

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

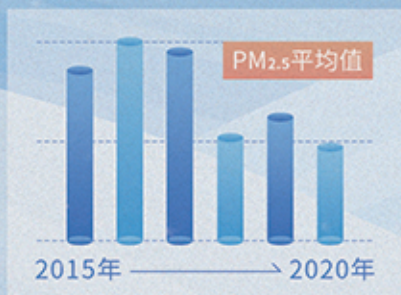
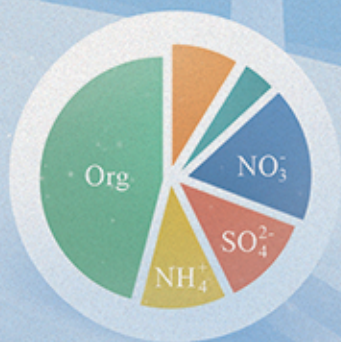
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志刚 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

滇中典型工矿业城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价

范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海

(国家地质实验测试中心, 中国地质调查局微区与元素形态重点实验室, 北京 100037)

摘要: 为研究滇中地区典型工矿业城市大气干湿沉降元素特征及健康风险, 选择安宁市 2019 年 6 月至 2020 年 7 月间采集的大气干湿沉降物为研究对象, 分别测定了干、湿沉降中 TN、F、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、P、As 和 Hg 这 11 个指标含量, 计算了大气年沉降通量, 并采用暴露风险模型评估了其对人体健康风险。结果表明: ① 大气干沉降物中除 Cr、Ni 和 As, 元素 F、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的含量平均值显著高于安宁市表层土壤元素含量, 其分别为 5.82、3.00、28.27、57.53、2.83 和 1.08 倍; 湿沉降物中 F 和 TN 平均含量超过地表水 V 类水标准值; ② TN 年沉降通量最高, 8 种重金属元素的年沉降通量从小到大依次为: $Hg < Ni < As < Cr < Cd < Cu < Pb < Zn$; 依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016) 要求, 除位于某化工厂附近的点位 DQ-11, 其余点位大气环境质量地球化学等级均为一等; ③ 手口摄入是大气重金属暴露的最主要途径, 且儿童的日均暴露剂量和非致癌健康风险远大于成人, 特别是研究区大气 As、Cd 和 Pb 对儿童会产生一定的非致癌性健康风险; 致癌重金属中 Cr、Cd、As 和 Ni 致癌风险指数低于 10^{-6} , 不存在致癌性风险或风险较小。因此需加强对区内工矿企业大气重金属排放的严格管控。

关键词: 大气干湿沉降; 重金属; 年沉降通量; 健康风险评价; 安宁市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3923-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112161

Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan

FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, GUO Wei, SUN Dong-yang, LIU Cheng-hai

(Key Laboratory of Micro- and Element Forms Analysis of China Geological Survey, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to study the characteristics of atmospheric dry and wet deposition elements and the health risks of typical industrial and mining cities in central Yunnan, the atmospheric dry and wet depositions collected from June 2019 to July 2020 in Anning city were selected as the research object and measured. The contents of the 11 indexes TN, F, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, P, As, and Hg were determined, the annual atmospheric deposition flux was calculated, and the exposure risk model was used to assess the risk to human health. The results showed that: ① In addition to Cr, Ni, and As in the atmospheric dry sediments, the average contents of the elements F, Cu, Zn, Cd, Pb, and Hg were significantly higher than those of the surface soil in Anning City, which were 5.82, 3.00, 28.27, 57.53, 2.83, and 1.08 times higher, respectively. The average contents of F and total nitrogen in wet deposition exceeded the standard value of surface water V-class water. ② The annual atmospheric deposition flux of total nitrogen was the highest, and the annual deposition flux of eight heavy metal elements from smallest to largest was $Hg < Ni < As < Cr < Cd < Cu < Pb < Zn$. According to DZ/T 0295-2016, except for the point DQ-11 located near a chemical industrial plant, the atmospheric environmental quality and geochemical grades of other points were all first-class. ③ Hand-to-mouth ingestion was the most important avenue of exposure to atmospheric heavy metals, and the exposure dose and non-carcinogenic health risks to children were far greater than those to adults; the atmospheric As, Cd, and Pb in the study area especially caused certain non-carcinogenic health risks to children. Cr, Cd, As, and Ni carcinogenic risk indexes were lower than 10^{-6} , thus, there was little or no carcinogenic risk. Therefore, it is necessary to strengthen the strict control of atmospheric heavy metal emissions from industrial and mining enterprises in this region.

Key words: atmospheric dry and wet deposition; heavy metal; annual atmospheric deposition flux; health risk assessment; Anning

大气沉降是指大气中的污染物通过一定的途径被沉降于地面或水体的过程, 分为干沉降和湿沉降^[1,2]。污染物通过化石燃料燃烧、工业烟气、矿山开采粉尘和汽车尾气等途径进入大气, 吸附在气溶胶上^[3], 经过在大气中扩散运输最终以干湿沉降的方式返回地表^[4]。大气沉降一方面被认为是去除大气污染物的主要过程, 另一方面大气沉降进入土壤或水体, 对生态系统安全造成风险并通过食物链威胁人体健康^[5]。近年来, 大气沉降被认为是大范围内特别是农耕区土壤重金属的重要来源, 并且呈现

出逐年累加的趋势^[6,7]。

随着我国城市化进程、工业矿业经济的快速发展, 大气质量和大气沉降重金属等污染物产生的生态风险越来越受到关注。例如, 熊秋林等^[8]、张夏等^[5]和蔡春楠等^[9]分别研究了北京、重庆和郑州等

收稿日期: 2021-12-17; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190589); 国家重点研发计划项目(2019YFC1805005); 国家地质实验测试中心大型科研仪器开放共享后补助资金项目(GXBZ-2021-01)

作者简介: 范晨子(1982~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气污染与人体健康, E-mail: czfan2013@163.com

人口密集城市中大气降尘成分特征、对土壤重金属的贡献和来源解析;陈强等^[10]研究了广东大宝山矿区附近大气沉降对农田土壤镉元素的输入通量;Liu 等^[11]研究了一个铅酸电池工厂附近农田系统中重金属污染的生态风险,结果表明 Cd、Pb 和 Zn 进入土壤主要是通过大气沉降路径.此外,大气中氮、磷和氟的来源、沉降特征和对生态环境的影响也得到了广泛的研究.大气氮、磷等营养元素沉降对维持陆地生态系统中的植物生产力具有积极的作用^[12,13],但是已有研究也表明过量的氮、磷沉降促进了水体中蓝藻等微生物的生长,加剧了滇池^[14,15]、洞庭湖^[16,17]和太湖^[18,19]等湖泊以及长江^[20]等河流的富营养化问题.大气中氟的人为来源主要产生于冶金厂、陶器厂、磷肥厂和玻璃厂的工业气溶胶,在我国氟污染严重的工业城市,空气中氟的体积分数可达到 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.10 \times 10^{-6}$,氟通过酸雨形式沉降到地面对农作物和人体健康产生较大毒性^[21,22].

安宁市位于云南昆明西南 32 km 处,属中亚热带低纬度高海拔地区,是滇中地区重要的工矿业城市.安宁季节温差不大,干湿分明,境内多刮西南风.境内地势起伏不大,盆岭相间,有八街、连然和禄脍这 3 个山间盆地,其余为山区半山区.安宁是昆明通往滇西 8 个地州,连接南亚和东南亚的交通重镇,既处于昆明市、滇中新区和滇中经济圈的中心位置,又属于国家“一带一路”战略东盟自由贸易区的重要节点^[23].安宁以建设滇中经济圈产业中心城市为总目标,形成了以水资源保护及生态农业区、工业园区、城市中心区和螳螂川旅游度假和景观带的“三区一带”为体系的城市发展格局^[24].安宁矿产资源丰富,包括有磷矿、盐矿、铁矿、石灰石和白云石等诸多矿藏,工业企业涵盖农业、矿业、钢铁、石油化工、能源和材料等领域^[25].随着磷矿开采和磷化工、钢铁和石油化工企业陆续建设投产,区内大气污染风险日益增大,因此研究区内大气重金属、氮、磷和氟元素的沉降化学、沉降通量特征和健康风险评价对于工矿业城市环境治理和建设规划有着重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据安宁地形地貌特征、城市功能区划分和工业矿业分布情况布设大气沉降取样装置,全区共布置取样点 13 个(图 1).本次研究采用湿法接收大气干湿沉降,选择口径直径约为 21 cm,高为 60 cm 左右的白色聚乙烯塑料桶作为大气沉降收集缸,使

用前经 10% HCl 溶液浸泡 24 h,用纯净水洗净之后晾干使用.放置在距离地面 5 ~ 12 m 左右的屋顶平台,四周无树木、建筑物等高大遮挡物.为避免平台扬尘影响,沉降收集缸使用支撑物垫高,并向桶内加入 1 ~ 2 L 纯净水避免“二次起尘”.在桶口处加套尼龙网罩盖防止扰动或异物进入.装置取样时间为 2019 年 6 月 20 日至 2020 年 7 月 17 日,共计 392 d.

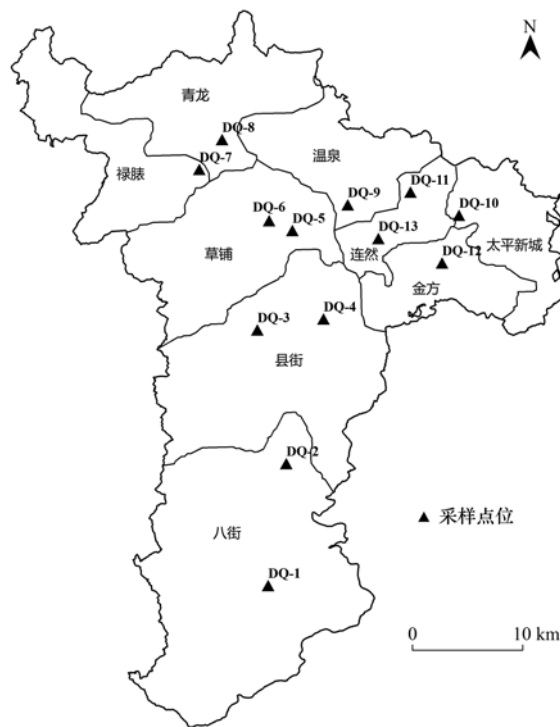


图 1 安宁大气干湿沉降物布设点位示意

Fig. 1 Sampling sites for atmospheric wet and dry deposition

1.2 样品处理和检测

受大气沉降物性质的影响,样品回收采用分别对上清液和下部沉淀物进行回收和分析的方法.先将回收的沉降缸静置并对上部溶液澄清后用虹吸法转移上清液,记录转移的上清液体积并对上清液进行取样分析.剩余的沉淀物和少量悬浊液进行转移、过滤、烘干、称重和分析.样品分析测试由云南省地质矿产勘查开发局中心实验室完成.固体和上清液样品分别分析总氮(TN)、氟(F)、铬(Cr)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)、磷(P)、砷(As)和汞(Hg)这 11 个指标,固体样品称干重,液体样品测 pH 值.干沉降物分析方法主要采用区域地球化学样品分析方法中元素测定方法,N 测定采用凯氏蒸馏-容量法(DZ/T 0279.29-2016),F 测定采用离子选择电极法(DZ/T 0279.21-2016),As 测定采用氢化物发生-原子荧光光谱法(DZ/T 0279.13-2016),Hg 测定采用蒸气发生-冷原子荧光光谱法(DZ/T 0279.17-2016),P、Cr 和 Zn 测定采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(DZ/T

0279.2-2016),Cd 测定采用电感耦合等离子体质谱法(DZ/T 0279.5-2016). 湿沉降分析方法主要采用水质相关方法,pH 值的测定采用玻璃电极法(GB/T 6920-1986),N 测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法(HJ 636-2012),P 测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989),F 测定采用离子色谱法(HJ 84-2016),Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 采用电感耦合等离子体质谱法(HJ 84-2016),As 和 Hg 的测定采用

原子荧光法(HJ 694-2014). 样品测试的质量监控按照《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD 2005-03)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)进行. 大气干沉降物和湿沉降物元素分析方法检出限见表 1,各元素方法测定 12 次的精密度 RSD 在 0.69%~9.69% 之间,准确度 $\Delta \lg \bar{C}$ 在 -0.031~0.043 之间,干湿沉降物准确度和精密度控制比例均为 9.38%,合格率均为 100%.

表 1 大气干沉降物和湿沉降物分析方法检出限¹⁾

项目	干沉降物/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		湿沉降物/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	要求检出限	方法检出限	要求检出限	方法检出限
As	1	0.27	0.000 4	0.000 2
Cd	0.03	0.02	0.05	0.01
Cu	1	0.89	0.05	0.005
Cr	5	0.33	0.004	0.004
N	20	18	—	0.05
F	100	85	0.05	0.02
Hg	0.000 5	0.000 4	0.000 4	0.000 4
Pb	2	0.96	0.01	0.005
Ni	2	0.439	0.03	0.003
Zn	4	2.15	0.05	0.005
P	10	2.38	—	0.01
pH	—	—	0.1	0.01

1) “—”表示无相关数据

1.3 年沉降通量数据处理

根据大气干沉降和湿沉降样品的量计算年沉降通量,以此来衡量大气干湿沉降对土壤和水体环境质量的影响程度^[26,27]. 大气干湿沉降通量计算公式如下:

$$F = \frac{Q_i}{S} = \frac{Q_s + Q_i}{S} = \frac{Vc_s + MC_i}{S} \quad (1)$$

式中, F 为年沉降通量 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]; Q_i 为年总沉降量 ($\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$); S 为采样面积 (m^2); Q_s 为湿沉降年沉降量 (mg); Q_i 为干沉降年沉降量 (mg); V 为溶液总体积 (m^3); c_s 为溶液浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$); M 为干沉降总量 (kg); C_i 为干样部分样品元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

1.4 大气沉降健康风险评价

大气沉降物主要通过 3 种途径进入人体: 经手口途径摄入、经呼吸途径摄入和经皮肤直接接触途径摄入,其中存在的微量重金属等致癌风险物,会对人体健康产生危害^[28]. 本研究中的 8 种重金属均具有非致癌风险,此外 As、Cr、Ni 和 Cd 这 4 种还具有致癌风险^[29,30]. 采用暴露风险评估模型研究人体在大气环境中通过手口摄入、呼吸作用和皮肤接触这 3 种方式的日平均暴露量 (ADD)、致癌风险 (CR) 和非致癌风险 (HI)^[31],具体计算公式如下.

手口途径日均暴露量 (ADD_{ing}):

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{c \times \text{IngR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

呼吸途径日均暴露量 (ADD_{inh}):

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{c \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

皮肤直接接触途径日均暴露量 (ADD_{derm}):

$$\text{ADD}_{\text{derm}} = \frac{c \times \text{SA} \times \text{CF} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{derm} 分别为手口、呼吸和皮肤这 3 种途径的重金属日均暴露量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]. 式中其余参数的含义见表 2.

致癌重金属 As、Cr、Cd 和 Ni 人体终生暴露日均吸入剂量的计算公式如下:

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = \frac{c \times \text{EF}}{\text{AT}_{\text{致癌}} \times \text{PEF}} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (5)$$

式中, LADD_{inh} 为基于人体生命周期的呼吸途径终生日平均暴露量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; $\text{InhR}_{\text{child}}$ 和 $\text{InhR}_{\text{adult}}$ 分别为儿童和成人的吸入率; ED_{child} 和 ED_{adult} 分别为儿童和成人的暴露周期; BW_{child} 和 BW_{adult} 分别为儿童和成人的平均体重; $\text{AT}_{\text{致癌}}$ 为致癌物的平均暴露时间,具体数值见表 2.

表 2 健康风险评价模型参数值¹⁾

Table 2 Definition and value of health risk assessment parameters

项目	参数	定义	单位	数值	文献
暴露参数	c	重金属含量	mg·kg ⁻¹	平均值 95% 置信度区间的上限	本研究
	EF	暴露频率	d·a ⁻¹	180	[32,33]
	ED	暴露周期	a	24(A)6(C)	[32~34]
	AT	平均暴露时间	d	365×ED(非致癌); 365×70(致癌)	[32~34]
	BW	平均体质量	kg	70(A)15(C)	[32~35]
	CF	转化系数	无量纲	1×10 ⁻⁶	[32,33,36]
手口摄入	IngR	手口摄取率	mg·d ⁻¹	100(A)200(C)	[32~34]
呼吸吸入	InhR	吸入率	m ³ ·d ⁻¹	20(A)7.63(C)	[34,36]
	PEF	颗粒物排放因子	m ³ ·kg ⁻¹	1.36×10 ⁹	[32~34]
皮肤接触	SL	皮肤黏着度	mg·cm ⁻²	0.07(A)0.20(C)	[34,35]
	ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001	[32~34]
	SA	暴露皮肤表面积	cm ²	2140(A)1150(C)	[32,33]

1) A 表示成人,C 表示儿童

健康风险可根据重金属元素的致癌性分为非致癌性风险和致癌性风险^[31],其计算公式如下:

非致癌性风险:

$$HI = \sum HQ_i = \sum \left(\frac{ADD}{RfD} \right)_i \quad (6)$$

式中,HI 为非致癌性风险指数;HQ 为非致癌性风险商;RfD 为非致癌性重金属不同暴露途径的参考剂量值[mg·(kg·d)⁻¹];i 为某一种重金属.当 HI ≤1 时,不存在健康风险或风险较小,当 1 < HI ≤10 时,存在一定的非致癌性风险,当 HI >10 时,表明存在慢性毒性^[37].

致癌性风险:

$$CR = \sum Risk_i = \sum (LADD \times SF)_i \quad (7)$$

式中,CR 为致癌性风险指数;SF 为致癌风险斜率系数;LADD 为不同途径终生日平均暴露量[mg·(kg·d)⁻¹],由于目前只有呼吸吸入致癌斜率系数参考值,暂未考虑手口摄入和皮肤接触这两种摄入途径导致的致癌风险;Risk 为人体致癌风险,Risk = LADD × SF;i 为某一种致癌重金属.当 CR ≤10⁻⁶时,认为不存在致癌性风险或风险较小;当 10⁻⁶ < CR ≤10⁻⁴时,认为是可以接受的正常自然致癌风险;当 CR >10⁻⁴时,认为存在较高的致癌风险^[26].不同暴露途径的 RfD 和 SF 见表 3.

表 3 大气重金属不同暴露途径 RfD 和 SF¹⁾

Table 3 Definition and value of reference dose for non-carcinogenic metals (RfD) and carcinogenic slope factors (SF)

元素	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹			SF(呼吸吸入) /kg·d·mg ⁻¹
	手口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	
As	3×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴	15.1
Cr	3×10 ⁻³	6×10 ⁻⁵	2.86×10 ⁻⁵	42
Cd	1×10 ⁻³	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻³	6.30
Ni	2×10 ⁻²	5.4×10 ⁻³	2.06×10 ⁻²	0.84
Cu	4×10 ⁻²	1.2×10 ⁻²	4×10 ⁻²	—
Zn	3×10 ⁻¹	6×10 ⁻²	3×10 ⁻¹	—
Pb	3.5×10 ⁻³	5.25×10 ⁻⁴	3.5×10 ⁻³	—
Hg	4×10 ⁻³	—	—	—

1) 数据来自文献[37,38];“—”表示无相关数据,下同

2 结果与讨论

2.1 安宁大气干湿沉降物元素含量特征

表 4 和表 5 中分别记录了 2019~2020 年度安宁地区大气干、湿沉降中的重金属和 TN、F 和 P 含量的平均值、标准差和变异系数(其中编号 DQ-10 干沉降物样品量少,TN 结果未报出).区内土壤类型主要有红土、紫色土、水稻土和黄棕土,由于各类型土壤母质存在一定的差别,大气沉降元素含量

会受到土壤基准值的一定程度影响.安宁大气干沉降物中除 Cr、Ni 和 As,元素 F、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的含量平均值分别为本课题组同年调查的安宁市表层土壤元素含量的 5.82、3.00、28.27、57.53、2.83 和 1.08 倍(图 2),尤其在 DQ-11 点位 F、Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、P 和 As 含量异常高,表明区内大气沉降更多的是受到较为强烈的人为活动影响.根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),V 类水主要适用于农业用水及一般景观要求的水域.将

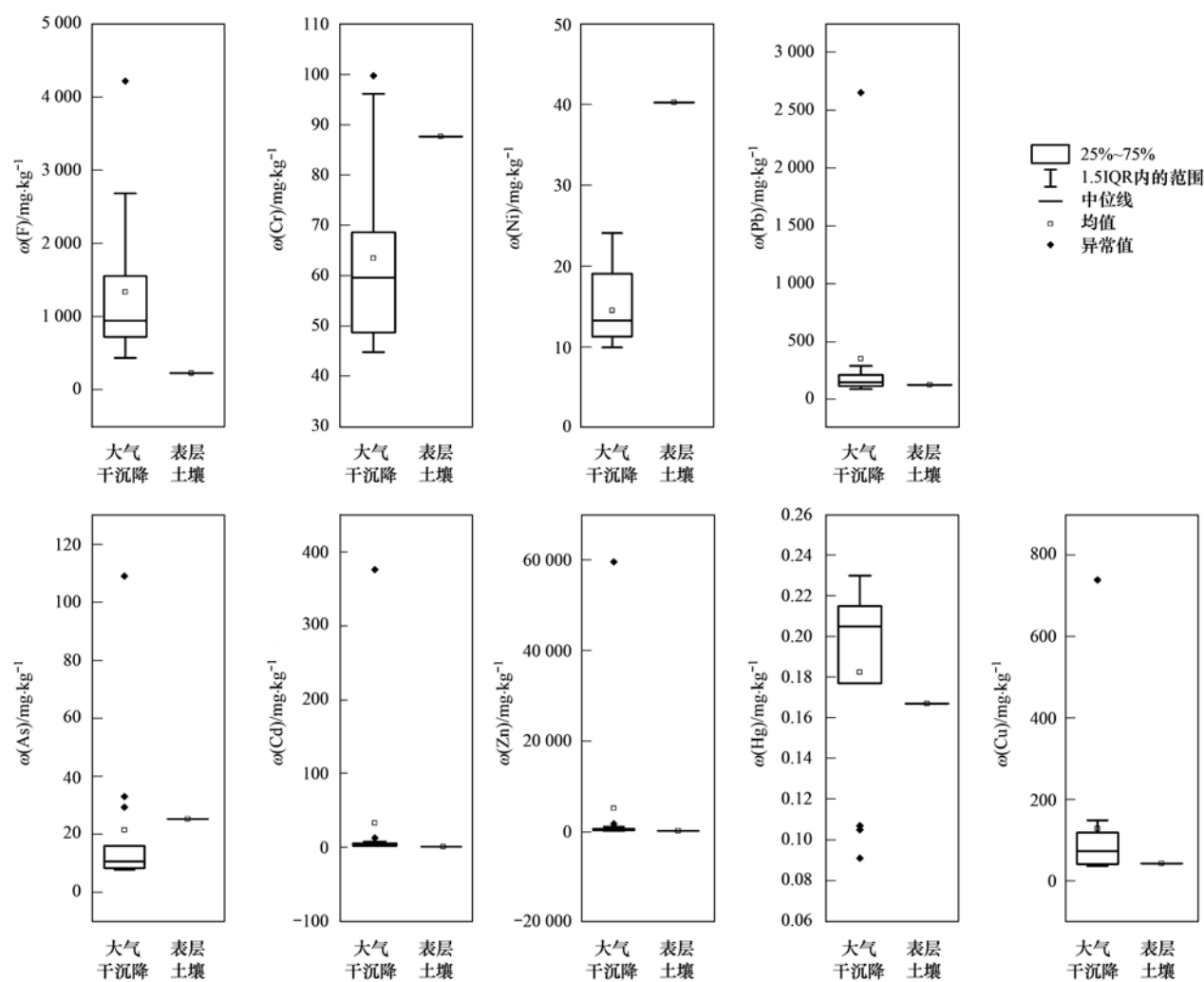


图2 安宁区内 F、Cr、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Zn 和 Hg 元素大气干沉降含量与表层土壤均值对比

Fig. 2 Comparison of average concentrations of F, Cr, Cu, Ni, Pb, As, Cd, Zn, and Hg elements in atmospheric dry depositions and surface soil in Anning

地表水的 V 类标准与湿沉降元素含量进行对比, F 和 TN 平均含量超过地表水 V 类水标准值, 其余元素含量均在 V 类水限值范围内. 尽管湿沉降对于表层土壤重量的影响微乎其微, 但是湿沉降对于土壤中重金属等多种元素的累积是正向的, 是土壤中元素累积的主要来源之一.

根据 1995 ~ 2015 年间我国大气降尘中重金属统计数据^[3], $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的平均值分别为 (107.41 ± 137.82) 、 (738.61 ± 1294.1) 、 (22.09 ± 27.78) 、 (0.34 ± 0.64) 、 (276.00 ± 826.03) 、 (101.00 ± 605.30) 、 (3.29 ± 7.05) 和 $(46.70 \pm 173.00) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 大气降水中的 $\rho(\text{Cu})$ 、 $\rho(\text{Zn})$ 、 $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Pb})$ 、 $\rho(\text{Cr})$ 、 $\rho(\text{Hg})$ 、 $\rho(\text{Cd})$ 和 $\rho(\text{Ni})$ 的平均值分别为 (5.72 ± 19.66) 、 (47.43 ± 95.57) 、 (10.11 ± 219.98) 、 (1.92 ± 12.91) 、 (2.21 ± 14.76) 、 (0.15 ± 37.19) 、 (0.55 ± 1.55) 和 $(2.40 \pm 3.09) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 安宁干沉降物中重金属含量除 Cr 和

Ni 含量相对较低, 其余元素含量水平与全国统计水平相当; 湿沉降物中重金属含量较全国大气降水统计值相对低.

2.2 安宁大气干湿沉降元素年沉降通量

根据公式(1) 计算安宁地区 2019 ~ 2020 年度大气干湿元素年沉降通量如表 6 所示. 安宁大气干湿沉降分析元素中 TN 的年沉降通量最高, 平均值为 $2434 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 中位值为 $2711 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 在不受人为干扰的情况下, 大气氮素的沉降通量范围为 $18 \sim 32 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[41], 安宁市大气氮沉降通量远超过该范围, 同时远超过我国湖泊营养盐氮沉降临界负荷 $100 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[42], 说明安宁市大气氮沉降受人类活动影响较大并且可能引起水体的富营养化. P 和 F 的年通沉降通量也相对高, P 的年沉降通量平均值为 $591 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 中位值为 $341 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; F 的年沉降通量平均值为 $486 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 中位值为 $293 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 8 种重金属元素的年沉降通量从小

表 4 安宁大气干沉降物元素含量特征统计

Table 4 Statistics for elemental concentrations in dry depositions of Anning

编号	ω (TN) /%	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$									
		F	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	As	Hg
DQ-1	1.45	438	48.7	9.97	38.0	620	1.52	119	1 484	7.97	0.105
DQ-2	1.69	576	47.7	10.2	37.0	261	1.36	121	1 834	10.6	0.180
DQ-3	2.20	1 026	44.8	11.4	46.9	351	1.47	89.0	3 957	7.69	0.107
DQ-4	1.82	863	68.4	13.6	41.3	221	1.24	102	4 163	8.00	0.091
DQ-5	2.08	1 610	68.6	24.1	113	1 118	3.50	211	6 136	16.0	0.213
DQ-6	1.94	2 688	62.9	19.3	119	528	3.44	206	11 700	14.7	0.205
DQ-7	2.94	1 144	57.2	14.3	149	565	3.98	113	3 735	29.3	0.230
DQ-8	3.08	948	59.6	11.3	73.7	675	5.22	147	3 010	9.89	0.229
DQ-9	1.46	898	74.2	19.2	140	1 757	12.3	289	3 526	33.0	0.215
DQ-10	—	727	46.1	11.0	47.6	674	7.75	171	2 725	8.26	0.209
DQ-11	0.59	4 221	99.7	19.1	739	59 529	376	2 652	5 393	109	0.221
DQ-12	1.77	727	96.1	13.3	83.5	689	4.31	241	2 694	14.6	0.190
DQ-13	2.54	1 557	50.7	12.1	41.1	298	1.72	94.7	6 041	9.71	0.177
最大值	3.08	4 221	99.7	24.1	739	59 529	376	2 652	11 700	109	0.230
最小值	0.59	438	44.8	9.97	37.0	221	1.24	89.0	1 484	7.69	0.091
平均值	1.96	1 340	63.4	14.5	128	5176	32.6	350	4 338	21.4	0.182
中位值	1.88	948	59.6	13.3	73.7	620	3.50	147	3 735	10.6	0.205
标准偏差	0.68	1 045	18.0	4.44	188	16 336	103	694	2 648	27.5	0.049
变异系数	1.45	0.78	0.28	0.31	1.46	3.16	3.17	1.98	0.61	1.28	0.270
安宁市土壤均值	—	230	87.6	40.2	42.8	183	0.567	124	—	25.3	0.167
云南省土壤背景值 ^[39]	—	592	65.2	42.5	46.3	89.7	0.218	40.6	—	18.4	0.058
干沉降/土壤	—	5.82	0.72	0.36	3.00	28.27	57.53	2.83	—	0.85	1.08

表 5 安宁大气湿沉降物元素含量特征统计

Table 5 Statistics for elemental concentrations in wet depositions of Anning

编号	pH 值 (无量纲)	$\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$										
		TN	P	F	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
DQ-1	7.80	7.79	0.018	6.965	0.003	0.004	0.010	0.028	0.000 1	0.003	<0.001	0.000 1
DQ-2	7.74	3.34	0.018	1.991	0.002	0.003	0.005	0.205	0.002 0	0.002	<0.001	<0.000 1
DQ-3	7.56	4.73	0.040	1.896	0.002	0.001	0.007	0.010	0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-4	7.52	1.59	0.010	1.098	0.003	0.001	0.003	0.008	<0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-5	7.37	0.91	0.011	1.249	<0.001	<0.001	0.003	0.008	<0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-6	7.11	1.37	0.017	2.356	<0.001	<0.001	0.004	0.005	<0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-7	6.91	1.82	0.017	3.880	<0.001	<0.001	0.004	0.015	0.000 1	<0.001	0.005	0.000 1
DQ-8	6.94	2.72	0.020	4.195	<0.001	<0.001	0.004	0.025	<0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-9	7.53	2.11	0.028	2.190	<0.001	0.002	0.009	0.005	<0.000 1	<0.001	<0.001	0.000 1
DQ-10	7.08	0.69	0.027	0.408	<0.001	<0.001	0.001	0.034	0.000 2	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-11	6.58	1.04	0.029	4.085	<0.001	0.003	0.020	8.839	0.090 6	0.005	0.003	0.000 1
DQ-12	7.20	1.39	0.011	1.383	<0.001	0.001	0.005	0.018	0.000 2	<0.001	<0.001	<0.000 1
DQ-13	7.30	3.45	0.018	1.972	<0.001	0.001	0.006	0.023	0.000 2	0.001	<0.001	0.000 1
最大值	7.80	7.79	0.040	6.965	0.003	0.004	0.020	8.839	0.090 6	0.005	0.005	0.000 1
最小值	6.58	0.69	0.010	0.408	<0.001	<0.001	0.001	0.005	<0.000 01	<0.001	<0.001	<0.000 1
平均值	7.28	2.53	0.020	2.590	0.001	0.001	0.006	0.709	0.007 2	0.001	0.001	<0.000 1
中位值	7.30	1.82	0.018	1.991	<0.001	<0.001	0.005	0.018	<0.000 1	<0.001	<0.001	<0.000 1
标准偏差	0.35	1.97	0.009	1.763	0.001	0.001	0.005	2.443	0.025 1	0.002	0.002	0.000 1
变异系数	0.05	0.777	0.423	0.681	1.635	1.027	0.770	3.445	3.484	1.839	2.521	1.317
V 类地表水 ^[40]	6~9	2	0.4	1.5	—	—	1	2	0.01	0.1	0.1	0.001

到大依次为: $\text{Hg} < \text{Ni} < \text{As} < \text{Cr} < \text{Cd} < \text{Cu} < \text{Pb} < \text{Zn}$, 其中 Zn 的年沉降通量最高, 平均值可达 $1968 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 中位值为 $49.5 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

图 3 为安宁市域功能布局与重金属大气干湿沉降元素年通量分布. 从中可以看出总体来说位于城市中心区和工业园区区域的样点沉降通量较水资源保

护与生态农业区域大. 点位 DQ-1 位于安宁南部车木河水库水源保护地, 周围植被茂密, 生态环境较好, 年沉降通量相对于其他点位显著偏低, 说明该点位处空气质量相对最好. 点位 DQ-3 位于安宁县街磷矿主要采区附近, 重金属元素年沉降通量不高, F 和 P 年沉降通量也处于中等水平, 说明磷矿采区附

近总体空气质量良好. 点位 DQ-11 位于在某化工厂周边, Zn、Cd、Pb、Cu、Cr 和 As 年沉降通量均高于其他区域 1~3 个数量级不等, 具有显著污染特征. 依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016) 要求, 大气干湿沉降物中 Hg 和 Cd 的年沉降通量限制值分别为 $0.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 安宁地区 13 件大气干湿沉降样品计算结果表明, 除了点位 DQ-11 Cd 年通量高达 161

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之外, 其余点位 Cd、Hg 年沉降通量值低于限制值, 环境质量地球化学等级均为一等. 与已报道的我国其他地区大气沉降特征比较, 安宁区内除 Cr、Ni 以外, 其他重金属沉降通量相对北京^[4,43]、重庆^[5]和天津^[26]等城市区域偏高; TN 沉降通量比昆明东郊^[44]区域高, 与北京^[45]和大连^[46]等区域较为接近; P 沉降通量与鲁南平原区^[47]和太湖^[48]区域接近.

表 6 安宁地区大气干湿沉降元素通量统计及比较¹⁾/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$

编号	TN	F	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	As	Hg
DQ-1	802	74.0	2.53	0.538	2.03	32.0	0.079	6.12	76.3	0.409	0.006 1
DQ-2	2 751	180	7.41	1.70	5.90	49.5	0.301	18.7	283	1.630	0.027 7
DQ-3	2 141	190	3.96	1.03	4.39	30.6	0.131	7.63	341	0.659	0.009 2
DQ-4	2 798	289	10.0	2.10	6.27	32.2	0.173	14.3	586	1.12	0.012 8
DQ-5	2 238	458	6.66	2.34	11.6	110	0.340	20.5	598	1.56	0.020 7
DQ-6	2 931	843	8.60	2.64	17.1	73.2	0.471	28.1	1 604	2.02	0.028 1
DQ-7	2 671	549	4.78	1.20	13.0	48.9	0.349	9.46	314	3.06	0.030 9
DQ-8	2 796	495	4.88	0.923	6.42	57.9	0.428	12.0	249	0.811	0.018 8
DQ-9	1 250	293	5.23	1.59	10.8	124	0.867	20.3	251	2.32	0.025 6
DQ-10	—	119	1.50	0.358	1.88	29.7	0.299	5.57	95.0	0.27	0.006 8
DQ-11	2 473	2 179	39.8	8.00	298	24 834	161	1 059	2 156	43.8	0.100 1
DQ-12	3 488	375	17.6	2.63	16.1	130	0.819	44.1	496	2.67	0.034 7
DQ-13	2 865	275	5.33	1.35	4.66	32.6	0.190	10.0	636	1.02	0.024 2
最大值	3 488	2 179	39.8	8.00	298	24 834	161	1 059	2 156	43.8	0.100 1
最小值	802	74.0	1.50	0.358	1.88	29.7	0.079	5.57	76.3	0.269	0.006 1
平均值	2 434	486	9.10	2.03	30.6	1 968	12.7	96.6	591	4.72	0.026 6
中位值	2 711	293	5.33	1.59	6.42	49.5	0.340	14.3	341	1.55	0.024 2
标准偏差	748	549	10.1	1.94	80.4	6 870	44.6	289	610	11.8	0.024 0
变异系数	0.307	1.13	1.11	0.957	2.63	3.49	3.50	2.99	1.03	2.50	0.902
北京(2007 年) ^[43]	—	—	7.29	3.47	5.87	33.08	0.24	11.13	—	5.26	—
北京(2014~2015 年) ^[4]	—	—	—	—	3.03	24.5	0.15	—	—	1.24	—
重庆(2017~2018 年) ^[5]	—	—	8.04	2.41	—	—	0.39	10.41	—	—	—
天津北部(2014~2015 年) ^[26]	—	—	6.10	3.17	5.85	37.80	0.21	15.58	—	0.69	0.016
鲁西南平原区(2011~2012 年) ^[47]	—	—	26.93	15.47	19.68	127	0.71	31.82	310	2.75	0.032
太湖(2018 年) ^[48]	7 702	—	—	—	—	—	—	—	333	—	—
北京密云水库(2014~2015 年) ^[45]	2 521	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
昆明东郊(2012~2013 年) ^[44]	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
大连(2009~2010 年) ^[46]	3 200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.3 安宁大气沉降人群暴露剂量和健康风险评价

根据大气干沉降重金属不同暴露途径剂量的计算公式可以得到表 7, 结果表明儿童和成人 3 种途径非致癌风险日均暴露量从大到小为: $\text{ADD}_{\text{ing}} > \text{ADD}_{\text{derm}} > \text{ADD}_{\text{inh}}$, 手口摄入是大气沉降重金属进入人体最主要的途径, 并且 3 种暴露途径下的暴露剂量儿童均大于成人. 8 种重金属中, 非致癌重金属日均暴露剂量排序为: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Hg}$; 致癌重金属呼吸途径终生日平均暴露量排序为: $\text{Cd} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni}$.

表 8 为研究区不同途径大气沉降健康风险评价指数. 8 种重金属中 As、Cd 和 Pb 对儿童产生的非致癌风险指数 HI 分别为 1.65、1.61 和 3.23, HI 值

位于 1 到 10 之间, 说明 As、Cd 和 Pb 对儿童会产生一定的非致癌性健康风险; 其余重金属产生的 HQ 和 HI 均 < 1 , 说明不存在非致癌健康风险. 在 3 种暴露途径下的非致癌风险指数儿童均大于成人, 高达 10~20 倍. 8 种重金属中, 儿童和成人非致癌风险指数排序均为: $\text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Hg}$, 其中 Hg 由于缺少呼吸吸入和皮肤接触 RfD 参考值, 计算的 HI_{Hg} 可能会比实际情况偏低. 4 种重金属的致癌风险指数排序为: $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Ni}$, 4 种重金属致癌风险指数 CR 均低于 10^{-6} , 认为不存在致癌性风险或风险较小. 由于目前在该健康风险评价模型中只有呼吸吸入致癌斜率系数参考值, 暂未考虑到手口摄入和皮肤接触这两种摄入途径导致

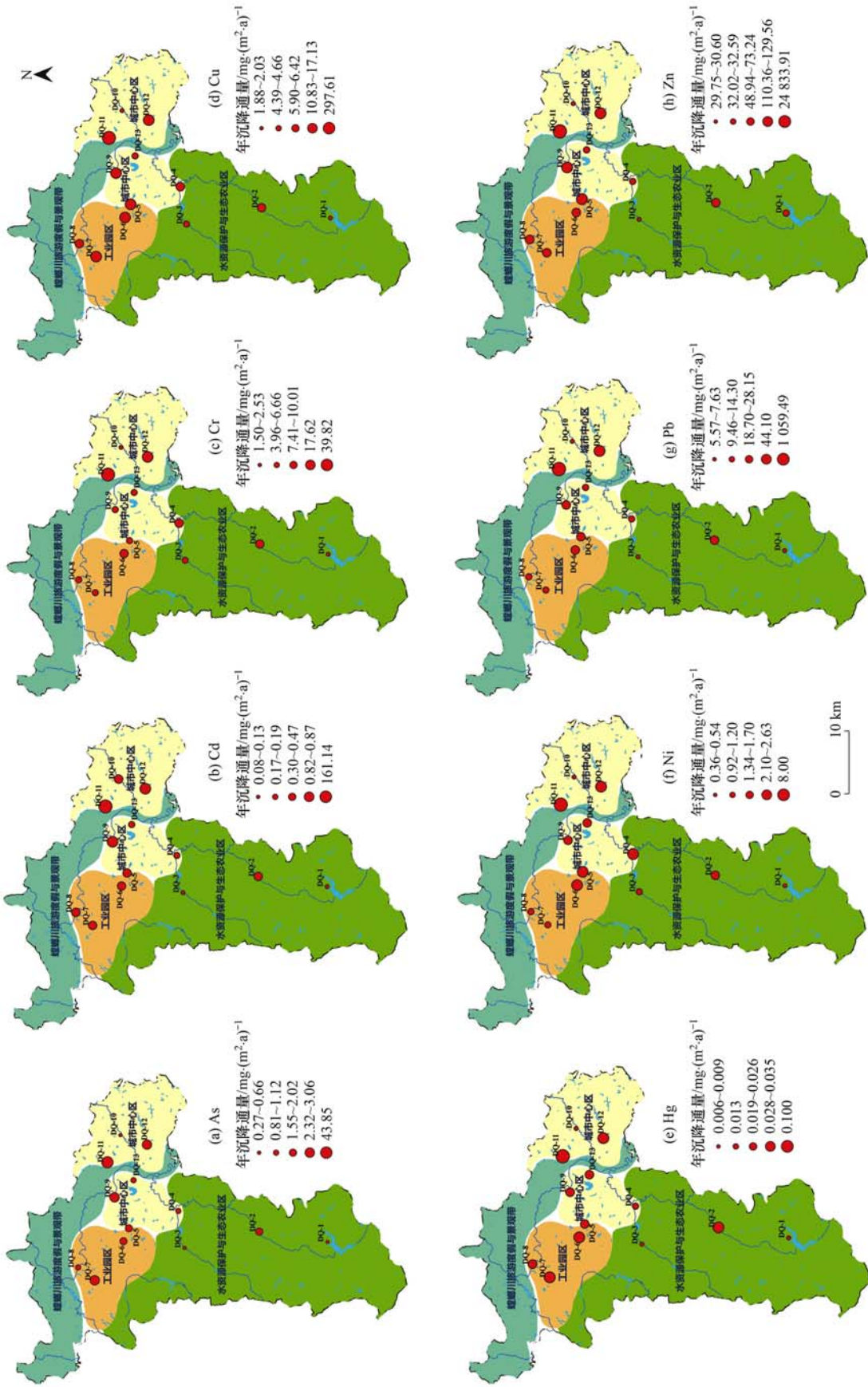


图 3 安宁市域功能布局与重金属大气干湿沉降元素年通量分布

的致癌风险,因此安宁地区大气重金属实际的致癌风险可能比本研究评估的致癌风险会偏高. 大气中铅、砷等重金属的排放主要来自于化石燃料燃烧、有色金属冶炼过程排放和汽车尾气排放等过程^[49,50]. 这些重金属污染物的长期暴露,易导致人体各组织器官的癌变,引发心血管疾病和造成肝脏、

生殖系统和神经系统等组织器官的病变,而儿童更是这些污染的敏感人群^[51,52]. 因此需加强对区内工矿企业大气重金属排放的严格管控,严格执行大气污染物有组织排放浓度限值和企业边界浓度限值的规定,实现对企业重金属污染的有效控制与公众健康的保护.

表 7 安宁地区大气干沉降重金属儿童与成人不同途径暴露剂量

Table 7 Children and adults exposure doses of research area in bulk air depositions

暴露途径 /mg·(kg·d) ⁻¹		As	Cr	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
ADD _{ing}	成人	5.30 × 10 ⁻⁵	6.97 × 10 ⁻⁵	1.66 × 10 ⁻⁴	1.63 × 10 ⁻⁵	3.50 × 10 ⁻⁴	2.62 × 10 ⁻²	1.21 × 10 ⁻³	2.04 × 10 ⁻⁷
	儿童	4.95 × 10 ⁻⁴	6.50 × 10 ⁻⁴	1.55 × 10 ⁻³	1.53 × 10 ⁻⁴	3.27 × 10 ⁻³	2.45 × 10 ⁻¹	1.13 × 10 ⁻²	1.90 × 10 ⁻⁶
ADD _{inh}	成人	7.80 × 10 ⁻⁹	1.02 × 10 ⁻⁸	2.43 × 10 ⁻⁸	2.40 × 10 ⁻⁹	5.15 × 10 ⁻⁸	3.85 × 10 ⁻⁶	1.77 × 10 ⁻⁷	2.99 × 10 ⁻¹¹
	儿童	1.39 × 10 ⁻⁸	1.82 × 10 ⁻⁸	4.33 × 10 ⁻⁸	4.28 × 10 ⁻⁹	9.17 × 10 ⁻⁸	6.86 × 10 ⁻⁶	3.16 × 10 ⁻⁷	5.33 × 10 ⁻¹¹
ADD _{derm}	成人	7.95 × 10 ⁻⁸	1.04 × 10 ⁻⁷	2.48 × 10 ⁻⁷	2.45 × 10 ⁻⁸	5.24 × 10 ⁻⁷	3.93 × 10 ⁻⁵	1.81 × 10 ⁻⁶	3.05 × 10 ⁻¹⁰
	儿童	5.69 × 10 ⁻⁷	7.48 × 10 ⁻⁷	1.78 × 10 ⁻⁶	1.75 × 10 ⁻⁷	3.76 × 10 ⁻⁶	2.81 × 10 ⁻⁴	1.29 × 10 ⁻⁵	2.19 × 10 ⁻⁹
LADD _{inh}		3.87 × 10 ⁻⁹	5.07 × 10 ⁻⁹	1.21 × 10 ⁻⁹	1.19 × 10 ⁻⁹	—	—	—	—

表 8 安宁地区大气沉降重金属健康风险指数

Table 8 Health risk index of heavy metals in research area

项目	途径	As	Cr	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg
HI	手口摄入	成人 1.77 × 10 ⁻¹	2.32 × 10 ⁻²	1.66 × 10 ⁻¹	8.17 × 10 ⁻⁴	8.75 × 10 ⁻³	8.73 × 10 ⁻²	3.44 × 10 ⁻¹	5.10 × 10 ⁻⁵
	儿童	1.65	2.17 × 10 ⁻¹	1.55	7.63 × 10 ⁻³	8.17 × 10 ⁻²	8.15 × 10 ⁻¹	3.21	4.75 × 10 ⁻⁴
HQ	呼吸摄入	成人 2.60 × 10 ⁻⁵	3.58 × 10 ⁻⁴	2.43 × 10 ⁻⁵	1.17 × 10 ⁻⁷	1.29 × 10 ⁻⁶	1.28 × 10 ⁻⁵	5.06 × 10 ⁻⁵	—
	儿童	4.63 × 10 ⁻⁵	6.38 × 10 ⁻⁴	4.33 × 10 ⁻⁵	2.08 × 10 ⁻⁷	2.29 × 10 ⁻⁶	2.29 × 10 ⁻⁵	9.03 × 10 ⁻⁵	—
HI	皮肤接触	成人 6.46 × 10 ⁻⁴	1.74 × 10 ⁻³	8.27 × 10 ⁻³	4.53 × 10 ⁻⁶	4.37 × 10 ⁻⁵	6.54 × 10 ⁻⁴	3.44 × 10 ⁻³	—
	儿童	4.62 × 10 ⁻⁴	1.25 × 10 ⁻²	5.92 × 10 ⁻²	3.25 × 10 ⁻⁵	3.13 × 10 ⁻⁴	4.69 × 10 ⁻³	2.46 × 10 ⁻²	—
CR	成人	1.77 × 10 ⁻¹	2.52 × 10 ⁻²	1.75 × 10 ⁻¹	8.22 × 10 ⁻⁴	8.79 × 10 ⁻³	8.80 × 10 ⁻²	3.78 × 10 ⁻¹	5.10 × 10 ⁻⁵
	儿童	1.65	2.30 × 10 ⁻¹	1.61	7.66 × 10 ⁻³	8.20 × 10 ⁻²	8.20 × 10 ⁻¹	3.23	4.75 × 10 ⁻⁴
GR		5.84 × 10 ⁻⁸	2.13 × 10 ⁻⁷	7.62 × 10 ⁻⁸	1.00 × 10 ⁻⁹	—	—	—	—

3 结论

(1) 安宁研究区内大气沉降受到较为强烈的人为活动影响,干沉降物中除 Cr、Ni 和 As 之外,F、Cu、Pb 和 Hg 尤其是 Zn 和 Cd 含量平均值显著高于安宁市表层土壤含量平均值;湿沉降物中 F 和 TN 浓度平均值超过地表水 V 类水标准值.

(2) 区内大气干湿沉降分析元素中 TN 的年沉降通量最高,TN、F 和 P 年沉降通量平均值分别为 2 434、486 和 591 mg·(m²·a)⁻¹. 8 种重金属元素的年沉降通量从小到大依次为: Hg < Ni < As < Cr < Cd < Cu < Pb < Zn,其中 Zn 的年沉降通量最高,平均值可达 1 968 [mg·(m²·a)⁻¹]. 位于城市中心区和工业园区区域的样点沉降通量较水资源保护与生态农业区域大,除位于某化工厂附近的点位 DQ-11,其余点位 Cd 和 Hg 年沉降通量值均低于 DZ/T 0295-2016 限制值,环境质量地球化学等级均为一等.

(3) 暴露风险评估模型结果表明手口摄入是区内大气重金属暴露的最主要途径,且重金属的儿童日均暴露剂量和非致癌健康风险远大于成人. As、

Cd 和 Pb 会对儿童产生一定的非致癌性健康风险,重金属元素不存在致癌性或非致癌性健康风险或风险较小. 加强对区内工矿企业大气重金属排放管控有助于实现大气污染的有效控制与公众健康的保护.

参考文献:

[1] 张志峰, 韩庚辰, 王菊英. 中国近岸海洋环境质量评价与污染机制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 等. 北京城区大气金属元素干湿沉降特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2493-2500.

Zhang G Z, Pan Y P, Tian S L, et al. Concurrent measurement of wet and bulk deposition of trace metals in urban Beijing[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2493-2500.

[5] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染

- 特征及评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- Zhang X, Liu B, Xiao B L, *et al.* Pollution characteristics and assessment of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- [6] Feng W L, Guo Z H, Peng C, *et al.* Atmospheric bulk deposition of heavy metal(loid)s in central south China: Fluxes, influencing factors and implication for paddy soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **371**: 634-642.
- [7] 陈雪, 杨忠芳, 陈岳龙, 等. 广西中东部9县区农田土壤As输入通量研究[J]. 现代地质, 2019, **33**(3): 525-534.
- Chen X, Yang Z F, Chen Y L, *et al.* Arsenic input flux in farmland soil of 9 counties in the middle east of Guangxi[J]. Geoscience, 2019, **33**(3): 525-534.
- [8] 熊秋林, 肖红伟, 程朋根, 等. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(4): 816-824.
- Xiong Q L, Xiao H W, Cheng P G, *et al.* Pollution distribution of topsoil heavy metals in Beijing and its atmospheric deposition contribution[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, **30**(4): 816-824.
- [9] 蔡春楠, 盛奇, 裴瑞亮, 等. 郑州市降尘、积尘中重金属元素特征及环境影响[J]. 能源与环保, 2021, **43**(6): 21-27, 34.
- Cai C N, Sheng Q, Pei R L, *et al.* Characteristics of heavy metal elements and environmental impacts in dust falling and dust accumulation in Zhengzhou city[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, **43**(6): 21-27, 34.
- [10] 陈强, 马明杰, 游远航, 等. 广东大宝山矿区附近农田土壤镉元素输入通量研究[J]. 华南地质与矿产, 2020, **36**(2): 147-152.
- Chen Q, Ma M J, You Y H, *et al.* Cadmium input flux in farmland soil near the Dabaoshan mining area of Guangdong province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2020, **36**(2): 147-152.
- [11] Liu G N, Yu Y J, Hou J, *et al.* An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory[J]. Ecological Indicators, 2014, **47**: 210-218.
- [12] Yu G R, Jia Y L, He N P, *et al.* Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. Nature Geoscience, 2019, **12**(6): 424-429.
- [13] 陈海涛, 王晓燕, 黄静宇, 等. 密云水库周边小流域大气氮磷沉降特征研究[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(6): 1419-1431.
- Chen H T, Wang X Y, Huang J Y, *et al.* Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in small catchment around Miyun reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(6): 1419-1431.
- [14] Zhan X Y, Bo Y, Zhou F, *et al.* Evidence for the importance of atmospheric nitrogen deposition to eutrophic Lake Dianchi, China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6699-6708.
- [15] 任加国, 贾海斌, 焦立新, 等. 滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 582-589.
- Ren J G, Jia H B, Jiao L X, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus formation in atmospheric deposition in Dianchi Lake and their contributions to lake loading[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 582-589.
- [16] Zhang Y, Liu C M, Liu X J, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition around the Dongting Lake, China[J]. Atmospheric Environment, 2019, **207**: 197-204.
- [17] Zhang X, Lin C Y, Zhou X L, *et al.* Concentrations, fluxes, and potential sources of nitrogen and phosphorus species in atmospheric wet deposition of the Lake Qinghai Watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **682**: 523-531.
- [18] Ti C P, Gao B, Luo Y X, *et al.* Dry deposition of N has a major impact on surface water quality in the Taihu Lake region in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2018, **190**: 1-9.
- [19] 余辉, 张璐璐, 燕妹雯, 等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(11): 1210-1219.
- Yu H, Zhang L L, Yan S W, *et al.* Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and contributions to the lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(11): 1210-1219.
- [20] Chen Z L, Huang T, Huang X H, *et al.* Characteristics, sources and environmental implications of atmospheric wet nitrogen and sulfur deposition in Yangtze River Delta[J]. Atmospheric Environment, 2019, **219**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116904.
- [21] 李凤嫣, 蒋天宇, 余涛, 等. 环境中氟的来源及健康风险评估研究进展[J]. 岩矿测试, 2021, **40**(6): 793-807.
- Li F Y, Jiang T Y, Yu T, *et al.* Review on sources of fluorine in the environment and health risk assessment[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, **40**(6): 793-807.
- [22] 孔茹, 刘菁. 大气中氟污染对农作物影响的探讨[J]. 现代盐化工, 2021, **48**(2): 64-65.
- Kong R, Liu J. Discussion on the influence of fluorine pollution in the atmosphere on crops[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2021, **48**(2): 64-65.
- [23] 范晨子, 刘永兵, 赵文博, 等. 云南安宁水系沉积污染物分布特征与风险评价[J]. 岩矿测试, 2021, **40**(4): 570-582.
- Fan C Z, Liu Y B, Zhao W B, *et al.* Pollution distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the river sediments in Anning, Yunnan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, **40**(4): 570-582.
- [24] 安宁市人民政府. 安宁市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. <http://www.kman.gov.cn/c/2011-06-20/5909511.shtml>, 2011-06-20.
- [25] 庞玲玲. 安宁市矿山地质环境评价信息系统研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- Pang L L. Research of mine geological environment evaluation information system of Anning[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [26] 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.
- [27] 卢俊平, 马太玲, 刘廷玺, 等. 京蒙沙源区水库大气磷干、湿沉降污染特征[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 127-134.
- Lu J P, Ma T L, Liu T X, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric dry and wet phosphorus deposition on a reservoir in sand source areas of Beijing-Inner Mongolia[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 127-134.
- [28] 于润, 王伟, 于扬, 等. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2021, **40**(3): 408-424.

- Yu F, Wang W, Yu Y, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils from Jiulong Li-Be mining area, Western Sichuan Province, China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, **40**(3): 408-424.
- [29] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [30] Wang C H, Zhou S L, Song J, *et al.* Human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban soils of Nanjing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 750-757.
- [31] Cai K, Li C, Na S. Spatial distribution, pollution source, and health risk assessment of heavy metals in atmospheric depositions: a case study from the sustainable city of Shijiazhuang, China [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(4), doi: 10.3390/atmos10040222.
- [32] Li H X, Ji H B. Chemical speciation, vertical profile and human health risk assessment of heavy metals in soils from coal-mine brownfield, Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **183**: 22-32.
- [33] Men C, Liu R M, Xu F, *et al.* Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 138-147.
- [34] De Miguel E, Llamas J F, Chacón E, *et al.* Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: Unleaded petrol and urban lead [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2733-2740.
- [35] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [36] Bi C J, Zhou Y, Chen Z L, *et al.* Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1349-1357.
- [37] 崔勇, 柏连阳, 龙岳林, 等. 长沙市近郊莲花镇土壤重金属生态风险评价 [J]. *环境工程*, 2020, **38**(5): 202-209.
- Cui Y, Bai L Y, Long Y L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in soils of Lianhua town in the suburbs of Changsha [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(5): 202-209.
- [38] 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 等. 昆明市土壤重金属的生态与健康风险评价 [J/OL]. *轻工学报*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1437.TS.20211026.0841.002.html>, 2021-10-26.
- Wang J, Gong J, Liu Y J, *et al.* Ecological & health risk assessment of heavy metals in soils from a typical southwest capital city [J/OL]. *Journal of Light Industry*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1437.TS.20211026.0841.002.html>, 2021-10-26.
- [39] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [40] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S].
- [41] 张颖, 刘学军, 张福锁, 等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1633-1639.
- Zhang Y, Liu X J, Zhang F S, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(6): 1633-1639.
- [42] 张六一, 刘妍霖, 符坤, 等. 三峡库区澎溪河流域氮湿沉降特征及其来源 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(12): 4999-5008.
- Zhang L Y, Liu Y J, Fu K, *et al.* Characteristics and sources of wet deposition of nitrogen in the Pengxi River Basin of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(12): 4999-5008.
- [43] 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.
- [44] 黄铄淇, 胡慧蓉, 韩钊龙, 等. 昆明东郊大气氮湿沉降的测定与分析 [J]. *四川农业大学学报*, 2014, **32**(4): 418-425.
- Huang S Q, Hu H R, Han Z L, *et al.* Atmospheric wet nitrogen deposition in the eastern suburb of Kunming [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2014, **32**(4): 418-425.
- [45] Guo L L, Lyu Y L, Yang Y Y. Concentrations and chemical forms of heavy metals in the bulk atmospheric deposition of Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(35): 27356-27365.
- [46] 颜文娟, 史锟. 大连市大气氮湿沉降研究 [J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(3): 517-522.
- Yan W J, Shi K. Program on the nitrogen concentrations in rain water in Dalian city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(3): 517-522.
- [47] 王增辉. 鲁西南平原区大气干湿沉降元素输入通量及来源浅析: 以巨野县为例 [J]. *物探与化探*, 2020, **44**(4): 839-846.
- Wang Z H. An analysis of the input flux and source of elements in dry and wet atmospheric deposition of southwest plain of Shandong: a case study of Juye County [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, **44**(4): 839-846.
- [48] 许志波, 杨仪, 卞莉, 等. 太湖大气氮、磷干湿沉降特征 [J]. *环境监控与预警*, 2019, **11**(4): 37-42.
- Xu Z B, Yang Y, Bian L, *et al.* Dry and wet Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus Taihu in Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, **11**(4): 37-42.
- [49] 臧宏宽. 2012 年中国重点源大气铅排放清单 [J]. *环境保护科学*, 2020, **46**(6): 6-11.
- Zang H K. Atmospheric lead emission inventories from primary anthropogenic sources in China, 2012 [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, **46**(6): 6-11.
- [50] 龚仓, 徐殿斗, 马玲玲. 大气颗粒物中砷及其形态的研究进展 [J]. *化学通报*, 2014, **77**(6): 502-509.
- Gong C, Xu D D, Ma L L. Research progress of occurrence and speciation of arsenic in atmospheric particles [J]. *Chemistry*, 2014, **77**(6): 502-509.
- [51] 王宗爽, 徐舒, 安广楠, 等. 铅大气污染物环境保护标准限值研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(9): 3163-3170.
- Wang Z S, Xu S, An G N, *et al.* Research on the lead limit values of environmental protection standards [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(9): 3163-3170.
- [52] 何安恩, 解姣姣, 苑春刚. 大气颗粒物重金属形态分析 [J]. *化学进展*, 2021, **33**(9): 1627-1647.
- He A E, Xie J J, Yuan C G. Heavy metal speciation analysis and distribution characteristics in atmospheric particulate matters [J]. *Progress in Chemistry*, 2021, **33**(9): 1627-1647.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)