

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

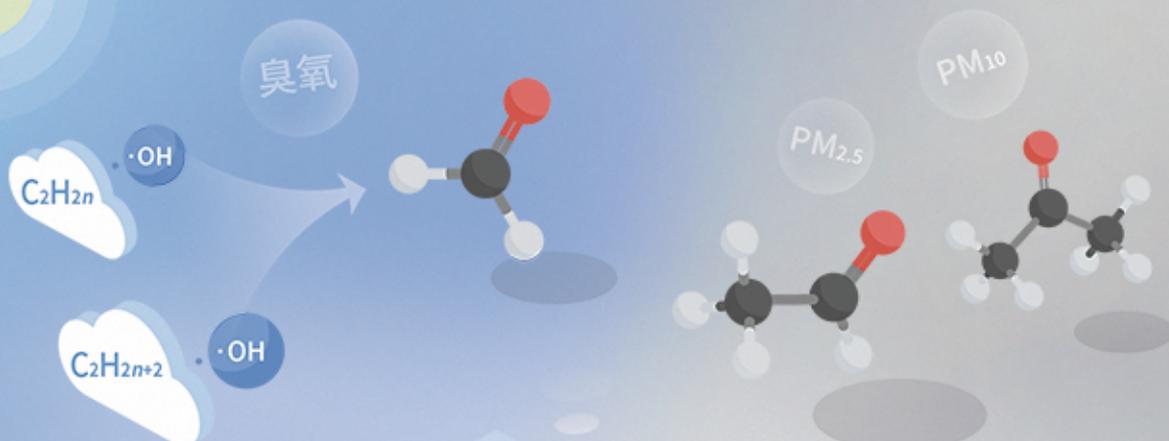
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1



目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 颜亚玮, 於驰晨, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉吸附形态和糙米镉累积的调控效应 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估

雷文凯¹, 李杏茹^{2*}, 张兰², 徐静³, 赵文吉¹, 刘子锐⁴

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 首都师范大学化学系, 北京 100048; 3. 生态环境部环境发展中心环境标准样品研究所, 北京 100029; 4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 为了解保定市大气环境中 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及其健康风险, 在保定市设立观测站点, 利用中流量颗粒物采样器对保定市大气 PM_{2.5} 进行了连续昼夜采集, 并使用微波消解-电感耦合等离子质谱法分析了样品中的 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 10 种重金属元素的质量浓度. 结果表明, 保定市大气 PM_{2.5} 浓度范围为 16.84 ~ 476.19 μg·m⁻³, 采样期间有 65d 高于我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中的二级标准, 超标率为 54.2%. 保定市 PM_{2.5} 中重金属元素的浓度变化趋势为: 除 Ni、Mn 和 Co 外, 夜间浓度略大于日间; 大部分重金属元素秋冬季浓度大于春夏季. 富集因子分析可知, 保定市 Cu、Zn、Pb、Cd 主要来自于人为源, 特别是受到交通源的影响较大. 健康风险评估结果表明, 保定市大气 PM_{2.5} 中的重金属污染的非致癌风险较小, 致癌风险主要是 As、Cr、Cd 和 Co, 且成年人的致癌风险大于儿童.

关键词: PM_{2.5}; 重金属元素; 季节变化; 富集因子; 健康风险

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0038-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004230

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM_{2.5} Collected in Baoding

LEI Wen-kai¹, LI Xing-ru^{2*}, ZHANG Lan², XU Jing³, ZHAO Wen-ji¹, LIU Zi-rui⁴

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Institute of Environmental Reference Materials, Environmental Development Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To reveal the pollution characteristics and the health risks of the trace heavy metals in the atmospheric particles in Baoding, Hebei province, PM_{2.5} samples were collected using a middle volume sampler, and the mass concentrations of V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the samples were determined by microwave digestion-inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that the PM_{2.5} concentration in Baoding ranged from 16.84-476.2 μg·m⁻³. During sampling, 65 samples were above the second-level standard of the Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012) by 54.2%. The most heavy metal elements showed higher levels in nighttime than during the daytime, except for Ni, Mn, and Co. Obvious seasonal variation was found with the trend of winter > autumn > spring > summer. The enrichment factors for Cu, Zn, Pb, and Cd were more than 1.5, indicating that those metals mainly came from anthropogenic emissions, such as traffic sources. Health risk assessment results indicated that the non-carcinogenic risk of heavy metals in PM_{2.5} in Baoding was small, and the carcinogenic risk resulting from As, Cr, Cd, and Co was greater for adults than for children.

Key words: PM_{2.5}; heavy metals; seasonal changes; enrichment factor; health risks

PM_{2.5} 是指空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物. 其特点是体积小、比表面积大和活性强, 能够吸附大量的金属元素^[1]. 有毒有害重金属如 Pb、Cd、Ni、Mn、V 和 Zn 等, 主要吸附在小于 2 μm 颗粒物上^[2]. 有研究表明, 重金属能够通过呼吸作用随 PM_{2.5} 直接进入人体的肺泡中并在人体内大量富集. As、Cr、Ni 和 Cd 对人体具有一定的致癌作用, Zn、Cu 和 Pb 积累会导致人体出现一系列疾病^[3, 4].

近年来, 国内外对金属元素的健康风险进行了大量研究. 宋浩军等^[5]研究了北京市 PM_{2.5} 中重金属元素的健康风险. 张芳源等^[6]评价了石家庄市大

气 PM_{2.5} 中重金属元素的健康风险. 张启钧等^[7]对天津市道路 PM_{2.5} 中重金属的粒径分布和健康风险进行了分析. MohseniBandpi 等^[8]对伊朗德黑兰空气中 PM_{2.5} 的重金属进行了健康风险评估. 但是在重金属的健康风险研究中, 研究地点主要集中于人口众多的大城市, 对于一些二三线城市却不够重视.

保定市是京津冀地区一个重要的工业城市, 其环境空气质量在 2013 ~ 2016 年连续 4 a 在全国 74

收稿日期: 2020-04-27; 修订日期: 2020-06-29

作者简介: 雷文凯(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学, E-mail: 18601232683@163.com

* 通信作者, E-mail: lixr@cnu.edu.cn

城市中排名垫底,但有关保定市大气 PM_{2.5} 中重金属的健康风险研究却很少. 本文通过探究保定市大气颗粒物 PM_{2.5} 中 10 种重金属元素的污染特征,评价它们经呼吸道摄入带来的健康风险,以期为保定市今后大气中重金属的防治政策制定提供基础的数据支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点概况

保定采样点(115. 4°E, 38. 8°N)位于市区西部,河北农业大学西校区平房房顶,距离地面高度 3.5 m. 采样点接近城市中心地带,周边没有高大建筑物和典型污染源,周围有很多居民区,西北方向距采样点 1 km 处有一高速立交桥,在东部方向 1.5 km 是朝阳南大街(保定城市主干道).

1.2 样品的采集及分析

使用武汉天虹仪表有限公司生产的中流量采样器(TH150 型)对大气细颗粒物(PM_{2.5})进行采集,设置采样流量为 100 L·min⁻¹. 使用石英纤维滤膜(Pall; *d* = 90 mm)采集样品,采样前先将采样膜在马弗炉(EYELA, 日本)中 500℃ 焙烧 3 h,将膜上的有机物消除掉,冷却后,在恒温恒湿箱(温度 25℃, 湿度 50%)中平衡 24 h,用十万分之一精密电子天平称重(Sartorius, 德国,精密度 0.01 mg),装进洗净的膜盒中备用. 对研究区域内进行了夏(2015-06-26 ~ 2015-07-25)、秋(2015-09-21 ~ 2015-10-21)、冬(2015-12-16 ~ 2016-01-14)和春(2016-03-21 ~ 2016-04-19)这 4 个季节同步采样,每天采集日夜两个样品,分别为 08: 00 ~ 19: 30(日间)和 20: 00 ~ 次日 07: 30(夜间),每个季节采样 30 d,且日间和夜晚各设 3 张实验空白膜,除去采样过程中因停电、设备故障、恶劣天气等意外事件发生而导致采样失败,采样点采集样品数共计 253 个. 采样后将膜放入恒温恒湿箱里(温度 25℃, 湿度 50%)中平衡 24 h,称重后放入膜盒并将其置于冰箱(-18℃)中避光保存至分析.

将 1/4 面积的石英膜剪碎后加入消解罐,依次加入 6mL HNO₃、2mL H₂O₂ 和 0.6 mL HF,放入微波消解仪进行消解. 将消解完全的样品定容至 100 mL 后使用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 8800)对 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 10 种重金属元素的浓度进行测定. 测样之前进行仪器调谐保证仪器标准曲线的 *R* 值均达到 0.999 9 以上. 在测样过程中每个测试样品测 3 次,依据内标元素(⁷²Ge、¹⁰³Rh、¹¹⁵In 和 ²⁰⁹Bi)的相对标准偏差(RSD)的数值从而保证仪器的稳定性^[9]. 将内标管放进

1 μg·L⁻¹的内标溶液(Part #5183-4680, Agilent),每次数据采集结束后,检查内标元素的 RSD 值,保证每个 RSD 值小于 3%,否则重新采集样品. 另外,取 1/4 面积空白膜也用相同的消解和分析方法进行处理,以其 3 倍空白膜的标准偏差作为检出限,除 As 的检测限在 0.1 g·L⁻¹ 外,其它元素检出限均可达到 0.01 g·L⁻¹ 甚至更低. 各个重金属元素的回收率在 80% ~ 120% 之间.

1.3 富集因子

富集因子是通过样品中某元素的实测值与该元素背景值对比来计算元素的富集程度,以判断人为来源对样品中无机元素含量的贡献水平,计算见公式(1)^[10-12]:

$$EF = \frac{(C_i/C_{Al})_{\text{样品}}}{(C_i/C_{Al})_{\text{地壳}}} \quad (1)$$

式中,EF 为富集因子; $(C_i/C_{Al})_{\text{样品}}$ 为 PM_{2.5} 中金属元素与参考元素 Al 含量的比值; $(C_i/C_{Al})_{\text{地壳}}$ 为地壳中金属元素与参考元素 Al 含量的比值,本研究选择河北土壤元素背景值(1990 年). 若元素 EF < 10, 可以认为该元素的来源可能是土壤或者地壳源; 若 EF 的值大于 10, 表明元素主要受到人类活动的影响^[13,14].

1.4 健康风险评价

本研究以美国环保署(US EPA)发布的人体健康风险评价模型为基本框架^[15],对 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 10 种重金属元素通过呼吸途径分别对成年男性、女性及儿童进行健康风险评价.

1.4.1 暴露剂量计算

人体健康风险评估是根据致癌和非致癌元素的平均浓度进行的. 非致癌元素采用正常平均日剂量[ADD, mg·(kg·d)⁻¹],致癌元素采用终身平均日剂量[LADD, mg·(kg·d)⁻¹],计算见公式(2)^[16,17]:

$$ADD(LADD) = \frac{c \times InhR \times EF \times ED}{AT \times BW} \quad (2)$$

式中,*c* 表示污染物浓度(mg·m⁻³),InhR 是呼吸频率(m³·d⁻¹),EF 是暴露频率(d·a⁻¹),ED 是暴露持续时间(a),BW 是体重(kg),AT 是平均暴露时间(d)

根据文献[18],确定人群暴露评价参数,见表 1.

1.4.2 致癌与非致癌风险计算

根据 EPA 综合风险信息数据库(IRIS)和国际癌症研究机构(IARC)的相关研究成果,发现 Cu、Zn、Pb、V 和 Mn 是非致癌的重金属元素,而 Co、Ni、Cr、Cd 和 As 是致癌的重金属元素. 采用美国

表 1 人群暴露评价模型参数

Table 1 Parameters of the population exposure evaluation model

人群	InhR/m ³ ·d ⁻¹	BW/kg	EF/d·a ⁻¹	ED/a	AT 致癌/d	AT 非致癌/d
成年男性	19.2	62.7	350	30	70 × 365	30 × 365
成年女性	14.17	54.4	350	30	70 × 365	30 × 365
儿童	5	15	350	6	70 × 365	6 × 365

环保署推荐的健康风险评估模型,呼吸暴露非致癌风险评价模型如公式(3)所示,致癌风险评价模型如公式(4)所示:

$$HQ = ADD/RfD \quad (3)$$

$$CR = LADD \times SF \quad (4)$$

式中,RfD表示参考剂量[$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$],HQ是污染物经呼吸暴露非致癌风险危险商(无量纲值).当HQ大于1时,存在非致癌风险;当HQ小于或等于1时,风险较小或可忽略^[19].CR是污染物经呼吸暴露致癌风险(无量纲值),SF是斜率因子[$(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$].当CR大于 10^{-6} 时,存在严重的潜在致癌风险;当CR小于 10^{-6} 时,存在的风险较少或可忽略该风险^[20].计算中使用的反应参数^[21-23]如表2所示.

表 2 通过呼吸系统进入人体的元素的反应参数

Table 2 Response parameters of elements entering the human body through the respiratory system

元素	风险	SF/($\text{kg} \cdot \text{d}$)· mg^{-1}	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$
Cr	致癌	42	
Co	致癌	32	
Ni	致癌	0.84	
As	致癌	20.07	
Cd	致癌	8.4	
V	非致癌		7×10^{-3}
Mn	非致癌		3×10^{-4}
Cu	非致癌		1.43×10^{-2}
Zn	非致癌		0.3
Pb	非致癌		3.5×10^{-3}

表 3 保定 PM_{2.5} 中不同季节金属元素日夜变化规律¹⁾/ng·m⁻³Table 3 Night and day variation of metal elements in different seasons in Baoding PM_{2.5}/ng·m⁻³

元素	夏		秋				冬				春					
	日		夜		日		夜		日		夜		日		夜	
	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std
V	2.21	2.08	2.39	2.07	0.70	0.98	0.66	0.58	1.43	1.24	1.86	1.27	2.56	1.38	2.36	1.22
Cr	2.36	2.15	4.48	4.59	4.71	2.76	5.10	2.28	3.67	2.91	4.06	2.54	2.54	4.19	3.76	2.85
Mn	21.34	7.66	19.38	8.87	38.20	17.87	37.72	31.40	39.02	18.70	38.26	19.83	38.76	21.88	36.85	22.76
Co	0.17	0.11	0.72	1.05	0.65	0.53	0.23	0.20	1.36	1.14	0.81	0.39	0.42	0.26	0.44	0.28
Ni	2.55	2.74	2.64	3.80	6.46	7.33	1.80	1.07	12.44	35.08	2.51	1.29	2.67	3.10	6.66	7.09
Cu	44.41	18.70	61.31	33.03	22.29	12.02	37.48	37.16	88.95	83.36	110.28	43.80	66.79	21.26	110.89	36.32
Zn	185.15	111.59	209.97	178.33	176.52	121.03	207.90	192.10	186.73	86.74	266.22	153.89	133.95	91.42	240.93	194.12
As	8.77	7.96	10.18	13.46	11.51	13.31	9.05	8.21	9.62	11.56	11.95	10.38	6.99	5.53	10.08	10.02
Cd	2.57	2.96	6.10	8.23	4.16	3.62	3.88	4.53	2.24	1.89	3.66	2.65	1.43	1.38	2.32	2.06
Pb	102.39	76.80	189.03	170.71	88.65	59.20	132.90	125.84	136.55	65.61	181.27	102.13	64.10	45.78	75.99	41.31
总计	371.92 ± 232.75		506.2 ± 424.14		353.85 ± 238.65		436.72 ± 403.37		481.05 ± 307.81		620.88 ± 338.17		320.21 ± 196.18		379.39 ± 281.71	

1) Ave 表示平均值; Std 表示标准偏差

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 的分布特征

图 1 为保定市在采样期间的 PM_{2.5} 质量浓度的季节及昼夜变化. 采样期间保定市 PM_{2.5} 的浓度范围为 16.84 ~ 476.19 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 采样期间有 65 d 高于我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中的二级标准(日均值 75 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 占总采样天数的 54.2%. 另外, 保定市夜间的 PM_{2.5} 浓度略高于日间, 因为在夜间易出现逆温层, 空气污染物不易扩散, 到了白天地面温度迅速上升, 逆温层就会逐渐消散, 于是污染物也会扩散, 所以夜间 PM_{2.5} 的浓度偏高^[24]. 季节分布由高到低依次为: 冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季. 这是因为保定市的冬季日照短, 天气寒冷, 缺少雨雪, 气象条件不利于颗粒物扩散和沉降, 同时燃煤供暖, 使得 PM_{2.5} 平均浓度较高; 而春夏季空气流通性好, 湍流运动活跃, 有利于污染物的扩散, 并且春夏季降雨量大、次数多, 有利于颗粒物沉降^[25].

2.2 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征

表 3 为保定市采样期间不同季节重金属元素日夜变化规律. 10 种重金属元素在夏、秋、冬和春这 4 个季节浓度 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$) 平均总和分别为 371.92 ± 232.75、353.85 ± 238.65、481.05 ± 307.81 和 320.21 ± 196.18 (日间); 506.2 ± 424.14、436.72 ± 403.37、620.88 ± 338.17 和 379.39 ± 281.71 (夜间), 总浓度呈现出秋冬季高于春夏季的特征.

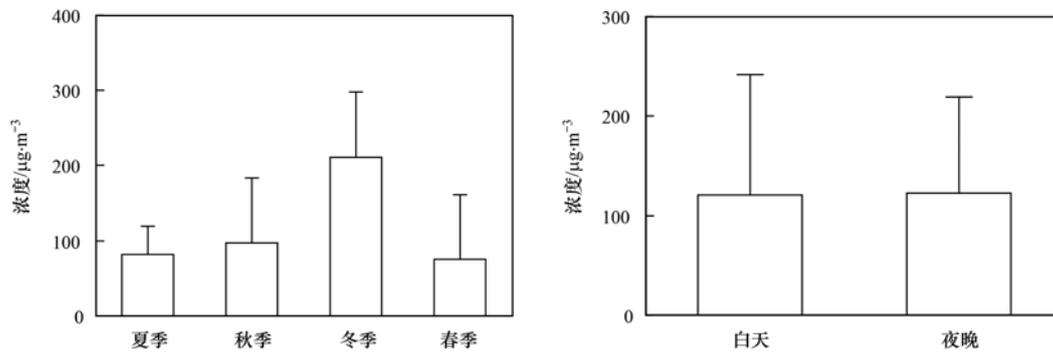
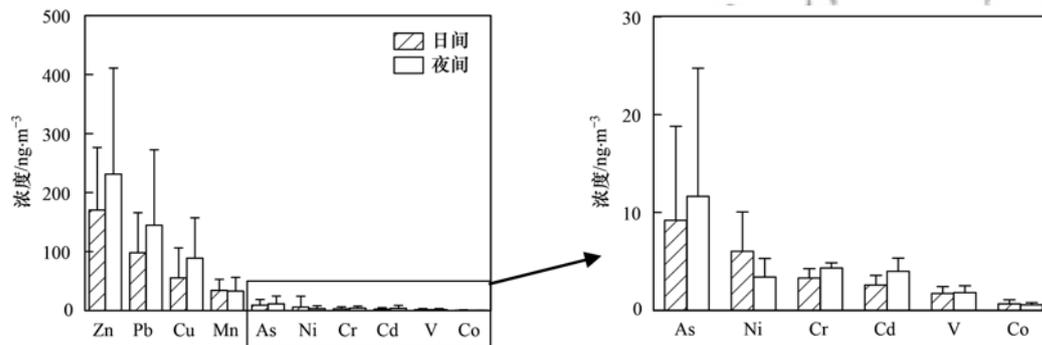
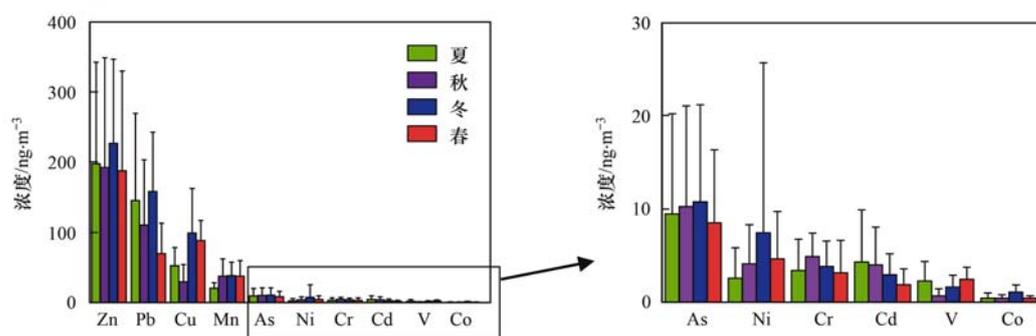
图1 采样期间 PM_{2.5} 质量浓度的季节及昼夜变化Fig. 1 Seasonal and diurnal changes of PM_{2.5} mass concentration during the sampling period

图2为保定市 PM_{2.5} 中金属元素的日夜变化,可以看出除了 Ni、Co 和 Mn 外,保定市重金属元素的浓度均为夜间大于日间(与 PM_{2.5} 的日夜变化趋势一致). Zn, Cd 和 Pb 元素夜间浓度比日间高,这与

夜间大型车辆的通行量增大有关^[26-28]; As 作为煤炭燃烧的特征,受夜间燃煤量增加且供暖排放的影响,夜间浓度较高^[26].

图3为保定市 PM_{2.5} 中金属元素的季节变化,可

图2 保定市 PM_{2.5} 中金属元素的日夜变化Fig. 2 Changes of metal elements in PM_{2.5} in Baoding during day and night图3 保定市 PM_{2.5} 中金属元素的季节变化Fig. 3 Seasonal changes of metal elements in PM_{2.5} in Baoding

以看出保定市的 10 种重金属元素浓度大部分呈现出秋冬季高,春夏季低的特点,与 PM_{2.5} 的季节变化趋势基本一样.这可能是因为秋冬季的空气流动性差,加上特殊的地形和气候条件,所以秋冬季节污染较重,而春夏季空气流通性好,污染物容易扩散.保定市的 Pb 元素质量浓度的最高值出现在冬季 (358.86 ng·m⁻³),小于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中铅的浓度限值 (Pb: 500 ng·m⁻³)^[29]. As 元素的 4 个季节的浓度均高于《环

境空气质量标准》参考浓度限值 (6 ng·m⁻³),且春季 As 的平均浓度为 8.54 ng·m⁻³,是参考浓度限值的 1.42 倍,夏季的浓度为 9.48 ng·m⁻³,是参考标准的 1.58 倍,秋季 As 元素的平均浓度为 10.28 ng·m⁻³,是参考标准的 1.71 倍,冬季浓度为 10.79 ng·m⁻³,为参考标准的 1.80 倍.秋冬季节 As 平均浓度远比其他季节高,这是由秋冬供暖燃煤量增加,导致 As 元素浓度值上升^[30]. Zn 和 Cu 元素的浓度均在冬季最高,春季最低;而 Zn 和 Cu 等元素的浓

度在冬季节明显增高,主要由于交通源和一些工厂的排放,而且冬季空气流动性差,污染物质不易扩散,所以在冬季的浓度高于春夏秋季^[31].保定市是京津冀地区一个重要的工业城市,Ni和Cr浓度增高可能与工业排放有关^[32].

2.3 富集因子分析

富集因子法主要用于简单地分析无机金属元素的来源:地壳源、混合源或者人为源^[33].如果元素的EF值 ≤ 10 时,则表明该元素的来源受人类活动干扰较小,可能是土壤或者地壳源;如果 $10 < EF \leq 100$ 时,表明这些无机重金属元素部分来自人为源,如果EF的值大于100时,说明人类活动的影响较大,表明这些无机重金属元素主要来自人为源^[34,35].

表4 采样期间保定市PM_{2.5}中金属元素富集因子

Table 4 Enrichment factors of metal elements in PM_{2.5} in Baoding during sampling

元素	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
富集因子	2.41	5.58	5.5	4.82	15.23	328.94	310.71	99.64	340.45	560.65
标准偏差	0.97	1.33	1.26	2.84	11.01	174.93	114.79	30.79	142.29	202.02

2.4 健康风险评价

保定市大气PM_{2.5}中10种重金属经呼吸途径不同人群的日常暴露剂量、重金属暴露非致癌和致癌风险见表5.

由表5可知,保定市成年人和儿童的非致癌重金属日均暴露剂量顺序为Zn > Pb > Cu > Mn > V;致癌重金属日均暴露剂量顺序为As > Ni > Cr > Cd > Co.成人和儿童经呼吸途径暴露的非致癌重金属

表4是保定市内重金属元素在PM_{2.5}中的富集因子.从中可知,保定市的各金属元素富集因子(EF)范围是2.41~560.65,其中V、Cr、Mn和Co等元素的EF值小于10,可以认为这些元素来自于地壳源,它们主要是由土壤或岩石风化的尘刮入大气中造成的^[36],而Ni是大于10小于100,说明部分来自人为源,As则是接近100,可认为它主要来自人为源,砷一般是煤炭燃烧的标志,而保定市属于北方,秋冬季采暖会燃烧大量煤炭,这会造成一定的影响.Cu、Zn、Pb和Cd的富集因子EF均大于100,其中Cu是刹车片和轮胎磨损的标志,Zn、Pb和Cd是汽车尾气的代表,这说明主要来自于人为源,特别是交通源的影响.

元素风险顺序为Mn、Pb、Cu、Zn、V;其中儿童 > 成年男性 > 成年女性,HQ均小于1,非致癌风险较小或可忽略,处于人体可接受范围内.而成人和儿童经呼吸途径暴露的重金属元素致癌风险顺序为As > Cr > Cd > Co > Ni,其中As、Cr、Cd、Co对成年人的致癌风险CR均大于 10^{-6} ,As、Cr对儿童的致癌风险CR均大于 10^{-6} ,这说明这些元素对人体均存在一定的致癌风险,且成年男性 > 成年女性 > 儿童.

表5 保定市大气PM_{2.5}中10种重金属经呼吸暴露的风险评价

Table 5 Risk assessment of respiratory exposure of 10 heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in Baoding

重金属	质量浓度 /ng·m ⁻³	ADD(LADD)/mg·(kg·d) ⁻¹			HQ			CR		
		男	女	儿童	男	女	儿童	男	女	儿童
V	1.77	5.20E-07	4.43E-07	5.66E-07	7.43E-05	6.32E-05	8.09E-05	—	—	—
Mn	3.83	9.90E-06	8.42E-06	1.08E-05	3.30E-02	2.81E-02	3.59E-02	—	—	—
Cu	33.69	2.12E-05	1.80E-05	2.31E-05	1.48E-03	1.26E-03	1.62E-03	—	—	—
Zn	0.60	7.21E-05	6.13E-05	7.85E-05	2.40E-04	2.04E-04	2.62E-04	—	—	—
Pb	4.72	3.57E-05	3.03E-05	3.88E-05	1.02E-02	8.67E-03	1.11E-02	—	—	—
Cr	72.18	4.83E-07	4.10E-07	1.05E-07	—	—	—	2.03E-05	1.72E-05	4.41E-06
Co	245.28	7.56E-08	6.42E-08	1.64E-08	—	—	—	2.42E-06	2.05E-06	5.26E-07
Ni	13.64	5.95E-07	5.05E-07	1.29E-07	—	—	—	5.00E-07	4.24E-07	1.09E-07
As	3.29	1.72E-06	1.46E-06	3.74E-07	—	—	—	3.45E-05	2.93E-05	7.50E-06
Cd	121.36	4.15E-07	3.52E-07	9.01E-08	—	—	—	3.48E-06	2.96E-06	7.57E-07

3 结论

(1) 保定市PM_{2.5}浓度范围为16.84~476.19 μg·m⁻³,有65d高于我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的二级标准,且保定市夜间的PM_{2.5}浓度略高于日间,四季中冬季PM_{2.5}的浓度最高,这主要与供暖、交通等排放有关.

(2) 保定市PM_{2.5}中重金属元素的浓度变化主

要趋势:大部分元素都是夜间浓度大于日间,秋冬季浓度大于春夏季.

(3) 通过计算保定市的富集因子,V、Cr、Mn、Co等元素可能来自地壳源,Ni、As部分来自人为源;Cu、Zn、Pb、Cd主要来自于人为源,特别是交通源的影响.

(4) 保定市大气PM_{2.5}中的重金属污染的非致癌风险较小,致癌风险主要是As、Cr、Cd、Co这4

种元素,且成年人的致癌风险大于儿童。

参考文献:

- [1] 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 等. 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4774-4782.
He R D, Zhang Y S, Chen Y Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological and health risk assessment of atmospheric PM_{2.5} in a living area of Zhengzhou city [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4774-4782.
- [2] 杨震, 王海波, 王小蓉, 等. 青海省某工业园区大气 PM_{2.5} 重金属的污染特征及来源解析[J]. 广州化工, 2018, **46**(3): 125-128.
Yang Z, Wang H B, Wang X R, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} of an industrial park in Qinghai[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, **46**(3): 125-128.
- [3] 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 等. 北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 997-1003.
Zhang X, Zhao X M, Meng X J, *et al.* Particle size distribution and human health risk assessment of heavy metals in atmospheric particles from Beijing and Xinxiang during summer [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 997-1003.
- [4] 郑元铸, 葛琳琳, 郑旭军, 等. 温州市区 PM_{2.5} 无机元素污染特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(1): 84-91.
Zheng Y Z, Ge L L, Zheng X J, *et al.* Characteristics and source apportionment of inorganic elements in PM_{2.5} in Wenzhou, Zhejiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(1): 84-91.
- [5] 宋浩军, 罗敏, 徐殿斗, 等. 北京市 PM_{2.5} 污染特征、来源分析及其重金属健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(11): 1357-1361.
Song H J, Luo M, Xu D D, *et al.* The pollution characteristics, sources of PM_{2.5} in Beijing and health risk assessment of its heavy metals[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, **41**(11): 1357-1361.
- [6] 张芳源, 冯福民, 李建国, 等. 石家庄市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2019, **36**(7): 612-615.
Zhang F Y, Feng F M, Li J G, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Shijiazhuang[J]. Journal of Environment and Health, 2019, **36**(7): 612-615.
- [7] 张启钧, 吴琳, 方小珍, 等. 天津典型道路环境 PM_{2.5} 中重金属的粒径分布及健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(10): 1202-1206.
Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Particle size distribution and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in typical road environment in Tianjin[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, **41**(10): 1202-1206.
- [8] MohseniBandpi A, Eslami A, Ghaderpoori M, *et al.* Health risk assessment of heavy metals on PM_{2.5} in Tehran air, Iran[J]. Data in Brief, 2018, **17**: 347-355.
- [9] 巴合提古丽·马解放. 我国大气颗粒物中重金属监测技术研究[J]. 科技展望, 2016, **26**(14): 177.
- [10] 张春荣, 吴正龙, 田红, 等. 青岛市区大气降尘重金属的特征和来源分析[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1187-1193.
Zhang C R, Wu Z L, Tian H, *et al.* Characteristics and sources analysis of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(7): 1187-1193.
- [11] 李秀镇, 盛立芳, 徐华, 等. 青岛市大气 PM_{2.5} 元素组成及来源研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1438-1445.
Li X Z, Sheng L F, Xu H, *et al.* Element compositions and source of PM_{2.5} aerosols in Qingdao[J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1438-1445.
- [12] Li Y F, Li Z, Cozzi G, *et al.* Signals of pollution revealed by trace elements in recent snow from mountain glaciers at the Qinghai-Tibetan plateau [J]. Chemosphere, 2018, **200**: 523-531.
- [13] Huang L K, Wang K, Yuan C S, *et al.* Study on the seasonal variation and source apportionment of PM₁₀ in Harbin, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2010, **10**(1): 89-93.
- [14] 王强, 戴玄吏, 巢文军, 等. 常州市春季大气 PM_{2.5} 中金属元素的分析及污染特征[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 323-330.
Wang Q, Dai X L, Chao W J, *et al.* Analysis and pollution characteristics of metal elements in PM_{2.5} in Changzhou during spring [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 323-330.
- [15] 郭金停, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市公园灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(2): 415-420.
Guo J T, Zhou J, Hu B B, *et al.* Health risk assessment on heavy metals in dust of urban parks in Tianjin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(2): 415-420.
- [16] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(9): 838-840.
- [17] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238-1244.
Dong T, Li T X, Zhao X G, *et al.* Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air PM₁₀ from one coking plant [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- [18] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [19] 张洛红, 范芳, 蒋炜炜, 等. 珠三角地区大气 PM_{2.5} 中重金属污染水平及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(1): 370-380.
Zhang L H, Fan F, Jiang W W, *et al.* Concentrations and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in the Pearl River Delta Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(1): 370-380.
- [20] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2225-2232.
Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [21] Gao Y, Guo X Y, Li C, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in Miyun, the northeastern suburb of Beijing: chemical composition and evaluation of health risk [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(21): 16688-16699.
- [22] Betha R, Pradani M, Lestari P, *et al.* Chemical speciation of trace metals emitted from Indonesian peat fires for health risk assessment [J]. Atmospheric Research, 2013, **122**: 571-578.
- [23] Chen P F, Bi X H, Zhang J Q, *et al.* Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM_{2.5} in Tianjin, China [J]. Particuology, 2015, **20**:

- 104-109
- [24] 徐静, 李杏茹, 张兰, 等. 北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, *et al.* Concentration and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in urban and suburban areas of Beijing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- [25] 陈颖, 王广友, 李晓刚, 等. 保定市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 时间分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(S2): 128-131, 163.
- Chen Y, Wang G Y, Li X G, *et al.* Study on temporal distribution pattern of PM₁₀ and PM_{2.5} in urban Baoding[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(S2): 128-131, 163.
- [26] 王永慧, 刘芑岩, 于泊藁, 等. 保定市日间、夜间大气 PM_{2.5} 中无机组分的特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(9): 1941-1948.
- Wang Y H, Liu P Y, Yu B Q, *et al.* Characteristics and source analysis of inorganic components in PM_{2.5} samples collected during daytime and night in Baoding City[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(9): 1941-1948.
- [27] Qie G H, Wang Y, Wu C, *et al.* Distribution and sources of particulate mercury and other trace elements in PM_{2.5} and PM₁₀ atop Mount Tai, China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **215**: 195-205.
- [28] 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 等. 常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 980-989.
- Liu J S, Gu Y, Ma S S, *et al.* Day-night differences and source apportionment of inorganic components of PM_{2.5} during Summer-Winter in Changzhou City[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 980-989.
- [29] 郭翌霞, 耿红, 张晋宏, 等. 山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1004-1013.
- Guo Z X, Geng H, Zhang J H, *et al.* Ecological and health risks of trace heavy metals in atmospheric PM_{2.5} collected in Wuxiang Town, Shanxi Province[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1004-1013.
- [30] Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, *et al.* Elemental characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the western coastal area of central Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1139-1150.
- [31] 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 等. 电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 18-26.
- Zhao Z L, Zhao W T, Huang T, *et al.* Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ around electroplating plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 18-26.
- [32] Feng J L, Yu H, Su X F, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a heavily polluted city in North China: fireworks and health risks[J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 176-188.
- [33] 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.
- [34] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 12-17.
- Yang W F, Yin Y, Wei Y X, *et al.* Characteristics and sources of metal elements in PM_{2.5} during hazy days in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(1): 12-17.
- [35] 虎彩娇, 成海容, 李锦伦, 等. 黄石市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中元素特征及重金属生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, **37**(1): 138-145.
- Hu C J, Cheng H R, Li J L, *et al.* Characteristics of elements and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ and PM_{2.5} in Huangshi[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(1): 138-145.
- [36] 房春生, 陈分定, 陈克华, 等. 龙岩市大气颗粒物来源统计分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 214-219.
- Fang C S, Chen F D, Chen K H, *et al.* Statistical analysis of atmospheric particulate matter sources in Longyan City [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(2): 214-219.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)