

· 调查与评价 ·

桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中重金属污染物健康风险评估

莫招育^{1,2}, 杜娟³, 刘慧琳^{1,2}, 陈志明^{1,2}, 梁桂云¹, 黄炯丽¹, 李宏姣¹, 林华^{1*}, 朱开显¹

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 广西 南宁 530022; 2. 广西西江流域生态环境与一体化发展协同创新中心, 广西 南宁 530022; 3. 桂林市环境监测站, 广西 桂林 541002)

摘要: 通过监测桂林市 2014 年冬季大气 PM_{2.5} 中 11 种元素的质量浓度, 运用富集因子解析其来源, 并开展重金属潜在生态风险、人体暴露和健康风险评估。结果表明: Cd 富集因子 > 10, 表明 Cd 的来源主要是人为源; 其他元素富集因子均 < 10, 主要来源为自然源。生态危害程度 Cd 和 Hg 为极强, Pb 为强, As 为较强, 其他元素均为轻微。总的潜在生态风险指数 (RI) 为 19 385.3, 远高于 600, 生态风险为极强。各元素经呼吸摄入的非致癌风险由高到低为 As > Cd > Cr > Pb > Hg, 致癌风险由高到低为 Cr > As > Cd > Pb; 儿童和成人的总致癌风险分别为 $1.68 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.84 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 风险甚微。

关键词: PM_{2.5}; 重金属; 富集因子; 健康风险评估; 桂林

中图分类号: X513; X820.4

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2019)04-0023-05

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM_{2.5} during Winter in Guilin

MO Zhao-yu^{1,2}, DU Juan³, LIU Hui-lin^{1,2}, CHEN Zhi-ming^{1,2}, LIANG Gui-yun¹, HUANG Jiong-li¹,
LI Hong-jiao¹, LIN Hua^{1*}, ZHU Kai-xian¹

(1. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning, Guangxi 530022, China;

2. The Collaborative Innovation Center of the Ecological Environment & Integration Development in the Xijiang River Basin, Nanning, Guangxi 530022, China;

3. Guilin Environmental Monitoring Station, Guilin, Guangxi 541002, China)

Abstract: According to the mass concentrations of 11 elementals in PM_{2.5} in Guilin during the winter of 2014, the potential ecological risk, human exposure and health risk of heavy metals were evaluated and the source was analyzed by enrichment factor. The results showed that the enrichment factor of Cd in fine particles was greater than 10, indicating that Cd was from human activities. The enrichment factors of other elements were all less than 10, indicating that they all came from nature. Cd and Hg had extremely strong potential ecological hazard, Pb had strong hazard, As had relatively strong hazard, other elements had slight hazard. The total potential ecological risk index (RI) was 19 385.3, which was much larger than 600, indicating high ecological risks existence. The non-carcinogenic risk level of each element in inhalable particles from high to low was As > Cd > Cr > Pb > Hg, while the carcinogenic risk level from high to low was Cr > As > Cd > Pb. The total carcinogenic risk for children and adult were $1.68 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ and $3.84 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, respectively, both were negligible to health risks.

Key words: PM_{2.5}; Heavy metals; Enrichment factor; Health risk assessment; Guilin

大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 对大气能见度和人体健康有重要的影响^[1-3], 《2010 年全球疾病负担评

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2019-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21777026); 广西科技基金资助项目 (桂科 AB16380292); 广西自然科学基金资助项目 (2015GXNSFB139203); 广西大气污染源解析及预警预报工程技术研究中心基金资助项目

作者简介: 莫招育 (1980—), 男, 广西南宁人, 高级工程师, 在读博士研究生, 主要从事大气环境及环境与健康等方面科研工作。

* 通信作者: 林华 E-mail: 36053156@qq.com

估》指出^[4], 大气PM_{2.5}污染每年造成全世界320万人过早死亡, 以及7600万健康生命年的损失, 在全球健康风险因子中排名第七。桂林市地处广西东北部, 近年来面临较重的大气PM_{2.5}污染问题。2013—2017年该市大气PM_{2.5}年均质量浓度分别为66 μg/m³、66 μg/m³、51 μg/m³、49 μg/m³和44 μg/m³, 均超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的二级标准限值(35 μg/m³), 引起学者的关注。相继有研究者对桂林市的空气质量特征和霾天气特征、大气总悬浮颗粒物(TSP)和可吸入颗粒物(PM₁₀)污染特征, 以及大气气溶胶离子组成等进行了初步研究^[5-8], 气溶胶化学成分或离子研究仅限于TSP和PM₁₀^[6-7], 对于组分研究仅限于应用单颗粒气溶胶质谱仪分析气溶胶数浓度^[8], 对于大气PM_{2.5}中重金属元素组分及其健康风险研究鲜有报道。由于大气PM_{2.5}中一般包含大量有害元素, 特别是有毒重金属元素对人体危害较大^[9-11], 且具有跨区域传输的特点。在冬季雾霾污染严重、灰霾频发等情况下, 作为世界有名的旅游城市, 大气PM_{2.5}中重金属健康风险的大小将决定当地人群和外来游客身体健康受影响的程度。现于2014年冬季在桂林市环境监测站点采集大气PM_{2.5}样品, 分析其中11种元素的浓度水平、变化规律, 开展重金属的潜在生态危害和健康风险评估, 为该市环境空气污染防治提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 大气PM_{2.5}样品的采集

此次采样点为桂林市环境监测站。该点位为国控监测点位, 代表桂林市交通、工业、居住、商业综合区, 位于桂林市中山南路(E110.29°, N25.27°), 距离地面25 m, 南面、北面均为商业、居民混合区, 西面125 m为桂林市汽车总站, 112 m为丹桂大酒店, 该酒店使用燃煤锅炉1台。

采样时间为2014年12月23日—2015年2月10日。每日采集1次样品, 每次采集20 h, 同步采集2张滤膜。采样仪器为武汉天虹仪表有限公司生产的TH-150D型中流量大气颗粒物采样器(含PM_{2.5}切割器)和石英纤维滤膜。

气象资料来自桂林两江国际机场监测点的小时数据。据统计, 监测期间气温变化为4.0℃~17.0℃, 平均值为9.9℃; 相对湿度为32.0%~94.0%, 平均值为69.2%; 气压为1012.34 hPa~

1030.56 hPa, 平均值为1024.20 hPa; 风速为0.56 m/s~3.33 m/s, 平均值为1.61 m/s, 以北或东北风为主导风向, 该主导风向的天数占比高达74.0%。监测期间, 降水天数达23 d, 累计降水量为46.3 mm; 能见度为0.8 km~11.6 km, 平均值为5.14 km, 仅2 d能见度>10 km。根据《霾的观测和预报等级》(QX/T 113—2010)标准, 排除降水天气影响, 52.0%的天数(26 d)可以判识为灰霾。

1.2 样品处理和测量

滤膜采样前预处置: 用铝箔纸将石英纤维滤膜包裹, 在马弗炉中480℃烘烤4 h, 以消除挥发性物质成分的影响, 恒温恒湿后称量用于后续采样。

室内分析和质控: 采用酸微波消解法浸提重金属, 原子荧光光度计(吉天AFS-830型)测定Hg含量, 电感耦合等离子体质谱仪(赛默飞ICP-MS型)测定Ti、Pb、As、Cr、Cd、V、Mn、Ni、Cu、Zn含量。质控包括标样测量、样品加标回收和平行样分析, 其中加标回收率要求90%~110%, RSD<15%。

1.3 重金属元素富集因子评价法

重金属元素富集因子评价法(EF)用于分析大气PM_{2.5}中金属元素的富集程度, 以判断其来源为自然源或人为源^[12]。公式如下:

$$EF_i = (C_i/C_n)_{\text{环境}} / (B_i/B_n)_{\text{背景}} \quad (1)$$

式中: EF_i为大气PM_{2.5}中元素*i*的富集因子, 无量纲; C_i、C_n分别为元素*i*和参比元素*n*在大气PM_{2.5}中的质量浓度, mg/m³; B_i、B_n分别为元素*i*和参比元素*n*在桂林市的土壤背景值, mg/kg。

评价中, 若EF_i<10, 则表示元素*i*相对于地壳中成分没有富集, 判断其主要来源为自然源; 若EF_i≥10, 则表示元素*i*相对于地壳成分富集明显, 判断其受人为源影响。

1.4 重金属元素潜在生态危害指数法

重金属潜在生态危害风险分析以该元素自然丰度为基准, 其潜在生态危害指数(RI)与该金属的污染程度正相关, 多种金属污染的生态危害具有累积加和性。公式如下:

$$C_f^i = C_i/B_i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i \quad (4)$$

式中: C_fⁱ为大气PM_{2.5}中元素*i*的污染系数, 无量纲; C_i为样品中元素*i*的实测值, mg/kg; B_i为元素*i*在桂林土壤中的背景值, mg/kg; E_rⁱ为元素*i*的

潜在生态风险系数,无量纲; T_r^i 为元素 i 的毒性系数,体现该元素的毒性水平及生物对其污染的敏感性;RI 为重金属的潜在生态风险指数,无量纲。根据评价需要可采用单因子危害评价和总的潜在生态风险评价两种方法来判断,单因子评价和总的潜在生态风险评价的等级划分见表 1^[13]。

表 1 潜在生态风险评价指标分级

Table 1 Classification of potential ecological risk evaluation

E_r^i	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
< 40	轻微	< 150	轻微
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	较强	300 ~ 600	强
160 ~ 320	强	> 600	极强
> 320	极强		

1.5 大气 PM_{2.5} 中重金属的健康风险评价

1.5.1 暴露模型和暴露参数选取

采用暴露指标评估人群健康的风险。大气 PM_{2.5} 污染暴露从污染物浓度、持续时间、作用频率 3 个方面来评估人体经呼吸途径与环境空气污染物之间的联系。文中部分参数选自《中国人群暴露参数手册》(成人卷)^[14] 和参考文献[15-17],其他参数来自实地调查。实地调查的参数采取问卷调查和抽样调查方式获取,抽样对象为儿童 1~8 岁、成人 18~65 岁,测量指标为儿童体重,问卷调查内容包括年龄、身高、本地居住年限、一年中外出学习或居住天数等。

根据美国国家环保署(USEPA)综合风险信息数据库(IRIS)和国际癌症研究机构(IARC)的研究成果,元素 As、Cd 和 Cr 为明确的化学致癌物,Pb 为可能的化学致癌物,Hg 为化学非致癌物。其中 As、Pb、Cd 和 Cr 具有致癌性,As、Pb、Cd、Cr 和 Hg 具有非致癌性。大气 PM_{2.5} 主要暴露途径为呼吸摄入,健康风险评价模型适用于包括非致癌物引起的非致癌风险和致癌物引起的致癌风险。今参考 USEPA 提出的风险模型来评价人体(儿童、成年人)受桂林市大气 PM_{2.5} 中 As、Pb、Cd、Cr、Hg 等 5 种元素的健康风险。非致癌风险中暴露剂量(ADD_{inh})的计算见下式^[15-16]。

$$ADD_{inh} = (C_i \times InhR \times ED \times EF) / (BW \times AT) \quad (5)$$

式中: C_i 为 PM_{2.5} 中元素质量浓度,mg/m³;BW

为人体平均体重,抽样调查所得,成人为 56.1 kg,儿童为 15.0 kg;EF 为暴露频率,问卷调查所得,成人与儿童均为 180 d/a;ED 为暴露年限,问卷调查所得,成人为 24 a,儿童为 6 a;AT 为平均作用时间,成人和儿童非致癌效应平均作用时间分别为 8 760 d 和 2 190 d,成人和儿童致癌效应平均作用时间均为 26 280 d^[14,17];InhR 为日均空气呼吸量,成人和儿童分别为 16.0 m³/d^[12] 和 7.5 m³/d^[14,17]。

1.5.2 风险表征

各重金属经呼吸途径非致癌风险和致癌风险分别按照公式(6)(7)计算^[18]。

$$HQ = ADD/RfD \times 10^{-6}/72 \quad (6)$$

$$Risk = ADD \times SF/72 \quad (7)$$

式中:HQ 为非致癌风险,a⁻¹;ADD 为某暴露途径重金属的日均摄入量,mg/(kg·d);RfD 为参考剂量,mg/(kg·d),As、Pb、Cd、Cr 和 Hg 经呼吸吸入的参考剂量分别为 3.83 × 10⁻⁶ mg/(kg·d)、3.52 × 10⁻³ mg/(kg·d)、2.55 × 10⁻⁶ mg/(kg·d)、2.55 × 10⁻⁵ mg/(kg·d) 和 7.66 × 10⁻⁵ mg/(kg·d);72 为人类平均寿命,a;Risk 为致癌风险,a⁻¹;SF 为致癌斜率因子,(kg·d)/mg,As、Pb、Cd 和 Cr 致癌斜率因子分别为 16.8 (kg·d)/mg、0.042 (kg·d)/mg、7.05 (kg·d)/mg 和 329 (kg·d)/mg^[18]。

对于多种重金属暴露途径的情况,总非致癌风险(HI)和总致癌风险(Risk_{total})计算分别见公式(8)(9)^[19-20]:

$$HI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n HQ_{ij} \quad (8)$$

$$Risk_{total} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Risk_{ij} \quad (9)$$

式中:HI 为总非致癌风险,a⁻¹;Risk_{total} 为总致癌风险,a⁻¹;HQ_{ij} 为第 i 种重金属第 j 种暴露途径的非致癌风险,a⁻¹;Risk_{ij} 为第 i 种重金属第 j 种暴露途径的致癌风险; m 、 n 分别为重金属种类和暴露途径的数量。

USEPA 建议,有毒有害物质的健康风险水平^[18]: < 1.0 × 10⁻⁶ a⁻¹ 表示风险甚微;1.0 × 10⁻⁶ a⁻¹ ~ 1.0 × 10⁻⁴ a⁻¹ 表示存在一定的风险,尚可接受;> 1.0 × 10⁻⁴ a⁻¹ 表示风险较为显著。

2 结果与讨论

2.1 大气 PM_{2.5} 中重金属污染水平

桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中 11 种元素质量浓度

及其与广州、南京的比较结果见表 2。

由表 2 可知,与广州相比,桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中除 As、Cd、Pb、Mn、Hg 等元素质量浓度较高

外,其余均较低;与南京相比,桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中除 As、Cd、Mn、Zn 等元素质量浓度略高外,其他均较低。

表 2 桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中元素质量浓度、富集因子、潜在生态危害系数及其与其他城市比较

Table 2 Comparison of the mass concentration, enrichment factor and potential ecological risk index of the elements in atmospheric PM_{2.5} during winter in Guilin with that in other cities

元素	桂林质量 浓度范围 $\rho/(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})$	桂林质量 浓度平均值 $\rho/(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})$	广州质量 浓度均值 ^[21] $\rho/(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})$	南京质量 浓度均值 ^[22] $\rho/(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})$	桂林土壤 背景值 ^[23] $w/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	富集因子	毒性系数	桂林 E_r^i	兰州 E_r^i ^[13]
Ti	0.6 ~ 10.5	4.2			3 800	0.001			
V	0.1 ~ 3.4	1.2		7.1	119.88	0.01			
Cr	— ~ 5.4	1.0	2.23	9.3	72.313	0.01	2	0.3	12.6
Ni	— ~ 2.5	0.8	2.84	7.4	18.86	0.04	5	2.4	198.1
Cu	1.3 ~ 23.0	8.9	23.7	88.2	22.07	0.40	5	23.2	260.4
As	0.9 ~ 35.4	11.2	9.52	11.1	14.00	0.80	10	92.0	
Cd	0.3 ~ 13.5	4.9	1.53	1.9	0.102 7	47.89	30	16 452.3	1 163.8
Pb	11 ~ 234	102	43.1	136.3	19.24	5.32	5	304.7	36.3
Zn	9 ~ 386	132	194	118.3	64.12	2.07	1	23.7	64.5
Mn	49 ~ 360	173	25.3	48.6	173.65	1.00	1	11.5	
Hg	— ~ 1.5	0.4	0.123		0.148 6	2.70	80	2 475.2	

2.2 大气 PM_{2.5} 中元素富集因子评价

以化学性质稳定的 Mn 为参比元素及桂林城区土壤重金属调查结果为背景值对 11 种元素作富集因子评价,结果见表 2。由表 2 可知,Cd 富集因子为 47.89, >10,表明 Cd 来源主要是人为源。经调查,桂林市冬季上风向湖南湘潭、桂林全州县等均有冶炼企业,Cd 是矿物最常见的伴生元素之一,Cd 富集与冶炼活动中重金属颗粒传输有关。其他元素富集因子均 <10,主要来源为自然源。

2.3 大气 PM_{2.5} 中元素潜在生态危害因子评价

由公式(2)(3)(4)分别计算大气 PM_{2.5} 中元素生态危害系数及潜在生态风险指数,结果见表 2。由表 2 可知,桂林市大气 PM_{2.5} 中元素生态危害程度由高到低为 Cd > Hg > Pb > As > Zn > Cu > Mn >

Ni > Cr。生态危害程度 Cd 和 Hg 为极强,Pb 为强,As 为较强,其他元素均为轻微。总的潜在生态风险指数(RI)为 19 385.3,远高于 600,生态风险为极强。从结果来看,Cd 元素可能受上风向区域冶炼活动颗粒物传输影响。与兰州市相比较,兰州和桂林大气 PM_{2.5} 的生态危害程度均为极强,除 Cu、Zn、Cr、Ni 较兰州较低外,Pb 和 Cd 均较兰州高。

2.4 大气 PM_{2.5} 中重金属健康风险评估

选择 Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 5 种元素,根据公式(5)(6)(8)计算桂林市儿童和成人经呼吸途径摄入大气 PM_{2.5} 中重金属的非致癌日均量及其非致癌风险,结果见表 3。由表 3 可知,儿童和成人非致癌日均摄入量由高到低为 Pb > As > Cd > Cr > Hg,儿童日均摄入量略大于成人。从风险估算结果来

表 3 桂林市大气 PM_{2.5} 中元素经呼吸途径的非致癌日均摄入量及非致癌风险和致癌日均摄入量及致癌风险

Table 3 Non-carcinogenic average daily intake and non-carcinogenic risk, carcinogenic average daily intake and carcinogenic risk of the elements in atmospheric PM_{2.5} in Guilin

元素	ADD _{inh} /[mg · (kg · d) ⁻¹]		HQ/a ⁻¹		ADD _{inh} /[mg · (kg · d) ⁻¹]		Risk/a ⁻¹	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
Pb	2.52 × 10 ⁻⁵	1.44 × 10 ⁻⁵	1.02 × 10 ⁻¹⁰	5.83 × 10 ⁻¹¹	2.16 × 10 ⁻⁶	4.93 × 10 ⁻⁶	1.29 × 10 ⁻⁹	2.96 × 10 ⁻⁹
Cd	1.21 × 10 ⁻⁶	6.90 × 10 ⁻⁷	6.77 × 10 ⁻⁹	3.87 × 10 ⁻⁹	1.04 × 10 ⁻⁷	2.37 × 10 ⁻⁷	1.04 × 10 ⁻⁸	2.38 × 10 ⁻⁸
Cr	2.46 × 10 ⁻⁷	1.41 × 10 ⁻⁷	1.38 × 10 ⁻¹⁰	7.89 × 10 ⁻¹¹	2.11 × 10 ⁻⁸	4.83 × 10 ⁻⁸	9.93 × 10 ⁻⁸	2.27 × 10 ⁻⁷
Hg	9.86 × 10 ⁻⁸	5.64 × 10 ⁻⁸	1.84 × 10 ⁻¹¹	1.05 × 10 ⁻¹¹				
As	2.76 × 10 ⁻⁶	1.58 × 10 ⁻⁶	1.03 × 10 ⁻⁸	5.89 × 10 ⁻⁹	2.37 × 10 ⁻⁷	5.41 × 10 ⁻⁷	5.68 × 10 ⁻⁸	1.30 × 10 ⁻⁷
∑	2.95 × 10 ⁻⁵	1.68 × 10 ⁻⁵	1.73 × 10 ⁻⁸	9.91 × 10 ⁻⁹	2.52 × 10 ⁻⁶	5.76 × 10 ⁻⁶	1.68 × 10 ⁻⁷	3.84 × 10 ⁻⁷

看,各元素的非致癌风险水平由高到低为 As > Cd > Cr > Pb > Hg, 儿童风险大于成人。由这 5 种元素产生的儿童和成人总非致癌风险分别为 $1.73 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ 和 $9.91 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, 总非致癌风险甚微。

选择 Pb、Cd、Cr 和 As 4 种元素,根据公式(5)(7)(9)计算桂林市儿童和成人经呼吸途径摄入大气 PM_{2.5} 中重金属的致癌日均量及其致癌风险,结果见表 3。由表 3 可知,儿童和成人日均摄入量由高到低为 Pb > As > Cd > Cr, 儿童日均摄入量小于成人。从致癌风险评估来看,各元素的致癌风险水平由高到低为 Cr > As > Cd > Pb。总的致癌风险中儿童和成人的致癌风险分别为 $1.68 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.84 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 风险甚微。

3 结论

(1) 桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中 11 种元素的质量浓度与广州相比,除 As、Cd、Pb、Mn、Hg 等元素质量浓度较高外,其余均较低;与南京相比,除 As、Cd、Mn、Zn 等元素质量浓度略高外,其他均较低。

(2) 富集因子结果显示,桂林市大气 PM_{2.5} 中 Cd 与人类的活动或区域传输有关。Cd 和 Hg 生态危害程度极强。经呼吸途径的非致癌风险由高到低为 As > Cd > Cr > Pb > Hg, 致癌风险由高到低为 Cr > As > Cd > Pb, 健康风险程度均为甚微。

(3) 文中在健康风险评估中还存在一定的不确定性,如仅选取了 1 个较有代表性的采样点难以全面反映桂林市大气 PM_{2.5} 中重金属的浓度水平,从而影响其健康风险值。除 PM_{2.5} 外,大气中 TSP 和粗颗粒 PM_{2.5-10} 与人群健康效应的流行病学联系也较为密切。文中仅探讨了 PM_{2.5} 中重金属的健康风险,缺乏其他粒径颗粒物中重金属健康风险评估,实际颗粒物健康风险可能更高。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 黄鹏鸣,王榕慧,王荟,等. 南京市空气中颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 334-337.
- [3] 浦一芬,吴瑞霞. 2004 年北京秋季大气颗粒物的化学组分和来源特征[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 739-744.
- [4] 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]. Lancet, 2012, 380(9859): 2224-2260.
- [5] 白先达,谭宇,王存真,等. 桂林霾天气变化趋势及天气特征[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 905-910.
- [6] 唐佳琪,廖雷,覃爱苗,等. 桂林市区大气颗粒物污染特征研究[J]. 环境工程, 2015, 33(9): 88-91, 104.
- [7] 刘超,廖雷,罗恢泓,等. 桂林市区大气气溶胶离子组成分布及酸化缓冲能力[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(3): 10-13.
- [8] 张志朋,杜娟,宋韶华,等. 夏季桂林市大气 PM_{2.5} 化学组成和成分分布的质谱研究[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(6): 22-26.
- [9] 林俊,刘卫,李燕,等. 上海市郊区大气细颗粒和超细颗粒物中元素粒径分布研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 982-987.
- [10] DOCKERY D W, SCHWARTZ J, SPENGLER J D. Air pollution and daily mortality: associations with particulates and acid aerosols[J]. Environmental Research, 1992, 59(2): 362-373.
- [11] 邹卉,张斌,万正茂,等. 苏州工业园区大气 PM_{2.5} 中主要重金属污染特征及其健康风险评估[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(4): 37-41.
- [12] 牟玲,彭林,任照芳,等. 滁州市大气 PM₁₀ 中化学元素分布特征[J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 619-622.
- [13] 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.
- [14] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [15] USEPA. EPA/540/1-89/002 Risk assessment guidance for superfund. volume I: human health evaluation manual (Part A) [S]. Washington D. C.: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [16] USEPA. EPA/600/P-95/002Fa Exposure factors handbook [S]. Washington D. C.: USEPA, 1997.
- [17] 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.
- [18] 曲亚斌,林立丰,张建鹏,等. 广东省十城市饮用水中部分元素健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(5): 434-437.
- [19] 李如忠,潘成荣,陈婧,等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2261-2270.
- [20] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等. 广州市夏、冬季室内外 PM_{2.5} 中元素组分的特征与来源[J]. 分析科学学报, 2007, 23(4): 383-388.
- [21] 李敏,高燕红,郭凌川,等. 广州大气 PM_{2.5} 中重金属污染的健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(5): 421-424.
- [22] 王伟,孔少飞,刘海彪,等. 南京市春节前后大气 PM_{2.5} 中重金属来源及健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2186-2195.
- [23] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法 & 广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学出版社, 1992: 212-218.