

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险

段海静¹, 蔡晓强², 阮心玲¹, 仝致琦¹, 马建华^{1*}

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 开封市环境监测站, 开封 475000)

摘要: 在开封市龙亭公园(P_L)、相国寺(P_X)、铁塔公园(P_T)、清明上河园(P_Q)采集地表灰尘样品 52 个, 用原子荧光(AFS)法测定灰尘 Hg、As 含量, 用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定 Cr、Cu、Zn、Pb、Ni、Cd 含量. 然后应用地积累指数(I_{geo})和污染负荷指数(PLI)探讨灰尘重金属污染特征, 应用美国环保署的健康风险模型开展针对成人的重金属健康风险评价. 结果表明, 灰尘 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 含量明显高于中国潮土背景值和开封市周边灰尘背景值, 其中 Hg、Pb 严重污染, Cu、Zn、Cd 多为轻污染和偏中度污染, As、Cr、Ni 污染程度较轻. 4 个公园中 P_X 灰尘为强度污染, P_L 为中度污染, P_T 和 P_Q 为轻度污染. 各公园灰尘重金属的平均致癌风险指数(TCR) $> 10^{-6}$, 存在一定的人体可耐受的致癌风险, 4 个公园灰尘重金属平均 TCR 顺序为: $P_L > P_Q > P_X > P_T$. 各公园灰尘重金属平均非致癌风险总指数(HI) < 1 , 不存在非致癌健康风险.

关键词: 公园; 地表灰尘; 重金属; 健康风险; 开封市

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2972-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.033

Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China

DUAN Hai-jing¹, CAI Xiao-qiang², RUAN Xin-ling¹, TONG Zhi-qi¹, MA Jian-hua^{1*}

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Kaifeng Environmental Monitoring Station, Kaifeng 475000, China)

Abstract: Fifty-two dust samples were collected from four parks [Longting Park (P_L), Tieta Park (P_T), Qingmingshanghe Park (P_Q), Xiangguosi Park (P_X)] located in Kaifeng City, China. Concentrations of Hg and As in dusts were measured by atomic fluorescence spectrometry (AFS), while Cr, Cu, Zn, Pb, Ni and Cd were analyzed by inductively coupled plasma mass-spectrometry (ICP-MS). The heavy metal pollution of dust was assessed using Geo-accumulation index (I_{geo}) and pollution load index (PLI). The health risk due to exposure to heavy metals in dust was assessed using the model recommended by USEPA. The non-carcinogen (HI) and carcinogen health risks (TCR) were also calculated to evaluate the potential risks to adults. The results showed that the average contents of Hg, Cu, Zn, Cd and Pb were much higher than those in control samples and the background values of fluvo-aquic soil in China. The samples were seriously polluted by Hg and Pb, besides, there was moderate pollution, slight pollution of Cu and Zn, and no pollution of As, Cr and Ni. The PLI from the 4 Parks indicated that there was serious heavy metals pollution of dust in P_X , moderate pollution in P_L , and slight pollution in P_T and P_Q . The average HI of heavy metals in the four Parks was lower than one. The average HI decreased in the order of $P_L > P_X > P_T > P_Q$, while the average TCR decreased in the order of $P_L > P_Q > P_X > P_T$. The contribution rate of HQ_{As} to HI was about 43.51%, and that of CR_{As} to TCR was about 70.11%.

Key words: park; surface dust; heavy metal; health risk; Kaifeng City

地表灰尘(灰尘)是附着、沉积于不透水下垫面(道路、桥面、街面、广场等)及地面附着物、建筑物的裸露面上, 未被固化黏结, 且易于被外力作用搬运的固体颗粒物^[1, 2], 是环境污染物重要的“源”和“汇”之一. 强烈的人类活动会造成灰尘重金属的大量聚集, 由于重金属具有难降解性, 所以它们具有重要的环境指示意义和较严重的环境危害^[3~5]. 由于灰尘粒径(介于 $1 \sim 1000 \mu\text{m}$)较小^[6], 易通过手口、呼吸及皮肤接触等途径进入人体, 在人体内蓄积, 对人类健康带来危害^[7~10]. 近年来, 随着人们生活水平的提高, 旅游景区及公园已经成为民众假日休闲的主要去处, 其灰尘重金属的污染水平对人体健康的影响也日渐引起人们的关注^[9~17]. 目前, 我

国关于公园灰尘重金属污染研究主要集中在北京^[10]、上海^[12, 13]、天津^[14]、西安^[15]、青岛^[16]、福州^[17]等发达或沿海城市, 而对于拥有 4 000 多年历史的古都开封市公园灰尘重金属的污染状况却鲜见报道. 开封市地处豫东平原, 作为国务院首批公布的 24 座历史文化名城之一, 旅游资源极其丰富, 仅市区旅游景点就达 17 处之多, 历年来游客人数逐年攀升. 截止到 2012 年底, 开封市游客人数达到

收稿日期: 2015-01-27; 修订日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171409, 41430637, 41201211); 河南省教育厅重点项目(13A170051); 河南大学研究生科研创新计划项目(Y1324001)

作者简介: 段海静(1983~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为土壤环境污染与防治, E-mail: jingjingd1983@126.com

* 通讯联系人, E-mail: mjh@henu.edu.cn

4 416.2 万人次, 旅游收入 180.5 亿元, 占全市 GDP 收入的 14.9%, 已成为开封市经济的支柱产业之一^[18]。本研究以开封市 4 个具有代表性的公园为例, 开展灰尘重金属 (Cu、Cr、Pb、Zn、Ni、Cd、Hg、As) 污染和健康风险评价, 旨在为开封市公园环境质量的改善提供依据。

1 材料与方法

1.1 样点布设与样品采集

笔者于 2014 年 3 月对开封市公园灰尘进行样品采集, 采样前一周无降水, 选择晴朗无风的天气进行采样。根据公园的面积及景区内景点的分布, 分别在开封市龙亭公园 (P_L)、铁塔公园 (P_T)、相国寺 (P_X) 和清明上河园 (P_Q) 采集灰尘样品 52 个, 公园位置及详细信息见图 1 和表 1。由图 1 可知, 本研究的 4 个公园分居于开封老城区的 4 个不同方向, 虽然开封市内公园有多处, 但尤以 P_L 、 P_T 、 P_X 和 P_Q 的知名度最高, 每年游客量较多。灰尘样点主要布设

在景区道路和停车场。在每个采样点上, 首先用塑料毛刷和簸箕收集 5 个灰尘子样 (每个子样重约 100 g), 然后将其充分混合, 挑拣出植物残体和砖块或石子, 放入聚乙烯自封袋中保存。

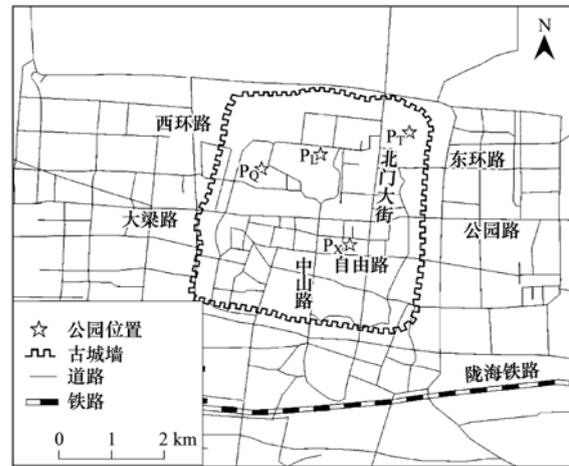


图 1 采样公园分布示意

Fig. 1 Location of the sampling parks in Kaifeng City

表 1 开封市地表灰尘采样公园信息

Table 1 Surface dust sampling park information in Kaifeng City

公园	地理位置	建园时间	样点数/个	公园面积/hm ²	景点级别
P_L	中山路北段	1953 年	18	86.60 (水域面积 47.30)	国家 4A 级
P_T	北门大街	1955 年	11	51.24 (水域面积 9.62)	国家 4A 级
P_X	自由路西段	1949 年	7	2.00 (水域面积 0.00)	国家 4A 级
P_Q	龙亭西路	1998 年	16	40.00 (水域面积 8.00)	国家 5A 级

1.2 样品处理

样品风干后用玛瑙研钵研磨全部通过 100 目 (0.149 mm) 尼龙筛。灰尘 As 和 Hg 含量采用 1:3 硝酸-盐酸混酸消解体系, AFS 法 (DB51/T 836-2008) 测定, 仪器是 AFS-3100 型双道原子荧光光度计 (北京海光仪器公司)。灰尘 Cu、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cd 含量采用硝酸-氢氟酸-高氯酸消解体系, ICP-MS 法测定, 仪器是 X Series 2 型电感耦合等离子体质谱仪 (美国 Thermo scientific)。在分析过程中, 灰尘中 As、Hg 用国家标准土壤样品 (ESS-2, 棕壤), 灰尘中 Cu、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cd 用 (GSS-3, 黄棕壤) 进行回收实验, 加标回收率在 95.3% ~ 104.3% 之间, 平行实验偏差都在 10% 以内。

1.3 灰尘重金属污染评价方法

分别采用地积累指数 (geo-accumulation index, I_{geo}) 和污染负荷指数 (pollution load index, PLI) 评价灰尘重金属污染状况。地积累指数的计算公式^[19]为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \cdot B_n} \right) \quad (1)$$

式中, C_n 为重金属的实测值, B_n 为重金属 n 的地球化学背景值, 1.5 是为了消除沉积物地区差异可能引起背景值变动的转换系数。 I_{geo} 的污染分级标准^[20,21]为: $I_{geo} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$, 轻污染; $1 < I_{geo} \leq 2$, 偏中污染; $2 < I_{geo} \leq 3$, 中污染; $3 < I_{geo} \leq 4$, 偏重污染; $4 < I_{geo} \leq 5$, 重污染; $5 < I_{geo}$, 极重污染。

污染负荷指数法 (PLI) 的计算公式^[22]为:

$$CF_i = c_i / c_{bi} \quad (2)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (3)$$

式中, CF_i 为灰尘重金属 i 污染因子, c_i 为灰尘重金属 i 的实测含量, c_{bi} 为重金属 i 的背景值, PLI 为某样点多种重金属的污染负荷指数。其污染分级标准为^[23]: $PLI \leq 1$ 为无污染, $1 < PLI \leq 2$ 为轻度污染, $2 < PLI \leq 3$ 为中度污染, ≥ 3 为强度污染。

1.4 重金属健康风险评价方法

1.4.1 暴露剂量模型

环境介质中的重金属可通过手-口直接摄入、呼吸吸入、皮肤接触吸收这 3 种暴露途径进入人

体,各种途径的暴露量按下列公式^[24, 25]计算:

经手-口直接摄入:

$$CDI_{\text{直接摄入}} = \frac{c \times IR_o \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

经呼吸摄入:

$$CDI_{\text{呼吸摄入}} = \frac{c \times EF \times ED \times IR_i}{BW \times AT \times PEF} \quad (5)$$

经皮肤接触:

$$CDI_{\text{接触摄入}} = \frac{c \times CF \times SA \times SL \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (6)$$

式中,CDI 为重金属暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; c 为灰尘重金属的浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; BW 为人体平均体重, kg; SA 为可能接触灰尘的皮肤面积, cm^2 ; IR_o 为摄入频率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; IR_i 为吸入频率, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; ED 为暴露年限, a; EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; CF 为转换系数, $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$; AT 为平均作用时间(非致癌和致癌), d; SL 是皮肤黏着度, $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; ABS_d 是皮肤吸收系数; PEF 为灰尘排放因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mg}^{-1}$.

参考我国场地环境评价导则(DB11/T 656-2009)以及国内外相关研究成果^[24~28],式(4)~(6)中的参数取值如下:IR_o 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, IR_i 为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, PEF 为 $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{mg}^{-1}$, CF 为 $110^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$, EF 为 $250 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, ED 为 10 a, BW 为 60 kg, SA 为 4350 cm^2 , SL 为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, ABS_d 为 0.001.

在暴露量计算中,致癌和非致癌重金属的 AT 取值不同. 在计算非致癌重金属暴露量时,成人平均 ED 为 10 a,故 AT 为 $10 \times 365 \text{ d}$. 在计算致癌重金属暴露量时,成人的平均 ED 为 10 a,再将暴露量平均分配到整个生命期(70 a),成人的致癌重金属暴露量 AT 取值为 $70 \times 365 \text{ d}$.

1.4.2 健康风险表征模型

本研究的 8 种重金属(Hg、As、Cr、Cu、Zn、

Pb、Ni、Cd)都具有慢性非致癌健康风险,其中 As、Cd、Ni、Cr、Pb 具有致癌风险^[7, 29]. 非致癌风险用风险商(HQ)和风险指数(HI)来表征,计算公式^[24~26]为:

$$HQ_{ji} = \frac{CDI_{ji}}{RfD_i} \quad (7)$$

$$HI = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 HQ_{ji} \quad (8)$$

式中,CDI_{ji} 为重金属 i 第 j 种暴露途径的暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD_i 为重金属 i 的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,即单位时间单位体重摄入的不会引起人体不良反应的最大量; HQ_{ji} 是非致癌重金属 i 第 j 种暴露途径的单项风险指数(风险商); HI 为 8 种重金属通过 3 种暴露途径所致的非致癌健康风险指数. 当 HI 或 HQ < 1 时,表示重金属的健康风险可以忽略;当其 > 1 时,表示存在重金属的健康风险,其值越大,健康风险就越大.

致癌健康用风险指数(TCR)来表征,计算公式^[24~26]如下:

$$CR_i = \sum_{j=1}^3 CDI_{ij} \times SF_{ij} \quad (9)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^5 CR_i \quad (10)$$

式中,CR_i 为致癌重金属 i 通过 3 种暴露途径的单项风险指数; CDI_{ij} 为致癌重金属 i 第 j 种暴露途径的暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF 为污染物的致癌斜率因子, $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$; TCR 为 5 种致癌重金属的健康风险指数. 当 TCR < 10^{-6} ,无致癌风险; $10^{-6} < \text{TCR} < 10^{-4}$,人体可耐受的致癌风险; TCR > 10^{-4} ,人体不可耐受的致癌风险^[28].

参考国内外相关研究成果^[24~29]及我国场地环境评价导则(DB11/T 656-2009),不同重金属各种暴露途径的 RfD 和 SF 见表 2.

表 2 重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF

Table 2 Reference dose (RfD) for non-carcinogen metals and slope factors (SF) for carcinogen metals

重金属	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$			SF/ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$		
	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
Hg	3E-04	2.4E-05	3E-04	n. a. ¹⁾	n. a.	n. a.
As	3E-04	3E-04	1.23E-04	1.5	7.5	1.5
Cr	3E-03	6E-05	2.86E-05	n. a.	n. a.	42.0
Cu	4E-02	1.2E-02	4E-02	n. a.	n. a.	n. a.
Zn	0.30	6E-2	0.30	n. a.	n. a.	n. a.
Pb	3.5E-03	5.25E-04	3.52E-03	n. a.	0.0085	n. a.
Ni	2E-02	5.40E-03	2.06E-02	n. a.	n. a.	0.84
Cd ²⁾	1E-03	1E-05	1E-03	6.1	6.1	6.30

1) n. a. 表示无数据; 2) 本研究为总铬,目前尚无其 RfD,只有 Cr⁶⁺ 和 Cr³⁺ 的 RfD,考虑到灰尘的 Eh 一般大于 400 mV, Cr³⁺ 大部分被氧化为 Cr⁶⁺,以及最大风险原则和预警作用,故本研究采用 Cr⁶⁺ 的 RfD

2 结果与分析

2.1 灰尘重金属的含量特征

从表 3 可见,开封市四大公园灰尘 Hg 和 Pb 含量属于强变异, C_v 分别为 138.99% 和 153.89%, 其他重金属均属于中等变异 (15.69% ~ 73.09%)。与开封周边地区灰尘重金属背景值^[23, 30]相比,公园灰尘除 As、Ni 平均含量低于背景值外, Hg、Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 高于其背景值, 分别是背景值的 16.7、1.1、2.0、3.0、5.6 和 3.1 倍。与中国潮土背景值^[31]相比,公园灰尘除 As、

Cr、Ni 平均含量低于潮土背景值之外, Hg、Cu、Zn、Pb、Cd 平均含量均高于其背景值, 分别是其背景值的 10.0、10.2、6.6、3.4 和 1.8 倍。表明公园灰尘大多数重金属出现不同程度的积累。开封市各公园灰尘重金属含量存在一定差别(表 3)。灰尘 Hg、Cr、Cu、Ni 含量表现为 $P_X > P_L > P_Q > P_T$, As 含量表现为 $P_Q > P_L > P_T > P_X$, Zn 含量表现为 $P_X > P_T > P_L > P_Q$, Pb 含量表现为 $P_L > P_X > P_T > P_Q$, Cd 含量表现为 $P_L = P_X > P_T > P_Q$ 。相国寺灰尘除 As 和 Pb 之外, 其他重金属含量均高于另外 3 个公园。

表 3 灰尘重金属含量统计

Table 3 Statistics of heavy metal contents in dust samples

公园	重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$								
	Hg	As	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	
$P_Q (n=16)$	最大值	0.53	8.20	71.30	94.28	419.12	139.85	29.05	1.36
	最小值	0.10	3.67	38.43	16.45	90.27	29.8	16.82	0.28
	均值	0.27	5.92	51.74	36.96	202.66	65.92	22.87	0.82
	SD	0.11	1.29	8.42	18.20	75.92	31.99	3.44	0.34
	$C_v/\%$	40.77	23.51	16.17	46.66	36.42	47.03	15.05	41.47
$P_L (n=18)$	最大值	3.36	16.95	65.33	60.65	551.03	1488.27	30.22	3.08
	最小值	0.11	2.76	46.59	20.57	131.51	38.49	21.8	0.43
	均值	0.61	5.50	46.01	38.91	234.80	210.68	24.13	1.13
	SD	0.77	3.05	6.48	10.13	99.93	352.61	2.08	0.64
	$C_v/\%$	106.43	52.78	11.58	25.92	40.79	132.59	8.57	54.17
$P_T (n=11)$	最大值	0.33	7.39	73.66	47.74	438.96	401.73	25.40	1.75
	最小值	0.13	1.87	22.13	16.79	99.47	27.47	12.33	0.46
	均值	0.20	4.41	47.74	32.20	255.27	126.88	20.05	1.05
	SD	0.05	1.58	16.07	9.57	103.71	117.50	4.45	0.38
	$C_v/\%$	27.05	36.78	33.64	29.71	42.02	83.70	22.40	36.45
$P_X (n=7)$	最大值	3.60	6.58	64.33	208.90	470.41	415.93	29.83	1.41
	最小值	0.21	2.50	51.01	41.63	221.19	69.68	22.52	0.80
	均值	1.06	4.07	58.01	82.12	320.94	185.00	25.47	1.13
	SD	1.36	4.45	58.13	100.82	323.16	197.15	26.11	1.09
	$C_v/\%$	89.03	32.95	7.15	64.85	26.72	56.54	9.66	21.27
全市平均 ($n=52$)	最大值	3.60	16.95	73.67	208.9	551.04	1488.27	30.22	3.09
	最小值	0.10	1.87	22.13	16.45	90.27	27.48	12.34	0.28
	均值	0.50	5.12	53.25	44.29	240.27	144.84	23.15	1.02
	SD	0.69	2.19	10.05	32.37	97.47	222.89	3.63	0.48
	$C_v/\%$	138.99	42.82	18.86	73.09	40.57	153.89	15.69	46.91
开封市周边灰尘背景值 ^[23, 30]	0.03	8.07	47.37	21.74	79.45	25.83	26.43	0.33	
中国潮土背景值 ^[31]	0.05	9.70	66.60	24.10	71.10	21.90	29.60	0.10	

2.2 重金属的污染特征

选择开封市周边灰尘元素背景值作为 B_n 值, 利用式(1)计算得到灰尘重金属的 I_{geo} 及其不同污染程度样点百分数(表 4)。由表 4 可见, 灰尘 Hg 和 Pb 的污染比较严重, 所有样点均在轻污染以上, 其中所有样点的 Hg 均在偏中污染以上, 处于偏中污染、中污染和偏重污染的样点数分别为 8、

27 和 11, 共占样点总数的 88.46%; 而 Pb 在各污染级别均有分布, 其中以偏中污染所占比例较高, 样点数为 21, 占样点总数的 40.38%。灰尘也存在一定程度的 Cu、Zn 和 Cd 污染。灰尘 Cu 处于轻污染的样点数为 33, 占总样点数的 63.46%; 大部分样点的 Zn 和 Cd 处于轻污染和偏中污染, 共占总样点数的 88.46%; 灰尘 As、Cr 和 Ni 污染程度较

轻,几乎全部的样点均处于无污染. 不同重金属的平均 I_{geo} 的含量顺序为: $Hg > Pb > Cd > Zn > Cu > Cr$

$> Ni > As$. 由此可知, Hg 是各公园灰尘最主要的污染因子,其次是 Pb .

表 4 灰尘重金属的 I_{geo} 及其不同污染程度样点百分数

Table 4 Geo-accumulation indexes of heavy metals in dusts and the number of samples in different pollution categories

元素	I_{geo}		不同污染程度样点百分数/%						
	范围	平均	无污染	轻污染	偏中污染	中污染	偏重污染	重污染	极重污染
Hg	1.22 ~ 6.32	2.87	—	—	15.38	51.93	21.15	3.85	7.69
As	-2.69 ~ 0.49	-1.33	98.08	1.92	—	—	—	—	—
Cr	-1.66 ~ 0.08	-0.42	98.08	1.92	—	—	—	—	—
Cu	-0.91 ~ 2.76	0.33	26.92	63.46	5.77	3.85	—	—	—
Zn	-0.36 ~ 2.25	0.94	7.69	50.00	38.46	3.85	—	—	—
Pb	-0.42 ~ 5.34	1.35	—	9.62	40.38	17.31	3.85	11.54	17.30
Ni	-1.68 ~ -0.39	-0.8	100	—	—	—	—	—	—
Cd	-0.67 ~ 2.78	1.04	5.77	38.46	50.00	5.77	—	—	—

利用式(2)和(3)得到各个公园基于开封市周边灰尘背景值的 PLI 评价结果(图 2),从图 2 可知,各公园灰尘重金属平均 PLI 的大小顺序依次为: $P_X(3.05) > P_L(2.38) > P_T(1.89) = P_Q(1.89)$. P_X 为强度污染, P_L 为中度污染,而 P_T 和 P_Q 则为轻度污染.

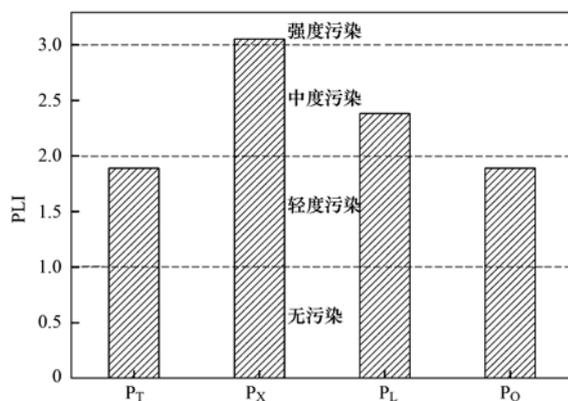


图 2 各公园灰尘重金属平均 PLI 与污染状况对比

Fig. 2 Average PLI and pollution levels of dust heavy metals in different parks

2.3 灰尘重金属健康风险评价

2.3.1 非致癌健康风险评价

按照式(4)~(8)分别计算得到开封市公园灰尘针对成人经 3 种暴露途径的各个重金属的非致癌健康风险单项指数(HQ)和风险总指数(HI),结果见表 5. 从中可见,4 个公园灰尘 8 种重金属的 HQ 和 HI 均小于 1,不存在非致癌健康风险. 平均 HQ 从大到小依次为: $As > Pb > Cr > Cd > Hg > Cu > Zn > Ni$. 灰尘 As 、 Pb 和 Cr 对 HI 的贡献率分别为 43.51%、32.47% 和 19.09%. 从不同公园灰尘重

金属平均 HI(图 3)来看, $P_L(0.184) > P_X(0.167) > P_T(0.134) > P_Q(0.129)$,但经方差分析发现,各公园的 HI 差别不显著($P > 0.05$).

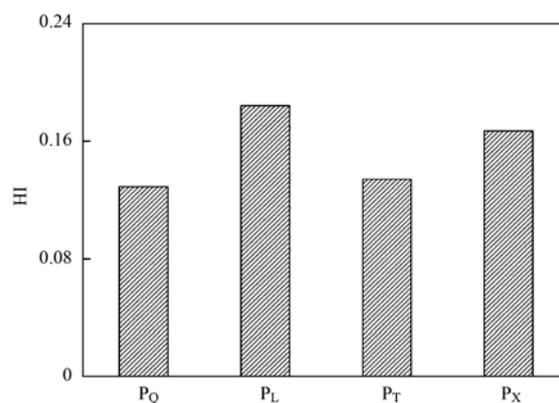


图 3 各公园灰尘重金属非致癌风险指数对比

Fig. 3 Average HI of dust heavy metals in different parks

2.3.2 致癌健康风险评价

按照式(9)和(10)分别计算得到各公园灰尘 As 、 Cd 、 Cr 、 Ni 、 Pb 的 CR 和 TCR(表 5). 从表 5 中可知,开封市公园灰尘各样点或其平均 CR_{Ni} 、 CR_{Pb} 和 CR_{Cr} 远小于 10^{-6} 数量级,无致癌风险;而大多数样点或其平均 CR_{As} 和 CR_{Cd} 大于 10^{-6} 数量级,存在一定的人体可耐受的致癌风险. 公园灰尘重金属的平均 TCR $> 10^{-6}$,存在人体可耐受的致癌风险,值得引起重视. 从不同公园灰尘重金属 TCR(图 4)来看,平均 TCR 大小顺序为: $P_L(3.89 \times 10^{-6}) > P_Q(3.57 \times 10^{-6}) > P_X(3.32 \times 10^{-6}) > P_T(3.27 \times 10^{-6})$,但差别不显著($P > 0.05$). CR_{As} 对其 TCR 的贡献率变化在 39.29% ~ 89.38% 之间,平均为 70.11%, As 是最主要的致癌风险因子.

表 5 灰尘重金属成人非致癌健康风险指数和致癌健康风险指数统计

Table 5 Non-carcinogenic and carcinogenic risk indexes for adults with heavy metals in dusts

健康风险类型		最大值	最小值	均值	SD	$C_v/\%$	
非致癌风险	HQ	Cu	6.83E-03	5.38E-04	1.45E-03	1.06E-03	73.09
		Zn	2.19E-03	3.58E-04	9.54E-04	3.87E-04	40.57
		Pb	5.14E-01	9.48E-03	5.00E-02	7.69E-02	153.89
		As	2.22E-01	2.45E-02	6.70E-02	2.87E-02	42.82
		Hg	1.52E-02	4.42E-04	2.11E-03	2.93E-03	138.99
		Cr	4.07E-02	1.22E-02	2.94E-02	5.54E-03	18.86
		Cd	6.59E-03	6.04E-04	2.17E-03	1.02E-03	46.91
		Ni	1.78E-03	7.27E-04	2.14E-04	1.36E-03	15.69
	HI	6.13E-01	6.68E-02	1.54E-01	8.50E-02	55.04	
致癌风险	CR	As	8.30E-06	9.18E-07	2.51E-06	1.07E-06	42.35
		Cr	7.42E-08	2.23E-08	5.36E-08	1.01E-08	19.25
		Ni	6.09E-10	2.49E-10	4.70E-10	7.50E-11	15.95
		Cd	3.10E-06	2.84E-07	1.02E-06	4.79E-07	46.70
		Pb	1.79E-08	3.31E-10	1.75E-09	2.69E-09	153.89
			TCR	1.04E-05	1.93E-06	3.58E-06	1.26E-06

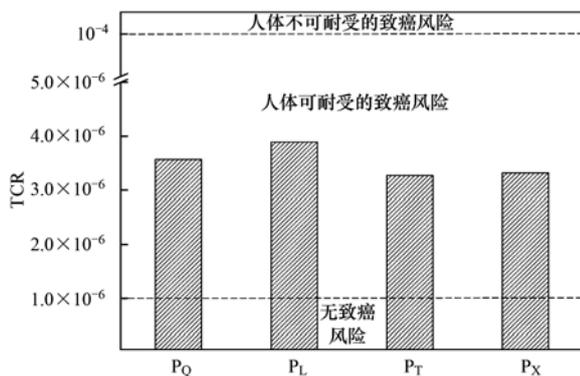


图 4 各公园重金属平均致癌风险指数对比

Fig. 4 Average TCR of dust heavy metals in different parks

3 讨论

3.1 灰尘重金属来源分析

公园灰尘重金属的来源比较复杂,主要受到城市交通,工业发展和人类旅游活动的影响.本研究中公园灰尘中 Hg、Cu、Zn、Pb、Cd 的平均含量显著高于中国潮土背景值和开封市周边灰尘背景值,表明其已受到人类活动的影响.研究表明^[23, 32~35], Hg 是典型的城市人为源重金属,来源较为复杂,除了工业、交通来源外,燃煤也可能是其另一来源.我国原煤中 Hg 的含量变化范围平均在 0.1~5.5 mg·kg⁻¹^[36],煤中平均的 Hg 含量为 0.22 mg·kg⁻¹^[37].开封市是典型的燃煤城市,煤炭是其主要能源,截止 2012 年,开封市原煤消耗量达 503 × 10⁴ t^[18].因此,煤炭燃烧造成的大气 Hg 沉降可能是灰尘 Hg 的重要来源.先前的研究表明^[10, 21, 24, 38~50],交通源是 Pb、Zn、Cd、Cu 等多种重金属的重要来源.比如橡胶轮胎磨损、润滑油的

耗损、刹车皮的磨损及汽车金属部件的碰撞会产生 Zn、Cd、Cu 等^[10, 43~45, 47].公园灰尘中 Pb 含量高的原因可能与含铅污染物的历史积累有关,含铅汽油通常含有四乙基铅或四甲基铅等抗爆剂,经燃烧,可转化为铅氧化物排入大气中,经过大气降尘进入土壤或形成地表灰尘,从而影响灰尘中 Pb 的含量^[51, 52].尽管交通污染排放的铅在无铅汽油使用后有所降低^[53],但其排放至土壤中的含铅污染物仍会滞留较长一段时间,而公园灰尘中污染物的来源包括周围绿地土壤颗粒的再悬浮,因此土壤中的污染物的历史积累会影响灰尘中 Pb 的含量,这一点在街道灰尘中也得到了证实^[24, 42].开封市截止 2012 年底,民用汽车拥有量达到 62 × 10⁴ 辆,其中私人汽车拥有量为 32.8 × 10⁴ 辆,占有汽车总数的 50%^[18].加之,近年来,开封市游客接待量人数众多,至 2012 年底,开封市接待海内外游客达 4 416.20 万人次^[18],加之自驾游,团体游逐年攀升,外来机动车辆激增,所排放的交通源污染物也随之增加,这可能是公园灰尘中 Cd、Pb、Zn、Cu 含量污染较重的原因之一.研究公园灰尘中 As、Ni 含量低于背景值,可能是土壤或灰尘中 As、Ni 含量主要受到城市周围土壤母质的影响,属于自然源重金属的原因^[10, 23, 41, 49, 54~56].开封市公园灰尘 Cr 含量略高于其周边背景值,而低于中国潮土背景值,说明其富集水平不高,可能主要受成土母质影响,但人类城市活动也是其来源之一,属于混合源重金属,该结论与朱伟等^[57]研究结果相似.

3.2 不同公园灰尘重金属污染差别分析

开封市不同公园灰尘重金属污染程度的差别可

能与建园时间长短、公园性质、水域面积、绿地面积、所处地理位置及周边环境状况等多种因素有关。相国寺灰尘重金属污染最为严重,除 As 和 Pb 之外,其他元素含量均高于另外 3 个公园,这可能与相国寺作为中国历史著名的佛教寺院,建园时间久远、寺内香客和游客众多,而香灰中含有大量的 Cr、Cu、Zn、Hg、Ni、Cd 等有关^[58];另外,该寺庙坐落于开封市中心,周边拥有开封市繁华的商业中心及运营时间较长的相国寺汽车站,周围道路车流量较大,交通拥堵造成大量的重金属进入灰尘中,交通废弃物较多也是其污染较重的原因之一^[13, 16, 21, 24, 38~50]。龙亭公园灰尘污染程度低于相国寺,其原因可能与其周围的水域面积有关,龙亭公园周围分布着杨家湖、潘家湖等湖泊,其水域面积达到 47.3 hm²,占公园面积的 54.62%,水域面积在 4 公园中最大,大面积的水域对周围空气起到了良好的净化作用;而清明上河园和铁塔公园灰尘重金属污染相对较轻可能与公园建园时间较短及地理位置偏僻有关,清明上河园自 1998 年才对外开放,距今仅 17 a;铁塔公园坐落于开封市东北隅,客流量及车流量相对较少,故这两个公园的灰尘污染程度相对较低。公园的绿地面积对地表灰尘质量也有影响,笔者使用 Google Map 截获 4 个公园的卫星影像图,通过使用 Arcmap 10.2 计算 4 个公园的绿地面积。龙亭公园的绿地面积相对较大(12.2 hm²),铁塔公园和清明上河园的次之,分别为 10.7 hm² 和 10.3 hm²,相国寺的绿地面积最小(0.5 hm²),公园高的绿地面积能有效降低公园土壤颗粒的再悬浮,减少污染物对地表灰尘的输入,这可能也是公园污染存在差异的又一原因。此外,不同公园的客流量的多少也会影响其灰尘重金属污染状况。据笔者从开封市旅游局获悉 4 个公园近 3 年的客流量看,相国寺单位面积的年游客量最高[2014 年,34 万人次·(hm²·a)⁻¹],铁塔公园单位面积的年游客量最少[2014 年,0.81 万人次·(hm²·a)⁻¹].

4 结 论

(1)开封市公园灰尘 Hg、As、Cr、Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的平均含量分别为 0.50、5.12、53.25、44.29、240.27、144.84、23.15 和 1.02 mg·kg⁻¹;灰尘中 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 属于人为源重金属,Cr 属于混合源重金属,Ni 和 As 属于自然源重金属。

(2)相国寺地表灰尘污染等级为强度污染,龙亭公园污染等级为中度污染,铁塔公园和清明上河

园污染等级为轻度污染。

(3)4 个公园灰尘 8 种重金属的 HQ 及 HI 均小于 1,不存在非致癌健康风险,其平均 HQ 变化依次为:As > Pb > Cr > Cd > Hg > Cu > Zn > Ni。在非致癌总风险中,HQ_{As}对 HI 的贡献约为 43.51%,As 是最主要的非致癌风险因子。

(4)在致癌风险评价中,四大公园灰尘重金属除 Cr、Ni、Pb 对成人的 CR < 10⁻⁶之外,As、Cd 对成人的 CR 及 5 种元素的 TCR 在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴之间,属于人体可耐受的致癌风险,但需要引起人们的重视。CR_{As}对其 TCR 的贡献率在 70.11%左右,As 是最主要的致癌风险因子。

参 考 文 献:

- [1] 常静,刘敏,候立军,等.城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J].应用生态学报,2007,18(5):1153-1158.
- [2] 方凤满,张志明,陈文娟,等.芜湖市春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律[J].环境科学学报,2009,29(9):1871-1877.
- [3] Alhassan A J, Sule M S, Atiku M K, et al. Study of correlation between heavy metal concentration, street dust and level of traffic in major roads of Kano Metropolis, Nigeria [J]. Nigerian Journal of Basic and Applied Science, 2012, 20(2): 161-168.
- [4] Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece [J]. Geoderma, 2009, 151(3-4): 257-263.
- [5] Wei X, Gao B, Wang P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112: 186-192.
- [6] Yap C K, Chew W Y, Tan S G. Heavy metal concentrations in ceiling fan and roadside car park dust collected from residential colleges in Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor [J]. Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, 2012, 35(1): 75-83.
- [7] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(25): 4501-4512.
- [8] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2): 99-107.
- [9] Tam N F Y, Liu W K, Wong M H, et al. Heavy metal pollution in roadside urban parks and gardens in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 1987, 59: 325-328.
- [10] Du Y R, Gao B, Zhou H D, et al. Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 299-309.
- [11] 许宇慧,唐亚,张朝生,等.四川省九寨沟景区道路灰尘及土壤重金属含量评价[J].山地学报,2011,(3):288-293.
- [12] 史贵涛,陈振楼,王利,等.上海城市公园灰尘重金属污染

- 及其潜在生态风险评价 [J]. 城市环境与城市生态, 2006, **19**(4): 40-43.
- [13] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征 [J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 238-242.
- [14] 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.
- [15] 黄丽, 卢新卫, 翟萌, 等. 西安城市公园灰尘重金属污染及其风险评价 [J]. 城市环境与城市生态, 2010, **23**(1): 17-20.
- [16] 钱翌, 刘峥延. 青岛城市公园灰尘重金属的形态分布及健康风险评价 [J]. 城市环境与城市生态, 2011, **24**(4): 20-23.
- [17] 陈秀玲, 茅建彬, 何世虹, 等. 福州城市公园灰尘重金属污染特征 [J]. 城市环境与城市生态, 2012, **25**(6): 31-34, 38.
- [18] 开封市统计局. 开封市统计年鉴 2013 [R]. 开封: 2013.
- [19] Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [20] Krčmová K, Robertson D, Cvečková V, *et al.* Road-deposited sediment, soil and precipitation (RDS) in Bratislava, Slovakia: compositional and spatial assessment of contamination [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, **9**(4): 304-316.
- [21] Lu X W, Wang L J, Lei K, *et al.* Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1058-1062.
- [22] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metals levels in estuaries and the formation of pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [23] 陈彦芳, 马建华, 董运武, 等. 开封周边地区地表灰尘砷、汞背景值及其应用 [J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3052-3059.
- [24] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [25] 谷蕾, 全致琦, 宋博, 等. 基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速公路郑州—商丘段为例 [J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3577-3584.
- [26] US EPA. Integrated risk information system [R]. <http://www.epa.gov/iris/index.html>. 2011.
- [27] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [28] Li Z Y, Ma Z W, Van der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [29] 季文佳, 王淇, 杨玉飞, 等. 危险废物事故排放的河流水环境健康风险评价 [J]. 环境工程学报, 2010, **4**(5): 1196-1200.
- [30] 董运武. 开封附近地区地表灰尘重金属背景值及其应用 [D]. 开封: 河南大学, 2012.
- [31] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版, 1990.
- [32] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [33] Zhang X M, Luo K L, Sun X Z, *et al.* Mercury in the topsoil and dust of Beijing City [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(2-3): 713-722.
- [34] Tsai Y I, Kuo S C, Lin Y H. Temporal characteristics of inhalable mercury and arsenic aerosols in the urban atmosphere in southern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(34): 3401-3411.
- [35] Chen X, Xia X H, Wu S, *et al.* Mercury in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(1): 48-54.
- [36] 白尚显, 唐文俊. 燃料手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 874-876.
- [37] 王起超, 沈文国, 麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算 [J]. 中国环境科学, 1999, **19**(4): 318-321.
- [38] Akhter M S, Madany I M. Heavy metal in street and house dust in Bahrain [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **66**(1-2): 111-119.
- [39] Wang X L, Sato T, Xing B S, *et al.* Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa, Japan [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, **36**(2): 197-210.
- [40] Manno E, Varrica D, Dongarrò G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a Petrochemical plant at Gela Sicily [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(30): 5929-5941.
- [41] 王晓云, 马建华, 侯千, 等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 583-593.
- [42] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, *et al.* A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. *Environment International*, 2003, **29**(5): 563-573.
- [43] Harrison R M, Tilling R, Callén Romero M S, *et al.* A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(17): 2391-2402.
- [44] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [45] Al-Khashman O A. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(39): 6803-6812.
- [46] Tokaltoğlu Ş, Kartal Ş. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the Organized Industrial District in Kayseri (Turkey) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2797-2805.
- [47] De Miguel E, Llamas J F, Chacón E, *et al.* Origin and patterns

- of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2733-2740.
- [48] Jaradat Q M, Momani K A. Contamination of roadside soil, plants, and air with heavy metals in Jordan, a comparative study [J]. *Turkish Journal of Chemistry*, 1999, **23**(2): 209-220.
- [49] Lu X W, Wang L J, Li L Y, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 744-749.
- [50] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 712-723.
- [51] Chow T J. Lead accumulation in roadside soil and grass [J]. *Nature*, 1970, **225**(5229): 295-296.
- [52] Wheeler G L, Rolfe G L. The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation [J]. *Environmental Pollution* (1970), 1979, **18**(4): 265-274.
- [53] Hashisho Z, El-Fadel M. Impacts of traffic-induced lead emissions on air, soil and blood lead levels in Beirut [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, **93**(1-3): 185-202.
- [54] 方凤满, 谢宏芳, 王海东, 等. 芜湖市土壤和地表灰尘中 As 含量分布及健康风险评估 [J]. *环境化学*, 2010, **29**(5): 880-883.
- [55] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(7): 1181-1188.
- [56] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(1): 204-212.
- [57] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1584-1589.
- [58] 马建华, 朱玉涛. 嵩山景区旅游活动对土壤组成和性质的影响 [J]. *土壤学报*, 2009, **46**(1): 164-168.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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