

新疆伊犁盆地燃煤电厂天然放射性水平评价

刘 昭, 格丽玛*

新疆维吾尔自治区辐射环境监督站, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年7月10日; 录用日期: 2024年8月8日; 发布日期: 2024年8月14日

摘要

文章对新疆伊犁6家燃煤电厂的原煤、煤渣、煤灰及周围土壤中的天然放射性核素开展测量。结果表明: 2家燃煤电厂煤渣、煤灰中天然放射性核素比活度大于 1000 Bq/kg , 煤渣和煤灰中天然放射性核素富集因子均值分别为 $1.5\sim6.3$ 、 $4.1\sim16.7$ 。原煤及周围土壤中的天然放射性核素比活度均处于本底水平。因此, 建议对用作建筑材料的煤渣和煤灰进行放射性检测, 严格控制高比活度的煤渣和煤灰在建筑材料中的比例。

关键词

燃煤电厂, 放射性水平, 富集因子, 伊犁盆地

Evaluation of Natural Radioactive Levels in Coal-Fired Power Plants in the Ili Basin of Xinjiang

Zhao Liu, Lima Ge*

Radiation Environmental Supervision Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang

Received: Jul. 10th, 2024; accepted: Aug. 8th, 2024; published: Aug. 14th, 2024

Abstract

This article conducts a survey on six coal-fired power plants in Ili, Xinjiang, and analyzes and measures natural radioactive nuclides in raw coal, coal slag, coal ash, and surrounding soil. The results showed that the natural radioactive nuclide specific activity in the coal slag and coal ash of two coal-fired power plants was greater than 1000 Bq/kg , and the natural radioactive nuclide

*通讯作者。

specific activity in the raw coal and the surrounding soil was at the standard level. Natural radioactive nuclides exhibit varying degrees of enrichment in coal slag and coal ash, with average enrichment index ranging from 1.5~6.3 and 4.1~16.7, respectively. Therefore, it is recommended that when cinder and coal ash are used as building materials, radioactivity testing is carried out to ensure that the radioactivity level in building materials is lower than the national standard limit.

Keywords

Coal-Fired Power Plants, Radioactivity Level, Enrichment Factor, Ili Basin

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

新疆伊犁盆地煤、铀资源丰富，且两种资源在空间上存在一定的共伴生关系，在煤中含有一定量的天然放射性核素，主要是铀、钍、镭和钾等，煤燃烧后，煤渣和煤灰中富集了大部分天然放射性核素，少部分随废气和飞灰以气溶胶的形式排入大气，直接或间接对周围环境造成一定的污染[1]。

本文根据伊犁盆地燃煤电厂的特征，筛选具有代表性的燃煤电厂作为研究对象，研究燃煤电厂原煤、灰渣及周围土壤中的天然放射性核素含量，分析放射性核素的迁移途径及富集规律，为合理处置和综合利用工业废渣提供科学依据。

2. 采样与测量方法

2.1. 样品采集

按照《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021) [2]的要求，每个电厂分别采集原煤、煤渣、煤灰各2个1.5 kg的混合样品，煤灰及煤渣来自除尘灰斗和锅炉下方及灰渣库，每次采集0.5 kg，连续采集三天，混合成1.5 kg。

在进行土壤样品采集时，严格按照土壤样品采集规定，采样点选取全年主导风向下风向位置2~3 km范围内的土壤，每份样品不少于2~3 kg，使用专用样品袋装存。

2.2. 样品制备与测量

本项目 γ 辐射剂量率的现场测量是使用便携式 γ 辐射剂量率监测仪在样品表面1米处测得。采集到的原煤、煤渣、煤灰和土壤样品测量时，称量1000(± 1)g样品装入聚乙烯塑料盒中封存，放置至镭、氡平衡后测量。

^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 含量分析方法是《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》(GB 11713-2015) [3]，使用德国研制的HPGe能谱分析仪。其探测器HPGe晶体，能量范围为50 keV~1.5 MeV；谱仪积分本底计数率为0.95 s⁻¹；相对效率为40%；能量分辨率对 ^{60}Co 1332.5 keV γ 射线，小于2.2 keV。

^{210}Pb 、 ^{210}Po 含量分析参照《水中铅-210的分析方法》(EJ/T 859-94)和《水中钋-210的分析方法 电镀制样法》(GB 12376-90)。通过测量 ^{210}Pb 的子体 ^{210}Bi 的 β 放射性间接测定 ^{210}Pb ，以氢氧化铁为载体，吸附带水中 ^{210}Pb 和 ^{210}Bi 。

3. 结果与分析

3.1. 原煤中天然放射性核素比活度测量结果

6家典型燃煤电厂原煤表面1米处的 γ 辐射剂量率现场监测结果和天然放射性核素比活度含量测量结果列于表1。由表1可知，原煤表面1米处的 γ 辐射剂量率测值平均值为79.27 nGy/h，与新疆和全国平均水平相当；原煤中天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 的比活度均值是新疆和全国土壤中的天然放射性核素测量结果平均值的2倍多。不同电厂原煤中的天然放射性核素比活度差异为2~67倍，但均未超过伴生放射性矿标准限值1000 Bq/kg [4]。

Table 1. γ radiation dose rate and natural radionuclides measurement results of raw coal samples

表1. 原煤样品 γ 辐射剂量率及天然放射性核素测量结果

序号	燃煤 电厂	样品 编号	γ 辐射剂量率	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb
			nGy/h	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg
1	A	A-1	89.80	20.79	16.93	18.63	157.76	12.89	22.61
2	B	B-1	50.20	5.46	12.95	14.04	100.37	22.56	22.61
3	C	C-1	52.10	37.40	23.65	3.13	55.31	22.56	36.18
4	D	D-1	53.48	15.93	15.54	10.83	123.32	19.34	22.61
5	E	E-1	195.60	371.29	404.31	28.47	30.04	51.57	52.91
6	F	F-1	34.46	40.18	42.42	24.68	51.45	19.24	22.50
测值范围			34.46~195.6	5.46~371.3	12.95~404.31	3.13~28.47	30.04~157.76	12.89~51.57	22.5~52.91
平均值			79.27	81.84	85.97	16.63	86.38	24.69	29.90
新疆土壤测值平均值			58.10	33.88	31.64	38.47	612.60	/	/
全国土壤测值平均值			67.54	43.00	39.00	59.00	572.00	28.1	8.1

3.2. 煤渣中天然放射性核素比活度测量结果

6家典型燃煤电厂煤渣表面1米处的 γ 辐射剂量率现场监测结果和天然放射性核素比活度含量测量结果列于表2。由表2可知，煤渣表面1米处的 γ 辐射剂量率测值平均值为原煤的3倍；煤渣中 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的测值平均值为原煤的3~5倍， ^{210}Po 、 ^{210}Pb 的测值平均值比原煤略高，煤燃烧后的煤渣的天然放射性核素比活度有一定的富集[5]。不同电厂煤渣中的天然放射性核素比活度差异为2~20倍。其中1家燃煤电厂(E)煤渣中的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素比活度超过了伴生放射性矿标准限值1000 Bq/kg。

Table 2. γ radiation dose rate and natural radionuclides measurement results of coal slag samples

表2. 煤渣样品 γ 辐射剂量率及天然放射性核素测量结果

序号	燃煤 电厂	样品 编号	γ 辐射 剂量率	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb
			nGy/h	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg
1	A	A-2	122.20	55.79	67.03	73.23	537.36	12.89	13.57
2	B	B-2	66.00	48.24	56.69	62.36	426.06	12.83	18.00
3	C	C-2	126.40	79.12	182.25	46.72	404.10	12.83	13.50

续表

4	D	D-2	216.80	120.48	127.44	55.02	234.05	12.83	9.00
5	E	E-2	554.80	1024.93	1179.83	35.63	472.11	44.90	53.99
6	F	F-2	200.00	285.88	313.21	35.76	258.34	118.65	134.98
测值范围		66~554.8	48.24~1024.93	56.69~1179.83	35.63~73.23	234.05~537.36	12.83~118.65	9.00~134.98	
煤渣平均值		214.37	269.07	321.08	51.45	388.67	35.82	40.51	
原煤平均值		79.27	81.84	85.97	16.63	86.38	24.69	29.90	

3.3. 煤灰中天然放射性核素比活度测量结果

6家典型燃煤电厂煤灰表面1米处的 γ 辐射剂量率现场监测结果和天然放射性核素比活度含量测量结果列于表3。由表3可知,煤灰表面1米处的 γ 辐射剂量率测值平均值为原煤的2倍;煤灰中 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的测值平均值为原煤的3~5倍, ^{210}Po 、 ^{210}Pb 的测值平均值为原煤的14~16倍,煤燃烧后的煤灰的天然放射性核素产生了富集[5]。不同电厂煤灰中的天然放射性核素比活度差异为3~12倍。其中2家燃煤电厂(D、E)煤灰中的 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 核素比活度超过了伴生放射性矿标准限值1000 Bq/kg。

Table 3. γ radiation dose rate and natural radionuclides measurement results of coal ash samples
表3. 煤灰样品 γ 辐射剂量率及天然放射性核素测量结果

序号	燃煤 电厂	样品 编号	γ 辐射 剂量率	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb
			nGy/h	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg
1	A	A-3	149.40	100.67	80.59	65.07	463.01	90.24	90.44
2	B	B-3	120.40	120.68	125.34	48.20	287.04	96.69	104.01
3	C	C-3	113.60	109.60	196.62	66.31	300.14	232.04	217.05
4	D	D-3	263.60	868.22	933.12	31.50	77.00	1084.00	968.45
5	E	E-3	281.80	656.91	838.69	99.10	228.09	841.16	1013.00
6	F	F-3	200.00	285.88	313.21	35.76	258.34	118.65	134.98
测值范围		113.6~281.8	100.67~868.22	80.59~933.12	31.5~99.10	77~463.01	90.24~1084	90.44~1013	
煤灰平均值		188.13	356.99	414.60	57.66	268.94	410.46	421.32	
煤渣平均值		214.37	269.07	321.08	51.45	388.67	35.82	40.51	
原煤平均值		79.27	81.84	85.97	16.63	86.38	24.69	29.90	

3.4. 土壤中天然放射性核素比活度测量结果

6家典型燃煤电厂下风向土壤表面1米处的 γ 辐射剂量率现场监测结果和天然放射性核素比活度含量测量结果列于表4。由表4可见,土壤表面1米处的 γ 辐射剂量率测值比本底水平略高;土壤中 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 的放射性比活度测值高于本底水平。测值结果表明:燃煤电厂周围土壤中天然放射性核素含量发生了一定变化,但未超出国家规定的标准。

Table 4. Measurement results of γ radiation dose rate and natural radionuclides in soil samples
表 4. 土壤样品 γ 辐射剂量率及天然放射性核素测量结果

序号	燃煤电厂	样品编号	γ 辐射剂量率	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb
			nGy/h	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/Kg
1	A	A-4	89.24	40.26	40.26	58.56	851.60	22.56	27.13
2	B	B-4	95.58	41.53	44.04	48.94	776.26	25.65	31.50
3	C	C-4	94.00	37.24	33.50	37.29	700.16	35.45	54.26
4	D	D-4	94.14	40.08	42.66	33.75	476.33	35.10	44.77
5	E	E-4	113.00	44.33	46.35	48.49	654.74	41.69	53.99
6	F	F-4	105.00	48.54	50.75	46.87	621.00	30.50	46.80
测值范围			89.24~113	37.24~48.54	33.50~50.75	33.75~58.56	476.33~851.60	22.56~41.69	27.13~54.26
土壤平均值			98.49	42.00	42.93	45.65	680.02	31.83	43.08
新疆土壤测值平均值			58.10	33.88	31.64	38.47	612.60	/	/
全国土壤测值平均值			67.54	43.00	39.00	59.00	572.00	28.1	8.1

3.5. 煤渣、煤灰对天然放射性核素的富集

原煤燃烧后，放射性核素会产生富集，用富集因子来表征原煤燃烧产物对放射性核素的富集能力[6]。煤灰富集因子 $k = C_{\text{煤灰}}/C_{\text{原煤}}$ ，煤渣富集因子 $k = C_{\text{煤渣}}/C_{\text{原煤}}$ ，其中 $C_{\text{煤灰}}$ 为煤灰放射性核素比活度， $C_{\text{煤渣}}$ 为煤渣放射性核素比活度， $C_{\text{原煤}}$ 为原煤放射性核素比活度。经计算，6 家燃煤电厂煤渣和煤灰的富集因子见表 5。由表 5 可知， $k_{\text{煤渣}}$ 均值范围为 1.5~6.3， $k_{\text{煤灰}}$ 均值范围为 4.1~16.7， $k_{\text{煤灰}}$ 略高于 $k_{\text{煤渣}}$ 。

Table 5. Enrichment factors of natural radionuclides in coal cinders and coal ash
表 5. 煤渣、煤灰中各天然放射性核素的富集因子

燃煤电厂	煤渣富集因子 $k_{\text{煤渣}}$						煤灰富集因子 $k_{\text{煤灰}}$						
	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Po	^{210}Pb	
A	2.7	4.0	3.9	3.4	1.0	0.6	4.8	4.8	3.5	2.9	7.0	4.0	
B	8.8	4.4	4.4	4.2	0.6	0.8	22.1	9.7	3.4	2.9	4.3	4.6	
C	2.1	7.7	14.9	7.3	0.6	0.4	2.9	8.3	21.2	5.4	10.3	6.0	
D	7.6	8.2	5.1	1.9	0.7	0.4	54.5	60.0	2.9	0.6	56.0	42.8	
E	2.8	2.9	1.3	15.7	0.9	1.0	1.8	2.1	3.5	7.6	16.3	19.1	
F	7.1	7.4	1.4	5.0	6.2	6.0	7.1	7.4	1.4	5.0	6.2	6.0	
k 值范围		2.1~8.8	2.9~8.2	1.3~14.5	1.9~15.7	0.6~6.2	0.4~6	1.8~54.5	2.1~60.0	1.4~21.2	0.6~7.6	4.3~56.0	2.1~8.8
平均值	5.2	5.8	5.2	6.3	1.7	1.5	15.5	15.4	6.0	4.1	16.7	5.2	

4. 煤渣、煤灰用作建筑材料的指标评价

燃煤电厂产生的煤灰和煤渣通常进行综合利用，用于建材生产、建筑工程等。由于富集作用，其建

材制品中的天然放射性水平往往高于传统建筑材料，因此应根据放射性核素含量水平对煤灰、煤渣进行分类管理。

依据国家标准《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566-2010) [6]，给出建筑材料放射性核素的限值作为评价指标，分析燃煤电厂煤渣、煤灰是否符合国家标准限值。

4.1. 内照射指数

内照射指数是由建筑材料中的²²⁶Ra的放射性比活度与规定的限量的商得出[7]。用以下表达式表示：

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

(1)式中， C_{Ra} 为建筑材料中²²⁶Ra的比活度，Bq/kg； I_{Ra} 为内照射指数。

4.2. 外照射指数

外照射指数是由建筑材料中的²²⁶Ra、²³²Th和⁴⁰K的放射性比活度分别与各自单独存在时的规定限量的商后求和得出[8]。用以下表达式表示：

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

(2)式中， C_{Ra} 、 C_{Th} 和 C_K 分别为建筑材料中²²⁶Ra、²³²Th和⁴⁰K的比活度，Bq/kg； I_{γ} 为外照射指数。

4.3. 分类评价

《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566-2010)标准中规定，同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.0$ 的建筑材料，可用作建筑主体材料。同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.3$ 的建筑材料，可当作A类装修材料使用；同时满足 $I_{Ra} \leq 1.3$ 和 $I_{\gamma} \leq 1.9$ 的建筑材料，可当作B类装修材料使用，但不可用于I类民用建筑的内饰面；不满足A、B类装修材料要求但满足 $I_{\gamma} \leq 2.8$ 时才可用作C类装修材料，C类装修材料只可用于建筑物的外饰面及室外其他用途。

6家燃煤发电厂煤渣和煤灰样品放射性内、外照射指数的计算结果见表6。根据6家燃煤电厂的检测样品，有3家(D、E、F)的煤渣、煤灰不可用作建筑主体材料，同样3家(D、E、F)不可用作A类装修材料，也不可用作B类装修材料，1家(E)不可用作C类装修材料。

Table 6. Radioactive internal and external exposure index of coal cinder and coal ash
表 6. 煤渣、煤灰的放射性内、外照射指数

燃煤电厂	煤渣		煤灰	
	I_{Ra}	I_{γ}	I_{Ra}	I_{γ}
A	0.34	0.59	0.40	0.58
B	0.28	0.49	0.63	0.59
C	0.91	0.77	0.98	0.86
D	0.64	0.61	4.67	2.66
E	5.90	3.44	4.19	2.70
F	1.57	1.05	1.57	1.05

5. 结论

1) 新疆伊犁6家典型燃煤电厂的监测数据表明，原煤中天然放射性核素²³⁸U、²²⁶Ra的比活度均值是

新疆和全国土壤中的天然放射性核素测量结果平均值的 2 倍多。不同电厂原煤中的天然放射性核素比活度有 2~67 倍的差异，均未超过伴生放射性矿标准限值 1000 Bq/kg。煤渣表面 1 米处的 γ 辐射剂量率测值平均值为原煤的 3 倍，煤渣中天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的测值平均值为原煤的 3~5 倍， ^{210}Po 、 ^{210}Pb 的测值平均值比原煤略高。煤灰表面 1 米处的 γ 辐射剂量率测值平均值为原煤的 2 倍，煤灰中天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的测值平均值为原煤的 3~5 倍， ^{210}Po 、 ^{210}Pb 的测值平均值为原煤的 14~16 倍。土壤中天然放射性核素比活度测值略高于本底水平，但未超出国家标准。

- 2) 原煤到煤渣再到煤灰中的天然放射性核素比活度呈依次升高的趋势。原煤燃烧产物对放射性核素具有一定富集作用。煤渣富集因子均值范围为 1.5~6.3，煤灰富集因子均值范围为 4.1~16.7，煤灰高于煤渣。
- 3) 当原煤燃烧产物用作建筑材料时，应按国家标准《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566-2010)进行放射性检测，确保建材中的放射性水平低于国家标准限值。

参考文献

- [1] 盛明伟. 新疆褐煤辐射水平测量与分析[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2010.
- [2] 生态环境部辐射环境监测技术中心. HJ61-2021 辐射环境监测技术规范[S].
- [3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB/T11713-2015 高纯锗 γ 能谱分析通用方法[S]. 2015.
- [4] 生态环境部. 伴生放射性矿开发利用企业辐射环境监测及信息公开办法(试行) [S]. 2018.
- [5] 姚海云, 王欣刚, 孙亚敏, 等. 浙江省燃煤电厂原煤、煤渣和煤灰中天然放射性水平调查分析[J]. 能源环境保护, 2020, 34(5): 65-70.
- [6] 马振珠, 韩颖, 王南萍, 徐翠华, 王玉和, 李增宽, 张永贵. GB6566-2010 建筑材料放射性核素限量[S]. 2010.
- [7] 李臻琦. 南昌市常用建筑材料放射性测定分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [8] 孙静. 包钢固体废物综合利用与污染防治对策研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.