

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷司佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析

吴红璇, 史常青*, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为探究乌海市煤矿区及周边区域春季降尘中重金属元素的含量水平、各功能区的污染特征以及污染物的来源情况, 于2018年3~6月选取乌海市5个典型功能区(露天矿区、矿外运煤专线、工业园区、商住混合区和沙区), 共采集43个大气降尘样品, 利用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定样品中Al、As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mg、Mn、Ni、Pb、Sb、Ti、V和Zn共18种元素的含量。结果表明, 乌海市大气降尘中As、Cd、Cu、Pb、Cr、Ni、Sb和Zn共8种元素平均含量分别为408.78、1.97、27.40、38.93、45.97、25.41、2.71和277.76 mg·kg⁻¹, 均高于内蒙古土壤元素背景值。18个元素中仅5种元素在个别区间差异显著, 且18种元素在5个功能区具有相似的富集特征, 说明乌海市各功能区降尘重金属污染情况相似。降尘中As、Cd、Cr和Pb元素综合污染指数分别为3.332、2.622、1.369和0.523, 是当地降尘的显著污染因子, 其中As和Cd是首要污染因子。主成分法因子分析得出, 乌海市大气降尘主要来源于工业排放、煤炭燃烧、交通尘和煤炭开采运输。因子分析-多元线性回归结果显示, 煤炭是Cd污染的主要来源, 其中煤炭开采和运输、工业排放分别占77.58%和22.42%; As来源复杂, 18.99%来源于工业排放、15.87%来源于煤炭燃烧、6.79%来源于煤炭开采及运输和58.34%的来源未知。

关键词: 降尘; 重金属; 来源; 污染特征; 露天矿区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1167-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907037

Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring

WU Hong-xuan, SHI Chang-qing*, ZHANG Yan, ZHAO Ting-ning, HU Ping, LIU Yun, CHEN Tong

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To study the concentration levels, pollution characteristics of each functional area, and sources of pollutants of the dust heavy metals Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V, and Zn in spring in Wuhai, 43 groups of dust samples were collected from different locations within the city from March to June 2018. The heavy metal mass concentration was then measured using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES). The results showed that: ①The average contents of As, Cd, Cu, Pb, Cr, Ni, Sb, and Zn were 408.78, 1.97, 27.40, 38.93, 45.97, 25.41, 2.71, and 277.76 mg·kg⁻¹, respectively, which were higher than the background values of the element soil. ②Only 5 of the 18 elements had significant differences in individual intervals, and the 18 elements had similar enrichment characteristics in 5 functional areas. This meant that the heavy metal pollution of dustfall in various functional areas of Wuhai was similar. ③As, Cd, Cr, and Pb elements were key pollution factors, and their comprehensive pollution indexes were 3.332, 2.622, 1.369, and 0.523, respectively, with As and Cd as primary factors. ④Through the analysis of pollution sources, it was found that in the Wuhai area the atmospheric dustfall was mainly caused by industrial emissions, coal burning, traffic dust, and coal mining and transportation. Factor analysis and multiple linear regression showed that coal was the main source of Cd pollution, with coal mining and transportation and industrial emissions accounting for 77.58% and 22.42%, respectively. The sources of As were complex, with 18.99% from industrial emissions, 15.87% from coal burning, and 6.79% from unknown sources.

Key words: dustfall; heavy metal; sources; pollution characteristics; opencast mine area

大气降尘指可自然降落于地表的空气颗粒物, 是城市的主要污染因子之一^[1,2]。自然条件下大气降尘主要来源于土壤, 在人为活动的干扰下, 大气降尘呈现多源性特征。其中, 人为来源主要包括交通排放、化学燃料的燃烧排放、工业矿业排放等^[2-6]。降尘不仅本身是污染物还是其他污染物的反应床和运载体, 其携带的重金属可通过物质循环过程影响陆地及水体生态系统^[7]。重金属在自然条件下很难被降解, 长期吸附于土壤、粉尘环境中, 在再悬浮机制或食物链累积作用下都将对人类健康构成潜在危害^[8,9]。

近年来对大气降尘的研究多集中于城市街道降尘的重金属含量、空间分布、污染特征、来源识别、生态风险及健康风险评价等方面^[3-5,10,11]。然而当前针对矿区降尘重金属污染的研究较少, 更多的是探讨煤矿区降尘量的空间分布或土壤重金属污染^[12-15]。相关研究显示大气降尘和土壤中重金属含量呈正相关关系, 且农田土壤中25%~85%的重金

收稿日期: 2019-07-04; 修订日期: 2019-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504400)

作者简介: 吴红璇(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为林业生态工程和大气环境污染, E-mail: whx_852456@126.com

* 通信作者, E-mail: scqbj@126.com

属来源于大气降尘^[16,17]. 作为土壤重金属的来源之一, 煤矿区及周边区域的降尘污染特征和来源解析的研究有着重要意义.

乌海市是西北干旱区典型的煤炭开采城市, 地处乌兰布和沙漠、库布齐沙漠和毛乌素沙地的交汇处, 特殊的气候和地理条件导致该区域生态环境脆弱. 随着城市化和工业化的快速发展, 产生了大量的污染物. 在春季频繁的大风条件下, 乌海市常遭受沙尘暴的干扰, 空气质量呈下降的趋势. 目前, 对乌海市降尘的污染特征及来源研究尚未见报道, 为弥补这些方面的不足, 本文着重从统计学的角度分析乌海市大气降尘元素浓度、富集程度在矿区及其周边典型功能区的差异性, 以此探究煤炭开采对周边区域的影响. 同时采用综合污染指数法和因子分析-多元线性回归法筛选出重要污染元素并探明其来源及贡献率, 以便乌海市针对重点污染物展开大气环境治理.

1 材料与方 法

1.1 样品采集方法

综合考虑乌海市各区域的主要功能、地形地貌、气候特征和道路交通等, 在乌海市设置露天矿区、矿外运煤专线、工业园区、商住混合区和沙区这 5 个采样区域共布设 43 个采样点(图 1). 露天矿区位于千里山矿区, 区域内包括矿区入口、采矿坑、排土场和排矸场, 共布设 9 个采样点; 矿外运煤专线位于试验矿区西部, 线路上共布设 7 个采样点; 工业园区是位于试验矿区西北部小片聚集的工业园, 内设彩钢厂和汽车爆破场等, 共布设 8 个采样点; 商住混合区指乌海市海勃湾区凤凰岭及海北街道住宅与商用房混合建设区域, 域内共布设 14 个采样点; 沙区指分布在矿区北部裸露的沙地, 域内共布设 5 个采样点.

大气降尘的采集器为高 30 cm 和内径 15 cm 内壁光滑底部平整的有机玻璃缸. 采样点均布设于电线杆上, 降尘采集口均距地表 2 m 高. 记录采样地点、缸号、采样时间及时长, 样品采集完成后密封带回实验室, 去除降尘缸内树叶和飞虫等杂质, 用蒸馏水冲洗干净降尘缸, 使用蒸发皿蒸干, 编号后密封保存. 本次样品采集于 2018 年 3 月 3 日至 6 月 1 日, 采集时长为 90 d, 共收集 43 个样品.

1.2 测定方法

元素含量测试前, 所有样品均使用玛瑙研钵充分研磨, 过 0.15 mm 筛孔; 准确称取 25 mg 样品粉末于消解罐中, 加入 8 mL HNO₃、2 mL HF、2 mL HCl 和 0.5 mL HClO₄, 封盖, 静置后采用高压微波消

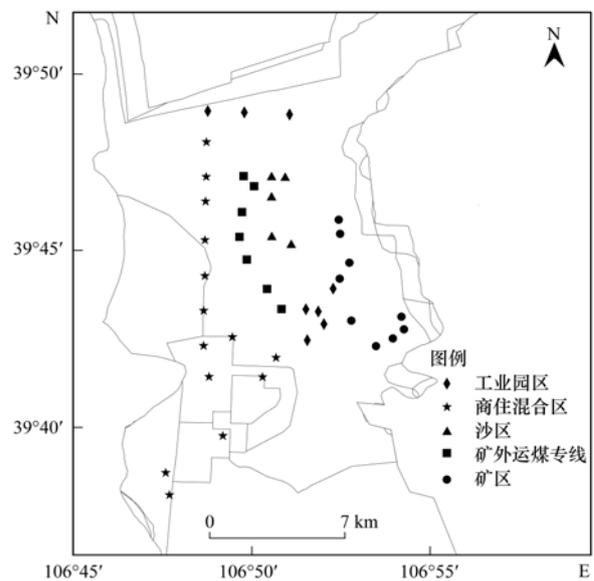


图 1 乌海市样品采样点示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Wuhai

解仪(Mars 6 型, 美国 CEM 公司)进行消解、赶酸. 待测样品冷却后, 用高纯水定容至 25 mL. 每 38 个样品设置 2 个全试剂空白对照, 以减小误差. 降尘中 Al、As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mg、Mn、Ni、Pb、Sb、Ti、V 和 Zn 元素均采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES, 5100 型, 美国 Agilent 公司)测定.

1.3 评价方法

1.3.1 重金属综合评价法

参考熊秋林等^[2]对大气降尘综合污染状况的计算方法, 计算出乌海市的综合污染指数(integrated pollution index of the dust heavy metal, IPI. dhm), 其计算公式如下:

$$IPI. dhm = PI_1 + PI_2 + PI_3 + PI_4 \quad (1)$$

式中, PI_i 均为归一化系数, PI_1 表征降尘重金属含量与背景值比值的归一化系数, $PI_1 > 0.15$ 表示社会经济活动对降尘重金属影响显著; PI_2 表征降尘重金属单因子污染指数的归一化系数, 单因子污染标准参考 GB 36600-2018 中第二类用地的风险筛选值^[18], $PI_2 > 0.15$ 表示降尘中各重金属对污染的贡献率显著; PI_3 表征降尘重金属地累积指数的归一化系数^[19], $PI_3 > 0.15$ 表示降尘重金属的污染显著; PI_4 表征降尘重金属潜在风险指数的归一化指数^[20], $PI_4 > 0.15$ 表示重金属的潜在生态危害显著. 当重金属的 IPI. dhm > 0.5 , 则该元素为降尘中显著污染因子.

1.3.2 富集因子法

富集因子(enrichment factor, EF)在大气降尘这一研究领域不仅可判断大气降尘中元素富集的程

度,还可定性判别和评价元素的初步来源及其贡献,其计算公式为^[21]:

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{\text{样品}}}{(C_i/C_n)_{\text{背景值}}} \quad (2)$$

式中,EF 为富集因子系数, C_i 为待测定的元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_n 为所选参比元素的含量; $(C_i/C_n)_{\text{样品}}$

和 $(C_i/C_n)_{\text{背景值}}$ 分别为环境样品和土壤背景中研究元素与参比元素含量的比值.各金属元素的背景值参考文献[22]中内蒙古 A 层土壤元素含量.根据范晓婷等^[23]选取参比元素的方法,基于因子分析及聚类分析,选取 Al 为本文参比元素.将大气降尘汇总重金属元素的富集程度分为 5 个级别(表 1)^[24].

表 1 富集因子(EF)分级标准

Table 1 Classification standards of enrichment factors

项目	EF ≤ 2	2 < EF ≤ 5	5 < EF ≤ 20	20 < EF ≤ 40	EF > 40
富集程度	轻度富集	中度富集	显著富集	强烈富集	极强富集
等级	1	2	3	4	5
来源	地壳或土壤源	自然与人为源	人为污染源	人为污染源	人为污染源

1.3.3 数据统计与分析方法

采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较大气降尘中各元素含量在不同功能区域的差异,显著水平设定为 $\alpha = 0.05$.各元素含量在差异性分析前对所有数据进行对数转换,以提高数据的正态性和方差齐性.运用主成分法因子分析辨别重金属来源,在此基础上采用多元线性回归模拟各污染物的来源贡献率.采用反距离权重插值法对乌海市重要降尘污染元素进行空间插值分析.本文所有数据分析在 SPSS 22 和 R64 3.5.2 软件进行.

2 结果与讨论

2.1 乌海大气降尘重金属含量特征

对研究区不同功能区大气降尘中 18 种元素含

量进行描述性统计,如表 2.大气降尘中 Al、Co、Fe、Li、Ba、Be、Mn、Ti 和 V 元素含量均值均低于内蒙古土壤元素背景值,其中 Al、Co 和 Li 元素超标率为 0%,Ba、Be、Mn、Ti、Fe 和 V 元素超标率均值在 2%~16%之间;As、Cd、Cu、Pb、Cr、Ni、Sb 和 Zn 元素含量均值均高于内蒙古元素土壤背景值,其中 As、Cd、Cu 和 Pb 元素超标率为 100%,Cr、Ni、Sb 和 Zn 元素超标率均大于 79%,乌海市的大气降尘可能受到 As、Cd、Cu、Pb、Cr、Ni、Sb 和 Zn 元素的污染.变异系数表现了数据的离散程度,小于 0.15 为小变异、在 0.16~0.36 之间为中等变异,大于 0.36 为高度变异^[13].Cd、Mg 和 Zn 元素变异系数远大于 0.36,变异性极强.说明这 3 种元素浓度整体上分布较为离散,可能存在突出高值区即污染严重区域.

表 2 研究区大气降尘中元素统计¹⁾

Table 2 Statistics of dustfall trace elements in the surrounding region of the study area

元素	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超标率/%
Al	2 923.36 ~ 18 337.39	7 106.20	3 162.84	0.45	56 700.00	0.00
As	234.91 ~ 724.80	408.78	173.49	0.42	7.50	100.00
Ba	126.22 ~ 841.50	299.67	111.18	0.37	542.00	2.94
Be	0.32 ~ 2.21	1.23	0.39	0.31	1.78	11.76
Cd	0.55 ~ 16.68	1.97	2.70	1.37	0.05	100.00
Co	0.32 ~ 3.64	1.41	0.42	0.57	10.30	0.00
Cr	21.71 ~ 94.14	45.97	11.64	0.25	41.40	79.41
Cu	16.72 ~ 49.73	27.40	6.63	0.24	14.40	100.00
Fe	3 247.62 ~ 27 595.56	16 565.64	5 911.38	0.36	23 100.00	8.82
Li	0.31 ~ 0.51	0.36	0.05	0.13	26.30	0.00
Mg	134.28 ~ 2 224.43	362.77	387.49	1.07	—	—
Mn	249.35 ~ 665.12	389.59	96.08	0.25	520.00	8.82
Ni	16.93 ~ 52.78	25.41	7.16	0.28	19.50	94.12
Pb	19.58 ~ 65.25	38.93	10.69	0.27	17.20	100.00
Sb	0.23 ~ 8.57	2.71	1.93	0.71	0.96	88.24
Ti	1 083.09 ~ 4 317.63	2 640.83	534.09	0.20	3 200.00	8.82
V	25.67 ~ 91.58	50.83	11.58	0.23	51.10	47.06
Zn	37.13 ~ 3 462.80	277.76	610.44	2.20	59.10	82.35

1) “—”表示相关研究中没有相关数据,超标率指样品中元素超过背景值的样本占总样本的比率

2.2 乌海市各功能区大气降尘污染情况差异性分析

各降尘元素含量在不同功能区差异性分析见表3,乌海市大气降尘18种元素中有13种元素在各功能区无显著性差异,仅Ba、Be、Cd、Co和Zn这5种元素在个别区域存在显著差异。Ba元素质量分数在沙区显著高于露天矿区;Be元素质量分数在露天矿区显著高于其他区域;Cd元素质量分数在矿外运煤专线显著高于其他区域;Co元素质量分数

在露天矿区显著高于沙区;Zn元素质量分数在露天矿区和商住混合区显著高于其他区域。矿外运煤专线的Cd与Zn元素显著高于($P < 0.05$)其他区域,可能与煤炭运输存在一定关系。乌海大气降尘的Cd易沉降区域与李芳等^[14]对鲁西煤矿区Cd沉降区域一致,多集中于矸石山、运煤公路和运煤中转站等区域。汽车轮胎磨损引起的交通尘中Zn排放比重大这一现象也符合乌海市交通繁忙区Zn的排放特征^[5]。

表3 不同功能区的大气降尘重金属质量分数¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Concentrations of heavy metals in dustfalls of different areas

元素	露天矿区	矿外运煤专线	工业园区	商住混合区	沙区
Al	7 907.00 ± 2 438.02a	6 385.46 ± 3 494.10a	6 636.51 ± 2 468.27a	5 630.02 ± 904.41a	8 684.39 ± 4 835.35a
As	425.51 ± 190.38a	545.32 ± 210.52a	376.93 ± 170.83a	351.46 ± 133.10a	390.00 ± 168.28a
Ba	240.72 ± 68.80b	289.75 ± 24.38ab	284.76 ± 18.57ab	276.96 ± 63.23ab	391.34 ± 188.96a
Be	1.60 ± 0.45a	1.26 ± 0.21b	1.13 ± 0.16b	1.12 ± 0.37b	1.10 ± 0.43b
Cd	1.48 ± 0.82b	5.25 ± 6.41a	1.44 ± 0.54b	1.27 ± 0.66b	1.46 ± 0.75b
Co	1.92 ± 0.94a	1.62 ± 0.79ab	1.36 ± 0.76ab	1.45 ± 0.64ab	0.82 ± 0.62b
Cr	45.64 ± 7.46a	49.23 ± 11.49a	44.00 ± 5.19a	43.55 ± 9.60a	48.13 ± 19.53a
Cu	27.77 ± 7.04a	30.00 ± 2.88a	25.83 ± 3.39a	28.22 ± 5.45a	25.82 ± 10.56a
Fe	16 128.86 ± 4 759.70a	13 802.66 ± 7 776.38a	19 040.77 ± 6 195.95a	18 260.36 ± 7 039.82a	14 928.53 ± 3 951.41a
Li	0.41 ± 0.07a	0.35 ± 0.04a	0.36 ± 0.03a	0.36 ± 0.02a	0.3 ± 0.02a
Mg	220.90 ± 59.94a	463.42 ± 449.47a	285.30 ± 132.04a	589.08 ± 679.49a	255.80 ± 105.10a
Mn	371.31 ± 130.60a	423.51 ± 61.09a	384.49 ± 51.36a	428.53 ± 108.23a	349.28 ± 91.64a
Ni	27.63 ± 9.10a	25.29 ± 2.25a	22.91 ± 1.90a	25.17 ± 5.17a	25.65 ± 11.33a
Pb	39.46 ± 11.92a	45.16 ± 12.70a	39.22 ± 6.59a	39.94 ± 9.54a	33.34 ± 11.75a
Sb	2.76 ± 1.95a	3.47 ± 3.36a	3.44 ± 2.55a	2.25 ± 1.01a	2.11 ± 0.82a
Ti	2 921.05 ± 421.59a	2 624.80 ± 331.54a	2 579.95 ± 195.95a	2 581.76 ± 632.60a	2 510.37 ± 772.45a
V	54.70 ± 10.46a	51.99 ± 7.41a	48.31 ± 5.99a	50.61 ± 10.99a	48.82 ± 18.29a
Zn	157.99 ± 168.04b	378.52 ± 516.54a	169.61 ± 154.02b	591.96 ± 1 171.71a	86.48 ± 62.83b

1) 数据为平均值 ± 标准差($n \geq 3$); a和b表示不同功能区在 $P < 0.05$ 的置信度上差异显著情况

根据乌海市各功能区降尘元素富集情况(图2),各区域As和Cd元素富集因子远大于100。矿外运煤专线、商住混合区及总研究区Zn元素均值富集因子为5级,均属于极强富集。乌海市As和Cd富集因子均值高达434.88和297.11,存在严重污染,主要受人为污染源影响。Co和Li元素EF均值均小于2,呈轻度富集,主要来源于地壳土壤。露天煤矿区、工业园区的Ba元素和沙区的Be元素富集因子在2~5之间,属中度富集,主要来源于地壳与土壤,受轻微程度人为干扰。各分区中Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sb、Ti和V元素富集程度为5~40之间,已达到显著富集及以上等级,存在一定污染,主要受人为污染影响。

乌海市5个区域降尘富集等级中As、Cd、Co、Cr、Fe、Li、Mn、Ni、Ti和V变异系数为0,呈无变异性;Sb、Pb、Be和Cu的变异系数分别为0.1、0.13、0.15和0.14,呈小变异性;Ba和Zn变异系数分别为0.18和0.22,呈中等变异性。这表明乌海市大气降尘的重金属元素在5个不同功能区具有相

似的富集特征。春季频繁的大风对大气降尘中侵蚀搬运沉积的过程具有促进作用,可有效地扩散污染源区的土壤或其他排放物。

2.3 春季降尘中重金属综合污染评价

由于区域间富集程度区别较小,在此仅对研究区进行整体污染评价。基于文献[18]中第二类用地的风险筛选值,计算乌海市春季降尘中As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb和V这8种金属的综合污染指数(表4)。

如表4所示,As和Cd元素 PI_1 均大于0.5,是乌海市降尘中受社会经济活动影响程度极强的重金属,重金属的背景比值的归一化系数(PI_1)排序为As > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > V > Co; Cr和As元素 PI_2 均大于0.5,是乌海市降尘中对污染的贡献率极高的重金属,单因子污染指数的归一化系数(PI_2)排序为Cr > As > V > Pb > Cd = Ni > Co > Cu; As、Cd元素 PI_3 均大于0.5,对乌海市降尘中的污染程度极高,Cr、Cu、Ni、V和Pb元素 PI_3 均大于0.3,对乌海市降尘中的污染程度较高,地累积指数的归一化

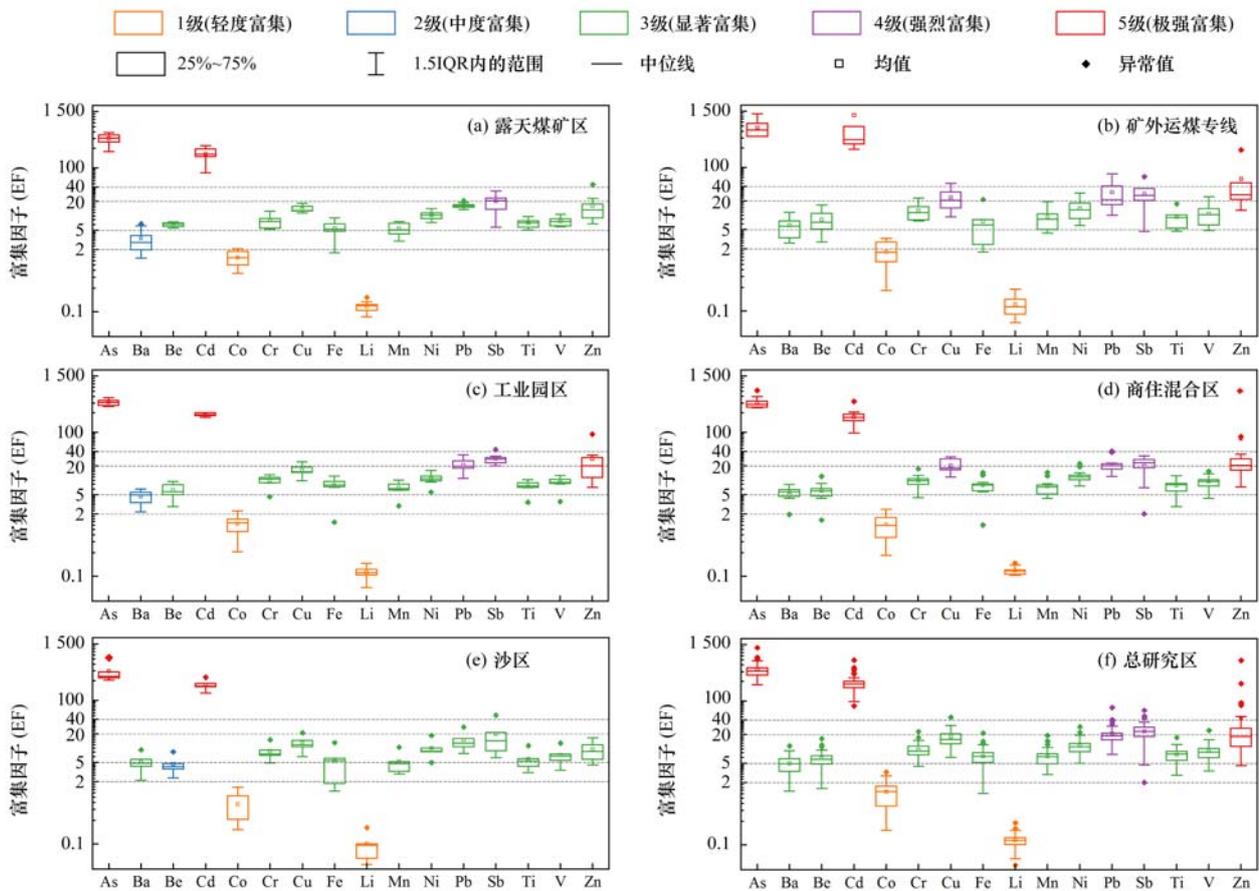


图2 研究区春季大气降尘中元素富集因子

Fig. 2 Boxplot of EF for elements in the atmospheric deposition during spring in the study area

表4 研究区春季降尘重金属污染水平¹⁾

Table 4 Pollution levels of dust heavy metals during spring in the study area

元素	BR	PI ₁	SPI	PI ₂	I _{geo}	PI ₃	E _r	PI ₄	IPI. dhm
As	54.504	1.000	6.813	0.845	5.183	1.000	545.040	0.488	3.332
Cd	37.236	0.682	0.030	0.003	4.634	0.936	1117.092	1.000	2.622
Co	0.137	0.000	0.020	0.002	-3.457	0.000	0.683	0.000	0.002
Cr	1.110	0.018	8.065	1.000	-0.434	0.350	2.221	0.001	1.369
Cu	1.903	0.032	0.002	0.000	0.343	0.440	9.516	0.008	0.480
Ni	1.303	0.021	0.028	0.003	-0.203	0.377	1.303	0.001	0.402
Pb	2.263	0.039	0.049	0.006	0.594	0.469	11.317	0.010	0.523
V	0.995	0.016	0.068	0.008	-0.593	0.331	0.995	0.000	0.356

1) BR 表示实测值与背景值的比值, SPI 为单因子污染指标, I_{geo} 为地累积指数, E_r 为潜在生态风险

系数(PI₃) 排序与背景比值的归一化系数(PI₁) 排序相同; 乌海市春季降尘中 Cd(PI₄ > 0.5) 存在极高的生态风险, As 存在较高生态风险, 潜在生态风险指数的归一化系数(PI₄) 排序为 Cd > As > Pb > Cu > Cr = Ni > Co = V; 综合污染指数(IPI. dhm) 排序为 As > Cd > Cr > Pb > Cu > Ni > V > Co. 4 个指标综合评定结果显示, 降尘中 As、Cd、Cr 和 Pb 综合污染指数分别为 3.332、2.622、1.369 和 0.523, 是当地降尘的显著污染因子(IPI. dhm > 0.5). 其中 As 和 Cd 是乌海市降尘的首要污染元素.

2.4 春季降尘中 As 和 Cd 污染分布特征

基于富集因子及综合污染评价结果, 绘制研究区污染最严重的 As 和 Cd 元素空间分布(图 3).

As 元素分布图存在多个高值区(图 3), 第一高值区为露天矿区的矸石山与洗煤厂附近, 区域含量最高值为 703.74 mg·kg⁻¹. As 元素含量呈现由矸石山向矿区入口降低的趋势, 表明矸石堆放起尘是矿区 As 污染的主要源头. 煤炭中有机态的 As 元素在煤层水氧化放出大量热能, 伴随着煤矸石及煤层的自燃, As 及其化合物极易在挥发-冷凝作用机制下

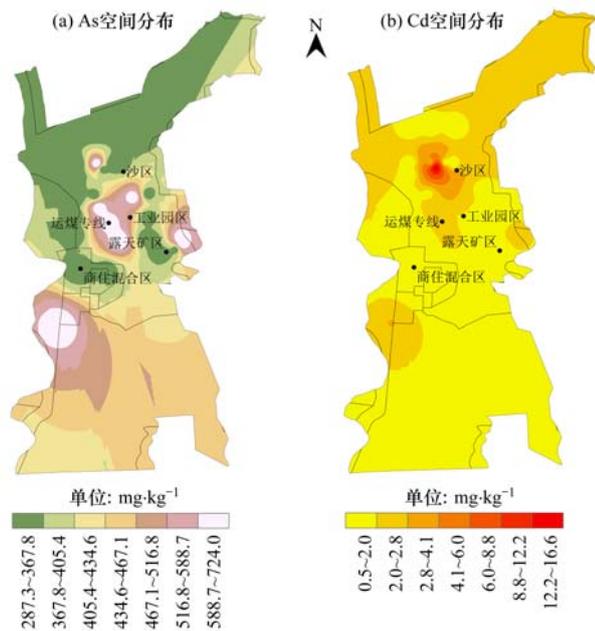


图3 研究区春季大气降尘中As和Cd元素分布
Fig. 3 Spatial distribution of dust As and Cr during spring in the study area

富集于大气颗粒物表面,并以气溶胶的形式迁移^[25,26].次高值区为矿外运煤专线十字路口,十字路口煤炭运输时频繁地刹车与启动扬起的煤粉尘、地表尘或是乌海市As污染另一源头.第三高值区为新开区未开放公路附近的裸地,包含有As和Cd元素一类有害物质的建筑垃圾可用作公路建设,此处高值可能为降雨-径流-蒸发这一水循环过程对裸地表土造成污染,并通过大风吹蚀作用,使得携带有As和Cd的颗粒物进入大气环境^[27].Cd元素在矿外运煤线含量最大,区域均值为 $5.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.最高值分布在矿外运煤专线与金沙湾景区道路的十字路口附近,含量为 $16.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.次高值区与As元素第三高值区分布相似.Cd元素在矿外运煤专线含量整体上呈现朝西南方向扩散的规律,且浓度与扩散距离成负相关趋势.

2.5 春季降尘来源与贡献率分析

2.5.1 金属元素来源识别

为探究乌海市2018年春季降尘主要来源,本文结合前人对不同来源大气降尘的研究,总结出不同污染源排放的主要元素^[4,10,28].从所测18种元素中选取Al、As、Ba、Cd、Cr、Co、Cu、Fe、Ni、Pb、Sb、Ti、V和Zn共14种元素作为不同来源的标识性元素.采用主成分法因子分析对标识性元素进行来源识别,根据特征向量大于1,累计方差贡献率大于80%的原则提取主因子,提取结果见表5和表6.

表6显示,因子1中Cr、Ni、Ti和V元素因子载荷较大,均大于0.8.Cr、Ni、Ti和V与金属冶炼、电镀、合金生产、钢铁制造等产业相关,富集因子均值大于5属于人为来源^[29-31],综合分析因子1代表工业活动.因子2中As和Fe元素因子载荷较高,均大于0.8,富集因子均值大于5属人为来源.As是煤炭燃烧的标识元素,且民用燃煤排放的细颗粒物种含有富Fe颗粒^[10,32].综合分析因子2代表煤炭燃烧.因子3中Pb和Zn元素占有较大因子载荷,其次Ba、Cu和Ni元素也占有一定比重载荷.Ba、Cu、Zn和Pb元素通常来源于汽车制动、轴承或轮胎及刹车片的磨损,极易通过磨损释放到空气中^[33,34],且Pb、Ba、Ni和Zn元素均为燃油及汽车尾气排放的主要元素^[4].综合分析因子3表征为交通尘.因子4中Cd元素的载荷最高,为0.950.Cd元素在区域内富集因子均值高达410.11,属极强富集,受人为活动干扰剧烈.Cd与矿区煤炭开采及煤矸石堆风化

表5 解释总方差

因子	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.672	40.51	40.51
2	2.731	19.51	60.02
3	1.845	13.18	73.20
4	1.116	7.97	81.18

表6 研究区降尘元素因子载荷

Table 6 Factor matrix of elements in dust in the study area

因子	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu
1	0.577	0.099	0.757	0.051	0.190	0.926	0.663
2	0.652	0.945	-0.138	0.002	-0.038	0.152	0.342
3	-0.205	0.011	-0.438	-0.040	0.083	-0.129	0.345
4	-0.175	0.196	-0.015	0.950	0.031	0.036	0.394
因子	Fe	Ni	Pb	Sb	Ti	V	Zn
1	0.230	0.855	0.579	0.082	0.901	0.919	-0.006
2	-0.883	0.190	0.082	0.681	-0.061	-0.050	-0.066
3	0.294	0.325	0.660	0.131	0.203	0.273	0.689
4	0.043	0.150	0.584	-0.014	-0.010	0.189	0.016

关系密切,结合乌海市煤炭运输专线 Cd 元素高值分布特征,因子 4 的来源可能为煤炭开采及运输扩散^[26].

2.5.2 污染源贡献率分析

基于因子分析结果,采用多元线性回归解析各主因子中重要金属元素来源及其贡献率(表 7). E/O 表示多元线性回归模型模拟出的重金属含量与实测值的比值. E/O 结果均接近 1,说明实测值与模拟值之间拟合关系较好. As、Cd、Pb、Cr、Fe、Ni、Ti 和 V 元素的回归方程的决定系数(R^2)均大于 0.8,模型整体拟合度较高; Zn 元素模拟的决定系数(R^2)为 0.480,模型拟合度较低. 处理结果按归一法取舍各主因子的贡献率,即小于 1% 的值贡献很小忽略不计,仅保留大于 1% 的贡献率. 部分金属元素的 4 个主因子贡献率之和小于 100%,表明还有其他污染贡献存在,记作不确定因子,以 US 表示.

如表 7 所示,在乌海市,工业活动、煤炭燃烧、

表 7 重金属来源贡献率、模拟值与实际值比率(E/O)及相关系数(R^2)

Table 7 Source contribution and estimation to observation ratios (E/O) of heavy metals using factor analysis/multiple linear regression (R^2)

项目	贡献率/%				US/%	E/O	R^2
	工业活动	煤炭燃烧	交通尘	煤炭开采及运输扩散			
As	18.99	15.87	0.00	6.79	58.34	1.000	0.942
Cd	22.42	0.00	0.00	77.58	0.00	1.024	0.906
Pb	43.17	0.00	55.55	1.28	0.00	1.000	0.895
Cr	98.55	1.42	0.00	0.00	0.00	1.000	0.898
Fe	36.77	0.00	14.39	1.26	47.58	1.000	0.920
Ni	85.66	1.67	9.96	2.71	0.00	1.000	0.895
Ti	81.77	0.00	5.62	0.00	12.62	1.000	0.857
V	88.63	0.00	8.06	3.30	0.00	1.000	0.958
Zn	0.00	0.00	98.62	1.38	0.00	0.999	0.480

3 结论

(1) 乌海市春季降尘 18 种重金属中, As、Cd、Cu、Pb、Cr、Ni、Sb 和 Zn 元素含量分别为 408.78、1.97、27.40、38.93、45.97、25.41、2.71 和 277.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值均高于内蒙古土壤元素背景值. 且 As 和 Cd 元素超标率为 100%, 于露天矿区、矿外运煤专线均有浓度高值分布.

(2) 乌海市降尘各功能区的降尘元素含量基本无差异, 仅 Ba、Be、Cd、Co 和 Zn 元素在个别功能区存在显著差异, 且降尘元素在各区域富集等级基本呈现无变异性或小变异性. 表明乌海市在 5 个典型功能区具有相似的污染特征.

(3) 乌海市 As、Cd、Cr 和 Pb 元素综合污染指数分别为 3.332、2.622、1.369 和 0.523, 是当地降尘的显著污染因子. 其中 As 和 Cd 为乌海市首要污染元素.

(4) 乌海市大气降尘主要来源于工业排放、煤

煤炭开采及煤尘扩散分别贡献 18.99%、15.87% 和 6.79% 的 As 元素, 煤炭相关活动产生的 As 元素占 22.66%. 工业活动、交通尘、煤炭开采及运输扩散分别提供 36.77%、14.39% 和 1.26% 的 Fe 元素. 降尘中 58.34% 的 As 元素与 47.58% 的 Fe 元素存在未知来源. 工业活动产生了大气中 80% 以上的 Cr、Ni、Ti 和 V 元素, 交通尘中含有 9.96% 的 Ni、5.62% 的 Ti、8.06% 的 V, 12.62% 的 Ti 来源于其他未知污染活动. 交通尘提供了 55.55% 的 Pb 和 98.62% 的 Zn 元素, 工业活动提供了 43.17% 的 Pb 元素. Cd 元素主要来源于煤炭开采及运输, 煤炭开采及运输提供了降尘中 77.58% 的 Cd 元素, 工业活动提供剩下 22.42% 的 Cd 元素.

因子分析-多元线性回归结果表明, 乌海市主要重金属元素贡献率由大到小依次为工业活动、煤炭燃烧、交通尘、煤炭开采及运输扩散, 污染物来源复杂且贡献率不同. As、Fe 和 Ti 元素还存在未知来源.

炭燃烧、交通尘、煤炭开采及运输. 煤炭开采及运输、工业排放分别贡献降尘中 77.58% 和 22.42% 的 Cd 元素, 煤炭是 Cd 污染的主要来源; 工业排放、煤炭燃烧、煤炭开采及运输分别贡献 18.99%、15.87% 和 6.79% 的 As 元素, 降尘中 58.34% 的 As 元素来源未知.

参考文献:

- [1] Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, et al. The spatial characteristics and pollution levels of metals in urban street dust of Beijing, China[J]. Applied Geochemistry, 2013, 35: 88-98.
- [2] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4051-4059.
- [3] Xiong Q L, Zhao W J, Li D J, et al. Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4051-4059.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [4] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2881-2888.
Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics and source apportionment of metals in the dustfall of Quanzhou city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2881-2888.
- [5] 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 应用铅锶同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
Sun J W, Yu R L, Hu G R, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and tracing sources by Pb & Sr isotope in the soil profile of woodland in Quanzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
- [6] Urrutia-Goyes R, Hernandez N, Carrillo-Gamboa O, *et al.* Street dust from a heavily-populated and industrialized city: evaluation of spatial distribution, origins, pollution, ecological risks and human health repercussions [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 198-204.
- [7] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.
- [8] Ghanavati N, Nazarpour A, Watts M J. Status, source, ecological and health risk assessment of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Abadan, Iran[J]. *CATENA*, 2019, **177**: 246-259.
- [9] Chen R H, Wang B Q, Wang Z B, *et al.* The pollution character analysis and risk assessment for metals in dust and PM₁₀ around road from China[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2015, **28**(1): 44-56.
- [10] 王明仕, 曹景丽, 李晗, 等. 焦作市采暖期降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(5): 824-830.
Wang M S, Cao J L, Li H, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dust-fall in Jiaozuo City, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(5): 824-830.
- [11] Rahman M S, Khan M D H, Jolly Y N, *et al.* Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the Southeast Asian Megacity: Dhaka, Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1610-1622.
- [12] 姚喜军, 张宇, 吴全, 等. 鄂尔多斯市伊金霍洛旗煤矿区降尘特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, **31**(9): 81-86.
Yao X J, Zhang Y, Wu Q, *et al.* Study on characteristics of dustfall in Yi Jin Huo Luo mine area, Ordos City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(9): 81-86.
- [13] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦提, 等. 准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
Liu F, Tiyp T, Nurmamat I, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risk in soil around the coal industrial area of East Junggar Basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
- [14] 李芳, 李新举. 鲁西南煤矿区农田耕层重金属分布特征及污染评价[J]. *煤炭学报*, 2018, **43**(7): 1990-1998.
Li F, Li X J. Distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland tillage soil at coal mine area of the western-south Shandong Province [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, **43**(7): 1990-1998.
- [15] Andersen A, Hovmand M F, Johnsen I. Atmospheric heavy metal deposition in the Copenhagen area [J]. *Environmental Pollution*, 1978, **17**(2): 133-151.
- [16] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [17] 杨磊, 熊黑刚. 新疆准东煤田土壤重金属来源分析及风险评估[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.
- [18] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 36600-2018, Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of development land[S].
- [19] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Journal of Geology*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [22] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-467.
- [23] 范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法——以元江底泥中重金属污染评价为例[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3795-3803.
Fan X T, Jiang Y X, Cui B, *et al.* Selection of a reference element for enrichment factor: a case study on the pollution evaluation of heavy metals in the sediment of Yuan River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3795-3803.
- [24] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [25] 丁玉龙. 煤矿开采沉陷对四合木的影响与保护对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
Ding Y L. Coal mining subsidence impacts on *Tetraena mongolica* and its protection [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [26] 郝威铎. 煤矸石堆放对土壤、水体和植物的环境影响—案例研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
Hao W D. Environmental impacts of coal mine wastes stacking on the soil, waterbody and vegetation—case study [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [27] 陈宇云, 贾瑞, 杨胜利, 等. 建筑垃圾中镉和砷的释放特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(9): 50-55, 111.
Chen Y Y, Jia R, Yang S K, *et al.* Characterization of Cd and As released from construction and demolition wastes recycled in road construction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(9): 50-55, 111.
- [28] 王世豪, 张凯, 柴发合, 等. 株洲市大气降尘中元素特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3130-3138.
Wang S H, Zhang K, Chai F H, *et al.* Characteristics and sources of elements in atmospheric dust fall in Zhuzhou City, Central China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3130-3138.

- [29] 李蔚卿. 大气气溶胶污染化学基础[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010. 88-96.
Li W Q. Fundamentals of aerosol pollution chemistry [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010. 88-96.
- [30] Manno E, Varrica D, Dongarrò G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40** (30): 5929-5941.
- [31] Siegel F R. Environmental geochemistry of potentially toxic metals[M]. Berlin: Springer, 2002. 45-59.
- [32] 张银晓, 卢春颖, 张剑, 等. 民用燃煤排放细颗粒中金属元素排放特征及单颗粒分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38** (9): 3273-3279.
Zhang Y X, Lu C Y, Zhang J, *et al.* Emission characteristics and individual particle analysis of metals in fine particles emitted from residential coal burning[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(9): 3273-3279.
- [33] Grigoratos T, Martini G. Brake wear particle emissions; a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22** (4): 2491-2504.
- [34] 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 990-996.
Wang S B, Ji Y Q, Li S L, *et al.* Characteristics of elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in road dust fall during spring in Tianjin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 990-996.



CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)