

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋铁锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝菱,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

青奥会前后南京 PM_{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估

张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省低碳农业与温室气体减排重点实验室, 南京 210095)

摘要: 人类活动对大气环境的影响已成为人们关注的焦点. 于青年奥林匹克运动会(青奥会, Youth Olympic Games)召开前后(2014年4~9月)动态监测南京大气中 PM_{2.5} 及其 6 种重金属质量浓度和污染特征, 并分析其健康风险. 结果表明, 观测期间 PM_{2.5} 质量浓度变化范围为 26.39~80.31 μg·m⁻³, 青奥会前的 4、5 和 7 月大气中 PM_{2.5} 质量浓度均达到国家空气质量二级标准(24 h 质量浓度限值 75 μg·m⁻³), 青奥会期间达到国家空气质量一级标准(24 h 质量浓度限值 35 μg·m⁻³). 青奥会结束后, 空气污染出现反弹, 大气 PM_{2.5} 质量浓度平均值为 76.14 μg·m⁻³. 观测期间大气 PM_{2.5} 中重金属离子质量浓度的变化特征并不一致, 主成分分析表明, 污染物源排放是影响 PM_{2.5} 重金属离子质量浓度变化最重要因素. 青奥会期间 PM_{2.5} 及重金属离子质量浓度均降至观测期间最低值, 这与召开青奥会所采取的一系列政策干预减排措施发挥作用有关. PM_{2.5} 中 Cd、Cu、Ni、Pb 通过呼吸和皮肤暴露的健康风险值均在可接受水平范围内, 而 Cr 存在较大的致癌风险; Mn 通过呼吸暴露对成年男性造成较大的非致癌风险; 同时 PM_{2.5} 中 6 种重金属通过皮肤暴露对儿童也造成较大非致癌风险.

关键词: 青奥会; PM_{2.5}; 重金属; 污染水平; 健康风险评估

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0028-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.005

Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM_{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games

ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, XIONG Zheng-qin*

(Jingsu Key Laboratory of Low Carbon Agriculture and GHGs Mitigation, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The influence of human activities on the atmospheric environment has attracted people's attention. This study reported the dynamic changes in PM_{2.5} concentration, its heavy metal compositions and health risk assessment from April to September, 2014 in Nanjing when the Youth Olympic Games (YOG) was held. The results showed that the mass levels of PM_{2.5} ranged from 26.39 to 80.31 μg·m⁻³ from April to September. The mass levels of PM_{2.5} met the level II standard of ambient air quality in China (24 h average concentration, 75 μg·m⁻³) in months of April, May and July while met the level I standard (24 h average concentration, 35 μg·m⁻³) in August during the YOG. The average mass concentration of PM_{2.5} reached 76.14 μg·m⁻³ after the YOG, showing resilience of air pollution. The variations of heavy metals were not consistent with each other throughout the observation period. Principal component analysis indicated that emission sources significantly affected the variations of PM_{2.5} and its heavy metals. PM_{2.5} and all of the heavy metals decreased to their minimum values during the YOG, indicating the effectiveness of those temporary measures for reducing atmospheric pollutant before and during the YOG. The health risks of Cd, Cu, Ni and Pb in PM_{2.5} via breathing and dermal contact exposure were all within the acceptable ranges, but potential carcinogenic risk existed for Cr in PM_{2.5}. There was potential non-carcinogenic health risk for adult males via breathing of Mn and greater non-carcinogenic health risk for children via dermal contact exposures to all these 6 heavy metals.

Key words: Youth Olympic Games; PM_{2.5}; heavy metal; pollution level; health risk assessment

随着中国经济的快速发展, 工业、交通、能源排放的污染物急剧增加, 导致中国大部分地区都暴露于较高的大气颗粒物水平下. 大气颗粒物已成为重要的空气污染物^[1], 其中大气颗粒物 PM_{2.5} 危害最大, 是各地城市生活中不可避免的一部分^[2].

PM_{2.5} 是指悬浮在大气中空气动力学等效直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物. 与较粗颗粒物相比, PM_{2.5} 比表面积更大^[3], 对重金属的携带能力更强, 铅(Pb)、锰(Mn)、镉(Cd)、锑(Sb)、锶(Sr)、砷(As)、镍(Ni)、硫酸盐和多环芳烃等含量更高; 所

含有害物质在环境中滞留时间长、输送距离远, 易进入人体支气管和肺泡区, 对人体危害大^[4,5]. 短期或长期暴露于 PM_{2.5} 中, 可导致心肺系统的患病率及人群死亡率升高, 也可能诱发癌症^[6]. PM_{2.5} 中重金属通过肺部呼吸作用进入人体并发生沉积, 导致

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171238, 41471192); 中央高校基本科研业务费专项(KYTZ201404)

作者简介: 张恒(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为碳氮循环与大气环境, E-mail: 2013103093@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zqxiong@njau.edu.cn

人体机能的功能性障碍和不可逆转性损伤,从而对人体造成危害^[7]. 国际环境流行病学证实,长期接触重金属离子 Cr 会导致气短、咳嗽、气喘、鼻中隔、支气管炎、肺功能和肺炎等呼吸系统疾病出现^[8]. 其他研究表明,过量 Pb 使人贫血,损害神经系统和脑; Mn 和 Cd 会损坏人的神经和肾脏; Ni 和 Cr 具有致癌性等^[9]. 研究发现,中国约 120 万居民的提前死亡与 PM_{2.5} 污染相关^[10]. 因此,开展人体对空气颗粒物中重金属暴露的健康风险评价对于科学制定空气污染防治与管理相关的法律法规和政策标准十分重要.

国外 PM_{2.5} 中重金属监测研究集中于 PM_{2.5} 排放源谱、源解析和健康影响方面^[11~14],我国则集中于研究 PM_{2.5} 的特征和来源^[15~17],较少关注对人体健康的影响. 我国缺乏 PM_{2.5} 长期监测数据,更缺少研究 PM_{2.5} 的健康效应. 同时,我国颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 仅将 Pb 列为常规监测指标,将 Cd、Hg、As 以及 Cr(VI) 则列为附录 A 的参考指标,其他致癌重金属则尚未涉及,因此,我国缺乏对大气环境致癌重金属的全面评价,更无对人体危害的风险评估. 如何采取有效措施控制城市大气污染,减少人群健康的危害,已成为目前我国城市发展面临的重要任务.

利用青奥会于 2014 年 8 月 8 日在南京召开之机,动态监测南京市 PM_{2.5} 污染现状及 PM_{2.5} 中重金属污染水平,开展健康风险评估,有助于了解人为措施及政策干预对 PM_{2.5} 污染控制及 PM_{2.5} 中重金属健康风险的影响,以期制定有效的污染控制措施提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 采样地点和方法

采样地点位于江苏省南京市南京农业大学主楼楼顶(32°02'N, 118°50'E),距离地面约 10 m,周围无高大建筑物遮挡,附近无工业污染源,观测数据可以较好反映南京城市平均污染水平.

采样过程严格按照大气颗粒物样品采集标准进行^[18]. 在 2014 年 4 月~2014 年 9 月期间,用 TH-150C 中流量大气 PM_{2.5} 采样器(武汉天虹仪表有限责任公司)进行 PM_{2.5} 样品采集,采样滤膜为直径 90 mm 的玻璃纤维滤膜,采样流量为 100 L·min⁻¹,每次采样持续 23 h,采样时段为 10:00~次日 09:00,共采集有效样品 57 个,同时记录各样品的采样体积和采样时天气状况.

1.2 样品处理和测量

采用微波消解法对样品进行处理:取 1/4 滤膜剪碎放入聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 浓 HNO₃ 溶液和 2 mL HF 溶液溶解后,放入微波消解系统进行 170℃ 与 200℃ 下各 10 min 消解^[19]. 冷却后在赶酸器上 160℃ 高温赶酸至近干,定容到 10 mL,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,美国 Agilent 公司)测定 Cu、Cd、Cr、Pb、Mn 和 Ni 这 6 种重金属的质量浓度,其检测限分别为 0.005、0.003、0.004、0.03、0.0005、0.009 μg·mL⁻¹,平行实验加标回收率为 97.4%~102.3%,满足准确性要求.

1.3 暴露剂量计算方法

大气颗粒物主要通过呼吸和皮肤两种途径暴露,分别按照式(1)和式(2)计算暴露剂量^[20].

$$CDI_{inhalation} = (c \times IR_i \times EF \times ED \times 10^{-6}) / (BW \times AT) \quad (1)$$

$$CDI_{dermal} = (c \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF) / (BW \times AT) \quad (2)$$

式中, $CDI_{inhalation}$ 指经口、鼻腔暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; CDI_{dermal} 指皮肤吸收剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; c 为 PM_{2.5} 中污染物质量浓度 ($ng \cdot m^{-3}$ 或 $mg \cdot kg^{-1}$); 依据已有研究结果,模型中各参数取值如下: IR_i 为空气吸入量(儿童为 $8.7 m^3 \cdot d^{-1}$; 成年男性为 $15.2 m^3 \cdot d^{-1}$; 成年女性为 $11.3 m^3 \cdot d^{-1}$)^[20]; EF 为暴露频率($365 d \cdot a^{-1}$)^[20]; ED 为暴露年限(儿童为 18 a; 成年人为 30 a)^[20]; CF 为转换系数($10^{-6} kg \cdot mg^{-1}$)^[20]; BW 为体重(儿童为 44 kg; 成年男性为 62.7 kg; 成年女性为 54.4 kg)^[20]; AT 为平均作用时间(非致癌:儿童为 2 190 d,成年人为 10 950 d; 致癌:25 550 d)^[21]; SA 为接触颗粒物的皮肤面积(儿童为 $2 800 cm^2 \cdot d^{-1}$; 成年人为 $3 300 cm^2 \cdot d^{-1}$)^[22]; AF 为颗粒物对皮肤的黏附系数($0.2 mg \cdot cm^{-2}$)^[21]; ABS 为皮肤吸收系数,随化学物质特性而异, Cd 为 0.001,其余元素为 0.01^[22].

1.4 健康风险评估方法

将 PM_{2.5} 中的重金属分为有阈(即非致癌性物质)和无阈(即致癌性物质)两类,其重金属的非致癌风险通过整个暴露作用期的平均每日单位体重摄入量(CDI)除以慢性参考剂量(RfD)得到,以风险值(HQ)表示,即 $HQ = CDI/RfD$ ^[23], Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 经呼吸暴露的 RfD 分别为 5.71E-05、2.86E-05、4.00E-02、1.43E-05、2.06E-02、3.50E-

$03 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 经皮肤暴露的 RfD 分别为 $2.50\text{E}-05$ 、 $3.00\text{E}-03$ 、 $1.20\text{E}-02$ 、 $2.33\text{E}-02$ 、 $5.40\text{E}-03$ 、 $1.40\text{E}-03 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[24,25]. 理论上, 当化学物质的非致癌风险值 $\text{HQ} < 1$ 时, 不会对人体造成显著的非致癌健康风险^[20].

重金属的致癌风险通过整个生命期的平均每日单位体重摄入量(CDI)乘以致癌斜率因子(SF)得到, 以风险值 R 表示, 即 $R = \text{CDI} \times \text{SF}$ ^[23], 具有致癌性的 Cr 和 Ni 经呼吸暴露的 SF 分别为 $4.20\text{E}+01$ 、 $9.01\text{E}-01$ [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]⁻¹, 经皮肤暴露的 SF 分别为 $5.00\text{E}-01$ 、 $4.25\text{E}+01$ [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]⁻¹^[24,25]. 理论上, 当致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内, 风险是可以接受的^[20].

1.5 主成分分析法

通过主成分分析法(principal component analysis, PCA)探究 $\text{PM}_{2.5}$ 中 6 种重金属的构成与来源. 其数学模型如下:

$$c_i = \sum_{j=1}^n a_j F_j + d_i u_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中, c_i 表示化学组分 i 在颗粒物中的浓度; F_j 表示第 j 种源对受体点贡献的颗粒物的浓度(公共因子); a_j 表示化学组成部分 i 在第 j 种源排放颗粒物中的质量分数(因子载荷); u_i 表示仅对 i 种元素有贡献的特殊源的排放量(唯一因子); d_i 表示唯一因子系数; ε_i 表示元素 i 的测量误差及其他误差.

1.6 数据处理与统计分析

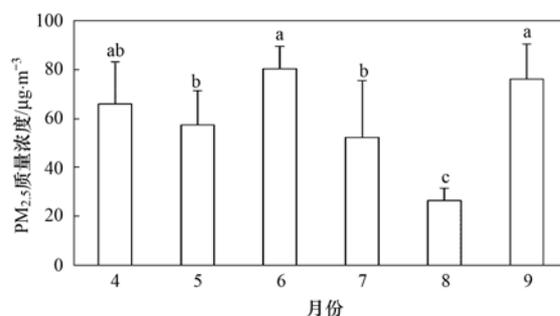
本研究计算暴露风险值时采用 95% UCL(算术平均值的 95% 置信上限)的重金属质量浓度. 数据计算及图表制作采用 Excel 和 ProUCL 5.0 软件; 采用 JMP 9.0 软件对 $\text{PM}_{2.5}$ 和各种重金属质量浓度进行方差分析; 采用 SPSS 16.0 统计软件对 $\text{PM}_{2.5}$ 中的重金属构成与来源进行主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度动态变化

如图 1 所示, 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 月均质量浓度变化较大, 变化范围为 $26.39 \sim 80.31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 从时间变化上看, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 4、5 和 7 月均达到国家空气质量二级标准(24 h 质量浓度限值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 这是为保障青奥会期间空气质量, 南京市政府在青奥会前, 采取一系列措施(火电厂和炼钢厂等重点工业污染源调控、严控垃圾焚烧、建筑工地停工等)以及区域大气环境联合整治, 使得空气质量较好. 大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 6 月超过国

家空气质量二级标准, 这与期间秸秆燃烧、水稻施肥等活动有关^[26]. $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 8 月最低($26.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 达到国家空气质量一级标准(24 h 质量浓度限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 这与青奥会前及期间的管控措施有关, 同时南京市 8 月降水频率高、降水量大, 雨水对细颗粒物的去除效应明显^[27]. 而 9 月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度异常升高, 达到 $76.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 这可能因为青奥会闭幕后, 监管力度放松和相关减排政策的解除, 使空气污染出现反弹. 这与北京奥运会、上海世博会和广州亚运会状况相似^[28-30]. 总体看来, 青奥会前及期间南京及其周边地区对工业排放源和移动排放源的管制措施对于南京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度改善的效果显著.



不同字母表示 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度月份间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 2014 年 4 月至 2014 年 9 月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations from April, 2014 to September, 2014

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 中各重金属浓度动态变化特征

本研究获取了 $\text{PM}_{2.5}$ 中 6 种重金属的月平均质量浓度(图 2). 在整个观测期间, Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 质量浓度均值分别为 (1.74 ± 0.92) 、 (14.28 ± 7.04) 、 (35.47 ± 12.93) 、 (39.80 ± 18.55) 、 (4.33 ± 2.42) 、 $(46.62 \pm 24.66) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中 Cd、Ni 和 Pb 均值是 WHO(世界卫生组织)参考限值的 0.4、0.2 和 0.1 倍, 均在限值以下.

从 $\text{PM}_{2.5}$ 中各重金属质量浓度的月变化可以看出, Cr 月均质量浓度在青奥会前与期间差异性不显著, 均处于较低的污染水平; Cd、Cu、Mn、Ni 和 Pb 元素质量浓度最小值出现 8 月, 分别为 0.96 、 22.73 、 20.46 、 2.19 和 $23.83 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. Cu 元素质量浓度在 5 月出现最大值, 为 $40.76 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, Mn 元素质量浓度在 6 月出现最大值, 为 $51.76 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, Cd、Cr、Ni、Pb 元素质量浓度在 9 月出现最大值, 分别为 2.44 、 25.07 、 6.82 和 $71.11 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 从元素月均质量浓度变化趋势可以看出, 9 月所有元素质量

浓度均较 8 月出现增加,其中 Cd、Cr、Ni、Pb 呈显著性增加. 南京 8 月降水量大,降水的冲刷作用造成大气颗粒物的质量浓度降低,重金属质量浓度也随之下降^[27]. 同时南京市政府因为举办青奥会,对

冶金工业、炼钢厂、燃煤等企业实行严格管控,这是造成重金属质量浓度下降的另一个原因. 青奥会结束,工厂、企业恢复生产是造成重金属质量浓度升高的主要因素^[31].

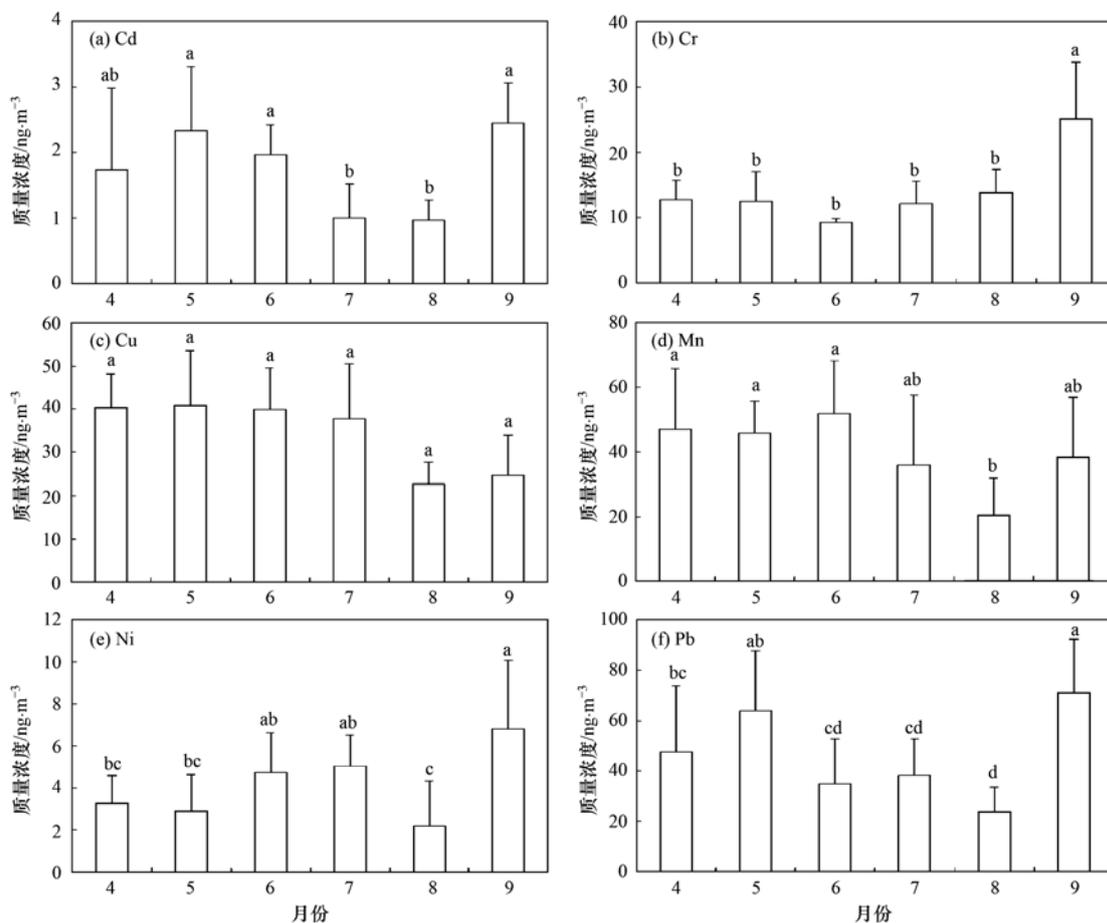


图 2 2014 年 4 月至 9 月青奥会前后南京 PM_{2.5} 中各重金属质量浓度的月变化

Fig. 2 Monthly variation of various heavy metal concentrations in PM_{2.5} from April to September, 2014 around the Youth Olympic Games

2.3 主成分分析

对 PM_{2.5} 中 6 种重金属的质量浓度进行了主成分分析. 由表 1 可知,主因子 1 与 Cd、Pb 相关性很高,分别为 0.808 和 0.726,同时从图 2 中可以看出 Cd、Pb 的月变化趋势相同,说明这两种离子同源性高, Cd、Pb 是冶金工业典型排放源标示物^[32],属于工业

排放,说明主因子 1 代表工业源,贡献率达 40.32%. 主因子 2 与元素 Cr 的相关性最高,为 0.861. 环境空气中 Cr 含量的升高主要来自燃煤类源的排放^[33],因此主因子 2 可代表燃煤类源,贡献率达 25.61%. 主因子 1 和 2 都代表人为源. 因此,通过人为政策干预是青奥会期间重金属离子浓度降至最低的主要原因.

表 1 南京市 PM_{2.5} 中重金属最大方差旋转因子分析 (n=57)

Table 1 Orthogonal rotation-Varimax matrix of heavy metals in PM_{2.5} in Nanjing (n=57)

主因子	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	方差贡献率/%	累积贡献率/%
主因子 1	0.808	0.304	0.55	0.651	0.648	0.726	40.32	40.32
主因子 2	0.028	0.861	-0.665	-0.442	0.339	0.206	25.61	65.93

2.4 南京 PM_{2.5} 中各重金属污染与其他城市的比较

选取了我国主要几个大城市 PM_{2.5} 重金属质量浓度与本研究结果进行对比(表 2),进一步说明青

奥会对南京市大气环境 PM_{2.5} 中重金属污染的影响. 在 4 个城市中,南京市 PM_{2.5} 中 6 种重金属的质量浓度相对较低,并且 Cd、Ni、Pb 的浓度远低于 WHO

空气质量标准;与2010年南京市PM_{2.5}中重金属浓度相比较,PM_{2.5}中Cd、Cr、Cu、Mn、Ni和Pb这6种重金属浓度分别降低了42.0%、29.7%、

63.4%、50.8%、69.3%、74.1%。可见,青奥会采取的各项减排措施对青奥会空气质量保障起到了关键性作用。

表2 南京地区不同时间内PM_{2.5}中各重金属含量及其与其他地区的比较/ng·m⁻³

重金属	本研究	南京 ^[22]	北京 ^[34]	上海 ^[35]	广州 ^[36]	WHO
	(2014-04~2014-09)	(2010-04~2010-09)	(2009~2010)	(2009~2010)	(2008-12~2009-02)	空气质量标准
Cd	1.74±0.92	3		3	20	5
Cr	14.28±7.04	20.3		31	70	
Cu	35.47±12.93	96.8	40	29	190	
Mn	39.80±18.55	80.9	70	132	150	
Ni	4.33±2.42	14.1	10	27		25
Pb	46.62±24.66	180.3	140	133	450	500

2.5 PM_{2.5}中各重金属经呼吸暴露的健康风险评价

PM_{2.5}中6种重金属通过呼吸暴露对人群造成的非致癌风险与致癌风险如表3所示。其中数据显示,儿童、成年男性和女性的联合致癌风险值均小于10⁻⁴,风险水平在可接受的范围内。如果采用保守的10⁻⁶作为目标风险值以充分保护人体健康,则儿童、成年男性、成年女性空气暴露重金属联合致癌风险值均大于10⁻⁶,其中Cr的致癌风险值占总致癌风险值的96.70%,表明Cr对人体健康具有很高的潜在性危害,Cr的毒性依赖于Cr(VI),而不是Cr(III),本研究仅测定了总Cr的浓度,计算的Cr致癌风险值偏高,但对于易感儿童群体,仍有可能对其身体健康产生危害,需引起重视^[37]。

就非致癌风险而言,南京市各类人群通过呼吸途径暴露的各种重金属非致癌风险值介于4.81×

10⁻⁵~7.63×10⁻¹之间,均低于可接受健康风险水平1,因此通过呼吸途径暴露于重金属的潜在非致癌健康风险并不显著,其非致癌风险强度为:Mn>Cr>Cd>Pb>Cu>Ni。其中成年男性、成年女性和儿童的联合非致癌风险值分别为0.918、0.786、0.748,可以看出成年男性的联合非致癌风险值接近1,其中Mn的非致癌风险值为0.763,占总非致癌风险值的83.10%,表明Mn是成年男性通过呼吸途径暴露于污染物的主要贡献者,因此Mn通过呼吸途径对成年男性造成的非致癌风险不容忽视。

总体上无论致癌风险值还是非致癌风险值,通过呼吸暴露的健康风险值都是成年男性>成年女性>儿童,这可能与人群室外活动的时间长短有关。通常成年男性室外活动时间较长,PM_{2.5}的暴露量要高于其他人群。

表3 经呼吸途径的致癌风险值与非致癌风险值

Table 3 Carcinogenic and non-carcinogenic risks via breathing exposure

重金属	非致癌风险(HQ)			致癌风险(R)		
	儿童	成人男性	成人女性	儿童	成人男性	成人女性
Cd	1.02E-02	1.25E-02	1.07E-02	9.45E-07	1.93E-06	1.65E-06
Cr	1.13E-01	1.38E-01	1.19E-01	3.49E-05	7.13E-05	6.11E-05
Cu	1.93E-04	2.37E-04	2.03E-04			
Mn	6.22E-01	7.63E-01	6.54E-01			
Ni	4.81E-05	5.89E-05	5.05E-05	2.29E-07	4.69E-07	4.02E-07
Pb	2.55E-03	3.13E-03	2.68E-03			
联合	7.48E-01	9.18E-01	7.86E-01	3.60E-05	7.37E-05	6.31E-05

2.6 PM_{2.5}中各重金属经皮肤暴露的健康风险评价

通过皮肤途径暴露的PM_{2.5}中6种重金属的非致癌风险与致癌风险值如表4所示,儿童、成年男性和女性通过皮肤暴露的铬的致癌风险值分别为3.91×10⁻⁶、5.39×10⁻⁶和6.21×10⁻⁶,但其风险值均小于10⁻⁴,表明南京市各类人群通过皮肤接触暴露的致癌性重金属健康风险是可以接受的。

对于PM_{2.5}中的6种非致癌性重金属,其非致癌风险值均小于1,理论风险值较小,表明通过皮肤接触暴露的PM_{2.5}中的6种重金属对各类人群的非致癌性健康风险产生的影响并不显著。然而儿童联合非致癌风险值大于1,其主要贡献来源于Pb的影响(Pb的非致癌风险值为0.557),表明Pb对儿童健康有很大的潜在性健康风险。因此,减少或控

表 4 经皮肤途径的致癌风险值与非致癌风险值

Table 4 Carcinogenic and non-carcinogenic risks via dermal contact exposure

重金属	非致癌风险(HQ)			致癌风险(R)		
	儿童	成人男性	成人女性	儿童	成人男性	成人女性
Cd	2.65E-01	2.20E-02	2.53E-02			
Cr	1.01E-01	8.43E-03	9.67E-03	3.91E-06	5.39E-06	6.21E-06
Cu	7.15E-02	5.94E-03	6.81E-03			
Mn	3.65E-02	3.03E-03	3.48E-03			
Ni	1.59E-02	1.33E-03	1.52E-03			
Pb	5.57E-01	4.63E-02	5.31E-02			
联合	1.05E+00	8.70E-02	9.98E-02	3.91E-06	5.39E-06	6.21E-06

制这些排放源对减少能源消耗以及减轻对人体的危害具有重要意义。

3 结论

(1) 青奥会期间南京市 PM_{2.5} 质量浓度仅为 26.39 μg·m⁻³, 达到国家空气质量一级标准, 低于观测期间其他时期; 南京市 PM_{2.5} 中 6 种重金属浓度在青奥会期间均降至最低, 与其他城市重金属浓度相比, 也处于较低的污染水平。通过主成分分析表明, 南京市 PM_{2.5} 中的重金属主要来自污染源排放, 与人类活动相关。可见青奥会期间南京及其周边地区所采取的减排措施对降低 PM_{2.5} 浓度及重金属浓度的效果较为显著。

(2) 大气 PM_{2.5} 中 6 种重金属元素通过呼吸暴露对成年男性的健康风险最大, 其次是成年女性, 对儿童的健康风险最小; Mn 通过呼吸暴露对成年男性造成较大的非致癌性风险, 6 种重金属通过皮肤暴露对儿童造成的联合非致癌风险值大于 1, 存在潜在的非致癌性健康风险, 应引起重视。

参考文献:

[1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 1-42.

[2] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, et al. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(6): 847-855.

[3] 赵承美, 孙俊民, 邓寅生, 等. 燃煤飞灰中细颗粒物 PM_{2.5} 的物理化学特性[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(2): 71-73.

[4] 王平利, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(1): 83-87.

[5] Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, **56**(6): 709-742.

[6] Zanobetti A, Franklin M, Koutrakis P, et al. Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions[J]. Environmental Health, 2009, **8**: 58.

[7] Jerrett M, Buzzelli M, Burnett R T, et al. Particulate air

pollution, social confounders, and mortality in small areas of an industrial city[J]. Social Science & Medicine, 2005, **60**(12): 2845-2863.

[8] 王春梅, 欧阳华, 王金达, 等. 沈阳市环境铅污染对儿童健康的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 17-22.

[9] 刘爱明, 杨柳, 吴亚玲, 等. 城市区域大气颗粒物的健康效应研究[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(5): 19-23.

[10] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. The Lancet, 2013, **380**(9859): 2224-2260.

[11] Waston J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} Chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological materials, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995[J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.

[12] Watson J G, Antony Chen L W, Chow J C, et al. Source apportionment: findings from the US supersites program[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, **58**(2): 265-288.

[13] Dockery D W, Pope C A, Xu X, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. New England Journal of Medicine, 1993, **329**(24): 1753-1759.

[14] Peters A. Particulate matter and heart disease: evidence from epidemiological studies[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, **207**(2): 477-482.

[15] Zhang X, Zhuang G, Guo J, et al. Characterization of aerosol over the Northern South China Sea during two cruises in 2003[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(36): 7821-7836.

[16] Sun Y, Zhuang G, Wang Y, et al. The air-borne particulate pollution in Beijing—concentration, composition, distribution and sources[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(35): 5991-6004.

[17] 黄辉军, 刘红年, 蒋维楣, 等. 南京市 PM_{2.5} 物理化学特性及来源解析[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(6): 713-722.

[18] HJ 656-2013, 环境空气颗粒物 (PM_{2.5}) 手工监测方法 (重量法) 技术规范[S].

[19] Hsu S C, Liu S C, Huang Y T, et al. A criterion for identifying Asian dust events based on Al concentration data collected from northern Taiwan between 2002 and early 2007[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(D18): 1044.

- [20] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 174-177.
- [21] Cao S Z, Duan X L, Zhao X G, *et al.* Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 1001-1009.
- [22] 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.
- [23] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund; Volume I (Part A: Human Health Evaluation Manual; Part E, Supplement Guidance for Dermal Risk Assessment; Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/superfund/programes/risk/ragse/index.htm>, 2004.
- [24] IRAC (International Agency for Research on Cancer), 2011. Agents classified by the IARC monographs, vol. 1-102 [R]. 2015.
- [25] US EPA. The Screening Levels (RSL) Tables [EB/OL]. <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/index.html>, 2015-06.
- [26] Sun L Y, Li B, Ma Y C, *et al.* Year-round atmospheric wet and dry deposition of nitrogen and phosphorus on water and land surfaces in Nanjing, China[J]. *Water Environment Research*, 2013, **85**(6): 514-521.
- [27] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 221-229.
- [28] 陶俊, 柴发合, 高健, 等. 16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 409-415.
- [29] Huang K, Zhuang G S, Lin Y T, *et al.* How to improve the air quality over megacities in China: pollution characterization and source analysis in Shanghai before, during, and after the 2010 World Expo[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(12): 5927-5942.
- [30] 王琳琳, 王淑兰, 王新锋, 等. 北京市 2009 年 8 月大气颗粒物污染特征[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(4): 553-560.
- [31] Lü S L, Zhang R, Yao Z K, *et al.* Size distribution of chemical elements and their source apportionment in ambient coarse, fine, and ultrafine particles in Shanghai urban summer atmosphere [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(5): 882-890.
- [32] Chow J C. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(5): 320-382.
- [33] 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.
- [34] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [35] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 221-229.
- [36] Yang F M, Tan J H, Zhao Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2011, **11**(11): 5207-5219.
- [37] De Miguel E, Iribarren I, Chacón E, *et al.* Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(3): 505-513.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行