

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM_{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境中挥发性有机物的污染特征及来源解析 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若琦, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价

熊秋林^{1,2}, 赵文吉^{2*}, 李大军¹, 周涛³

(1. 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059)

摘要: 大气降尘可以反映大气颗粒物的自然沉降量, 具有重要的环境指示意义. 降尘重金属通过大气沉降进入土壤或水体, 对人体健康、植物和水生生物等有危害作用. 为了了解北京冬季降尘中重金属的含量水平、富集程度以及综合污染特征, 于 2013 年 11 月~2014 年 3 月收集了北京大气降尘样品 49 组, 并用 Elan DRC II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试了降尘中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Co、V、Bi、Mo 等 10 种重金属的含量. 结果表明, 北京冬季降尘中重金属 Cd、Bi 和 Mo 的平均含量不足 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Co、Ni 和 V 的平均含量在 $10 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 而 Pb、Cr、Cu 和 Zn 的平均含量均超过 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cd、Zn、Cu 的含量均超出土壤环境二级标准值, 其中城区和近郊 Cd、Zn、Cu 的二级超标率分别为 100%、97%、93.9% 和 100%、100%、81.2%. 富集因子研究结果表明, Bi、Cu、Ni、Pb 微量富集, 主要来源于地壳或土壤源; Cd、Cr、Mo、Zn 轻度富集, 受自然源和人为源共同作用. 论文在传统单一污染评价基础上, 提出了“降尘重金属综合污染指数”模型, 并探讨了北京降尘重金属的综合污染特征, 结果表明北京城区冬季降尘中重金属的综合污染指数排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Co}$, 并且 Cd、Zn、Cu 和 Pb 是冬季北京城区降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 为极显著污染因子; 北京近郊冬季降尘中重金属的综合污染指数排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{V}$, 并且 Cd、Zn、Cu、Pb 和 Cr 是冬季北京近郊降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 为极显著污染因子.

关键词: 降尘; 重金属; 含量水平; 富集因子; 综合污染指数; 显著污染因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4051-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201707194

Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing

XIONG Qiu-lin^{1,2}, ZHAO Wen-ji^{2*}, LI Da-jun¹, ZHOU Tao³

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Resources, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. College of Tourism and Urban Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Dust reflects the natural subsidence of particles and is thus generally accepted as an important environmental indicator. Dust heavy metals find their way into soil or water via atmospheric deposition, potentially damaging plants, aquatic organisms, as well as human beings. In order to study the concentration levels, enrichment degrees, and comprehensive pollution characteristics of the dust heavy metals Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, V, Bi, and Mo in winter in Beijing, 49 groups of dust samples were collected from different locations within the city from November 2013 to March 2014. Heavy metal content (mass percentage) was then measured using Elan DRC II type inductively-coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Results showed that the average content of Cd, Bi, and Mo was less than $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, that of Co, Ni, and V was between 10 and $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, while that of Pb, Cr, Cu, and Zn was more than $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The amount of Cd, Zn, and Cu in dust samples was generally higher than their secondary standard values in the soil environment. The secondary standard excess rates of Cd, Zn, and Cu were 100%, 97%, and 93.9% in urban environments, and 100%, 100%, and 81.2% in suburban environments, respectively. Results also indicated slight enrichment of Bi, Cu, Ni, and Pb, mainly derived from crustal or soil sources, while Cd, Cr, Mo, and Zn, exhibited mild enrichment, caused by a combination of natural and artificial sources. The paper proposes a "dust heavy metal comprehensive pollution index" model, based on the traditional single pollution assessment method, so as to explore comprehensive pollution characteristics of dust heavy metals in Beijing. Results for the dust heavy metal comprehensive pollution index in Beijing City were in the order of $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Co}$. Cd, Zn, Cu, and Pb were identified as key pollution factors, with Cd and Zn as primary factors. Results for the dust heavy metal comprehensive pollution index in Beijing suburbs was $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{V}$. Cd, Zn, Cu, Pb, and Cr were key pollution factors, with Cd and Zn as primary factors.

Key words: dust; heavy metals; concentration level; enrichment factor; comprehensive pollution index; key pollution factors

收稿日期: 2017-07-23; 修订日期: 2018-03-12

基金项目: 教育部博士点基金项目(20111102110004); 首都师范大学研究生国际交流与联合培养项目(028175534000)

作者简介: 熊秋林(1988~), 男, 博士, 主要研究方向为 GIS 在城市环境中的应用, E-mail: xiong_ql@163.com

* 通信作者, E-mail: zhwenji1215@163.com

大气降尘是环境空气中粒径较大(空气动力学当量直径通常 $> 10 \mu\text{m}$), 依靠自身重力以落尘形式自然降落于地表的颗粒物。它可以反映大气颗粒物的自然沉降量, 是地球表层“地-气”系统物质交换的一种形式, 具有重要的环境指示意义^[1,2]。大气降尘中的重金属, 尤其是有毒重金属, 易沉积在植物、土壤和水中, 通过食物链的传递和累积, 从而对生态环境和人类健康造成严重的危害^[3-6]。近年来, 我国城市大气中 As、Cd、Cr、Mn、Ni 和 Pb 等主要重金属含量均超过 GB 3095-2012、欧盟《空气质量标准》和 WHO《欧洲空气质量指南》中相应的年均标准限值或参考限值。城市大气降尘及其重金属污染日益严重, 已成为一个关系到国计民生的重大环境问题。随着我国社会经济的快速发展和居民生活水平的逐步提高, 人们对环境质量, 尤其是对大气环境质量的要求也越来越高。了解降尘重金属含量水平、污染特征以及由其引发的人体健康与生态环境风险具有重要的社会价值。

国内外专家学者通过主动采样或被动采样的方式收集大气降尘样品, 分析降尘中的重金属含量, 并对降尘重金属的含量水平^[7]、时空分布^[8,9]、污染特征^[10-12]以及人体健康风险评价^[13-15]进行了大量研究。国外对大气降尘重金属研究工作开展较早, 早在 20 世纪 70 年代, 就有研究报道了丹麦哥本哈根地区大气降尘中 Cu、Cd、Zn、Pb、Ni、Cr 等重金属的沉降特性, 并探讨了哥本哈根地区的重金属含量的区域差异, 发现大气降尘和土壤中的重金属含量之间呈现正相关^[3]。此外, 有学者研究了英格兰和威尔士的农田, 发现农田土壤重金属的 25% ~ 85% 主要来自大气降尘^[16]。国内近几年也陆续开展了大气降尘重金属研究, 如杨忠平等^[17]的研究发现长春市大气干湿沉降样品中重金属含量均明显高于表层土壤中重金属的含量; Gu^[15]和任春辉^[18]采用健康风险评价方法对灰尘中重金属的人体健康风险进行评估, 结果发现 Cd 是人类健康风险的主要影响因素, 农业区和居民区的人体健康风险最高。北京作为京津冀地区的核心城市, 又是我国政治、文化和对外交流中心。由于高度城市化和剧烈的人类活动, 加之特殊的气候环境和不利的地形条件, 近几年北京大气污染比较严重, 尤其是冬季频频遭受霾天气的侵袭, 多个监测站空气质量屡屡“爆表”。本文通过被动采样的方式采集了冬季北京城区及近郊区大气降尘样品, 利用 ICP-MS 测试了降尘中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Co、V、Bi、

Mo 等 10 种重金属的含量, 分析了北京冬季降尘重金属的含量水平, 计算了 10 种重金属的富集因子; 并在单因子污染指数法等传统单一污染评价方法的基础上, 综合降尘重金属的含量水平、富集程度、污染程度以及对生态环境构成的潜在风险等不同维度, 提出了“降尘重金属综合污染指数”模型, 对北京冬季降尘重金属的污染程度和生态风险进行了综合评估, 以期在城市降尘及大气重金属污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点位和采样时间

大气降尘采样严格按照国家标准《环境空气 降尘的测定 重量法 GB/T 15265-1994》^[19]进行。集尘缸选用高 30 cm、内径 15 cm、缸底平整的圆筒形玻璃缸。采样点一般设在矮建筑物的屋顶或根据需要设在电线杆上(集尘缸统一设在离地面 2.5 m 高处, 收集该位置的大气降尘), 附近(10 m \times 10 m)无高大建筑, 且避开烟囱和交通主干道等点、线污染源的局部污染^[20]。于 2013 年 11 月 15 日 ~ 2014 年 3 月 15 日, 分两步在北京布设点位: 一是在北京城区 17 个大气环境监测站附近布点, 以确保布点的代表性; 二是将第一批 17 个点位落到北京市地图上, 在落点稀疏区域以及北京城区外围的近郊区均匀加密 33 个采样点(有 1 个采样点不便布设, 舍弃), 最终布设覆盖北京市整个城区及近郊区域 49 个有效采样点(如图 1)^[21], 进行同步平行(每个采样点采集 3 个样品)采样, 以最大程度地降低实验的不确定性, 提高实验的代表性和可信度。每个采样点收集的大气降尘样品的重量在 100 ~ 1 000

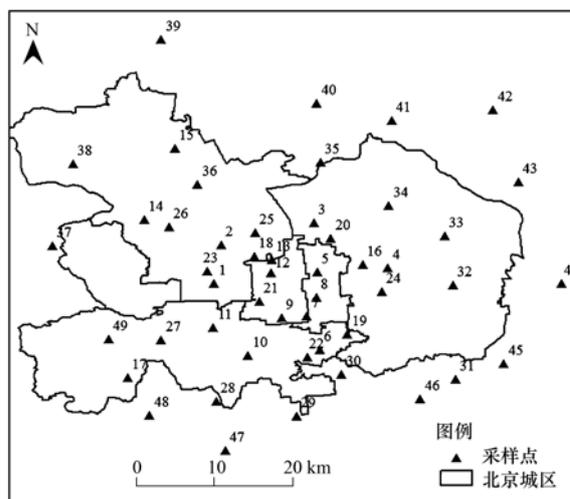


图 1 北京大气降尘采样点位示意

Fig. 1 Map of atmospheric dust sampling points in Beijing

mg 之间. 降尘样品收集完成后, 用密封盖密封妥善保存, 防止存放过程中样品损失.

1.2 测定方法

降尘中金属元素含量测试仪器为美国 Perkin Elmer 公司的 Elan DRC II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 分析方法符合《土壤环境质量标准(修订)GB 15618-2008》^[22]中有关土壤污染分析测试方法的要求. 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 40 mg 样品粉末于聚四氟乙烯内胆中, 加入 0.6 mL HNO₃ 和 2 mL HF, 封盖; 待静置后, 放入防腐高效溶样罐罐体(内部材质为特氟龙, PTFE, 如图 2), 在防腐烘箱内 150℃ 加热 24 h; 待冷却后, 加 0.5 mL HClO₄, 并敞口放置在 120℃ 的防腐电热板上至半干; 随后加入 1 mL HNO₃ 和 1 mL H₂O, 密闭置于防腐烘箱 150℃ 回溶 12 h; 冷却后将溶液转移至聚酯瓶内, 并用高纯水定容至 40 mL.

通过 ICP-MS 测定 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、

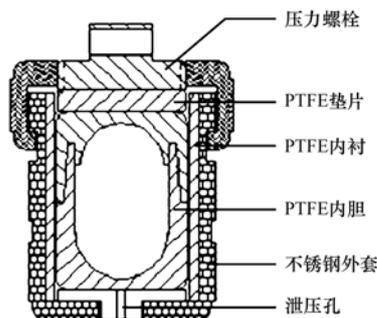


图 2 防腐高效溶样罐示意

Fig. 2 Schematic diagram of erosion-resistant high-efficiency digestion bomb

Co、V、Bi、Mo 10 种重金属以及参比过渡性金属元素 Sc 的含量. 样品元素化学分析时采用国家海洋沉积物一级标准物质 GBW07315、GBW07316 以及美国地质调查局玄武岩标准物质 BCR-2、BHVO-2 作质量监控. 本研究的数据分析在 Excel 2007、SPSS 17.0 和 Origin 9.0 软件中完成.

1.3 研究方法

1.3.1 富集因子

富集因子法是用于研究大气降尘以及颗粒物中元素的富集程度以及判断、评价元素的自然来源和人为来源的普遍方法^[23]. 富集因子(enrichment factor, EF)的计算公式为:

$$EF = (C_i/C_n)_{\text{sample}} / (C_i/C_n)_{\text{background}} \quad (1)$$

式中, EF 为富集因子系数, C_i 为研究元素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n 为所选参比元素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $(C_i/C_n)_{\text{sample}}$ 和 $(C_i/C_n)_{\text{background}}$ 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. 根据范晓婷等^[24]关于参比元素的选择要求: ①与目标元素相关性小; ②化学性质稳定; ③必须是自然来源, 本文选用了研究中同步测试的地壳中普遍存在的且人为污染来源较少、化学稳定性好、分析结果精确度高的低挥发性稀土金属元素 Sc. 各金属元素的背景值取北京地区 A 层土壤对应金属元素平均值^[25]. 通常大气降尘中某元素 EF 值大小不仅可以反映出大气降尘中元素的富集程度, 还可定性判断和评价元素的初步来源及其贡献. 根据大气降尘中元素的 EF 值的大小, 本研究将大气降尘中重金属元素的富集程度分为 5 个级别, 具体分级情况见表 1.

表 1 EF 与大气降尘中元素的富集程度的关系

Table 1 Relationship between EF and enrichment degree of chemical elements in dustfall

富集因子(EF)	EF ≤ 1	1 < EF ≤ 10	10 < EF ≤ 100	100 < EF ≤ 1000	EF > 1000
富集程度	基本无富集或微量富集	轻度富集	中度富集	高度富集	超富集
等级	1	2	3	4	5
来源	地壳或土壤源	自然源和人为源共同作用	人为污染源	人为污染源	人为污染源

1.3.2 降尘重金属综合污染指数

单因子污染指数法、地积累指数法以及潜在生态风险指数法等单一重金属污染评价方法被大量应用于对大气降尘重金属污染进行分析评价^[26, 27]. 地累积指数(geo-accumulation index, I_{geo})是 1969 年由德国科学家 Muller 提出的用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标. I_{geo} 综合考虑了自然界地质过程造成的背景值的变化以及人为活动对环境的影响, 是反映重金属分布的自然变化特征和判别

人为活动对环境影响的重要参数. 近年来, 地累积指数法被广泛用于土壤风沙尘、大气颗粒物以及燃煤电厂周边积尘等的重金属污染特征研究. 潜在生态风险指数是 1980 年瑞典科学家 Hakanson 提出的基于元素丰度响应和污染物的协同效应的定量指标^[26], 是目前大气颗粒物、土壤和沉积物中重金属污染程度及潜在生态风险评价最为常用方法之一^[27]. 该方法不仅反映了特定沉积物中单一重金属的潜在生态危害, 同时还考虑了多种重金属的综合

生态效应,并定量划分出重金属的潜在生态风险等级,是表征重金属对生态环境影响程度的综合指标。

为了综合评价北京降尘重金属污染及风险,论文在上述单一污染评价方法的基础上,以综合评估降尘重金属的污染程度和生态风险为目的,从降尘中重金属含量水平、富集程度、污染程度及对生态环境构成的潜在风险出发,提出了“降尘重金属综合污染指数”的方法和模型。“降尘重金属综合污染指数”选择相关评价指标,对降尘中主要重金属污染物(Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn、Co、V等)进行综合污染指数的计算,科学合理、全面综合地确定北京市应重点关注的降尘重金属指标。本文主要研究对象为北京市降尘重金属,采用《土壤环境质量标准(修订)》(GB 15618-2008)中居住用地土壤(城乡居住区、学校、宾馆、游乐场所、公园、绿化用地等地土壤)第二级标准值,即保障居民健康生活的土壤临界值。降尘重金属综合污染指数(integrated pollution index of the dust heavy metal, IPI. dhm)计算公式如下:

$$IPI. dhm = PI_1 + PI_2 + PI_3 + PI_4 \quad (2)$$

式中, PI_1 为降尘重金属背景比值的归一化系数,参照《中国土壤元素背景值》中北京地区 A 层土壤对应金属元素平均值^[25],表征社会经济活动对北京市降尘重金属影响的程度; PI_1 的取值在 0.15 以上的重金属,为降尘中显著污染因子。 PI_2 为降尘重金属单因子污染指数的归一化系数,参照《土壤环境质量标准(修订)》(GB 15618-2008)中居住用地土壤二级标准,反映北京市降尘中各重金属对污染的贡献率; PI_2 的取值在 0.15 以上的重金属,为降尘中显著污染因子。 PI_3 为降尘重金属地累积指数 I_{geo} 的归一化系数,在地累积指数计算结果的基础上进行归一化处理,反映北京市降尘重金属的污染程度; PI_3 的取值在 0.15 以上的重金属,为降尘中显著污染因子。 PI_4 为降尘重金属潜在生态风险

指数 E_r^i 的归一化系数,在潜在生态风险指数计算结果的基础上进行归一化处理,反映北京市降尘重金属的潜在生态危害程度; PI_4 的取值在 0.15 以上的重金属为降尘中显著污染因子。 IPI. dhm 为降尘重金属最终的综合污染指数,由上述 4 项污染分指数加和计算得到。 IPI. dhm 的取值在 0.5 以上的重金属,为降尘中显著污染因子。

2 结果与讨论

2.1 北京大气降尘重金属污染水平

根据降尘重金属含量测试结果,分别统计了北京城区(样本数为 36)及郊区(样本数为 13)冬季大气降尘中 10 种重金属元素含量的平均值、标准偏差以及变异系数。从统计结果可以看出,北京冬季大气降尘不同重金属元素之间含量差异非常大,Cd、Bi 和 Mo 含量较少,平均值不足 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Co、Ni 和 V 含量较多,平均值在 $10 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;而 Pb、Cr、Cu 和 Zn 含量很多,平均值均超过 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且 Pb、Cr、Cu 和 Zn 在城区的含量(分别为 147.1、195.9、239.2 和 $713.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)明显高于郊区的含量(分别为 91.6、125.1、131.9 和 $514.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。北京城区降尘中重金属 V、Ni、Co、Zn、Cu 的变异系数在 0.17 ~ 0.45 之间; Bi、Mo、Cd、Pb 的变异系数在 0.56 ~ 0.76 之间; Cr 的变异系数最高,为 1.33。北京郊区冬季大气降尘重金属元素含量的变异系数相对城区要小得多,除 Zn 和 Bi(变异系数分别为 0.48 和 0.50)略大外,其余 8 种重金属元素的变异系数均小于 0.45。由此说明,北京城区相比郊区,人口更密集、交通更繁忙、生产生活活动更剧烈,人为活动对降尘重金属污染的贡献较大。

为了直观地表现出降尘中重金属含量的分布,本文运用 Origin 9.0 绘图软件分别绘制了重金属 Co、Mo、Cd、Bi [图 3(a)]以及 V、Cr、Ni、Cu、Zn、

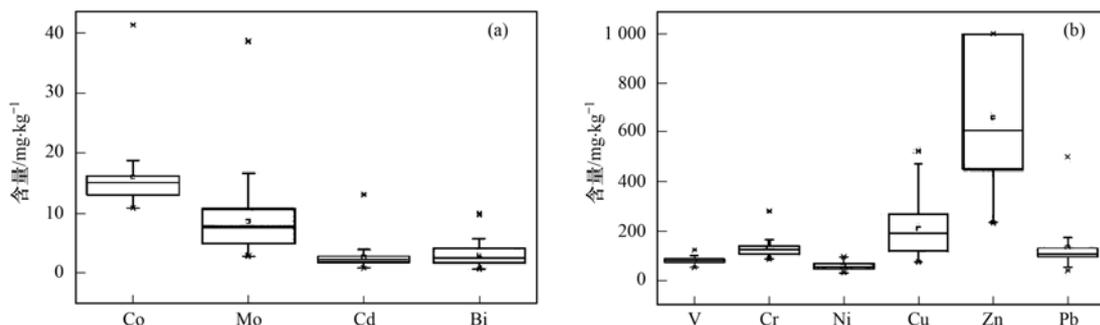


图 3 北京降尘重金属含量箱线图

Fig. 3 Boxplots of dust heavy metal concentrations in Beijing

Pb [图 3(b)] 的箱线图. 从图 3 可以看出, 重金属 Co、Cd、Mo、Bi、Cr、Pb 存在极端异常值; Ni、Zn、Cu 和 V 的含量分布较 Co、Cd、Mo、Bi、Cr 和 Pb 的分布更对称、更集中.

为了研究北京冬季降尘中重金属的污染水平, 计算了供暖期北京城区和近郊降尘中 10 种重金属元素(镉 Cd、铅 Pb、铬 Cr、铜 Cu、镍 Ni、锌 Zn、钴 Co、钒 V、铋 Bi、钼 Mo)的均值、背景值、一级超标率、二级超标率. 其中, “均值”为剔除极端值和异常值后取的降尘重金属含量的算术平均值; “背景值”参考文献[25]; “一级限值”和“二级限值”参考 GB 15618-1995《土壤环境质量标准》、GB 15618-2008《土壤环境质量标准(修订)》中规定的一级标准值和二级标准值(其中, Bi 和 Mo 的一级标准值和二级标准值, 以及 Co 和 V 的一级标准值, 现行的标准中均未给出推荐值); “背景比值”取重金属含量的“平均值”与“背景值”的比值; “一级超标率”和“二级超标率”分别为超出一级限值的样本数与总样本数的百分比以及超出二级限值的样本数与总样本数的百分比.

从表 2 可以看出, 北京城区降尘中大部分重金

属存在不同程度的污染. V 含量的平均值与土壤环境背景值接近, 且所有样本数据均未超标, 不存在污染. Co 含量的平均值略高于土壤环境背景值, 且所有样本数据均未超标, 不存在污染. Cr 和 Ni 含量的平均值超出土壤环境背景值 1 倍左右, 且其超出一级标准值的样本数与总样本数的百分比均为 93.9%, 超出二级标准值的样本数与总样本数的百分比分别为 3% 和 66.7%, 存在中度污染. Mo 和 Bi 含量的平均值分别超出对应土壤环境背景值的 3.7 和 7.4 倍, 在降尘中的含量较高, 由于无对应的环境标准值作参考, 其超标情况及污染状况未知. Pb 的平均含量为相应土壤环境背景值的 5.5 倍, 所有样本数据均超出一级标准值, 但只有 9.1% 的样本数据超过二级标准值, 属于中度污染. Zn 和 Cu 的平均含量分别为相应土壤环境背景值的 9.5 和 10.7 倍, 其超出一级标准值的样本数与总样本数的百分比均为 100%, 超出二级标准值的样本数与总样本数的百分比分别为 97% 和 93.9%, 属于重度污染. Cd 的平均含量高达相应土壤环境背景值的 28.1 倍, 其超出一级标准值、二级标准值的样本数与总样本数的百分比均为 100%, 存在严重污染.

表 2 北京城区降尘重金属污染水平

Table 2 Pollution levels of dust heavy metals in Beijing City

重金属	均值 /mg·kg ⁻¹	背景值 /mg·kg ⁻¹	一级限值 /mg·kg ⁻¹	二级限值 /mg·kg ⁻¹	背景比值	一级超标率 /%	二级超标率 /%
Bi	3.3	0.4	—	—	8.4	—	—
Cd	2.8	0.1	0.200	0.300	28.1	100	100
Co	14.7	12.7	—	50	1.2	—	0
Cr	136.1	61	90	300	2.2	93.9	3
Cu	242.7	22.6	35	100	10.7	100	93.9
Mo	9.4	2	—	—	4.7	—	—
Ni	61.0	26.9	40	50	2.3	93.9	66.7
Pb	143.6	26	35	300	5.5	100	9.1
V	79.7	82.4	—	200	1.0	—	0
Zn	703.3	74.2	100	250	9.5	100	97

从表 3 可以看出, 北京近郊降尘中大部分重金属存在不同程度的污染. V 含量的平均值与土壤环境背景值接近, 且所有样本数据均未超标, 不存在污染. Co 含量的平均值略高于土壤环境背景值, 且所有样本数据均未超标, 不存在污染. Ni 和 Cr 含量的平均值超出土壤环境背景值 1 倍左右, 且其超出一级标准值的样本数与总样本数的百分比分别为 87.5% 和 100%, 超出二级标准值的样本数与总样本数的百分比分别为 37.5% 和 6.3%, 存在中度污染. Mo 和 Bi 含量的平均值分别超出对应土壤环境背景值的 1.9 和 3.7 倍, 在降尘中的含量较高, 由于无对

应的环境标准值作参考, 其超标情况及污染状况未知. Pb 的平均含量为相应土壤环境背景值的 3.6 倍, 所有样本数据均超出一级标准值, 但无样本数据超过二级标准值, 属于中度污染. Cu 和 Zn 的平均含量分别为相应土壤环境背景值的 6.4 和 7.7 倍, 其超出一级标准值的样本数与总样本数的百分比均为 100%, 超出二级标准值的样本数与总样本数的百分比分别为 100% 和 81.2%, 污染较重. Cd 的平均含量高达相应土壤环境背景值的 19.8 倍, 其超出一级标准值、二级标准值的样本数与总样本数的百分比均为 100%, 存在严重污染.

表 3 北京近郊降尘重金属污染水平

重金属	均值 /mg·kg ⁻¹	背景值 /mg·kg ⁻¹	一级限值 /mg·kg ⁻¹	二级限值 /mg·kg ⁻¹	背景比值	一级超标率 /%	二级超标率 /%
Bi	1.9	0.4	—	—	4.7	—	—
Cd	2.0	0.1	0.200	0.300	19.8	100	100
Co	17.4	12.7	—	50	1.4	—	0
Cr	128.3	61	90	300	2.1	100	6.3
Cu	144.9	22.6	35	100	6.4	100	81.2
Mo	5.8	2	—	—	2.9	—	—
Ni	51.5	26.9	40	50	1.9	87.5	37.5
Pb	93.5	26	35	300	3.6	100	0
V	82.9	82.4	—	200	1.0	—	0
Zn	572.2	74.2	100	250	7.7	100	100

2.2 北京大气降尘重金属富集程度

根据富集因子 EF 值的定义,分别计算了北京城区和郊区冬季大气降尘中 10 种重金属元素的平均富集因子(EF)。由计算结果可知,北京城区和郊区降尘中重金属元素的平均富集因子(EF)排序有差异,分别为 Co < V < Ni < Cr < Mo < Cu < Bi < Pb < Zn < Cd 和 V < Co < Ni < Cr < Mo < Pb < Bi < Zn < Cu < Cd; 但北京城区和郊区降尘重金属的富集程度基本一致,并且重金属 Ni、Cr、Mo、Cu、Bi、Pb、Zn、Cd 在城区和郊区均呈现出轻度以上的富集,其中

Ni、Cr、Mo、Cu、Bi、Pb、Zn 为轻度富集,受自然源和人为源共同作用;而 Cd 达到中等程度富集,主要受人为污染源影响。

为直观地表现出降尘中重金属含量的分布,本文运用 Origin 9.0 绘图软件分别绘制了重金属 V、Cr、Co、Ni、Pb[图 4(a)]以及 Cu、Zn、Mo、Cd、Bi[图 4(b)]的箱线图。从图 4 可以看出,重金属 Cu、Zn、Mo、Cd、Bi 的富集因子普遍高于 V、Cr、Co、Ni、Pb,并且 Cr、Co、Cu、Cd 的富集因子存在极端异常值;而其他 6 种重金属的富集因子分布更对称、更集中。

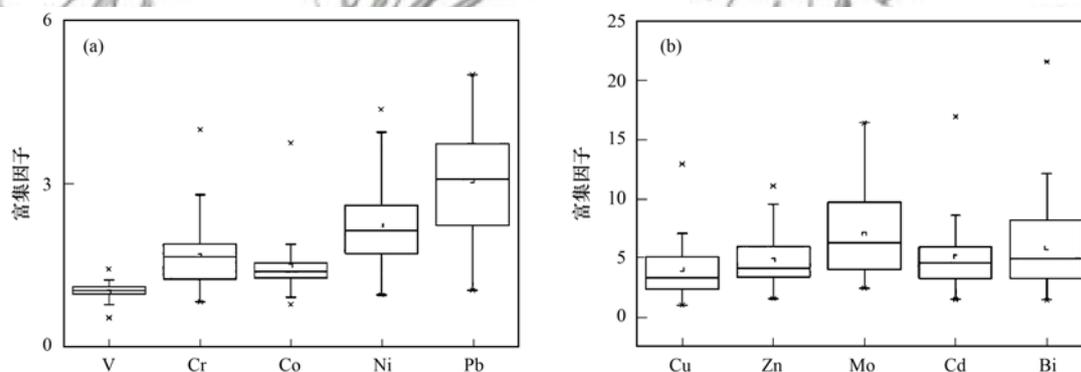


图 4 北京降尘重金属富集因子箱线图

Fig. 4 Boxplots of dust heavy metals EF values in Beijing

2.3 北京降尘重金属污染综合评价

本文利用 1.3.2 节构建的“降尘重金属综合污染指数”对北京冬季大气降尘中 V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等 8 种主要重金属污染物进行综合污染指数的计算,进而综合评价北京大气降尘中重金属的污染状况。根据降尘重金属综合污染指数的定义及计算公式,本文依次计算了北京城区和郊区冬季大气降尘中 V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等 8 种主要重金属污染物的背景比值(BR)的归一化系数(PI_1)、单因子污染指数(SPI)的归一化系数(PI_2)、地累积指数(I_{geo})的归一化系数

(PI_3)、潜在生态风险指数(E_r^i)的归一化系数(PI_4)以及最终计算的北京城区和郊区冬季降尘中重金属的综合污染指数(IPI_{dhm})分别如表 4 和表 5 所示。其中,Mean 代表降尘中重金属含量的平均值,单位 mg·kg⁻¹; BR 代表降尘重金属含量的平均值与相应重金属的土壤背景值的比值; SPI 代表降尘重金属的单因子污染指数; I_{geo} 代表降尘重金属的地累积指数; E_r^i 代表降尘重金属的潜在生态风险系数。

从表 4 计算的结果来看,北京城区冬季降尘中重金属的背景比值的归一化系数(PI_1)排序为 Cd >

$Cu > Zn > Pb > Ni > Cr > Co > V$, 其中 Cd、Cu 和 Zn 的 PI_1 值大于 0.3, 这 3 种重金属是北京市降尘中受社会经济活动影响程度极强的重金属, 此外 Pb 的 PI_1 值大于 0.15, 也是北京市降尘中受社会经济活动影响程度较强的重金属; 单因子污染指数的归一化系数(PI_2)排序为 $Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > V > Co > Cd$, 其中 Zn 和 Cu 的 PI_2 值大于等于 0.45, 这两种重金属是北京市降尘中对污染的贡献率极高的重金属, 此外 Pb 的 PI_2 值大于 0.15, 也是北京市降尘中对污染的贡献率较高的重金属; 地累积指数的归一化系数(PI_3)排序为 $Cd > Cu > Zn > Pb > Cr > Ni > Co > V$, 其中 Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 和 Ni 的 PI_3 值

均不小于 0.15, 是冬季北京城区降尘中污染程度较高的重金属, 且 Cd、Cu、Zn 和 Pb 在城区降尘中污染程度极高; 潜在生态风险指数的归一化系数(PI_4)排序为 $Cd > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr > Co > V$, 除 Cd 以外的重金属的 PI_4 值均不超过 0.05, Cd 是冬季北京城区降尘中唯一潜在生态危害程度极高的重金属. 最终计算的北京城区冬季降尘中重金属的综合污染指数(IPI. dhm)排序为 $Cd > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > V > Co$, 并且 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的 IPI. dhm 值均大于 0.8, 是北京市降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 的 IPI. dhm 值分别高达 3.00 和 1.97, 是冬季北京城区降尘中极显著污染因子.

表 4 北京城区冬季降尘重金属污染综合评价结果

Table 4 Integrated pollution evaluation of dust heavy metals in winter in Beijing City

重金属	Mean/mg·kg ⁻¹	BR	PI ₁	SPI	PI ₂	I _{geo}	PI ₃	E _r [*]	PI ₄	IPI. dhm
Cd	2.8	28.1	1	0.31	0	4.2	1	988	1	3
Co	14.7	1.2	0.01	0.31	0	-0.4	0.02	5	0	0.03
Cr	136.1	2.2	0.05	0.42	0.1	0.6	0.23	5	0	0.38
Cu	242.7	10.7	0.36	0.81	0.45	2.7	0.68	56	0.05	1.55
Ni	61	2.3	0.05	0.41	0.09	0.5	0.21	11	0.01	0.36
Pb	143.6	5.5	0.17	0.5	0.18	1.7	0.47	30	0.03	0.84
V	79.7	1	0	0.4	0.08	-0.5	0	2	0	0.08
Zn	703.3	9.5	0.31	1.41	1	2.6	0.66	7	0.01	1.97

从表 5 计算的结果来看, 北京近郊冬季降尘中重金属的背景比值的归一化系数(PI_1)排序为 $Cd > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > V$, 其中 Cd、Zn 和 Cu 的 PI_1 值均大于 0.25, 这 3 种重金属是北京市降尘中受社会经济活动影响程度极强的重金属, 此外 Pb 的 PI_1 值接近 0.15, 也是北京市降尘中受社会经济活动影响程度较强的重金属; 单因子污染指数的归一化系数(PI_2)排序为 $Zn > Cr > Cu > V > Co > Ni > Pb > Cd$, 其中 Zn、Cr 和 Cu 的 PI_2 值大于等于 0.3, 这 3 种重金属是北京市降尘中对污染的贡献率极高的重金属, 此外 V 和 Co 的 PI_2 值大于 0.15, 也是北京市降尘中对污染的贡献率较高的重金属; 地累积指数的归一化系数(PI_3)排序为 $Cd > Zn > Cu > Pb >$

$Cr > Ni > Co > V$, 其中 Cd、Zn、Cu、Pb、Cr 和 Ni 的 PI_3 值均不小于 0.25, 是冬季北京城区降尘中污染程度较高的重金属, 且 Cd、Zn、Cu 和 Pb 在城区降尘中污染程度极高; 潜在生态风险指数的归一化系数(PI_4)排序为 $Cd > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr > Co > V$, 除 Cd 以外的重金属的 PI_4 值均不超过 0.05, Cd 是冬季北京城区降尘中唯一潜在生态危害程度极高的重金属. 最终计算的北京近郊冬季降尘中重金属的综合污染指数(IPI. dhm)排序为 $Cd > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > V$, 并且 Cd、Zn、Cu、Pb 和 Cr 的 IPI. dhm 值均不小于 0.7, 是北京市降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 的 IPI. dhm 值分别高达 3.00 和 2.06, 是冬季北京近郊降尘中极显著污染因子.

表 5 北京近郊冬季降尘重金属污染综合评价结果

Table 5 Integrated pollution evaluation of dust heavy metals in winter in Beijing suburbs

重金属	Mean/mg·kg ⁻¹	BR	PI ₁	SPI	PI ₂	I _{geo}	PI ₃	E _r [*]	PI ₄	IPI. dhm
Cd	2.0	19.8	1.00	0.20	0.00	3.6	1.00	599	1.00	3.00
Co	17.4	1.4	0.02	0.35	0.16	-0.3	0.13	5	0.01	0.31
Cr	128.3	2.1	0.06	0.49	0.31	0.6	0.33	5	0.01	0.70
Cu	144.9	6.4	0.29	0.48	0.30	2	0.64	29	0.05	1.28
Ni	51.5	1.9	0.05	0.34	0.15	0.3	0.27	9	0.01	0.48
Pb	93.5	3.6	0.14	0.31	0.12	1.2	0.47	22	0.03	0.76
V	82.9	1.0	0.00	0.41	0.23	-0.9	0.00	2	0.00	0.23
Zn	572.2	7.7	0.36	1.14	1.00	2.2	0.69	6	0.01	2.06

3 结论

(1)北京冬季降尘重金属 Cd、Bi 和 Mo 含量的平均值不足 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Co、Ni 和 V 含量的平均值在 $10 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; 而 Pb、Cr、Cu 和 Zn 含量的平均值均超过 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 并且城区降尘重金属 Pb、Cr、Cu、Zn 的含量(分别为 147.1、195.9、239.2 和 $713.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)明显高于郊区(分别为 91.6、125.1、131.9 和 $514.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

(2)北京冬季降尘重金属 Bi、Cu、Ni、Pb 微量富集, 主要来源于地壳或土壤源; Cd、Cr、Mo、Zn 轻度富集, 受自然源和人为源共同作用.

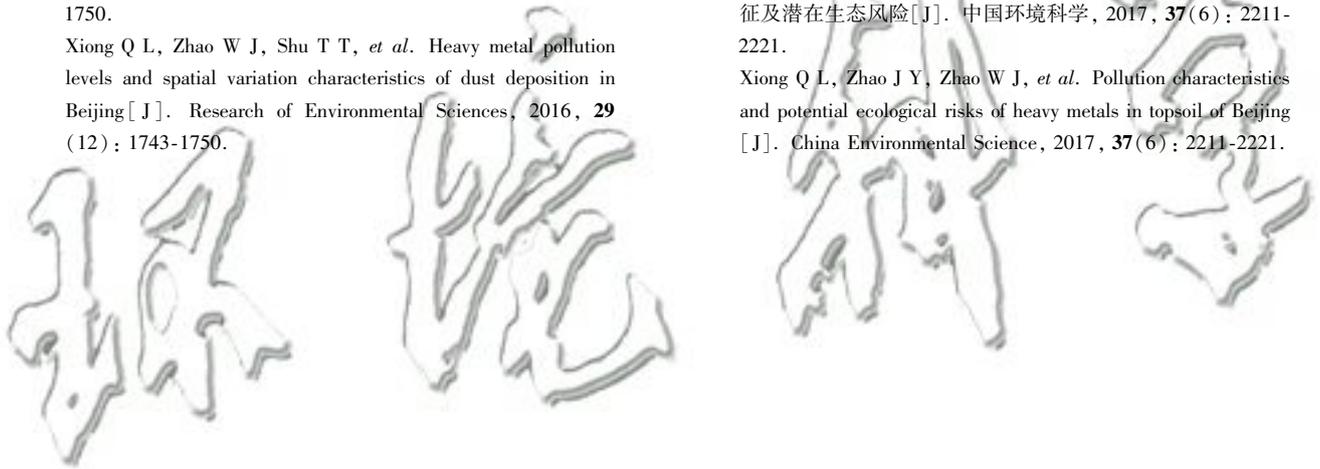
(3)北京城区冬季降尘中重金属的综合污染指数(IPI. dhm)排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Co}$, 并且 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的 IPI. dhm 值均大于 0.8, 是北京市降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 的 IPI. dhm 值分别高达 3.00 和 1.97, 是冬季北京城区降尘中极显著污染因子. 北京近郊冬季降尘中重金属的综合污染指数(IPI. dhm)排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{V}$, 并且 Cd、Zn、Cu、Pb 和 Cr 的 IPI. dhm 值均不小于 0.7, 是北京市降尘中显著污染因子, 其中 Cd 和 Zn 的 IPI. dhm 值分别高达 3.00 和 2.06, 是冬季北京近郊降尘中极显著污染因子.

致谢:感谢中国科学院青岛海洋研究所对本研究的支持. 束同同、陈凡涛、郑晓霞等在采样和实验方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 乔庆庆, 黄宝春, 张春霞. 华北地区大气降尘和地表土壤磁学特征及污染来源[J]. 科学通报, 2014, **59**(18): 1748-1760.
- Qiao Q Q, Huang B C, Zhang C X. Magnetic properties and pollution sources in dustfall and topsoil of North China [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, **59**(18): 1748-1760.
- [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] Andersen A, Hovmand M F, Johnsen I. Atmospheric heavy metal deposition in the Copenhagen area [J]. Environmental Pollution, 1978, **17**(2): 133-151.
- [4] Okubo A, Takeda S, Obata H. Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan [J]. Atmospheric Research, 2013, **129-130**: 20-32.
- [5] Chen H, Lu X W, Li L Y, *et al.* Metal contamination in campus dust of Xi'an, China: A study based on multivariate statistics and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2014, **484**: 27-35.
- [6] Lee P K, Choi B Y, Kang M J. Assessment of mobility and bioavailability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk [J]. Chemosphere, 2015, **119**: 1411-1421.
- [7] 梁俊宁, 刘杰, 陈洁, 等. 陕西西部某工业园区采暖期大气降尘重金属特征 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 318-324.
- Liang J N, Liu J, Chen J, *et al.* Characteristics of heavy metals in atmospheric deposition in heating periods of an industrial park in western Shaanxi Province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(2): 318-324.
- [8] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: Mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability [J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 257-265.
- [9] 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.
- [10] Zheng X X, Zhao W J, Yan X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of airborne heavy metals collected from Beijing bus stations [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(8): 9658-9671.
- [11] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- Li P, Xue L Y, Wang S L, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. Environment Science, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- [12] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **112**: 186-192.
- [13] 方文稳, 张丽, 叶生霞, 等. 安庆市降尘重金属的污染评价与健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- Fang W W, Zhang L, Ye S X, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Anqing [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- [14] 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 等. 新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2453-2461.
- Yang C, Tashpolat T, Hou Y J, *et al.* Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar basin in Xinjiang [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2453-2461.
- [15] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou [J]. Applied Geochemistry, 2016, **67**: 52-58.
- [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] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥. 长春市城区重金属大气干湿沉降

- 特征[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(1): 28-34.
- Yang Z P, Lu W X, Long Y Q. Atmospheric dry and wet deposition of heavy metals in Changchun city, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(1): 28-34.
- [18] 任春辉, 卢新卫, 李晓雪, 等. 宝鸡长青镇工业园区周围灰尘重金属污染特征及健康风险[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 367-374.
- Ren C H, Lu X W, Li X X, *et al.* Pollution level and health risk of heavy metals in dust from the surrounding environment of the industrial park in Changqing town of Baoji [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3): 367-374.
- [19] 国家环境保护总局. 环境空气降尘的测定重量法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [20] 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 等. 北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- Xiong Q L, Zhao W J, Guo X Y, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of dustfall trace elements during winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- [21] 熊秋林, 赵文吉, 束同同, 等. 北京降尘重金属污染水平及其空间变异特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1743-1750.
- Xiong Q L, Zhao W J, Shu T T, *et al.* Heavy metal pollution levels and spatial variation characteristics of dust deposition in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(12): 1743-1750.
- [22] 土壤环境质量标准(修订)GB 15618-2008 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [23] 熊秋林, 赵文吉, 王皓飞, 等. 北京市春季PM_{2.5}中金属元素污染特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(7): 1181-1187.
- Xiong Q L, Zhao W J, Wang H F, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of metal elements in PM_{2.5} during spring in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(7): 1181-1187.
- [24] 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.
- [25] 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. 87-91.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 熊秋林, 赵佳茵, 赵文吉, 等. 北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2211-2221.
- Xiong Q L, Zhao J Y, Zhao W J, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2211-2221.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)