

贵州典型电厂粉煤灰的放射性安全评估

罗林¹, 钱志宽^{2,*}, 甘甜^{3,4}, 罗泰义³

(1. 西南能矿建设工程有限公司, 贵阳 550022; 2. 贵州民族大学 建工学院, 贵阳 550025;

3. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

4. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 怀柔 100049)

摘要: 贵州是华南最重要的煤电和粉煤灰生产省份, 粉煤灰的放射性安全评估是综合利用的基础。对贵州不同产煤区域典型电厂粉煤灰进行了放射性核素比活度测定并根据国标 GB6566-2001 进行了安全性评估。结果表明: 西部纳雍电厂粉煤灰内照射指数 I_{Ra} 和外照射指数 I_{γ} 均较低, 使用范围不受限制; 中部大方、金沙电厂和东部黔东电厂粉煤灰 I_{Ra} 较低而 I_{γ} 接近限值, 可以作为建筑主体材料(其中大方一级灰仅限于空心率大于 25% 的主体材料)和 A 类装修材料; 北部桐梓和二郎电厂粉煤灰 I_{Ra} 和 I_{γ} 均超出限值, 分别可作为 B 类和 C 类装修材料, 作为建筑主体材料应严格控制掺量比例。综合本次研究和前人数据, 确证了粉煤灰中 U、Th 含量和相关放射性核素比活度具有良好相关性, 推导了利用粉煤灰 U、Th 含量 ($C_U, C_{Th}, \times 10^{-6}$) 进行快速评估的经验公式: $I_{Ra} = 0.0616 \times C_U + 0.0049$; $I_{\gamma} = 0.0341 \times C_U + 0.0159 \times C_{Th} + 0.0517$ 。

关键词: 放射性评估; 经验公式; 粉煤灰; 贵州火力电厂

中图分类号: X837 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2019)05-0722-06 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.109

从 2000~2010 年, 伴随中国经济的快速增长, 中国年均煤炭消费量出现爆发式增长(2000 年为 13.57 亿 t, 2010 年 34.90 亿 t, 净增 157%), 2011~2015 年增速减缓, 稳定在 35~40 亿 t 左右; 2000 年-2015 年的统计表明, 约 45% 的中国煤炭消费量用于火力发电^[1]。电厂煤炭燃烧产物(Coal Combustion Products, CCPs), 也被称为 Coal Combustion Residues, CCRs 或 Coal Combustion Wastes, CCWs) 主要包括了粉煤灰(Fly Ash, CCPs 的 60%), 烟气脱硫产品(Fuel-Gas Desulfurization materials, CCPs 的 24%), 底灰(Bottom Ash, CCPs 的 12%) 和炉渣(Boiler Slag, CCPs 的 4%)^[2]。根据中国多家火力发电厂的统计, 中国煤炭的出灰率平均为 34%^[3], 估计 2010~2015 年年均产出 5~6 亿 t 粉煤灰, 与国家发改委公布的数据基本吻合(2011 年产出 5.4 亿 t, 2013 年 5.8 亿 t^[4-5])。目前我国的粉煤灰综合利用率稳定在 68%~69%, 主要用于水泥(41%~44%)、商业混凝土(16%~19%) 和墙体材料(砖)(26%~28%) 等建筑材料, 少量用于筑路、农业和高附加值利

用^[4-5]。煤中含有一定量的放射性元素(以铀为例, 中国煤中平均值为 2.43×10^{-6} , 但最高值可达 141.5×10^{-6} ^[6])。在模拟电厂生产的高温焚烧实验中, 煤中的铀绝大部分(87%~97%) 富集在粉煤灰中^[7]; 考虑到 34% 的出灰率, 预期粉煤灰中放射性元素相对原煤可富集 3 倍左右, 因此粉煤灰的放射性安全评估是其综合利用的基础。

我国东北、西北及华北聚煤区煤中铀的平均含量较低(分别为 1.62×10^{-6} 、 0.87×10^{-6} 和 3.90×10^{-6})^[8]。相应粉煤灰的综合利用不存在明显的放射性危害, 如对新疆^[9]、黑龙江^[10-11]、山西^[12-13] 及北京^[14] 等地粉煤灰的放射性评估结果。华南聚煤区铀的平均含量较高(23.23×10^{-6}), 贵州是华南最重要的煤炭产区, 大部分煤中铀的含量范围为 $1.92 \times 10^{-6} \sim 16.10 \times 10^{-6}$ ^[8]; 随着西电东送工程的发展, 贵州从 2008 年到 2016 年, 年均消费 $4 \times 10^7 \sim 6 \times 10^7$ t 煤用于火力发电^[15], 年均产生 $1.4 \times 10^7 \sim 2.0 \times 10^7$ t 粉煤灰(按 34% 出灰率估算)。张覃等(2001) 在贵州某火电厂粉煤灰中发现了明显 ^{226}Ra 异常(486

收稿日期: 2018-09-23; 改回日期: 2019-4-17

基金项目: 贵州省自然科学基金项目(黔科合 JZ 字[2015]2009 号、黔科合 LH 字[2014]7387 号、黔科合 J 字[2013]2139 号)。

第一作者简介: 罗林(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事矿山地质环境与土壤健康风险研究。E-mail: 2483111942@qq.com。

* 通讯作者: 钱志宽(1983-), 男, 副教授, 主要从事成矿理论及矿山环境恢复治理研究。E-mail: qianzhikuan-0317@163.com。

Bq/kg)^[16]。雷鸣等(2001)对贵州主要电厂粉煤灰(渣)的放射性核素进行了测定,发现除西部的水城电厂外,其他电厂粉煤灰(渣)都具有较高的放射性核素含量(²²⁶Ra: 174~323 Bq/kg),他们进一步对粉煤灰砖为主要建筑材料的某小区进行了放射性测量,结果表明室内的大气氡浓度及居民年有效剂量当量都严重超标^[17]。刘向御等(2009)根据国标 GB6566-2001 对贵州五个典型火电厂的粉煤灰进行了评估,结果表明西部电厂粉煤灰的使用不受限制(²²⁶Ra: 91 Bq/kg),其他地区粉煤灰使用都有一定限制(²²⁶Ra: 180~417 Bq/kg)^[18]。综合上述调研,贵州作为华南最重要的粉煤灰生产大省,中部、北部和东部粉煤灰中存在较高的放射性核素,随着粉煤灰综合利用率的提高,特别是建筑材料上的广泛使用,可能对广大居民形成放射性危害,因此加强贵州火力电厂粉煤灰的放射性安全评估研究具有重要意义。

由于城市建设的发展,贵州部分电厂先后拆迁,新建了一批采用先进除尘设备的火力发电厂,部分电厂生产的粉煤灰(不包括底灰)供不应求,快速进入建筑材料生产链,但尚无相关的放射性安全评估。本论文主要对贵州西部、中部、东部和北部典型电厂生产的粉煤灰开展了放射性元素含量分析和放射性核素比活度分析,根据国标 GB6566-2001^[19]评估相应粉煤灰的安全性,并提出了利用微量元素含量对放射性核素比活度进行快速评估的经验公式。

1 样品及分析

在西部纳雍电厂(样品编号: 18NY,下同)、中部金沙电厂(18JS)和大方电厂(18DF)、北部桐梓电厂(18TZ)和二郎电厂(18EL)及东部黔东电厂(18QD)的粉煤灰储仓中分别对一级粉煤灰(细灰,编号-1)和二级粉煤灰(粒度大于一级,编号-2)进行取样,每个样品重约 3 kg,实验室内缩分 250 g 用于放射性核素分析和微量元素分析。放射性核素分析采用中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的美国 Canberra 公司 GX6020 延展性多道能谱仪进行测试;微量元素采用中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的加拿大 Perkin Elmer 公司 ELAN DRC-e 四级杆型电感耦合等离子体质谱进行分析,对绝大多数微量元素的重复性测试相对标准

偏差优于 10%。

样品的内照射指数和外照射指数分别根据国标 GB6566-2001^[19]给出的公式进行计算:

$$I_{Ra} = C_{Ra} / 200 \quad (1)$$

$$I_{\gamma} = C_{Ra} / 370 + C_{Th} / 260 + C_K / 4200 \quad (2)$$

公式(1)中: I_{Ra} —内照射指数; C_{Ra} —建筑材料中天然放射性核素²²⁶Ra的放射性比活度,单位为贝可/千克(Bq/kg); 200—仅考虑内照射情况下,GB6566-2001标准规定的非空心的建筑主体材料对放射性核素²²⁶Ra的放射性比活度限量,单位为贝可/千克(Bq/kg)。公式(2)中: I_{γ} —外照射指数; C_{Ra} 、 C_{Th} 、 C_K 分别为建筑材料中天然放射性核素²²⁶Ra、²³²Th和⁴⁰K的放射性比活度,单位为: 贝可/千克(Bq/kg); 370、260、4200分别为仅考虑外照射情况下,GB6566-2001标准规定的非空心的建筑主体材料中天然放射性核素²²⁶Ra、²³²Th和⁴⁰K在其各自单独存在时放射性比活度限量,单位为贝可/千克(Bq/kg)。

分析结果及相关指标计算列于表1。

2 结果及讨论

2.1 贵州典型电厂粉煤灰的放射性安全评估

从表1可见,上述电厂粉煤灰的放射性核素含量之和大于 37 Bq/kg,相应各核素的测量不确定度都小于 6%,测试质量满足国标 GB6566-2001 不确定度不大于 20%的要求。从目前的数据来看,贵州火力电厂粉煤灰的放射性核素含量具有明显的地区差异,总体表现为西部低,中北部和东部较高,与前人的研究结果^[18]吻合。一级粉煤灰相应放射性核素含量略高于二级粉煤灰,表明放射性核素在粉煤灰产生过程中伴随粒度分选有微弱差异,但不显著。

西部纳雍电厂粉煤灰 I_{Ra} (0.4~0.6)和 I_{γ} (0.6~0.7)指数均明显低于国标 GB6566-2001 限值,可以作为优良的建筑主体材料(根据国标 GB6566-2001 同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.0$,下同)和 A 类装修材料(同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.3$),产销与使用范围不受限制。黔东电厂和黔中的大方、金沙电厂粉煤灰 I_{Ra} 均小于 1.0(0.7~0.9), I_{γ} 大部分接近 1.0 限值(0.9~1.1),只有大方电厂一级灰达到 1.1;因此,大方电厂一级灰可用于空心率大于 25%的建筑主体材料(同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.3$),其余可以作为普通建筑主体材料,三个电厂的粉煤灰均可作为 A 类装修材料,产销与使用范围不受限

表1 贵州部分电厂粉煤灰放射性核素测试及相关指标计算

Table 1 Fly ash radio nuclides content and related indices of some power plants in Guizhou

样品	测试项目						评估参数计算			
	⁴⁰ K/ (Bq/kg)	不确定度/%	²²⁶ Ra/ (Bq/kg)	不确定度/%	²³² Th/ (Bq/kg)	不确定度/%	I _{Ra}	I _γ	低背景 水泥掺量	高背景 水泥掺量
18NY-1	330.5	5.3	118.2	3.2	75.3	3.2	0.6	0.7	无限制	无限制
18NY-2	305.7	5.4	88.8	3.3	70.7	3.3	0.4	0.6	无限制	无限制
18DF-1	364.8	5.3	187.7	3.1	135.1	3.0	0.9	1.1	无限制	无限制
18DF-2	360.1	5.3	141.0	3.1	122.6	2.9	0.7	0.9	无限制	无限制
18JS-1	364.4	5.2	153.3	3.1	123.5	2.9	0.8	1.0	无限制	无限制
18JS-2	360.1	5.2	149.6	3.1	123.7	3.0	0.7	1.0	无限制	无限制
18QD-1	731.7	5.1	178.4	3.1	93.9	3.2	0.9	1.0	无限制	无限制
18QD-2	729.2	5.1	176.5	3.1	89.5	3.1	0.9	1.0	无限制	无限制
18EL-1	272.3	5.8	232.7	3.1	137.8	3.0	1.2	1.2	80%	47%
18EL-2	246.2	5.7	205.1	3.1	121.0	3.0	1.0	1.1	96%	58%
18TZ-1	344.8	5.4	290.9	3.1	115.4	3.0	1.5	1.3	58%	31%
18TZ-2	348.4	5.3	284.1	3.1	117.0	3.0	1.4	1.3	60%	30%

注: I_{Ra}和 I_γ 分别按照公式(1)和(2)进行计算,普通硅酸盐水泥放射性背景值引自文献[20],掺量计算方法参见文献[16]。

制。黔北地区桐梓电厂和二郎电厂粉煤灰的 I_{Ra} (1.0~1.5)和 I_γ(1.1~1.3)指数均明显大于1.0,需要明确限制掺杂比后方可作为建筑主体材料使用,其中二郎电厂粉煤灰可作为B类装修材料(同时满足 I_{Ra}≤1.3和 I_γ≤1.9),桐梓电厂粉煤灰只能作为C类装修材料(满足 I_γ≤2.8)。

目前贵州电厂粉煤灰主要用于复合硅酸盐水泥生产,而复合硅酸盐水泥一般要求工业废渣掺量不能超过50%。2011年对贵州生产的普通硅酸盐水泥的测试表明,相应²²⁶Ra的比活度范围为73~135 Bq/kg^[20]。桐梓电厂和二郎电厂粉煤灰主要是 I_{Ra}超标,根据粉煤灰掺量计算方法^[16],对于²²⁶Ra低背景(73 Bq/kg)的普通硅酸盐水泥厂家,两个电厂的粉煤灰可以用于生产复合硅酸盐水泥,但对于高背景(135 Bq/kg)的厂家,二郎电厂一级灰的掺量不能大于47%,桐梓电厂一级灰和二级灰的掺量都不能大于31%。

黔北地区电厂粉煤灰的放射性水平较高,如果不加以监管进入民用建筑,可能导致较大的放射性安全隐患,建议贵州省政府制定严格的粉煤灰放射性安全监管条例,加强对相关粉煤灰综合利用技术的研发。

2.2 放射性核素比活度与相应微量元素相关性

放射性核素²²⁶Ra主要来自²³⁸U(元素U的主要同位素,相对丰度约99.3%)衰变,²³²Th是元素Th最主要的同位素(相对丰度约99.98%)。由于放射性衰变的链式反应基本不受物理化学条件的影响,

如果成煤过程和燃烧过程中放射性核素和母体同位素之间不存在明显的分离,可以预期粉煤灰中放射性核素的含量(比活度)与相应元素含量具有明确的相关性,进而可以通过相关元素含量对相应放射性核素的比活度进行判定或计算。

表2列出了本次研究中的分析结果和文献中收集的相关数据,结果表明,相应元素含量和相关放射性核素比活度之间具有良好的相关关系(图1,2),在已知元素U、Th含量(C_U、C_{Th})的基础上,可以根据图1和图2中的相关性对放射性核素比活度进行计算:

$$^{226}\text{Ra}(\text{Bq/Kg}) = 12.315 \times C_U + 0.9868 \quad (3)$$

$$^{232}\text{Th}(\text{Bq/Kg}) = 4.0402 \times C_{\text{Th}} + 1.2808 \quad (4)$$

进一步根据公式(1)和(3),可得:

$$I_{\text{Ra}} = 0.0616 \times C_U + 0.0049 \quad (5)$$

由于绝大部分粉煤灰外照射指数⁴⁰K核素的权重不超过10%(表2),主要权重来自²²⁶Ra和²³²Th,我们定义粉煤灰中仅仅由²²⁶Ra和²³²Th导致外照射的指数 I_{γ(U+Th)}为:

$$I_{\gamma(\text{U+Th})} = (12.315 \times C_U + 0.9868) / 370 + (4.0402 \times C_{\text{Th}} + 1.2808) / 260 \quad (6)$$

相应 I_γ与 I_{γ(U+Th)}之间具有良好的相关性(图3):

$$I_{\gamma} = 1.0259 \times I_{\gamma(\text{U+Th})} + 0.0439 \quad (7)$$

合并公式(6)和(7):

$$I_{\gamma} = 0.0341 \times C_U + 0.0159 \times C_{\text{Th}} + 0.0517 \quad (8)$$

上述公式中 C_U、C_{Th}分别代表粉煤灰样品中元素U(10⁻⁶)和Th(10⁻⁶)的含量。

表 2 中国部分电厂粉煤灰 U、Th 含量、放射性核素比活度及相关参数

Table 2 U, Th and radionuclides contents and related indices in fly ashes of some coal power

C_U	C_{Th}	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	I_{Ra}	I_r	$I_{\gamma(U+Th)}$	C_U	C_{Th}	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	I_{Ra}	I_r	$I_{\gamma(U+Th)}$
南京电厂 ^[21]								长兴电厂 ^[22]							
5.8	55.1	223.8	72.4	313.0	0.4	0.9	1.1	6.7	30.5	123.8	83.6	195.9	0.4	0.8	0.7
8.9	62.8	254.8	111.1	297.6	0.6	1.4	1.3	10.9	32.7	132.8	136.0	246.8	0.7	1.0	0.9
13.5	95.6	388.1	168.5	295.1	0.8	2.1	1.9	13.6	34.6	140.5	169.7	269.7	0.8	1.1	1.0
6.7	57.6	234.0	83.1	304.6	0.4	1.0	1.1	15.8	47.3	192.0	197.2	290.1	1.0	1.4	1.3
6.9	44.0	178.6	84.4	229.0	0.4	1.0	0.9	17.7	47.7	193.7	220.9	274.8	1.1	1.4	1.3
8.3	51.0	207.1	102.8	231.5	0.5	1.2	1.1	8.5	35.8	145.4	106.1	91.6	0.5	0.9	0.8
10.5	56.0	227.4	132.1	226.4	0.7	1.3	1.2	14.4	51.3	208.3	179.7	101.8	0.9	1.3	1.3
11.6	74.0	300.4	143.1	195.9	0.7	1.6	1.5	21.6	72.7	295.2	269.5	117.1	1.3	1.9	1.9
15.0	76.0	308.6	187.2	223.9	0.9	1.8	1.7	26.9	75.1	304.9	335.7	157.8	1.7	2.2	2.1
5.4	29.0	117.7	66.1	206.1	0.3	0.7	0.6	9.3	36.5	148.2	116.1	94.2	0.6	0.9	0.9
6.9	30.0	121.8	84.4	333.3	0.4	0.8	0.7	13.2	52.5	213.2	164.7	101.8	0.8	1.3	1.3
10.3	30.0	121.8	128.5	358.7	0.6	1.0	0.8	21.2	71.5	290.3	264.5	117.1	1.3	1.9	1.8
9.5	59.0	239.5	117.4	94.1	0.6	1.3	1.2	27.5	80.2	325.6	343.2	134.9	1.7	2.3	2.2
6.7	28.0	113.7	84.4	404.5	0.4	0.8	0.7								
金陵石化 ^[23]								贵州电厂(本次研究数据)							
3.8	15.9	64.6	47.7	135.4	0.2	0.4	0.4	14.5	28.4	135.1	187.7	364.8	0.9	1.1	0.9
7.8	20.1	81.6	95.4	117.5	0.5	0.6	0.6	10.9	25.5	122.6	141.0	360.1	0.7	0.9	0.8
10.0	25.0	101.5	124.8	135.4	0.6	0.8	0.7	16.5	27.6	137.8	232.7	272.3	1.2	1.2	1.0
13.1	35.7	144.9	165.2	168.6	0.8	1.1	1.0	17.4	28.5	121.0	205.1	246.2	1.0	1.1	1.0
6.0	18.6	75.5	73.4	120.1	0.4	0.5	0.5	14.4	32.5	123.7	149.6	360.1	0.7	1.0	1.0
9.3	19.7	80.0	117.4	132.9	0.6	0.7	0.6	15.4	33.7	123.5	153.3	364.4	0.8	1.0	1.0
11.5	32.0	129.9	143.1	140.5	0.7	0.9	0.9	10.6	20.0	75.3	118.2	330.5	0.6	0.7	0.7
11.9	36.5	148.2	146.8	178.8	0.7	1.0	1.0	7.9	19.1	70.7	88.8	305.7	0.4	0.6	0.6
5.9	15.8	64.2	73.4	104.8	0.4	0.5	0.4	15.1	23.7	89.5	176.5	729.2	0.9	1.0	0.9
9.3	22.9	93.0	117.4	132.9	0.6	0.7	0.7	14.2	22.1	93.9	178.4	731.7	0.9	1.0	0.8
10.8	30.2	122.6	135.8	150.7	0.7	0.9	0.8	23.5	29.6	117.0	284.1	348.4	1.4	1.3	1.2
12.8	35.1	142.5	161.5	178.8	0.8	1.1	1.0	23.4	29.0	115.4	290.9	344.8	1.5	1.3	1.2
9.9	30.2	122.6	161.5	161.0	0.8	1.0	0.8								
11.9	36.1	146.6	146.8	184.0	0.7	1.0	1.0								
14.0	38.4	155.9	176.2	189.1	0.9	1.1	1.1								
13.0	38.6	156.7	161.5	201.8	0.8	1.1	1.0								

注: C_U 、 C_{Th} 分别为 U、Th 含量 (10^{-6}), ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 为相应放射性核素的比活度 (Bq/kg) I_{Ra} 、 I_r 和 $I_{\gamma(U+Th)}$ 分别按照公式 (1)、(2) 和 (6) 进行计算。

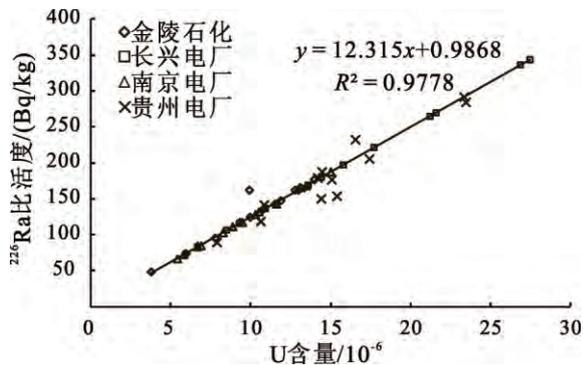


图 1 中国部分电厂粉煤灰中 U 含量和 ^{226}Ra 比活度的相关性

Fig.1 Correlation between U content and ^{226}Ra specific activity in fly ashes of some coal power plants in China

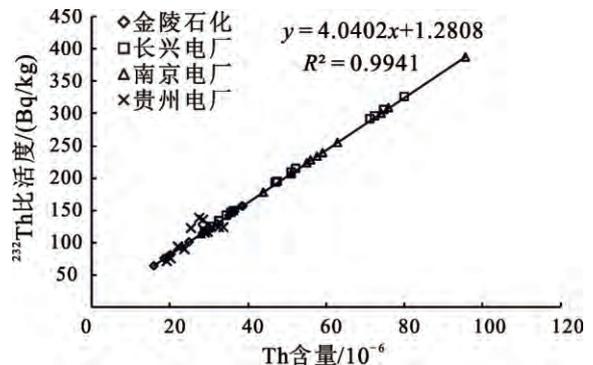


图 2 中国部分电厂粉煤灰中 Th 含量和 ^{232}Th 比活度的相关性

Fig.2 Correlation between Th content and ^{232}Th specific activity in fly ashes of some coal power plants in China

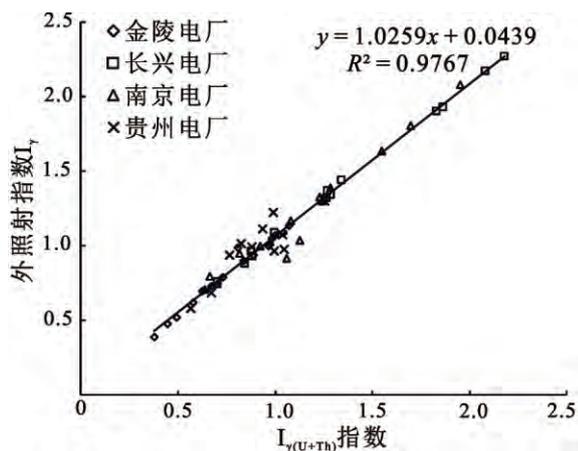


图3 中国部分电厂粉煤灰中外照射指数 I_{γ} 和 $I_{\gamma(U+Th)}$ 指数的相关性

Fig.3 Correlation between indices I_{γ} and $I_{\gamma(U+Th)}$ in fly ashes of some coal power plants in China

放射性核素的检测一般需要在专业实验室中进行,而微量元素 ICP-MS 测试技术已经非常成熟和普及,上述公式的推导有利于根据粉煤灰微量元素分析结果快速计算内照射指数和外照射指数,降低粉煤灰放射性安全评估成本。

3 结论

通过对贵州不同产煤区域 6 家典型火力电厂粉

煤灰中放射性核素比活度分析,根据国标 GB6566-2001 对粉煤灰的放射性安全进行了评估;通过相应元素含量和比活度相关性分析,推导了利用 U 和 Th 元素含量进行粉煤灰放射性安全评估的经验公式。主要结论包括:

1) 纳雍电厂粉煤灰内、外照射指数明显低于 GB6566-2001 国标限值,可作为优良的建筑主体材料和 A 级装修材料;黔东电厂、金沙电厂和大方电厂粉煤灰内照射指数不超标,外照射指数大部分接近 1.0 限值,可以作为建筑主体材料和 A 级装修材料;黔北二郎电厂和桐梓电厂粉煤灰的内、外照射指数均超标,可以通过控制掺量比例用于复合硅酸盐水泥生产,其中二郎电厂粉煤灰可用作 B 级装修材料,桐梓电厂粉煤灰只能用作 C 级装修材料。鉴于黔中、黔东和黔北地区粉煤灰中较高乃至超标的放射性核素含量,建议贵州省政府制定严格的电厂粉煤灰管理和应用规范,进一步加强对相关水泥和制砖企业及粉煤灰堆放的放射性监控,研发更为科学合理的粉煤灰应用技术。

2) 根据本次研究结果和收集的前人资料,确证了放射性核素比活度和相关元素含量之间具有良好相关性,推导了利用粉煤灰 U、Th 含量快速计算内照射指数和外照射指数的经验公式: $I_{Ra} = 0.0616 \times C_U + 0.0049$; $I_{\gamma} = 0.0341 \times C_U + 0.0159 \times C_{Th} + 0.0517$ 。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] Wikipedia. Coal combustion products [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Coal_combustion_products. 2018-03-22.
- [3] 李凤翔,金光宇,张建洲,等. 61 个电厂燃煤和灰分中的天然放射性水平及其对环境的辐射影响 [J]. 辐射防护, 1987(04): 260-272, 259.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告 [R]. 2012.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告 [R]. 2014.
- [6] Dai S, Finkelman R. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 186: 155-164.
- [7] Zhang Y, Shi M, Wang J, et al. Occurrence of uranium in Chinese coals and its emissions from coal-fired power plants [J]. Fuel, 2016, 166: 404-409.
- [8] Huang W, Wan H, Finkelman R, et al. Distribution of uranium in the main coalfields of China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2012, 30(5): 819-835.
- [9] 谢贵英,艾尔肯·阿不列木,艾克拜尔·吐合提. 新疆部分燃煤和电厂粉煤灰中天然放射性水平分析 [J]. 核电子学与探测技术, 2011(12): 1354-1356+1373.
- [10] 李北城,赵孝文,吴珂,等. 黑龙江省主要燃煤电厂粉煤灰天然放射性水平 [J]. 中国新技术新产品, 2008(15): 10.
- [11] 吴珂,赵孝文,范庆丽,等. 哈尔滨某电厂粉煤灰的天然放射性水平测量 [J]. 中国新技术新产品, 2009(24): 24.
- [12] 张卫,郝玉怀,黄建英. 山西省主要燃煤电厂粉煤灰和煤矿矸石中放射性水平 [J]. 中国环境监测, 1987(02): 26-29.
- [13] 张卫,刘普灵,郝玉怀,等. 山西燃煤电厂粉煤灰及煤矿矸石中天然放射性核素含量测定 [J]. 环境科学与技术, 1987(03): 7-10.
- [14] 顾洪坤,郝汝宽,章文英,等. 北京市燃煤电厂燃煤和粉煤灰及其建材制品中的天然放射性水平 [J]. 辐射防护, 1996(04): 309-316.
- [15] 贵州省统计局. 贵州省统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

- [16] 张覃,毛健全,肖喜生. 粉煤灰的放射性及防护 [J]. 粉煤灰, 2001(05): 25-26, 29.
- [17] 雷鸣,王成琼,彭元贵. 贵州省含煤渣建材的放射性污染调查 [J]. 华东地质学院学报, 2001(02): 123-126.
- [18] 刘向御,邱跃琴,张覃. 贵州典型粉煤灰天然放射性水平分析 [J]. 中国煤炭, 2009(10): 93-95, 104.
- [19] 杨钦元. 新国标 GB6566-2001《建筑材料放射性核素限量》的主要内容及简要说明 [J]. 粉煤灰, 2002(03): 38-40.
- [20] 李荣华,宋光林,袁波,等. 贵州省市售水泥放射性抽样调查 [J]. 中国新技术新产品, 2011(03): 11.
- [21] 徐红. 粉煤灰微量元素含量和放射性安全评价——粉煤灰建筑砂浆的基础研究之三 [J]. 电力环境保护, 2000(01): 10-12, 34.
- [22] 黎飞虎,翟建平,付晓茹,等. 长兴电厂粉煤灰的微量元素含量及其安全性评价——长兴电厂粉煤灰综合利用对策研究之二 [J]. 粉煤灰综合利用, 2005(04): 6-9.
- [23] 傅晓茹,邹继兴. 脱硫灰中有毒、有害元素含量及使用安全性评价 [J]. 河北理工学院学报, 2004(01): 156-160.

Radioactive Safety Assessment of the Fly Ash from Typical Power plants in Guizhou

LUO Lin¹, QIAN Zhikuan², GAN Tian^{3,4}, LUO Taiyi³

- (1. Construction Engineering Co. Ltd., Southwest Energy & Mine Group, Guiyang 550002, China;
2. Architectural Engineering College, Guizhou Mingzu University, Guiyang 550025, China; 3. The state Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
4. School of the Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Guizhou is the most important coal-producing and power production province in south China, and the radioactivity safety assessment is the basis of comprehensive utilization of the fly ash. The specific activity of radionuclide in the fly ash of typical power plants in different coal producing areas in Guizhou was measured and the safety evaluation was carried out according to the national standard GB6566-2001. The results show: the fly ash in the Nayong power plant of west Guizhou has a low level of radioactivity and such can be used with no restriction; the fly ashes in Jinsha and Dafang power plants of central Guizhou and the Qiandong power plant of east Guizhou have high levels of radioactivity, they can be used as body-building materials and A class decoration materials, but the first-class fly ash in Dafang is only suit to the material with an empty rate greater than 25%. The fly ashes in Erlang and Tongzi power plants of north Guizhou have the highest level of radioactivity, they can be used as B and C decoration materials only, and should be controlled strictly as body-building materials such as composite Portland cement. Combined with previous data, this study found that contents of uranium and thorium in fly ashes correlated well with the relative activity of radionuclides, and estimated empirical formulas ($I_{Ra} = 0.0616 \times C_U + 0.0049$; $I_\gamma = 0.0341 \times C_U + 0.0159 \times C_{Th} + 0.0517$) to fast evaluate the internal and external irradiation indices base on contents of uranium and thorium ($C_U, C_{Th}, 10^{-6}$) in the fly ash.

Key words: radioactive assessment; empirical formula; fly ash; Guizhou coal power plant