

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
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价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
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	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/ NH_4^+ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

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价

张鑫¹, 赵小曼¹, 孟雪洁¹, 王小颖¹, 杨帅¹, 许骁鹏¹, 王书亭¹, 谷超¹, 王梦蕾¹, 任浩¹, 张子洋¹, 闫广轩¹, 曹治国^{1,2,*}, 王跃思^{3,4,*}

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染与防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007; 2. 清华大学环境学院, 新兴有机污染物控制北京市重点实验室, 北京 100084; 3. 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本研究在空气质量为良的情况下(AQI:55~90, PM_{10} :37~97 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}$:17~76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 于2016年6~8月, 用Andersen撞击式分级采样器分别于北京市、新乡市两地室内外共采集6组54个样品, 经微波消解仪消解, 对大气颗粒物中的9种重金属元素(Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Mn、Co)用电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS)进行定量检测。研究发现:两地除Cd富集指数(北京:15.0, 新乡:8.47)较高外, 其余元素富集指数(0~3)均较低。北京市公园大气颗粒物中的Cr、Co、Cu、Mn, 办公室大气颗粒物中的Cd、Pb、Mn, 新乡市公园大气颗粒物中的Cr、Co、Ni、As及两道路路大气颗粒物中各金属元素在粗颗粒物中的比重较大;而北京市公园大气颗粒物中的Pb、Zn、Cd、Ni、As, 办公室大气颗粒物中的Co、Zn、Ni、Cr、As、Cu, 新乡市公园大气颗粒物中的Pb、Zn、Cd、Cu、Mn及办公室大气颗粒物中各金属元素则呈相反规律。人体健康风险评价结果显示, 5种致癌元素的致癌风险值均小于 10^{-4} , 但若长期处于此种环境, 会有较低的潜在致癌风险。对于4种非致癌元素而言, 北京市大气颗粒物中Pb、Zn、Mn、Cu的非致癌健康风险值都远小于1, 即风险可以忽略;除Mn外, 新乡市大气颗粒物中的Pb、Zn、Cu均不存在明显非致癌风险。

关键词: 大气颗粒物; 重金属; 粒径分布; 健康风险评价

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-0997-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705137

Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer

ZHANG Xin¹, ZHAO Xiao-man¹, MENG Xue-jie¹, WANG Xiao-ying¹, YANG Shuai¹, XU Xiao-peng¹, WANG Shu-ting¹, GU Chao¹, WANG Meng-lei¹, REN Hao¹, ZHANG Zi-yang¹, YAN Guang-xuan¹, CAO Zhi-guo^{1,2,*}, WANG Yue-si^{3,4,*}

(1. Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Beijing Key Laboratory for Emerging Organic Contaminants Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Under a condition of good air quality (AQI: 55-90, PM_{10} : 37-97 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}$: 17-76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), six groups of 54 samples were collected using an Andersen cascade impactor from both the indoor and outdoor stations in Beijing and Xinxiang from June to August in 2016. The samples were digested by microwave digestion, and nine heavy metal elements (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Mn, and Co) in the atmospheric particles were determined with an inductively coupled plasma source mass spectrometer (ICP-MS). The results showed that the enrichment index (0-3) of most elements were low in both cities except for Cd [15.0 (Beijing) and 8.47 (Xinxiang)]. Cr, Co, Cu, and Mn in the atmospheric particles from Beijing park, Cd, Pb, and Mn in the atmospheric particles from the Beijing office, Cr, Co, Ni, and As in the atmospheric particles from Xinxiang park, and all nine heavy metal elements in the atmospheric particles from roads in both cities were found to be more concentrated in the coarse fractions; however, Pb, Zn, Cd, Ni, and As in the atmospheric particles from Beijing park, Co, Zn, Ni, Cr, As, and Cu in the atmospheric particles from the Beijing office, Pb, Zn, Cd, Cu, and Mn in the atmospheric particles from Xinxiang park, and all nine metal elements in the atmospheric particles from the Beijing office showed the opposite pattern. The result of a human health risk assessment indicated that the

收稿日期: 2017-05-15; 修订日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(21607038); 中国博士后科学基金项目(2015M570629, 2016T90668); 河南师范大学科学基金项目(5101219279007, 5101219170802); 河南省高等学校重点科研项目(16A610002)

作者简介: 张鑫(1985~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境重金属污染治理及植物修复技术, E-mail: zx_htu@163.com

* 通信作者, E-mail: wq11ab@163.com; wys@dq.cern.ac.cn

carcinogenic risk of the five carcinogenic elements were all less than 10^{-4} , but a lower potential cancer risk would also occur under long term exposure. For the four non-carcinogenic elements (Pb, Zn, Mn, and Cu), the non-carcinogenic health risk values of Pb, Zn, Mn, and Cu in the atmospheric particulates in Beijing were all far less than 1, which means the corresponding non-carcinogenic risk was negligible; and, except for Mn, there was no obvious non-carcinogenic risk from Pb, Zn, and Cu in the atmospheric particles of Xinxiang.

Key words: atmospheric particulates; heavy metal; size distribution; human health risk assessment

随着经济快速发展,我国大气污染形势日益严峻,大气颗粒物的污染防治已成为全社会关注的焦点问题^[1]. 大气颗粒物(particulate matter, PM)指大气中除气体之外的物质,包括各种液体、固体和气溶胶,其粒径范围在 $0.01 \sim 200 \mu\text{m}$ ^[2],是大气环境中组成最复杂、危害最大的污染物之一^[3]. 重金属是大气颗粒物中重要的污染成分,具有生物富集性和不可降解性,可通过呼吸作用进入人体,对人类健康有极大的潜在威胁^[4].

Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Mn、Co是9种常见的重金属,且对人体健康及生态环境有重要影响,其中As、Cr、Ni和Cd具有一定的致癌作用,As和Cd对人体有潜在致畸作用,而Pb对胎儿有毒性作用^[5]. 目前,我国大气颗粒物中重金属污染比较严重,因此,近年来大气颗粒物的重金属污染问题引起了相关学者的广泛关注^[4,6-8].

粒径是大气颗粒物的一个重要性质参数,污染物可能会因地域、粒径的不同而表现出显著不同的赋存特征^[6,9,10]. 同时,不同粒径颗粒物及其中的重金属对人体的潜在健康风险存在很大差异^[11]. 目前,我国关于大气颗粒物中重金属污染及人体健康风险的研究多集中于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等中重金属的时空分布规律^[7,12],而关于重金属在大气颗粒物中粒径分布及影响因素的研究尚不多见^[9,10]. 已有的关于北京、新乡两地大气颗粒物中重金属的研究中,北京市较多研究单一地点的多种^[13]或单一重金属元素^[14,15]浓度分布特征,而对粒径分布及健康风险评价的相关研究较少;关于新乡市大气颗粒物中重金属污染特征及人体健康风险的研究尚未见报道. 且鲜有将北京和新乡两地污染现状作比较的研究.

鉴于此,为了解大气颗粒物中常见的9种重金属元素(Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Mn、Co)的室内外浓度差异、粒径分布、对人体的危害程度,以北京市、新乡市分别作为大、中型城市代表,对北京市、新乡市两地文教区不同地点的大气颗粒物分别进行采样调查,对比研究大、中型城市大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险,以期为

推进城市环境重金属污染的防控提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

于2016年6~8月在北京(海淀区)、新乡(牧野区)两地文教区,就近选择公园(A、D)、办公室(B、E)、道路(C、F)各一个进行采样,实际记录AQI、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 范围分别为55~90、37~97 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、17~76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 选用Andersen撞击式分级采样器(型号:TE-20-800,流量:28.3 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 0~F级粒径范围分别为 $0 \sim 0.4$ 、 $0.4 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 1.1$ 、 $1.1 \sim 2.1$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 、 $4.7 \sim 5.8$ 、 $5.8 \sim 9.0$ 、 $9.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$),进气高度约距地面1.5 m,在每个采样点连续采样24 h,(由于采样区域限制,采样不完全同步)共采集6组54个样品,同步记录其气象数据(天气、温度、风向等).

采样滤膜选用直径为81 mm的石英纤维滤膜,采样前将空白滤膜置于马弗炉中,400℃焙烧4 h. 采样前后将滤膜放入恒温、恒湿箱(温度:50℃,相对湿度:50%)中平衡24 h,用精确度十万分之一的精密电子天平称量,重复操作直至数据稳定,前后质量之差即为各个粒径段颗粒物质量. 采样结束后将滤膜放置冰箱(-20°C)内保存,直至分析.

1.2 样品分析及检测

取四分之一石英纤维滤膜置于消解罐中,依次加入 HNO_3 6 mL、 H_2O_2 2 mL、HF 1 mL. 用微波消解仪(型号MDS-6G,上海新仪微波有限公司),采取三步升温法进行消解,消解液用稀硝酸定容至50 mL容量瓶中待测,并采用相同步骤对空白及加标回收样品进行消解. 用电感耦合等离子-质谱仪(ICP-MS)测定前处理标样、试剂空白和样品溶液中9种重金属的浓度. 样品采集分析过程中所使用工具均不含金属成分,实验检测过程中所使用的试剂均为优级纯,且样品处理的全过程保持严格的质量控制,以确保测量方法和数据的准确可靠.

1.3 健康风险评价方法

本研究以美国环保署(USEPA)发布的人体健康风险评价模型为基本框架^[16],分别对成年男性、

女性及儿童进行 9 种重金属元素的健康风险评价。

1.3.1 人体暴露途径的确定

有研究表明,由呼吸途径产生的健康风险较手-口摄入、皮肤接触大得多^[17],所以本研究主要考虑经呼吸暴露引起的健康风险,忽略手-口摄入、皮肤接触产生的健康风险,所计算出的健康风险比实际偏小^[12]。

1.3.2 暴露量计算

9 种重金属元素中, Pb、Zn、Mn、Cu 为非致癌物, Cr、Ni、As、Cd、Co 为致癌物^[18]。其中,非致癌物质的暴露量通常用日均暴露剂量[average daily dose, ADD, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]表示;致癌物质的暴露量通常用终身日均暴露剂量[life average daily dose, LADD, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]表示,9 种重金属元素的暴露剂量由公式(1)、(2)^[19,20]计算得到。

$$\text{ADD/LADD} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中, c 为污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; IR 为呼吸速率, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露持续时间, a ; BW 为体重, kg ; AT 为平均暴露时间, d 。

$$\text{add/ladd} = \frac{\sum_{i=1}^4 \text{add}_i/\text{ladd}_i \times m_i}{\sum_{i=1}^4 m_i} \quad (2)$$

式中, add/ladd 为某非致癌/致癌元素在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中(含 4 张膜)的暴露量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\text{add}_i/\text{ladd}_i$ 为第 i 张膜上颗粒物所对应的某元素的浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; m_i 为第 i 张膜上颗粒物质量占 4 张膜(1~4 级)上颗粒物总质量的百分比。

本研究选用文献[12]中经过本土化的暴露参数值进行呼吸暴露评估,相关暴露参数见文献[12]的推荐值。

1.3.3 健康风险表征

致癌风险一般以 ILCR (incremental lifetime cancer risk, 终生增量致癌风险)表示,计算公式(3)如下:

$$\text{ILCR} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (3)$$

式中, ILCR 为终生增量致癌风险,表示人群癌症发生的概率,通常以单位数量人口出现癌症患者的比例来表示,若 ILCR 值在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,则认为该重金属不具备致癌风险; SF 表示致癌斜率因子,表示人体暴露于一定剂量某种污染物下产生致癌效应的最大概率。

非致癌风险一般以 HQ (hazard quotient, 危险系

数)表示,计算公式(4)如下:

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (4)$$

式中, ADD 为非致癌元素日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD 为参考剂量 (referencedose), $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

当 $\text{HQ} \leq 1$ 时,风险较小或可以忽略; $\text{HQ} > 1$ 时,存在非致癌风险^[12]。

重金属呼吸暴露参考剂量及斜率因子见文献[12]的推荐值。

2 结果与讨论

2.1 重金属污染水平

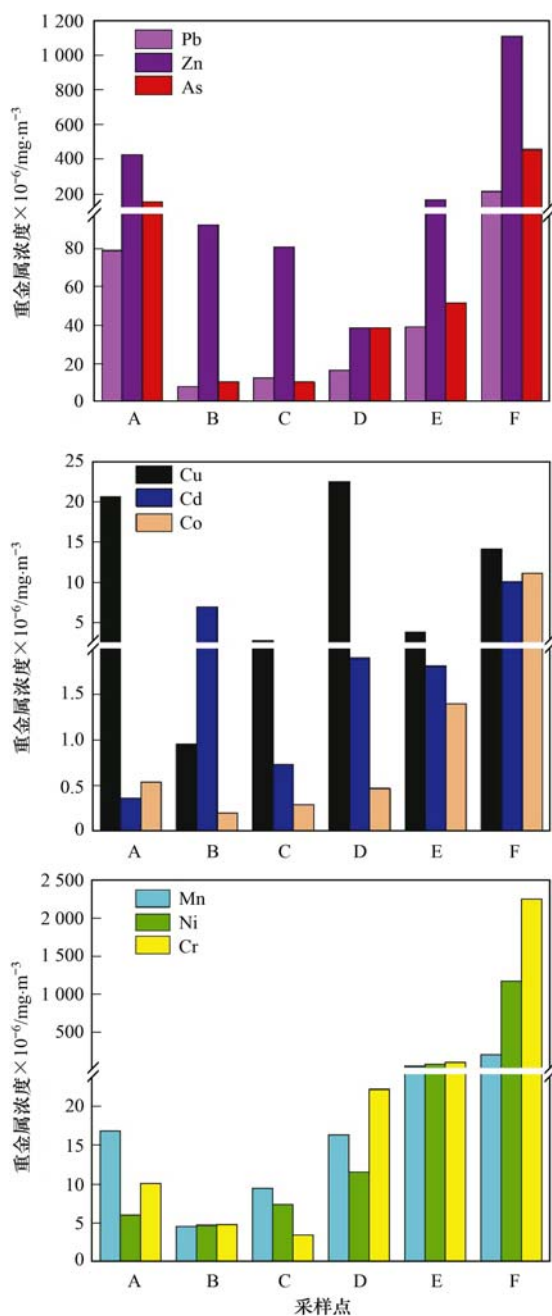
为探讨 6 组样品中重金属元素的污染水平和组分特征的差异,根据各径级样品中重金属浓度和颗粒物质量,计算得 PM_{10} 中 9 种重金属元素的浓度。(见图 1)

分别计算两地各元素浓度的算术平均值,得两地的元素排序分别为: $\text{Zn} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Co}$, $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Co}$ 。北京市的排序结果与天津^[21]相关研究结论大致相符,其中,北京 As 的相对浓度较天津高,且除 As 的浓度在北京市较高, Cd 在两地区间相差不大外,其它元素(除 Co)浓度均表现为北京较天津低。新乡市的排序结果与乌鲁木齐市^[22]的相关研究结论大致相符,其中,新乡 Ni、As 的相对浓度较乌鲁木齐高,且新乡 Cr、Ni、As 的浓度较乌鲁木齐高, Pb、Mn、Cu 的浓度较乌鲁木齐低。有研究表明^[23], Cr、As、Ni 浓度在夏季较其它季节高,故本研究该两种元素浓度的高低与参考的相关研究数据有差异除受采样点的影响之外,还可能受采样季节的影响。

总体上,新乡市的重金属浓度普遍较北京市高;室外重金属浓度普遍较室内高,其中,室外表现为道路环境大气颗粒物重金属浓度较高。新乡虽为中等城市,但目前城市周边仍存在大量工矿企业,故污染状况较北京严重。富集因子法结果显示,两地只有 Cd 的富集系数较大,(北京:15.0, 新乡:8.47),受人为源影响较大,其它 8 种元素的富集系数为 0~3,污染水平较低。Cd 主要来源为机动车尾气^[24],故两地交通污染应引起有关部门的重视。

2.2 重金属粒径分布规律

图 2 显示,北京市 3 组样品不同粒径大气颗粒

图1 PM₁₀重金属浓度Fig. 1 Heavy metal concentrations in PM₁₀

物中重金属整体呈双峰型分布,根据两峰值之间差值大小可分为两类:A、B组两峰值相差较小,其峰值在4.7~5.8 μm 、0.7~1.1 μm 粒径段,且A组Zn的质量浓度随粒径减小而升高,主峰值在细粒径段(2.1 μm 为粗、细粒径的分界),这与范雪波等^[25]对杭州市大气颗粒物的研究结果相一致。C组两峰值相差较大,第一个峰值(4.7~5.8 μm)远大于第二个峰值(0.7~1.1 μm),与A、B两组相比,C组中的9种重金属元素相对集中地分布于粗粒径段大气颗粒物中,这可能是受到道路沙尘等粗颗粒

物的影响^[26]。

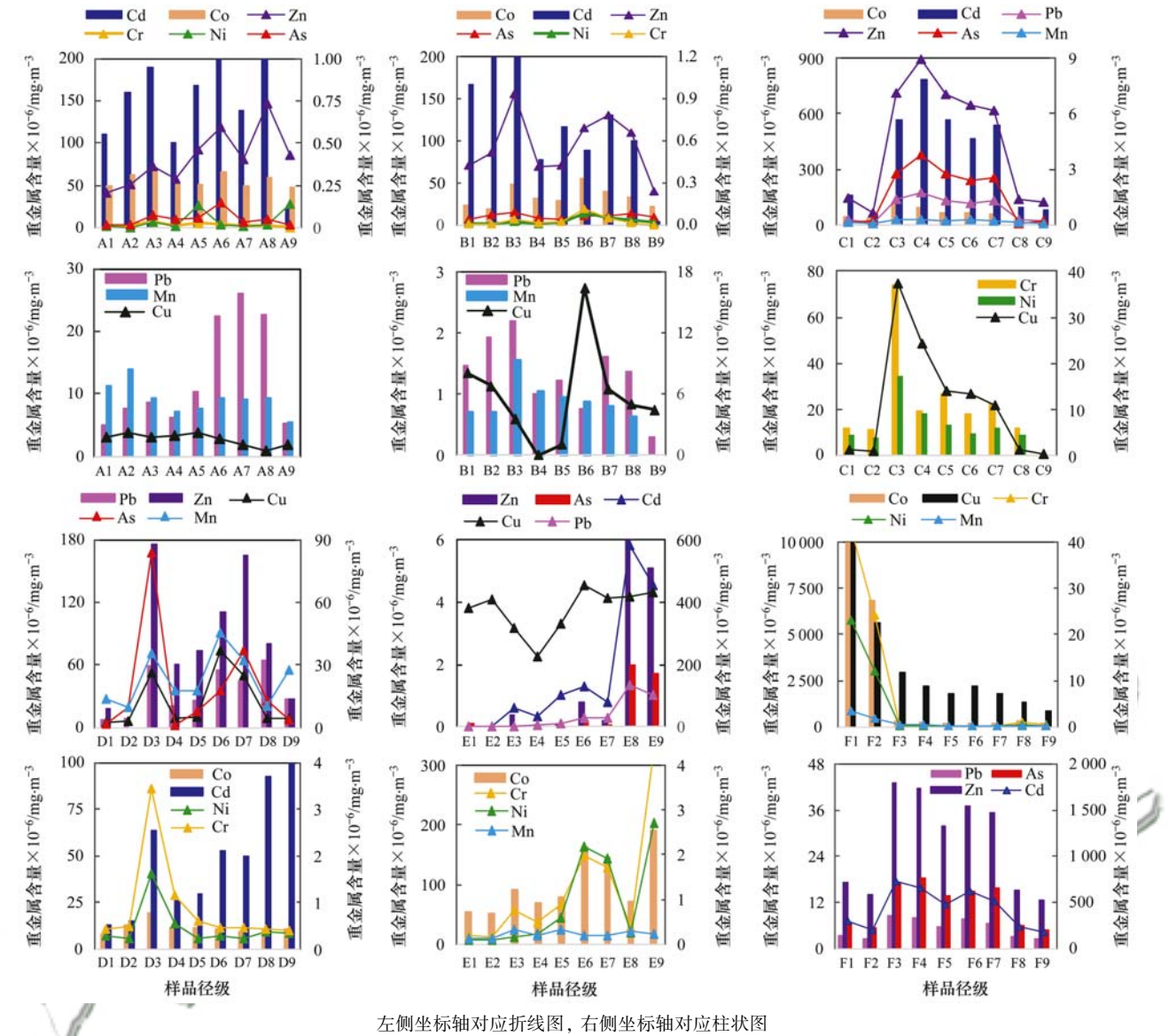
新乡市3组样品不同粒径大气颗粒物中重金属整体呈单、双峰型分布。D组的Pb、Zn、Cu、As、Mn、Cd呈双峰型分布,其峰值在4.7~5.8 μm 、0.7~1.1 μm 粒径段,大气颗粒物的粒径分布对其重金属的粒径分布有一定影响,已有研究结果表明大气颗粒物在细粒径段(0.43~0.65 μm)和粗粒径段(4.7~9.0 μm)各出现一次峰值,与此结果相类似^[27];Co、Ni、Cr呈单峰型分布,其峰值在4.7~5.8 μm 粒径段。E组各元素(除Cu)总体呈单峰型分布,且质量浓度随粒径减小而升高,其峰值在0~0.4 μm 粒径段,说明该采样点细颗粒物中重金属对人们影响较大。F组各元素呈单峰型分布,Cu、Mn、Co、Cr、Ni的峰值在9.0~10.0 μm 粒径段,其质量浓度随粒径的减小而降低,且在4.7~10.0 μm 粒径段下较为明显,分析认为这主要是因为采样地点湿度较大,颗粒物易凝结,使得粒径变大^[27];Pb、Zn、As、Cd的峰值在0.7~5.8 μm 粒径段。

由图2可知,两地区之间重金属元素的粒径分布规律存在显著差异;同一地区相同地点各重金属元素往往表现出相似的粒径分布规律,而同一地区不同地点各重金属元素则可能表现出不同的粒径分布规律,这进一步说明了重金属来源对重金属在大气颗粒物中的粒径分布产生重要影响^[6]。实验结果表明北京市公园的Cr、Co、Cu、Mn,办公室的Cd、Pb、Mn,新乡市公园的Cr、Co、Ni、As及两道路各金属元素在粗颗粒物中的比重较大;而北京市公园的Pb、Zn、Cd、Ni、As,办公室的Co、Zn、Ni、Cr、As、Cu,新乡市公园的Pb、Zn、Cd、Cu、Mn及办公室各金属元素则呈相反规律。有研究表明,颗粒物粒径越小对人体危害越大^[28],因此,须对上述不同地点分布于细粒径段大气颗粒物中的重金属元素给予重视。

2.3 健康风险评价

运用公式(2)计算得北京、新乡市两地大气颗粒物PM_{2.5}经呼吸途径对成年男性、女性及儿童的日均暴露剂量及健康风险评价数据(表1和表2)。

结果显示,致癌风险成人大于儿童,成年男性大于成年女性;非致癌风险除E组外,其余组均表现为儿童大于成人,成年男性大于成年女性,与已有的研究结论^[12,29]一致,E组的非致癌风险为儿童大于成人,成年女性大于成年男性。两地相比,新乡市采样点的暴露量、致癌风险、非致癌风险均高



左侧坐标轴对应折线图，右侧坐标轴对应柱状图

图2 重金属在6个采样点大气颗粒物中的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of heavy metals in the atmospheric particles at six sampling sites

表1 北京市采样点健康风险评价

Table 1 Health risk assessment of sampling sites in Beijing

项目	重金属	A			B			C		
		成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
ILCR	Cr	1.55×10^{-5}	1.33×10^{-5}	3.41×10^{-9}	3.63×10^{-5}	3.12×10^{-5}	7.97×10^{-6}	3.92×10^{-5}	3.37×10^{-5}	8.61×10^{-6}
	Ni	9.57×10^{-7}	8.22×10^{-7}	2.10×10^{-7}	7.58×10^{-7}	6.51×10^{-7}	1.67×10^{-7}	4.57×10^{-7}	3.92×10^{-7}	1.00×10^{-7}
	As	2.48×10^{-5}	2.13×10^{-5}	5.46×10^{-6}	2.11×10^{-5}	1.81×10^{-5}	4.63×10^{-6}	2.64×10^{-4}	2.26×10^{-4}	5.80×10^{-5}
	Cd	7.84×10^{-7}	6.73×10^{-7}	1.72×10^{-7}	5.05×10^{-7}	4.34×10^{-7}	1.11×10^{-7}	3.29×10^{-6}	2.83×10^{-6}	7.23×10^{-7}
	Co	3.44×10^{-7}	2.95×10^{-7}	7.56×10^{-8}	2.67×10^{-7}	2.29×10^{-7}	5.86×10^{-8}	5.17×10^{-7}	4.44×10^{-7}	1.14×10^{-7}
HQ	Pb	1.60×10^{-3}	1.37×10^{-3}	1.76×10^{-10}	5.11×10^{-4}	4.39×10^{-4}	5.62×10^{-4}	6.26×10^{-3}	5.37×10^{-3}	6.88×10^{-3}
	Zn	1.04×10^{-4}	8.96×10^{-5}	1.15×10^{-9}	9.51×10^{-5}	8.16×10^{-5}	1.04×10^{-4}	3.93×10^{-4}	3.37×10^{-4}	4.32×10^{-4}
	Cu	1.39×10^{-5}	1.19×10^{-5}	1.53×10^{-5}	9.42×10^{-6}	8.09×10^{-6}	1.03×10^{-5}	1.04×10^{-4}	8.93×10^{-5}	1.14×10^{-4}
	Mn	1.71×10^{-1}	1.47×10^{-1}	1.88×10^{-1}	6.86×10^{-2}	5.89×10^{-2}	7.54×10^{-2}	3.14×10^{-1}	2.70×10^{-1}	3.46×10^{-1}

于北京市采样点. 对于5种致癌元素,北京市除Cr、As及C组Cd的ILCR值在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内外,其余元素的ILCR $<10^{-6}$,无致癌风险;新乡市除D组Ni、Co的ILCR $<10^{-6}$ 外,该组其余元素及

表 2 新乡市采样点健康风险评价

Table 2 Health risk assessment of sampling sites in Xinxiang

项目	重金属	D			E			F		
		成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
ILCR	Cr	5.81×10^{-5}	5.00×10^{-5}	1.28×10^{-5}	8.27×10^{-4}	7.10×10^{-4}	1.82×10^{-4}	6.37×10^{-4}	5.47×10^{-4}	1.40×10^{-4}
	Ni	8.05×10^{-7}	7.00×10^{-7}	1.77×10^{-7}	1.37×10^{-5}	1.18×10^{-5}	3.01×10^{-6}	5.55×10^{-6}	4.76×10^{-6}	1.22×10^{-6}
	As	7.09×10^{-5}	6.09×10^{-5}	1.56×10^{-5}	1.93×10^{-4}	1.66×10^{-4}	4.24×10^{-5}	7.97×10^{-4}	6.85×10^{-4}	1.75×10^{-4}
	Cd	3.16×10^{-6}	2.71×10^{-6}	6.94×10^{-7}	3.39×10^{-6}	2.91×10^{-6}	7.45×10^{-7}	9.39×10^{-6}	8.06×10^{-6}	2.06×10^{-6}
	Co	4.95×10^{-7}	4.21×10^{-7}	1.08×10^{-7}	2.31×10^{-6}	1.98×10^{-6}	5.07×10^{-7}	1.09×10^{-6}	9.39×10^{-7}	2.40×10^{-7}
HQ	Pb	1.97×10^{-3}	1.69×10^{-3}	2.16×10^{-3}	6.28×10^{-6}	5.40×10^{-3}	6.90×10^{-3}	1.66×10^{-2}	1.43×10^{-2}	1.83×10^{-1}
	Zn	4.79×10^{-5}	4.11×10^{-5}	5.26×10^{-5}	3.13×10^{-4}	2.68×10^{-4}	3.43×10^{-4}	9.85×10^{-4}	8.46×10^{-4}	1.08×10^{-3}
	Cu	2.38×10^{-4}	2.04×10^{-4}	2.61×10^{-4}	3.12×10^{-5}	2.68×10^{-5}	3.43×10^{-5}	4.35×10^{-5}	3.74×10^{-5}	4.78×10^{-5}
	Mn	1.12	9.59×10^{-1}	1.23	3.45×10^{-1}	2.96×10^{-1}	3.79×10^{-1}	9.00×10^{-1}	7.73×10^{-1}	9.89×10^{-1}

E、F 两组全部元素的 ILCR 值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内,但若长期处于此种环境,会有较低的潜在致癌风险.对于 4 种非致癌元素,北京市 3 个采样点非致癌元素 HQ < 1,风险可忽略;新乡市除 Mn 外,其余元素 HQ < 1.但相比之下,As(致癌风险)和 Pb(非致癌风险)对人体造成的潜在健康风险相对其余元素较高,需引起重视.

3 结论

(1) 从重金属组分特征上看,两地大气颗粒物重金属浓度均表现为 Zn、As 浓度较高,Cd、Co 浓度较低;除 Cr、Ni 外,其余元素的分布特征地域差异性不大.Cd 元素的富集程度较大,应受到重视.

(2) 北京市采样点不同粒径大气颗粒物中重金属整体呈双峰型分布,新乡市采样点不同粒径大气颗粒物中重金属整体呈单、双峰型分布.重金属在大气颗粒物中的粒径分布规律可能受时间、空间、重金属来源、大气颗粒物成分等诸多因素的影响,本研究所得结果具有一定局限性.

(3) 对于致癌金属元素,北京市采样点的 Cr、As、Cd 及新乡市采样点的 Cr、Ni、As、Cd、Co 存在一定的潜在致癌风险;对于非致癌元素,北京市采样点不存在非致癌风险,但不能忽略长期影响;新乡市采样点只有 Mn 表现出一定的非致癌风险,且儿童的非致癌风险高于成人.相比而言,As(致癌风险)和 Pb(非致癌风险)对人体造成的健康风险相对较高,应引起关注.

参考文献:

[1] 张霖琳,薛荔栋,滕恩江,等.中国大气颗粒物中重金属监测技术与方法综述[J].生态环境学报,2015,24(3):533-538.
Zhang L L, Xue L D, Teng E J, et al. Monitoring technology and methods of heavy metals in atmospheric particulate matter, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3):

533-538.
[2] 郑志侠,吴文,汪家权.大气颗粒物中重金属污染研究进展[J].现代农业科技,2013,(3):241-243.
Zheng Z X, Wu W, Wang J Q. Study advances on heavy metals pollution in atmospheric particulates[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, (3): 241-243.
[3] 葛杨,梁淑轩,孙汉文.大气气溶胶中重金属元素痕量分析及形态分析研究进展[J].环境监测管理与技术,2007,19(6):9-14,39.
Ge Y, Liang S X, Sun H W. Research progress in analysis and morphological analysis of heavy metal components in atmospheric aerosol[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2007, 19(6): 9-14, 39.
[4] 杨弘.太原市大气颗粒物中重金属的污染特征及来源解析[D].太原:山西大学,2014.
Yang H. The elemental pollution characteristics and source apportionment of atmospheric particulate in Taiyuan [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.
[5] 谭吉华,段菁春.中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J].中国科学院研究生院学报,2013,30(2):145-155.
Tan J H, Duan J C. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(2): 145-155.
[6] 曹治国,余刚,吕香英,等.北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估[J].环境科学,2016,37(4):1272-1278.
Cao Z G, Yu G, Lv X Y, et al. Particle size distribution, seasonal variation characteristics and human exposure assessment of heavy metals in typical settled dust from Beijing [J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1272-1278.
[7] 林海鹏,武晓燕,战景明,等.兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J].中国环境科学,2012,32(5):810-815.
Lin H P, Wu X Y, Zhan J M, et al. Analysis of atmospheric particles and heavy metals character at the area of Lanzhou City in summer and winter[J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 810-815.
[8] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, 57: 146-152.

- [9] Meng Q Z, Fan S X, He J B, *et al.* Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing, China[J]. *Particuology*, 2015, **18**: 127-134.
- [10] Liu X T, Zhai Y B, Zhu Y, *et al.* Mass concentration and health risk assessment of heavy metals in size-segregated airborne particulate matter in Changsha [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **517**: 215-221.
- [11] 曹治国, 董星依, 石玉盟, 等. 3 种磷代阻燃剂在室内外灰尘中的粒径分布规律及人体暴露评估[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(7): 2759-2766.
- Cao Z G, Dong X Y, Shi Y M, *et al.* Particle size distribution and human exposure assessment of three organic phosphorus flame retardant in indoor and outdoor dust [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2759-2766.
- [12] 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价[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.
- [13] 田鹏, 杨志峰, 李迎霞. 公路地表灰尘及径流中颗粒物附着重金属对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(6): 14-18.
- Tian P, Yang Z F, Li Y X. Comparative study on heavy metals distribution on particles in road sediments and stormwater runoff [J]. *Environmental Pollution Prevention and Control*, 2009, **31**(6): 14-18.
- [14] 白梦梦, 冯海艳, 景慧敏. 北京市可吸入大气颗粒物中 Pb 的浓度分布特征研究[J]. *现代地质*, 2017, **31**(1): 177-183.
- Bai M M, Feng H Y, Jing H M. The concentration distribution characteristics of Pb in inhalable particulate matters in Beijing [J]. *Geoscience*, 2017, **31**(1): 177-183.
- [15] 魏敏, 冯海艳, 赵忠芳. 北京市大气颗粒物中 Cd 的地球化学分布特征及其生态风险评估[J]. *现代地质*, 2012, **26**(5): 983-988.
- Wei M, Feng H Y, Yang Z F. The distribution characteristics and ecological risk assessment of Cd in atmospheric particulate matter of Beijing[J]. *Geoscience*, 2012, **26**(5): 983-988.
- [16] 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价[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.
- [17] 王永晓, 曹红英, 邓雅佳, 等. 大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3575-3584.
- Wang Y X, Cao H Y, Deng Y J, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals in atmospheric particulate matter and dust [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3575-3584.
- [18] 姜林, 李立新, 黄海林, 等. 场地环境评价导则[M]. 北京: 北京市环境保护局, 2007.
- [19] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- Wang Z S, Wu T, Duan X L, *et al.* Research on inhalation rate exposure factors of Chinese residents in environmental health risk assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- [21] 陈培飞, 张嘉琪, 毕晓辉, 等. 天津市环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中典型重金属污染特征与来源研究[J]. *南开大学学报 (自然科学版)*, 2013, **46**(6): 1-7.
- Chen P F, Zhang J Q, Bi X H, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in PM₁₀ and PM_{2.5} in Tianjin city [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2013, **46**(6): 1-7.
- [22] 伊丽米热·阿布达力木, 迪丽努尔·塔力甫, 阿布力孜·伊米提. 乌鲁木齐市大气颗粒物中重金属浓度的分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(8): 107-111, 116.
- Abudalimu Y, Talipu D, Yimiti A. Distribution characteristics of heavy metals concentration in atmospheric particles of Urumqi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(8): 107-111, 116.
- [23] 袁春欢, 王琨, 师传兴, 等. 哈尔滨市空气中 PM₁₀ 的元素组成特征分析[J]. *环境保护科学*, 2009, **35**(1): 1-3.
- Yuan C H, Wang K, Shi C X, *et al.* Characteristics analysis of elements contained in air suspended particles in Harbin [J]. *Environmental Protection Science*, 2009, **35**(1): 1-3.
- [24] 杨扬. 大气颗粒物及其重金属污染特征和来源分析[J]. *资源节约与环保*, 2015, (5): 119-120.
- [25] 范雪波, 刘卫, 王广华, 等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(1): 13-18.
- Fan X B, Liu W, Wang G H, *et al.* Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(1): 13-18.
- [26] 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 等. 成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4034-4043.
- Tao Y L, Li Q K, Zhang J, *et al.* Seasonal variations in particle size distribution and water-soluble ion composition of atmospheric particles in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4034-4043.
- [27] 李文慧, 刘杰, 常鹏利, 等. 某铅锌冶炼厂开放源颗粒物及重金属粒径分布特征[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(15): 114-119, 128.
- Li W H, Liu J, Chang P L, *et al.* The size distribution characteristics of particles and heavy metals from the open sources in a certain lead-zinc smelter [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(15): 114-119, 128.
- [28] 杨复沫, 马永亮, 贺克斌. 细微大气颗粒物 PM_{2.5} 及其研究概况[J]. *世界环境*, 2000, (4): 32-34.
- Yang F M, Ma Y L, He K B. A brief introduction to PM_{2.5} and related research[J]. *World Environment*, 2000, (4): 32-34.
- [29] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 PM_{2.5} 重金属污染水平与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- Hu Z M, Wang J, Tao Z K, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5}, Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(12): 3399-3406.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)