

The Distribution of Arsenic Particle Size Distribution and Health Risk Assessment of High Arsenic Coal Combustion Fly Ash

Yan Gao^{1,2}, Zhengqiang Wang^{1,2*}, Jianxia Xu^{1,2}, Haixia Shu², Chunran Song², Hong Tan², Jinlin He²

¹Guizhou Testing Center for Food Safety in Circulation, Guiyang Guizhou

²Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang Guizhou

Email: *wangzhengqiang@gzata.cn

Received: Nov. 2nd, 2018; accepted: Nov. 19th, 2018; published: Nov. 26th, 2018

Abstract

Local arsenic poisoning has been caused by high arsenic coal burning in the southwest of Guizhou province. In recent years, the research on the mechanism and health risk of endemic arsenic poisoning has become a hot topic. In this paper, analysis of the particle size distribution of arsenic is simulated in fly ash then the carcinogenic risk is calculated. High arsenic coal burned in diffusion furnace at the temperature between 600°C and 1000°C, and the fly ash particle size was sample classified using Andersen sampler, which is divided into 8 classes (1.2~42.6 microns). The experimental results show that the content of arsenic increases with the decrease of particle size. Especially when coal fly ash particle size <10.7 μm, it showed more obvious change. The minimum value of arsenic content in the fly ash is of 2280 μg/g, and a maximum of 5812 μg/g. More than 60.27% of the total mass of fly ash showed particle size between 3.4~16.3 μm, and 61.3% of the total mass peak appears in the fifth class (5.4~107 μm), which accounts for 23.86%, is unimodal distribution. Health risk of fly ash was evaluated using the method of EPA, and daily exposure amount in two kinds of exposure path ways is calculated (inhalation and dermal exposure) ADD_{inh} = 2566.1 mg/(kg·d) and ADD_{drem} = 85.42 mg/(kg·d), which showed a serious risk of cancer. The study in this paper provides a basis for quantitative description of epidemiology of arsenic while the As exposure assessment to human health is rarely reported.

Keywords

High Arsenic Coal, Fly Ash, Arsenic, Particle Size Distribution, Health Risks

高砷燃煤燃烧飞灰中砷粒径分布及健康风险评价

高燕^{1,2}, 王正强^{1,2,*}, 胥建霞^{1,2}, 舒海霞², 宋春然², 谭红², 何锦林²

*通讯作者。

¹贵州省流通环节食品安全检验中心, 贵州 贵阳

²贵州省分析测试研究院, 贵州 贵阳

Email: wangzhengqiang@gzata.cn

收稿日期: 2018年11月2日; 录用日期: 2018年11月19日; 发布日期: 2018年11月26日

摘要

贵州省黔西南地区因使用高砷燃煤带来地方性砷中毒。近年来, 对于地方性砷中毒的机制及健康风险研究已成为关注的热点。本文模拟高砷燃煤燃烧时产生的飞灰中砷的粒径分布及对人体致癌的风险。将高砷燃煤在扩散炉中进行燃烧, 燃烧温度为600℃~1000℃, 生成的飞灰粒径采用Andersen分级采样器进行采样, 共分为8级(1.2~42.6 μm)。实验表明: 飞灰中砷的含量随粒径的减小而增大。尤其是当燃煤飞灰粒径<10.7 μm时, 这种变化更为明显。飞灰中砷含量最小值为2280 μg/g, 最大值达到5812 μg/g。粒径在3.4~16.3 μm之间的飞灰质量占总飞灰质量的60.27%, 其中砷的质量占飞灰中砷的总质量的61.3%, 峰值出现在第五级(5.4~10.7 μm), 为23.86%左右, 呈单峰态分布。对飞灰中As的含量应用USEPA的方法, 开展健康风险评价, 结果表明, As通过皮肤接触和吸入这两种暴露途径进入人体的日均暴露量分别为ADD_{inh} = 2566.1 mg/(kg·d)和ADD_{drem} = 85.42 mg/(kg·d), 存在严重致癌的风险。高砷燃煤飞灰中的As暴露于人体的健康风险评价鲜有报道, 故本文的研究为定量描述流行病学提供依据。

关键词

高砷燃煤, 飞灰, 砷, 粒径分布, 健康风险

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

贵州中西部地区的兴义、安龙、兴仁等县分布着一定数量的高砷燃煤[1] [2]。丁振华等人[3]研究指出, 贵州省黔西南燃煤中砷含量不仅高于中国和世界的平均水平而且远高于世界上已报导过的所有高砷燃煤, 按我国氟砷专业委员会推荐标准, 一般煤的砷小于 100 mg/g, 当砷含量大于 100 mg/g 时为高砷煤。被采燃用可使暴露人群砷中毒。文献[1] [2] [3] [4] [5]报道, 因为误采含砷量大于 100 mg/g 的煤, 砷中毒大面积爆发在 200 万人口居住的区域, 包括贵州省的兴仁县、兴义市、织金县、开阳县等, 给使用高砷燃煤的地区带来社会灾害。

地方性砷中毒是一种生物地球化学性疾病, 我国卫生部于 1992 年将此病作为重点防治的地方病[6]。我国特别是贵州黔西南地区, 是世界上砷中毒病区最严重的地区之一, 经研究证实, 砷是一种无阈值的促癌物质[7], 根据周运书等人的调查研究发现[8], 贵州省黔西南州于 1976 年发现较多“癞子病”, 主要症状为皮肤过度角化、色素异常沉着, 伴随消化道症状、肢端麻木、视物不清、肝区痛、肝大等。经调查发现其人群的尿、头发、烘烤玉米及家用燃煤等含砷量极高。其致病原因是直接使用当地地表浅层砷含量大于 100 mg/g 的高砷燃煤用于烘烤玉米、辣椒等食物, 以及直接采暖用(如图 1)有关。当停用高砷煤后, 病情显著下降。



Figure 1. Heat and bake with open range
图 1. 用敞开式炉灶取暖及烘烤食物

当高砷煤燃烧时，由于飞灰中大量亚微米级颗粒物会有大量微孔，比表面积相对高于大颗粒，受开尔文装置和容积效应影响程度较大。在使用燃烧过程中，大颗粒的碳燃烧时，发生表面积爆裂产生大量小颗粒[9]。燃煤中的 As 有三种进入人体的方式，分别为手 - 口摄入、皮肤接触和吸入，亚微米级颗粒物容易通过燃烧食物和呼吸进入人体[10]。这些暴露途径进入，带来健康风险。因此飞灰中亚微米级颗粒危害性较大，本文模拟高砷燃煤在燃烧时飞灰颗粒粒径分布及健康风险评估，为燃煤型砷中毒的流行病学提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 仪器与试剂

扩散炉(自制带石英管可控温扩散炉); AFS-230E, 双光道原子荧光光度计(北京海光仪器公司); DZKW 型电子恒温水浴锅(北京永光明医疗仪器厂); Andersen 分级采样器(United States Environmental Protection Agency); 磁力搅拌器(上海司乐仪器有限公司 B11-1 恒温磁力搅拌器); 流量计(天津流量仪表有限公司); 抽气泵(KBV408); 煤的标准物质(GBW08401, 中国科学院环境化学研究所); 砷标准溶液, (国家标准物质研究中心); 硫脲; 抗坏血酸; 硝酸; 硼氢化钾溶液等。以上试剂均为优级纯, 购于上海试剂有限公司。实验用水为去离子水。

2.2. 实验用煤

高砷煤样品采自贵州黔西南州兴仁县交乐乡, 为叠统龙潭组煤。把采集后的煤块压碎, 并除去石砾等杂物, 均匀铺开, 自然风干。将风干煤样放在清洁塑料板上, 用木棍碾压, 使样品全部通过 100 目尼龙网筛, 充分混合均匀供分析测试用。其理化性质见表 1。

Table 1. The experiment USES coal industry and element analysis w%
表 1. 实验用煤的工业、元素分析 w%

工业分析	元素分析
水分 5.000	灰分 16.870
固定碳 34.087	碳 67.274
挥发分 49.043	氢 4.478
灰分 16.870	氮 1.239
	氯 0.030
	硫 4.185
	氧 5.924

2.3. 燃煤实验方法

飞灰样品采集

模拟燃烧试验在带石英管的扩散炉中进行，恒温区为 600 mm，可自动控制。装置如图 2：将实验用煤样放入进样瓶(2)中，开动抽气泵(9)，空气经过干燥塔(1)后，进入有磁力搅拌器的进样瓶(2)将煤样吸进入带石英管的扩散炉中，在扩散炉中模拟高砷燃煤的自然燃烧。经过 8 级 Andersen 分级采样器，采集燃煤飞灰，大颗粒沉积在石英管中。抽气泵的抽气流速通过流量计(8)调节控制，流速选择根据 Andersen 分级采样器的使用说明书中流量控制图的要求进行选择。本试验采用管路流量为 0.048 L/s。采集到的各级飞灰样品数量充足，以保证飞灰中 As 的分析。上述试验重复五次，飞灰的重量和砷含量取平均值。采集到的飞灰样品如图 3、图 4。Andersen 分级采样器的级数及飞灰尺寸的对照表如表 2。

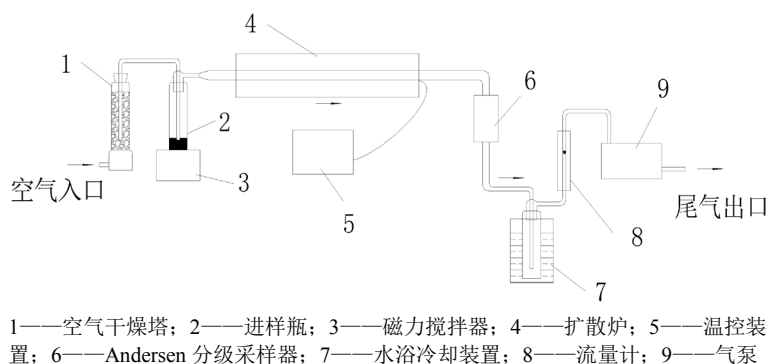


Figure 2. Combustion and sampling procedures

图 2. 燃烧与采样流程图

Table 2. The comparison table of the series and fly ash size of the Andersen graded sampler

表 2. Andersen 分级采样器的级数及飞灰尺寸的对照表

级数	1	2	3	4	5	6	7	F
粒径(μm)	>35.1	35.1~24.1	24.1~16.3	16.3~10.7	10.7~5.4	5.4~3.4	3.4~2.5	<2.5

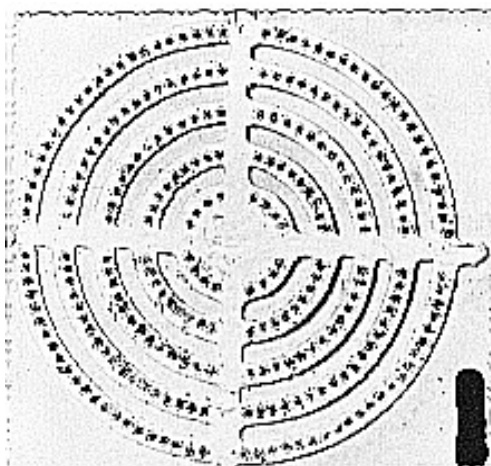


Figure 3. Samples of the fly ash classification after sampling

图 3. 采样后飞灰的各级样品图

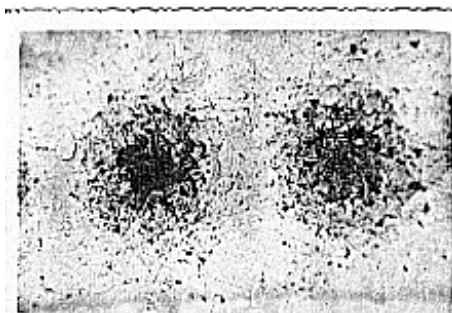


Figure 4. The topography of the fly ash after sampling

图 4. 采样后飞灰的形貌图

2.4. 煤及飞灰中砷含量的测定

称取一定量的煤样品用硝酸进行微波密封消化, 用去离子水定容至 50 mL 容量瓶中, 取上清液用原子荧光光度仪测定砷含量。同时作全程试剂空白。用煤标准物质(GBW08401)进行分析质量控制。

飞灰样品消化

将预先称重放入 Andersen 采样器的各级滤纸及其上收集的燃煤飞灰于电子天平称重后, (两次重量之差为各级飞灰质量), 至于 50 ml 比色管中, 加入 5 ml 优级纯浓硝酸, 加盖后在沸腾的水浴中加热 1.5 小时(加热期间振荡几次), 取出冷却后, 取出滤纸, 在比色管上置一小漏斗, 将滤纸放在小漏斗中用 45 ml 去离子水冲洗, 再将比色管中溶液定容至 50 ml, 摇匀, 静止沉淀, 上清液用原子荧光光度仪测定砷含量。同时作全程试剂空白 2 个。平行测定燃煤飞灰成分分析标准物质(GBW08401, 中国科学院环境化学研究所, 砷含量为 $11.4 \pm 0.6 \mu\text{g/g}$), 每次取样 0.5 g, 进行分析质量控制。

2.5. 高砷燃煤中 As 健康风险评价模型

高砷燃煤飞灰中 As 暴露模型

砷中毒是通过如下方式进入人体, 分别为手-口摄入、皮肤接触和吸入, 这些暴露途径进入人体, 带来燃煤型砷中毒的风险。本研究通过皮肤接触和吸入两种暴露途径致癌(成人)的日均暴露量计算公式 [11][12][13][14]。如下:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{c * \text{InhR} * \text{EF} * \text{ED}}{\text{PEF} * \text{BW} * \text{AT}} \quad (1)$$

$$\text{ADD}_{\text{drem}} = \frac{c * \text{SA} * \text{CF} * \text{SL} * \text{ABS} * \text{EF} * \text{ED}}{\text{BW} * \text{AT}} \quad (2)$$

式中, ADD_{inh} 、 ADD_{drem} 分别为摄入、吸入和皮肤接触途径的重金属日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; c 为飞灰中 As 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; InhR 为呼吸频率, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; CF 为转换系数, $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$; EF 为暴露频率, a ; ED 为暴露年限, a ; BW 为平均体重, kg ; AT 为重金属平均暴露时间, d ; PEF 为灰尘排放因子, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; SA 为暴露皮肤表面积, cm^2 ; SL 为皮肤黏着度, $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; ABS 为皮肤吸收因子, 无量纲。

参照我国场地环境评价导则[12]-[17] (DB11/T 656-2009)以及国内外相关研究成果, 式(1)~(2)中的参数取值如下: CF 为 $1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$; EF 为 $90 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 以一年为计; BW 为 53.1 kg ; AT 为平均暴露时间, 根据贵州黔西南地区每年农闲时期及烤火取暖的时间以 12 h/d , 烤火时长为 3 个月 90 d 。 $\text{AT} = 90 \text{ d} \times 12 \text{ h/d} = 1080 \text{ h}$, $1080 \text{ h} / (24 \text{ h/d}) = 45 \text{ d}$; InhR 为 $15 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; PEF 为 $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; SA 为 4350 cm^2 ;

SL 为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; ABS 为 0.001。

3. 结果与讨论

3.1. 燃煤飞灰中砷含量

燃煤经过图 2 燃烧后的飞灰中砷的含量、各级飞灰的质量百分含量(各级飞灰的质量占每个试验中取到的飞灰总质量的百分含量)以及各级飞灰中砷的质量百分含量(各级飞灰上的砷的质量占每个试验中取到的飞灰中砷的总质量的百分含量)测定结果分别列于表 3、表 4 和表 5 中。为直观、方便分析测定结果, 绘制飞灰中砷的含量、飞灰的质量百分含量以及各级飞灰中砷的质量百分含量三个折线图(见图 5、图 6 和图 7 所示。)

Table 3. Arsenic content test results/ $\mu\text{g/g}$

表 3. 砷含量试验结果/ $\mu\text{g/g}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	1	2	3	4	5	6	7	F
600	2280	2499	2766	2711	3514	4012	4002	4014
700	2482	2501	2643	2936	3035	3480	3800	3965
800	2843	3007	2771	2758	3387	3694	4795	5022
900	2510	2629	2943	2793	3094	3385	4622	5386
1000	2750	2400	2691	2574	3399	4831	5489	5812
平均	2573	2607	2763	2754	3286	3880	4542	4840

注: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, F 为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 级。以下各表均同。

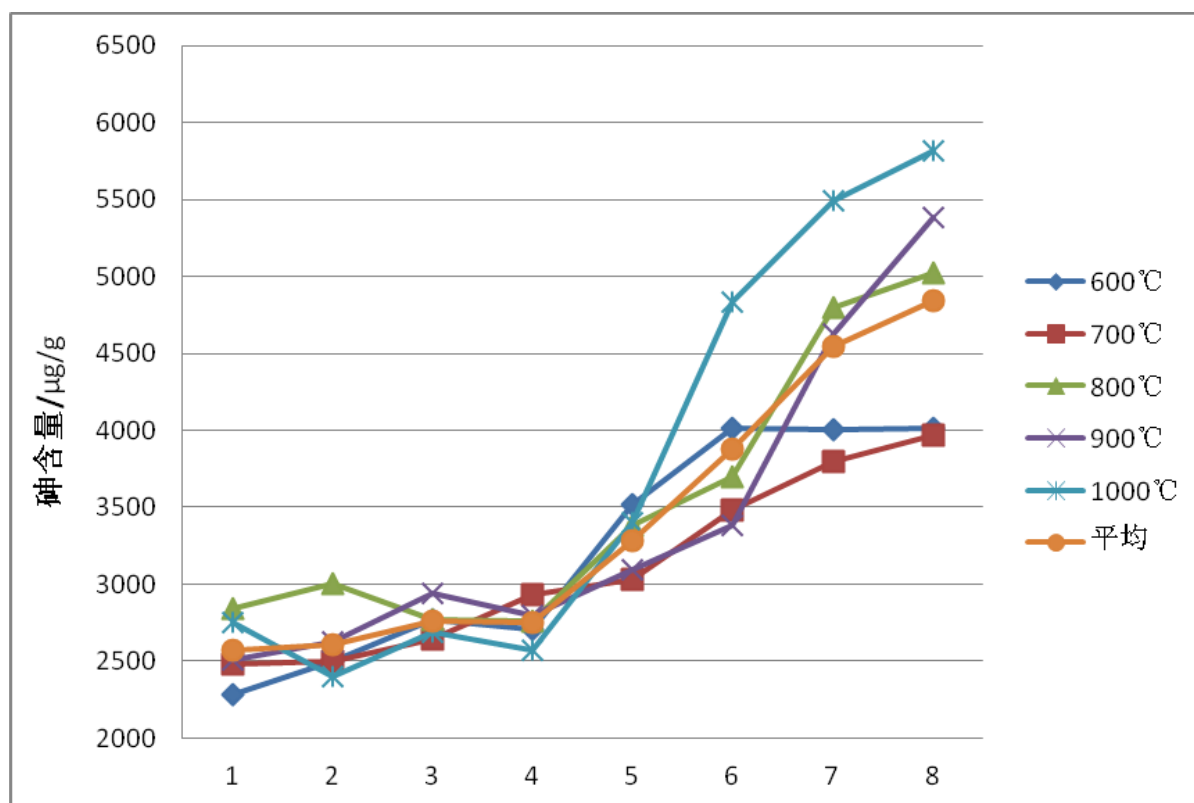


Figure 5. Arsenic content in fly ash at all levels of raw coal

图 5. 原煤各级飞灰中砷含量

Table 4. Test results of the percentage of fly ash mass test /%
表 4. 飞灰质量百分含量试验结果/%

温度/ °C	1	2	3	4	5	6	7	F
600	7.45	8.25	9.96	26.11	25.79	14.03	5.47	2.77
700	6.48	7.95	8.33	21.41	22.99	19.79	8.98	5.29
800	10.36	11.62	15.79	24.99	18.90	11.64	4.32	1.76
900	13.52	11.48	9.31	16.24	22.66	16.41	6.17	3.84
1000	7.99	9.37	10.29	22.87	24.28	13.27	6.88	4.05
平均	9.16	9.73	10.74	22.32	22.92	15.03	6.36	3.54

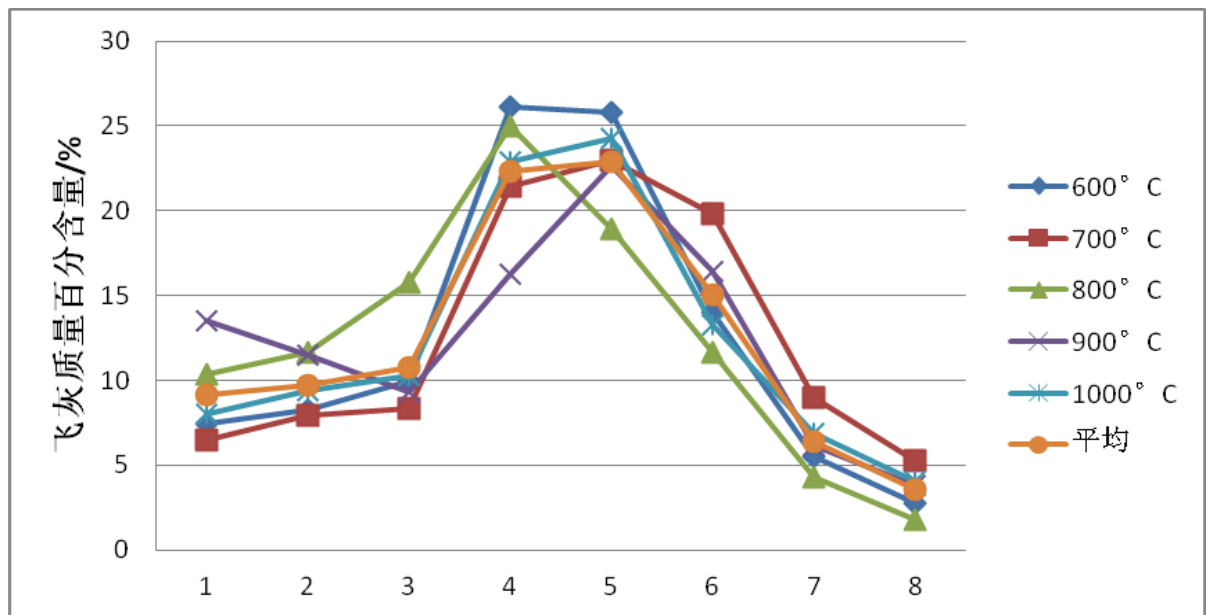


Figure 6. Percentage of fly ash mass at all levels of raw coal
图 6. 原煤各级飞灰质量百分含量

Table 5. Test results per cent of arsenic
表 5. 砷百分含量试验结果/%

温度/ °C	1	2	3	4	5	6	7	F
600	5.02	6.57	8.49	22.68	29.63	17.31	6.81	3.77
700	5.26	6.35	7.25	20.39	22.51	22.09	10.04	6.51
800	9.37	11.02	14.05	21.61	21.09	13.62	6.77	3.13
900	10.72	9.88	9.05	15.09	22.07	18.39	9.03	6.44
1000	6.58	6.82	8.59	17.34	23.99	18.97	10.77	6.92
平均	7.39	8.13	9.49	19.42	23.86	18.08	8.68	5.35

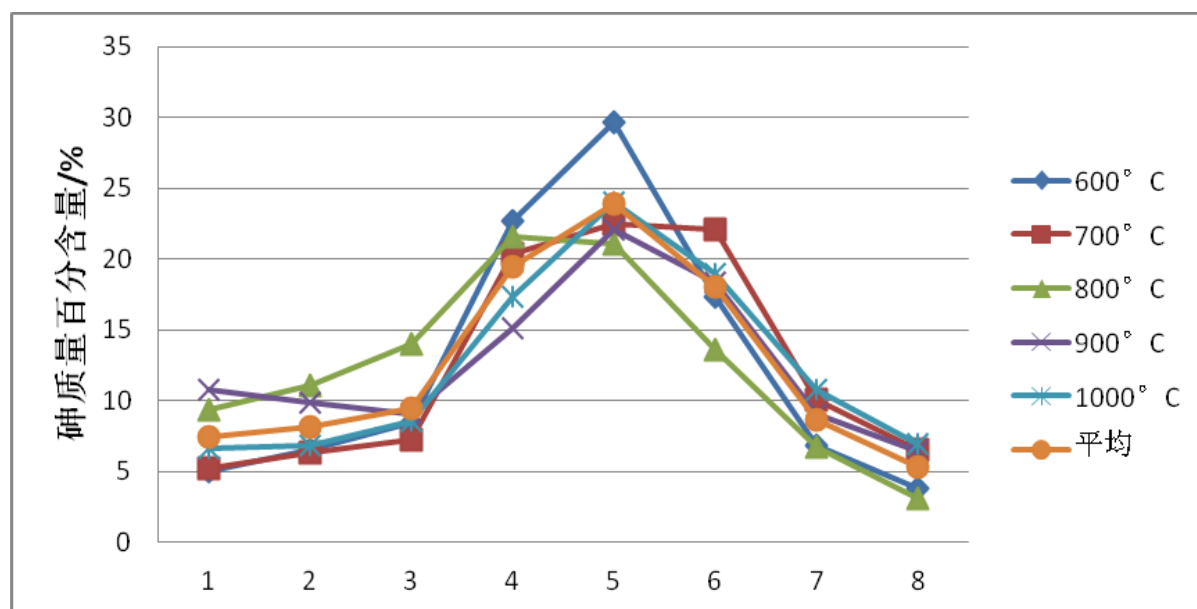


Figure 7. The content of arsenic in fly ash at all levels of raw coal

图 7. 原煤各级飞灰中砷的质量百分含量

1) 表 3 及图 5 可以看出: 粒径减小, 飞灰中砷的含量增大。当煤飞灰粒径 $\geq 10.7 \mu\text{m}$ (前 4 级) 时, 煤飞灰中砷的含量的变化不大(其中最小值为 600°C -1 的 $2280 \mu\text{g/g}$, 最大值为 700°C -2 的 $2936 \mu\text{g/g}$), 而当煤飞灰粒径 $< 10.7 \mu\text{m}$ (后 4 级) 时, 煤飞灰中砷的含量的变化则比较明显(其中最小值为 700°C -5 的 $3035 \mu\text{g/g}$, 最大值为 1000°C -F 的 $5812 \mu\text{g/g}$)。 600°C ~ 1000°C 范围内, 温度对 $\geq 3.4 \mu\text{m}$ 的飞灰(前 6 级)中砷的含量影响不明显, 但在 $< 3.4 \mu\text{m}$ 的飞灰中砷的含量随温度升高呈现明显上升趋势, 说明高温有利于砷向小颗粒富集, 这与陆晓华等研究煤灰中重金属含量后得出的结论[18]一致。

2) 从表 4 及图 6 可以看出: 粒径变化对各级上飞灰的质量影响比较明显。呈单峰分布, 峰值为 25.79%。 600°C ~ 1000°C 范围内, 温度的影响则不明显。不同温度条件下, 原煤燃烧产生的飞灰都主要集中在 3.4 ~ $16.3 \mu\text{m}$ 之间, 即第 4、5、6 级, 占总量的 60.27% 左右, 其它五级不到 40%。这三级的飞灰的百分含量平均值都 $> 15\%$, 而其它各级的百分含量平均值都 $< 12\%$ 。

3) 从表 5 及图 7 可以看出: 从各级飞灰中砷的质量来看, 砷主要富集在粒径为 3.4 ~ $16.3 \mu\text{m}$ 的微粒上, 即第 4、5、6 级, 占总量的 61.36% 左右, 其它五级不到 40%。这三级的飞灰中砷的质量百分含量平均值都 $> 17\%$, 而其它各级的百分含量平均值均 $< 10\%$ 。呈单峰分布, 峰值为 29.63%。

4) 直径在 $10 \mu\text{m}$ 以上的可见尘粒, 他们在静止的空气中可以很快地沉降下来。而直径小于 $1 \mu\text{m}$ 尘粒将长期地飘浮与空气之中而难以沉降于地面[19]。由前人分析结论——Meij (1992 年)等[20]分析认为砷在底灰中含量很少, 绝大部分砷分布于飞灰中($> 90\%$), 少量以气态分布于烟气中($< 5\%$), 所以, 燃用高砷煤后, 煤中绝大部分砷富集在飞灰上, 砷主要富集在粒径为 3.4 ~ $16.3 \mu\text{m}$ 的微粒上, 且 $> 10 \mu\text{m}$ 的微粒可以很快的沉降下来, 介于 1 到 $10 \mu\text{m}$ 之间的颗粒在排放到空气中之后, 也有可能与其它颗粒或物质发生碰撞、凝聚等作用, 粒径变大, 沉降速度增加。

3.2. 高砷燃煤中 As 暴露模型健康风险评价

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{c * \text{InhR} * \text{EF} * \text{ED}}{\text{PEF} * \text{BW} * \text{AT}} \quad (1)$$

$$\text{ADD}_{\text{drem}} = \frac{c * \text{SA} * \text{CF} * \text{SL} * \text{ABS} * \text{EF} * \text{ED}}{\text{BW} * \text{AT}} \quad (2)$$

一般而言, 粒径 10~30 μm 的颗粒绝大部分沉积在鼻腔, 5~10 μm 的颗粒可进入气管和支气管, 只有小于 5 μm 的颗粒才能进入到深部呼吸道和散布于肺泡上, 尤其小于 2.5 μm 的颗粒, 粒径小, 可进入人体的下呼吸道, 沉积在肺部, 甚至穿过肺泡进入血液对人体有严重的危害[21]。根据表 4 燃煤飞灰中砷含量试验的结果, 结合砷通过皮肤接触和吸入的日均暴露量计算公式, 选取第二级(粒径大于 35.1~24.1 μm)的平均值 2607 $\mu\text{g/g}$ 和第七级(粒径小于 3.4~2.5 μm)的平均值 4542 $\mu\text{g/g}$ 作为飞灰中重金属的含量来计算。高砷燃煤使用地区平均海拔 1100 m, 属高海拔低纬度, 高原亚热带湿润气候, 全年降雨量平均 1191 mm, 农作物主要是玉米、辣椒, 收割均在多雨少晴的贵州低温秋雨季节, 很难自然干燥, 多采用煤火烘烤方式干燥食品, 致使食品砷大量富集; 另外, 当地群众有用煤取暖习惯, 且每年取暖时间以 90 d 计[18]。

根据上面式(1)、式(2), 结合表 4 中砷含量试验结果的数据, 可以计算出砷通过皮肤接触和吸入两种暴露途径致癌重金属的日均暴露量。其中, PET 为排放因子, 由于黔西南地区, 使用高深燃煤直接取暖, 飞灰中的砷完全暴露排出, 故此值不参与计算。

计算结果得出, $\text{ADD}_{\text{inh}} = 2566.1 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; $\text{ADD}_{\text{drem}} = 85.42 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

魏羽佳等人经研究后得出结论[22]: 通过呼吸含有高浓度砷的空气以及食用经高砷煤烘烤的食物成为砷中毒的主要途径。

砷是一种毒性较强的物质, 砷的氧化物, 三氧化二砷(俗称砒霜)是人们公认的致癌物和致死物。中毒剂量为 10~50 mg, 敏感者 1.0 mg 即可中毒, 20 mg 可致死。在正常情况下, 成人每天摄入砷的总量为 100 μg 左右, 而每天排出的砷总量也大约 100 μg 。但当摄入量超出 100 μg 或高出几倍时, 对人体就会产生严重危害[23]。可见使用高深燃煤直接取暖, 通过吸入和皮肤接触砷的日均暴露量远远高于人体可承受的范围, 会带来严重的地方性砷中毒。

4. 小结

本文揭示了使用高砷燃煤取暖及烘烤食物会带来的砷中毒, 将大于粒径 30 μm 的飞灰中砷含量计算通过皮肤接触的日均暴露量, 将粒径小于 3.4~2.5 μm 的粒径中砷含量计算吸入的日均暴露量, 通过定量描述的方式揭示了污染的情况和程度。因此, 我们应该避免开采使用高砷煤; 改变燃煤方式, 降低高砷燃煤的砷污染。积极开展宣传教育, 改善燃煤使用方式, 不使用高砷燃煤直接采暖及烘烤食物, 最终预防控制燃煤污染引起的地方性砷中毒的流行。

基金项目

国家自然科学基金 (2166070108)。

参考文献

- [1] 安冬, 何光煜, 胡小强. 室内燃用高砷煤引起的地方性砷中毒[J]. 中国地方病学杂志, 1994, 13(4): 245-247.
- [2] 罗挺, 魏羽佳, 凌淑清, 等. 地方性砷中毒初步报告[J]. 贵州医药, 1993, 17(6): 371-372.
- [3] 郑宝山, 龙江平, 周代兴, 等. 贵州高砷煤所致地方性砷中毒[J]. 内蒙古地方病防治研究, 1994, 19(增刊): 41.
- [4] 周代兴, 等. 高砷煤污染引起慢性砷中毒的调查[J]. 中华预防医学杂志, 1993, 27(3): 147-150.
- [5] 周运书, 周代兴, 朱绍廉, 等. 一起燃煤所致人群慢性砷中毒的调查[J]. 中国公共卫生, 1994, 10(1): 41.
- [6] 丁振华, 等. 黔西南高砷煤中砷存在形式的初步研究[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 421-425.
- [7] 世界卫生组织(WTO). 砷的环境卫生标准(中文版) [S]. 北京: 人民卫生出版社, 1985: 118-141.

- [8] 周运书, 程明亮, 吴君, 等. 贵州与陕西省燃煤型砷中毒的比较分析[J]. 中国地方病学杂志, 2007(6), 679-681.
- [9] 陈军, 范寿波, 王锦成. 我国工业锅炉污染存在的问题及治理对策[J]. 中国环境管理, 2003, 22(2): 26-27.
- [10] 陈星, 马建华, 李新宁, 等. 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1068-1074.
- [11] US EPA (1989) Risk Assessment Guidance for Superfund, vol. I: Human Health Evaluation Manual. Office of Emergency and Remedial Response. <http://www.docin.com/p-549363036.html>
- [12] 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.
- [13] 谷蕾, 仝致琦, 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]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 241-247.
- [14] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 241-247.
- [15] Ferreira, B.L. and De Miguel, E. (2005) Geochemistry and Risk Assessment of Street Dust in Luanda, Angola: A Tropical Urban Environment. *Atmospheric Environment*, **39**, 4501-4512. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.026>
- [16] Lim, H.S., Lee, J.S., Chou, H.T., et al. (2008) Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment in the Vicinity of the Abandoned Songcheon Au-Ag Mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, **96**, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.04.008>
- [17] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的县城土壤重金属健康风险评价——以浙江省慈溪市为例[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 634-639.
- [18] 黄廷磊, 郑刚, 王乃宁. 气溶胶中微小颗粒状污染物检测技术[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(2): 38-40.
- [19] Malykh, N.V. and Pertsikov, I.Z. (1990) Study of the Partitioning of Trace Elements during Pulverized Coal Combustion. *Khimiya Tverdogo Tela*, **24**, 50.
- [20] Rizeq, R.G., Hansell, D.W. and Seeker, W.R. (1994) Predictions of Metal Emissions and Partitioning in Coal-Fired Combustion Systems. *Fuel Processing Technology*, **39**, 219-236. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(94\)90181-3](https://doi.org/10.1016/0378-3820(94)90181-3)
- [21] 王荟, 等. 南京市城区气溶胶粒度分布特征[J]. 江苏环境科技, 2002, 15(3): 4-5.
- [22] 魏羽佳, 等. 燃用高砷煤引起慢性砷中毒的调查[J]. 贵阳医学院学报, 1997, 22(1): 23-25.
- [23] 李文珍, 杨洪莉. 浅谈砷污染[J]. 环境保护科学, 1995, 23(3): 57, 67, 80.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: aep@hanspub.org