦山镇羊马村和羨塘镇红旗村,达到5级,属于重度污染;其次为好花红镇好花红村和涟江街道大坡村,达到3级,属于中度污染;摆金镇立新村为2级,属于轻度污染;内梅罗综合污染指数大小为羨塘镇红旗村>芦山镇羊马村>涟江街道大坡村>好花

红镇好花红村>摆金镇立新村。

3.2.2 灌溉水评价结果

从表4可看出,灌溉水样品中Cd、Cr⁶⁺、Ge、Hg、Pb含量低于检测限值,说明含量极低。灌溉水重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合指数计算结果:Cd、Cr、Hg、Pb低于检出限, P_i 和 NP_i 为0,As、Zn的 P_i 范围和 NP_i 分别为0~0.0042、0.0420,0.0015~0.0155、0.0156,等级均为1级,属清洁范围,表明灌溉水水质均达标,重金属元素无污染。

3.2.3 雨水和大气降尘评价结果

根据公式 $F = Q/S = (Q_g + Q_s)/S = (M \times C_g + V \times C_s)/S$ 计

表6 表层土壤重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合指数

Table 6 Single factor pollution index and Nemerow composite index of heavy metal elements in surface soil

取样地点	项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	NPi
芦山镇羊马村	P_i	0.36	4.13	0.43	0.23	0.07	0.28	0.24	0.37	2.92
	分级	1	5	1	1	1	1	1	1	4
羨塘镇红旗村	P_i	0.45	4.90	0.43	0.13	0.06	0.21	0.20	0.29	3.47
	分级	1	5	1	1	1	1	1	1	5
好花红镇好花红村	P_i	0.38	1.33	0.38	0.33	0.03	0.34	0.17	0.31	0.94
	分级	1	3	1	1	1	1	1	1	2
涟江街道大坡村	P_i	0.46	1.83	0.46	0.55	0.06	0.44	0.23	0.37	1.30
	分级	1	3	1	1	1	1	1	1	3
摆金镇立新村	P_i	0.24	0.97	0.30	0.19	0.06	0.15	0.15	0.19	0.68
	分级	1	2	1	1	1	1	1	1	1

表7 雨水和大气降尘年通量特征参数 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
 Table 7 Characteristic parameters of annual flux in rain and atmospheric dust ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

样号	As	B	Cd	Cr	F	Ge	Hg	Pb	Se	Zn
5LSDQ1	0.827	8.369	0.043	1.188	0.071	0.056	0.006	2.101	0.813	3.562
6HSDQ1	0.788	5.908	0.136	1.221	0.131	0.010	0.006	3.586	0.662	1.080
6HSDQ2	0.362	0.947	0.047	0.877	0.232	0.013	0.002	1.333	0.077	0.218
2BJDQ1	0.633	2.072	0.149	1.236	0.207	0.011	0.015	3.611	16.369	0.307
4TZDQ1	0.667	8.532	0.097	0.918	0.033	0.020	0.004	3.523	0.895	1.101
平均值	0.655	5.166	0.094	1.088	0.135	0.022	0.007	2.831	3.763	1.254
北京(丛源等,2008)	29.00		2.360	118.55			0.24	219.95		544.92
成都(汤奇峰等,2007)	2.77		1.770				0.10	45.95		174.83
重庆(彭玉龙等,2014)	4.50		0.44					30.25		76.26

算雨水和大气降尘年通量密度(表7)。其中: F 为年沉降通量密度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), Q 为年沉降总量(mg/a), Q_d 为干样部分年沉降量(mg/a), Q_w 为湿样部分年沉降量(L/a), M 为年沉降总量(g/a), C_d 为干样部分样品元素质量分数(mg/g), V 为溶液样品总体积(L/a), C_s 为溶液样品元素浓度(mg/L), S 为采样容器面积(m^2)。

采集了5件雨水和大气降尘样品,并计算了主要的As、B、Cd、Cr、F、Ge、Hg、Pb、Se、Zn等环境元素的年沉降通量,其年通量密度平均值大小顺序分别为B>Se>Pb>Zn>Cr>As>F>Cd>Ge>Hg。

3.3 讨论

3.3.1 表层土壤、灌溉水、雨水和大气降尘系统关系

表层土壤元素含量和评价结果显示:表层土壤元素中Se、Cd、Hg超出贵州省表层土壤背景值;单因子污染指数Cd贡献最大,多属于中度污染以上;而34件灌溉水样品中重金属元素含量均低于农田灌溉水标准,属清洁区;表层土壤与年雨水通量相比较来看(图4a),Cd、Cr、Pb、Zn富集,Se亏损,表明雨水对Se的贡献较大。

大气降尘总量包括雨水与大气降尘总和,用大气降尘总量与收尘缸面积的商即获得单位面积降尘总量。研究区大气降尘总量范围为24~146 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均值89 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与中国北方地区和城市相比偏低,如天津市(侯佳渝等,2013)2007年246 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、松嫩平原南部(李延生,2011)2007年489 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与南方城市相比,总量略低,如广东韶关(罗莹华等,2006)2006年180 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、杭州(焦荔等,2013)2006—2009年110 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。大气降尘总量大小顺序为2BJDQ1>5LSDQ1>4TZDQ1>6HSDQ1>6HSDQ2,即

摆金镇立新村>芦山镇羊马村>羡塘镇红旗村>好花红镇好花红村>涟江街道大坡村,惠水县北部地区大气降尘总量高于南部地区,并且摆金镇、好花红镇与贵阳市交通位置(贵惠高速公路、惠罗高速、国道309)密切相关。

重金属元素年通量大小为Pb>Zn>Cr>As>Cd>Hg、Pb的年沉降通量比其他5种元素明显较高。与北京市(丛源等,2008)大气降尘年通量对比,As、Cd、Cr、Hg、Pb、Zn分别为0.02倍、0.04倍、0.01倍、0.03倍、0.01倍、0.002倍;与成都市(汤奇峰等,2007)大气降尘年通量对比,As、Cd、Hg、Pb、Zn分别为0.24倍、0.05倍、0.07倍、0.06倍、0.007倍;与重庆市(彭玉龙等,2014)大气降尘年通量对比,As、Cd、Pb、Zn分别为0.15倍、0.21倍、0.09倍、0.016倍,这远低于其他城市大气降尘年通量。

大气降尘与雨水相比较(图4b),除了Hg以外,大气降尘均高于雨水;大气降尘年通量与表层土壤平均值相对比(图4c),除了Se以外,均亏损,即大气降尘对表层土壤重金属元素有贡献,但并非唯一关键原因;大气降尘年通量与灌溉水含量相比较(图4d),As、Hg、Se富集,Cr亏损。

3.3.2 表层土壤和大气沉降污染源

表层土壤重金属超标常常是由于地质背景与人为活动共同影响的结果(栾文楼等,2008)。研究区土壤重金属元素Cd与As、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn呈正相关关系,其具有相同污染源,而据有关学者研究,贵州省黔南都匀市已探明Cd资源储量为大型规模的富镉锌矿(叶霖和刘铁庚,2001);经现场取样调查,研究区内存在多个采石场,其产生的工业三废(陈芬等,2020)同样可以导致Cd、Hg等重金属的累积,并且当

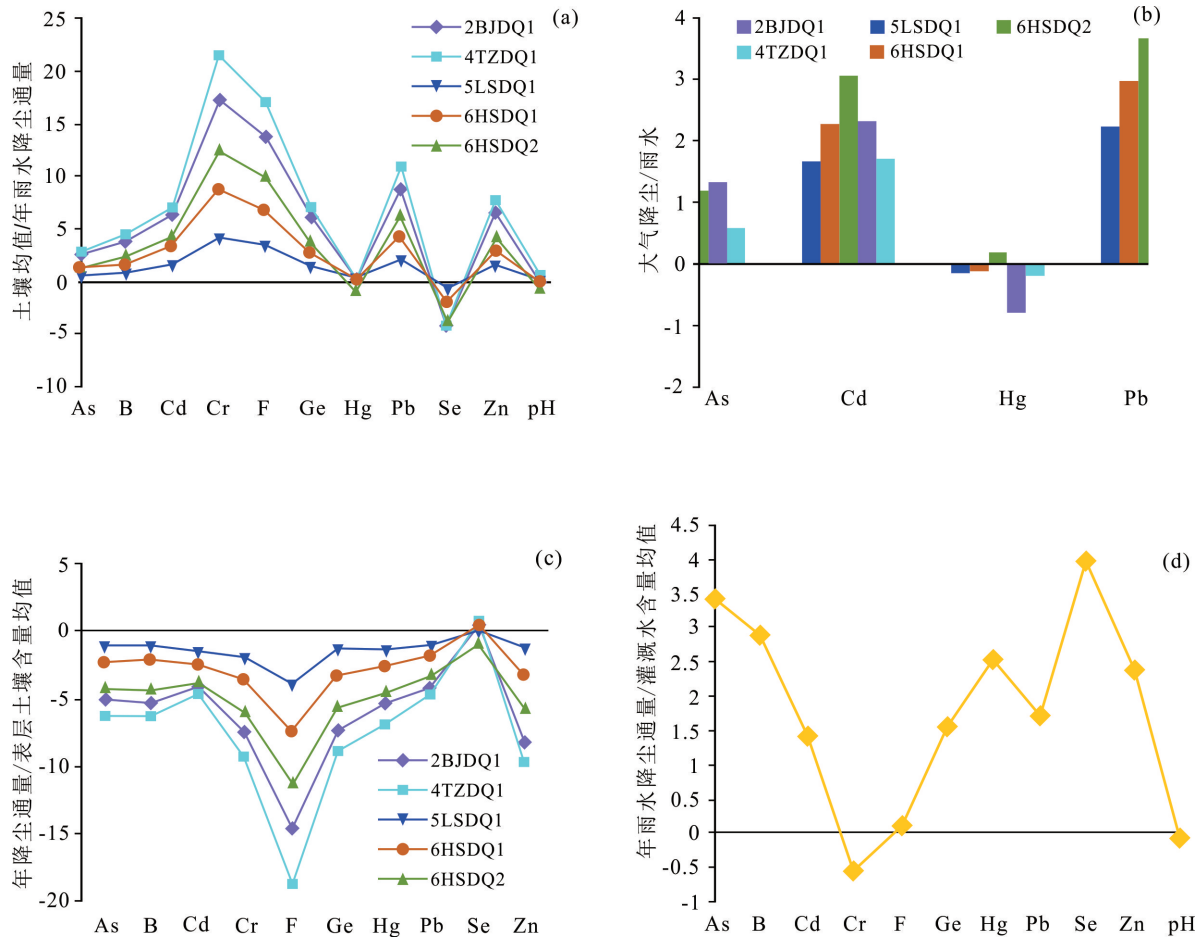


图4 表层土壤、灌溉水、雨水、大气降尘对比关系图

Fig.4 Comparison diagram of surface soil, irrigation water, rain and atmospheric dust

地村民生活和取暖多使用燃煤(Streets et al., 2005; 杨子鹏等, 2020), 这同样可以导致Hg的累积。

大气降尘物质来源主要为土壤、交通尘、燃煤尘、建筑尘、冶金尘等, 不同来源尘通常具有不同的特征元素或元素组合(顾家伟, 2019)。研究区大气降尘中Se、Pb、Zn、Cr年通量占63.87%, 有研究表明非土壤来源的降尘来源中Se是燃煤尘的特征元素, Pb是交通尘的特征元素, Zn是垃圾焚烧的特征元素(郭锋等, 2013)。而燃煤尘中Se、Pb、Zn、As、Cd含量相对其他降尘来源最高(汤洁等, 2012)。据现场调查, 研究区乡镇农村生活、取暖均采用燃煤, 并且周边原有几个小型煤矿开采(现已停止开采), 因此燃煤或采煤活动可以认为影响研究区大气沉降物的主要污染源之一; Pb是交通尘(汽车尾气)(王增辉, 2020)的标示性元素, 而摆金镇和好花红镇正好位于交通干道, 车流量大, 因此, 汽车尾气可为影响

本区大气降尘的另一个污染源。

4 结论

(1) 研究区以酸性土为主, 147件表层土壤元素Cd与As、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn、pH呈正相关关系; 与Cu、Se呈负相关关系; 34件灌溉水样品中Cd、Cr⁶⁺、Ge、Hg、Pb含量低于检测限值; 水样含量主要为As、B、F⁻、Se、Zn; 灌溉水重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合指数等级为1级, 属清洁范围, 表明灌溉水水质均达标, 重金属元素无污染。5件雨水和大气降尘样品中, 大气降尘主要为As、Cd、Cr、Hg、Pb, 含量大小顺序为Pb>Cr>As>Cd>Hg; 雨水中: As、B、Cd、Cr⁶⁺、F⁻、Ge、Hg、Pb、Se、Zn, 含量大小顺序为B>Se>As>Zn>F⁻>Pb>Hg>Ge>Cd>Cr⁶⁺。

(2) 研究区内Cd单因子污染指数最高, 其污染贡献最大, 尤其在芦山镇羊马村和羨塘镇红旗村,

达到5级,属于重度污染;其次为好花红镇好花红村和涟江街道大坡村,达到3级,属于中度污染;摆金镇立新村为2级,属于轻度污染;内梅罗综合污染指数大小为羡塘镇红旗村>芦山镇羊马村>涟江街道大坡村>好花红镇好花红村>摆金镇立新村;灌溉水水质均达标,无重金属元素污染;大气干湿沉降物年通量密度平均值大小顺序分别为B>Se>Pb>Zn>Cr>As>F>Cd>Ge>Hg。

(3)研究区大气降尘总量平均值 $89\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,与中国一些省市地区相比较,总量略低;表层土壤、大气沉降之间对比可知:表层土壤与雨水通量相对比来看,Cd、Cr、Pb、Zn富集,Se亏损,表明雨水对Se的贡献较大;大气降尘与雨水相对比,除了Hg以外,大气降尘均高于雨水;大气降尘年通量与表层土壤平均值相对比,除了Se以外,均亏损;大气降尘年通量与灌溉水含量相对比,As、Hg、Se富集,Cr亏损。

(4)表层土壤重金属元素Cd超标,其污染来自于地质背景、工业三废、燃煤的综合来源;大气降尘主要来源于燃煤尘和交通尘。

致谢:审稿专家及编辑部老师对本文的修改提出建设性的修改意见,在此表示诚挚的感谢!

注释

①贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院.2019.贵州省惠水县耕地质量调查评价报告[R].

References

- Adila Hayrat, Mamattursun Eziz, Gulbanu Hini, Jin Wangui, Anwar Mohammad, Alimujiang Kasimu. 2020. Pollution and health risks assessment of heavy metals of road dust in Korla City, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 47(6): 1915–1925(in Chinese with English abstract).
- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636(in Chinese with English abstract).
- Chen Fen, Yu Gao, Hou Jianwei, Zhou Zengyan, Yang Lilin, Li Yusong, Wu Hanxi. 2020. Risk assessment of heavy metals in farmland soils on both sides of the Slag transportation road[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 42(11): 9–21(in Chinese with English abstract).
- Cong Yuan, Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Hou Qingye, Wang Hongcui. 2008. Dry and wet atmospheric deposition fluxes of elements in the plain area of Beijing municipality, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(2): 257–264(in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Li Suimin, Song Zefeng. 2012. An analysis of the sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 39(4): 1108–1115(in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Song Jianhua, Dong Jian, Hu Xueping, Li Xiaopeng. 2018. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 45(3): 617–627(in Chinese with English abstract).
- Gao Qing, Gu Youli, Gong Mengdan, Li Shuying, Wu Yang, Zhu Weiqin. 2014. An assessment and characterization of heavy metal pollution in the farmland of Hemu wetland[J]. *Wetland Science and Management*, 10(2): 48–52(in Chinese with English abstract).
- Gou Tizhong, Zhang Wenhua. 2019. Ecological risk evaluation of heavy metal contamination in Blueberry planting soil of the Majiang county, Guizhou, China[J]. *Earth and Environment*, 47(5): 680–688(in Chinese with English abstract).
- Gu Jiawei. 2019. A review on heavy metals in atmospheric suspended particles of China cities and its implication for future references[J]. *Earth and Environment*, 47(3): 385–396(in Chinese with English abstract).
- Guan Houchun, Li Yunhuai, Peng Miaozi, Liu Daobin. 2013. The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan City[J]. *Geology in China*, 40(6): 1149–1158(in Chinese with English abstract).
- Guo Feng, Shen Huifang, Fan Wenhua. 2013. Particle size distribution and health risk assessment of heavy metal of surface dust in middle school of mining district in Datong City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27(1): 162–166(in Chinese with English abstract).
- Hou Jiayu, Liu Jincheng, Cao Shuping, Cheng Xujiang, Zhang Yana, Wang Weixing. 2013. Study on the dry and wet atmospheric deposition in the urban area of Tianjin[J]. *Geological Survey and Research*, 36(2): 131–135(in Chinese with English abstract).
- Huang Yong, Yang Zhongfang. 2009. Recent research progress of overseas soil quality evaluation[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 130–136(in Chinese with English abstract).
- Jiao Li, Shen Jiandong, Yao Lin, Yang Le. 2013. Pollution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Hangzhou[J]. *Environmental Pollution and Control*, 35(1): 73–76(in Chinese with English abstract).
- Jiaohaer Hongwei, Li Ning, Su Yuhong, Dou Yongle, Anwar Mamat. 2020. Effects of long-term reclaimed water irrigation on soil properties and heavy metal content in arid mountainous area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(12): 181–186(in Chinese with English abstract).

- Li Bo, Liu Ya, Yao Yan, Fang Fang, Zhang Zhiqiang, Xu Xuechun. 2010. Element flux and sources from atmospheric bulk deposition in Western Jilin Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40(1): 176–182(in Chinese with English abstract).
- Li Yansheng. 2011. Geochemical characteristics of atmospheric dust in southern Songnen plain, Heilongjiang Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 35(4): 536–540(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhiqiang, Li Huafeng. 2020. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in irrigation water of medium-sized irrigation areas in Shaoguan[J]. Water Resources Development and Management, (10): 20–24(in Chinese with English abstract).
- Liu Zi, Huang Xingkai, Xu Hongling, Zhang Bin, Peng Qingsong, Wang Chensheng, Wang Heng, Jiang Hua. 2020. Migration characteristics of elements in the rock-soil system and suitability evaluation of orange planting in Yaqueling area, Yichang, Hubei Province[J]. Geology in China, 47(6): 1853–1868(in Chinese with English abstract).
- Luan Wenlou, Wen Xiaoya, Ma Zhongshe, Cui Xingtao, Song Zefeng, Du Jun. 2008. Geochemical characteristics of heavy metal elements in soils eastern Hebei Plain[J]. Geoscience, 22(6): 939–947(in Chinese with English abstract).
- Luo Yinghua, Dai Tegen, Liang Kai. 2006. Study on distribution of the atmospheric dust-fall and its metal element contents in Shaoguan City, Guangdong Province[J]. Geological Survey and Research, 29(1): 64–68(in Chinese with English abstract).
- Nemerow N L. 1974. Scientific Stream Pollution Analysis[M]. Washington: Scripta Book Companies.
- Pang Xugui, Wang Xiaomei, Dai Jierui, Guo Ruipeng, Yu Chao, Cui Yuanjun, Dong Jian. 2014. Geochemical characteristics and pollution sources identification of the atmospheric dust-fall in Jinan City[J]. Geology in China, 41(1): 285–293(in Chinese with English abstract).
- Peng Yulong, Wang Yongmin, Qin Caiqing, Wang Dingyong. 2014. Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in core urban areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 35(7): 2490–2496(in Chinese with English abstract).
- Ren Jie, Liu Xiaowen, Wu Yingxin, Zhang Jie, Cao Tianyi, Li Jie, Zhang Yongli. 2020. The evaluation and content of typical contaminants in irrigation water during the slack season in the suburban areas of North River and West River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(11): 3990–4000(in Chinese with English abstract).
- State Department of Environmental Conservation. 1990. Background Value of Soil Environment in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 330–369(in Chinese).
- Streets D G, Hao J M, Wu Y, Jiang J K, Chan M L S, Tian H Z, Feng X B. 2005. Anthropogenic mercury emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 39(40): 7789–7806.
- Tang Jie, Li Na, Li Haiyi, Bian Jianmin, Li Zhaoyang, Cui Yujun. 2012. Flux and source appointment of heavy metals from atmospheric dry and wet deposition in Daqing City, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(2): 507–513(in Chinese with English abstract).
- Tang Qifeng, Yang Zhongfang, Zhang Benren, Feng Haiyan, Wang Hongcui. 2007. A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu economic region[J]. Earth Science Frontiers, 14(3): 213–222(in Chinese with English abstract).
- Wang Cunlong, Zeng Xiandong, Liu Huafeng, Yang Liyuan, Wang Hongjin, Pang Xugui. 2015. The present situation of soil environmental quality and the distribution and migration regularity of heavy metals in soil of Yantai [J]. Geology in China, 42(1): 317–330(in Chinese with English abstract).
- Wang Zenghui. 2020. 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, 44(4): 839–846(in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghai, Wang Chensheng, Chen Honghan. 2020. Eco-environmental assessment and genetic analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten-molybdenum mine area in Inner Mongolia [J]. Geology in China, 47(6): 1838–1852(in Chinese with English abstract).
- Xu Linchun. 2014. Research on Water Security under the Impact of Human Activities in Pearl River Delta[D]. Wuhan: Wuhan University(in Chinese with English abstract).
- Yang Wentao, Liao Bohan, Zhou Hang, Gu Jiaofeng, Wu Pan, Zhang Jia. 2020. On relation between trace elements and Cd content in soil-rice system at different rice stages under organic fertilizer application[J]. Journal of Safety and Environment, 20(5): 1932–1941(in Chinese with English abstract).
- Yang Zipeng, Xiao Rongbo, Chen Yuping, Deng Yirong, Han Cunliang, Liu Chufan, Gao Zhongyuan, Huang Shuting, Dai Weijie. 2020. Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in south China[J]. Ecologica Sinica, 40(14): 4823–4835(in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Liu Tiegeng. 2001. Distribution features and existing forms of Cadmium in the Niujiaotang Cd-rich zinc deposit, Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 21(1): 115–118(in Chinese with English abstract).
- Yuan Fang, Xie Yuanyun, Chi Yunping. 2018. Material characteristics of dust fallouts during the dust-storm weather in Harbin: Constraint on the provenance[J]. Geology in China, 45(6): 1177–1187(in Chinese with English abstract).
- Zhang Junhua, Li Cuiwei, Xie Yin, Meng Lei. 2020. Environmental quality evaluation of soil and irrigation water in plantations in

- Hainan Province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 40(9): 13-19(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinzhu, Wang Biao, Liu Yi, Wang Siyuan, Zhou Jinlong. 2020. Geochemical evaluation of soil quality and lang- use regionalization of selenium- rich soils in cultivated area around Nangqian County, Qinghai[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 34(10):93-101(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 阿地拉·艾来提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 姑力巴努·艾尼, 艾尼瓦尔·买买提, 阿里木江·卡斯木. 2020. 新疆库车县道路积尘重金属污染及健康风险评价[J]. 中国地质, 47(6): 1915-1925.
- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 47(6): 1625-1636.
- 陈芬, 余高, 侯建伟, 周曾艳, 杨莉琳, 李玉松, 吴涵茜. 2020. 矿渣运输道路两侧农田土壤重金属风险评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 42(11): 9-21.
- 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 侯青叶, 王洪翠. 2008. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. 地质通报, 27(2): 257-264.
- 崔邢涛, 栾文楼, 李随民, 宋泽峰. 2012. 石家庄市大气降尘重金属元素来源分析[J]. 中国地质, 39(4): 1108-1115.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 董建, 胡雪平, 李肖鹏. 2018. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. 中国地质, 45(3): 617-627.
- 高清, 顾优丽, 龚梦丹, 李淑英, 巫阳, 朱维琴. 2014. 杭州市和睦湿地农田土壤重金属污染评价及关联特征研究[J]. 湿地科学与管理, 10(2): 48-52.
- 苟体忠, 张文华. 2019. 贵州省麻江县蓝莓基地土壤重金属污染及风险评价[J]. 地球与环境, 47(5): 680-688.
- 顾家伟. 2019. 我国城市大气颗粒物重金属污染研究进展与趋势[J]. 地球与环境, 47(3): 385-396.
- 官后春, 李运怀, 彭苗枝, 刘道彬. 2013. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 中国地质, 40(6): 1949-1958.
- 郭锋, 申慧芳, 樊文华. 2013. 大同市矿区中学地表灰尘重金属粒级效应及健康风险评估[J]. 水土保持学报, 27(1): 162-166.
- 国家环境保护局. 1990. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 330-369.
- 侯佳渝, 刘金成, 曹淑萍, 程绪江, 张亚娜, 王卫星. 2013. 天津市城区大气干湿沉降地球化学研究[J]. 地质调查与研究, 36(2): 131-135.
- 黄勇, 杨忠芳. 2009. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 28(1): 130-136.
- 姣哈尔·红卫, 李宁, 苏玉红, 窦永乐, 艾尼瓦尔·买买提. 2020. 长期再生水灌溉对于旱区山地土壤基本性质及重金属含量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 34(12): 181-186.
- 焦荔, 沈建东, 姚琳, 杨乐. 2013. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. 环境污染与防治, 35(1): 73-76.
- 李波, 刘娅, 姚燕, 方芳, 张志强, 徐学纯. 2010. 吉林省西部地区大气干湿沉降元素通量及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(1): 176-182.
- 李廷生. 2011. 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, 35(4): 536-540.
- 刘志强, 李华峰. 2020. 韶关市中型灌区灌溉水重金属污染调查与评价[J]. 水资源开发与管理, (10): 20-24.
- 刘孜, 黄行凯, 徐宏林, 张斌, 彭青松, 王晨昇, 王恒, 姜华. 2020. 湖北宜昌鹤峰岭地区岩石-土壤元素迁移特征及柑橘种植适宜性评价[J]. 中国地质, 47(6): 1853-1868.
- 栾文楼, 温小亚, 马忠社, 崔邢涛, 宋泽峰, 杜俊. 2008. 冀东平原土壤中重金属元素的地球化学特征[J]. 现代地质, 22(6): 939-947.
- 罗莹华, 戴塔根, 梁凯. 2006. 广东韶关市大气降尘及尘中金属元素分布特征研究[J]. 地质调查与研究, 29(1): 64-68.
- 庞绪贵, 王晓敏, 代杰瑞, 郭瑞鹏, 喻超, 崔元俊, 董健. 2014. 济南市大气降尘地球化学特征及污染源研究[J]. 中国地质, 41(1): 285-293.
- 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇. 2014. 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, 35(7): 2490-2496.
- 任杰, 刘晓文, 吴颖欣, 张杰, 曹天轶, 李杰, 张永利. 2020. 农闲期城郊农田灌溉水中典型污染物含量与评价——以西北江三角洲为例[J]. 环境科学学报, 40(11): 3990-4000.
- 汤洁, 李娜, 李海毅, 卞建民, 李昭阳, 崔玉军. 2012. 大庆市大气干湿沉降重金属元素通量及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 507-513.
- 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 冯海艳, 王洪翠. 2007. 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, 14(3): 213-222.
- 王存龙, 曾宪东, 刘华峰, 杨丽原, 王红晋, 庞绪贵. 2015. 烟台市土壤环境质量现状及重金属元素分布迁移规律[J]. 中国地质, 42(1): 317-330.
- 王增辉. 2020. 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, 44(4): 839-846.
- 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 2020. 内蒙古废弃铅钨矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. 中国地质, 47(6): 1838-1852.
- 徐林春. 2014. 人类活动影响下的珠江三角洲水安全研究[D]. 武汉: 武汉大学.
- 杨文强, 廖柏寒, 周航, 辜娇峰, 吴攀, 张佳. 2020. 有机肥施用下水稻不同生育期土壤-水稻系统中微量元素与Cd的关系[J]. 安全与环境学报, 20(5): 1932-1941.
- 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 邓一荣, 韩存亮, 刘楚藩, 高中原, 黄淑婷, 戴伟杰. 2020. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. 生态学报, 40(14): 4823-4835.
- 叶霖, 刘铁庚. 2001. 贵州都匀牛角塘富镉锌矿床中镉的分布及福存状态探讨[J]. 矿物学报, 21(1): 115-118.
- 袁方, 谢远云, 迟云平. 2018. 哈尔滨沙尘暴天气沉降物的物质组成及其对物源的限制[J]. 中国地质, 45(6): 1177-1187.
- 张俊华, 李翠微, 谢茵, 孟磊. 2020. 海南园地灌溉水和土壤质量评价[J]. 热带农业科学, 40(9): 13-19.
- 周殷竹, 王彪, 刘义, 王思源, 周金龙. 2020. 青海囊谦县城周边农耕地土壤质量地球化学评价及富硒土地利用分区[J]. 干旱区资源与环境, 34(10): 93-101.