doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.11.014

放射性核素在粉煤灰生产利用中的转移规律与安全评价

李冠超[1],杨波[1],孙功明[1],高柏[2],方正[2],丁燕[2]

(1. 广东省核工业地质局辐射环境监测中心,广州 510800;
2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013)

摘要:以某地区 8 个煤矿和 13 个燃煤电厂为研究对象,通过室外取样与室内检测,对粉煤灰生产利用中放射性核素^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K进行比活度分析和评价。结果表明,在原煤到粉煤灰过程中,4 种放射性核素(^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K)的富集系数在 2.15～3.79,富集系数与燃煤浓缩比基本一致,确定转移系数为 3.79;在粉煤灰到粉煤灰砖中,4 种放射性核素(^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K)的富集系数为 0.65～1.04,富集系数与粉煤灰掺比基本相同,确定转移系数为 0.70。整个过程放射性核素未发生损失,且不因放射性水平高低影响其转移系数。粉煤灰砖放射性水平评价表明,该地区 8 类粉煤灰砖符合国家标准要求,适用于任何途径(除 X-8 外均可作为建筑主体);剩余 5 类粉煤灰砖仅可用于建筑物的外饰面等与人体接触不密切的建筑上,后续仍需加强该类粉煤灰砖在生产、使用等方面的监督。该地区 13 类粉煤灰砖的 γ 辐射吸收剂量率水平较高,但其中 6 类粉煤灰砖的年有效剂量率低于全国推荐值,表明对人体的辐射危害较小,可以用于建筑材料使用。

关键词:放射性核素;^{238}U;^{232}Th;^{226}Ra;^{40}K;粉煤灰砖;安全评估;转移系数

中图分类号:X758　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2022)11-0089-08

Transfer Law and Safety Evaluation of Radionuclides in Coal-fly Ash Production and Utilization

LI Guan-chao[1], YANG Bo[1], SUN Gong-ming[1], GAO Bai[2], FANG Zheng[2], DING Yan[2]

(1. Radiation Environment Monitoring Center of Guangdong Province Nuclear Industry Geological Bureau, Guangzhou 510800, China;
2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Taking 8 coal mines and 13 coal-fired power plants in a certain area as research objects, specific activities of four radionuclides (^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra and ^{40}K) in coal-fly ash chain were analyzed and evaluated by outdoor sampling and indoor detection. The results show that enrichment coefficients of four radionuclides in raw coal-fly ash are 2.15—3.79, which is basically consistent with concentration ratio of coal, and transfer coefficient is determined as 3.79. In fly ash-fly ash brick, enrichment coefficients of four radionuclides range from 0.65 to 1.04, which is basically the same as fly ash ratio, and transfer coefficient is determined as 0.70. No loss of radionuclides occurs during the whole process, and transfer coefficient is not affected by level of radioactivity. Radioactive level evaluation of fly ash bricks shows that

收稿日期:2022-07-04

基金项目:广东省生态环境厅项目(115-2019-XMZC-0009-30-0020)

作者简介:李冠超(1982-),男,硕士,高级工程师;**通信作者**:杨波(1988-),男,高级工程师

eight types of fly ash bricks in this area meet the requirements of national standards and are suitable for any way (can be used as the main building except X-8). The remaining five types of fly ash bricks can only be used in buildings with no close contact with human bodies, such as exterior finishes of buildings. Supervision on production and use of such fly ash bricks should be strengthened in the follow-up. Among the 13 types of fly ash bricks in this area, the annual effective dose rate of 6 types of fly ash bricks is lower than the national recommended value, indicating that the radiation harm to human body is small, and can be used as building materials.

Key words: radionuclide; ^{238}U; ^{232}Th; ^{226}Ra; ^{40}K; fly ash brick; safety assessment; transfer coefficient

中国是全球最大的煤炭消费国,据统计,2020年能源消费总量49.8亿t标准煤,其中煤炭消费量占能源消费总量的56.8%,连续三年煤炭消费比稳定在57%左右,煤炭依然是我国的主体能源[1-2]。目前我国煤炭消耗量的一半用于燃煤发电,然而由于部分原煤中含有天然放射性核素如铀系、钍系和^{40}K较高[3-5]。燃烧过程产生的粉煤灰被广泛应用于建筑材料等活动,导致放射性核素转移到公众环境,进而对环境及公众造成一定的辐射影响,造成居室污染[6-9]。辐射体直接照射人体造成分子结构和细胞破坏,损害人体神经系统、生殖系统和消化系统[10-11]。此外放射性核素在空气中易衰变形成易于人体吸收的放射性核素氡,氡及其子体极易溶于人体脂肪组织,诱发肺癌,直接威胁人民生命安全[12-13]。

目前,许多学者对用于建筑材料的工业废渣如粉煤灰等放射性水平开展研究。如罗林等[14]对贵州北部桐梓和二郎电厂粉煤灰进行安全评估,发现内照射指数I_{Ra}和外照射指数I_γ均超出限值,作为建筑主体材料时必须严格控制掺量比例。路建超等[15]抽样调查宝鸡市工业废渣的放射性水平发现,该市粉煤灰的^{226}Ra含量较高,最高为167.7 Bq/kg,且I_{Ra}、I_γ最高,需控制其掺入量。过慧平等[16]研究西安某热电厂粉煤灰中天然放射性核素水平及其应用情况,结果表明,该地区天然核素水平均处于正常本底范围,属于A类建筑材料,应用范围不受限制。ALMAHAYNI等[17]以威斯康辛州60号干线公路数据为例,评估了使用粉煤灰稳定巷道路面对人类健康的潜在影响,结果表明,粉煤灰放射性核素的浸出影响主要来源于铀的毒性。

而目前关于放射性核素在粉煤灰生产利用过程中的转移规律和放射性水平评价研究较少,本文以某地区8个煤矿和13个燃煤电厂为研究对象,通过室外取样与室内检测,对粉煤灰生产利用中放射性核素^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K进行比活度分析和水平评价。分析粉煤灰生产利用过程中的放射性核素含量变化,探明煤矿到粉煤灰的开发利用及废物再利用环节的放射性转移规律,为煤矿开发利用及粉煤灰综合利用提供辐射环境保护方面的建议,为其他伴生放射性矿的管理提供参考,促进粉煤灰/煤渣等废物科学合理的应用。

1 样品收集与处理

在某地区的8个煤矿(编号S-1至S-8)按照均匀布点的原则,综合地层信息等因素,采用梅花形采样法进行原煤采样,采样量为2.0 kg,同时在该地区13家燃煤电厂(编号X1至X13)采集足量的粉煤灰样品。样品采集后运至实验室,立即去除沙石、杂草等异物,称重,置于搪瓷盘中摊开晾干,谱仪分析样品过60目筛,放化分析样品过120目筛,105 ℃恒温干燥至恒重,置于已编号的广口瓶中密封保存,备用。称重后装入与刻度γ能谱仪的体标准源相一致的样品盒中,密封,放置3~4周。按照《高纯锗γ能谱分析通用方法》(GB/T 11713—2015)及《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》(GB/T 11743—2013)中的具体要求进行放射性核素分析。

2 数据处理

2.1 富集系数

研究采用富集系数[18]来表示放射性核素在物质转化过程中的富集能力,表达式如下:

$$k_1=\frac{C_{1粉煤灰}}{C_{原煤}} \quad (1)$$

$$k_2=\frac{C_{粉煤灰砖}}{C_{2粉煤灰}} \quad (2)$$

式中,k_1、k_2分别为原煤到粉煤灰和粉煤灰到粉煤灰砖中放射性核素富集因子;$C_{原煤}$为原煤中放射性核素比活度(Bq/kg);$C_{1粉煤灰}$为燃烧试验后粉煤灰

中放射性核素比活度(Bq/kg);$C_{2粉煤灰}$为 13 家燃煤电厂粉煤灰中放射性核素比活度(Bq/kg);$C_{粉煤灰砖}$为粉煤灰砖中放射性核素比活度(Bq/kg)。

2.2 建筑材料放射性核素评价方法

样品的内外照射指数按照《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2010)计算。内照射指数 I_{Ra} 及外照射指数 I_γ 的计算公式参见文献[19]。根据《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2010)有关建筑主体材料规定,按照天然放射性核素^{226}Ra、^{232}Th、^{40}K 的放射性比活度 I_{Ra} 和 I_γ 的计算结果,分别划分为 A、B、C 类建筑装修材料。

2.3 放射性核素水平评价方法

采用 γ 辐射空气吸收剂量率、年有效剂量率[20]对粉煤灰砖进行放射性水平评价,其中 γ 辐射空气吸收剂量率公式为:

$$D = a_{Ra} \times Q_{Ra} \times + a_{Th} \times Q_{Th} + a_K \times Q_K \quad (3)$$

式中,D 为 γ 辐射空气吸收剂量率(nGy/h);a_{Ra}、a_{Th}、a_K 分别是镭、钍、钾的换算系数,分别为 0.427、0.662、0.043(nGy·kg)/(Bq·h);Q_{Ra}、Q_{Th}、Q_K 分别为土壤中^{226}Ra、^{232}Th、^{40}K 的放射性比活度(Bq/kg)。

年有效剂量计算公式如下:

$$D_{ader} = D \times 8760 \times a_1 \times a_2 \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中,D_{ader} 为年有效剂量率(μSv/y);a_1 为室内居留因子,a_1=0.72;a_2 为空气中吸收剂量转化年有效剂量换算系数,a_2=0.7 Sv/Gy。

3 结果与分析

3.1 放射性核素从煤矿到粉煤灰的转移规律

为研究放射性核素从煤矿到粉煤灰中的转移规律,在研究区 8 个主要煤矿选取不同放射性水平(^{226}Ra比活度在 100～1 000 Bq/kg)的原煤进行高温充分燃烧试验。试验前,原煤中^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的放射性比活度分别为 56.4～836.4、28.4～93.8、49.7～3 080、60.5～324 Bq/kg,进行高温充分燃烧试验后,测出粉煤灰中^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的放射性比活度分别为 192～10 110、88.3～280、184～10 000、208～850 Bq/kg。富集系数的计算结果显示(见表 1),^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的富集系数 k_1 分别为 2.15～3.53、2.35～3.65、2.66～3.75、2.62～3.79。总体而言,从原煤到粉煤灰放射性核素发生了富集,粉煤灰的富集能力为原煤的2～3倍。原因在于,原煤中 4 种放射性核素在 800～1 200 ℃燃烧情况下几乎没有发生损失,燃烧过程中原煤的有机质、无机盐等成分流失,原煤总质量减少,导致放射性核素富集于粉煤灰中。

表 1 不同原煤/粉煤灰放射性核素活度及粉煤灰富集系数

Table 1 Different raw coal/fly ash radionuclide activities and fly ash enrichment coefficients

煤矿产地	原矿/粉煤灰	原煤中放射性核素比活度/(Bq·kg^{-1})				粉煤灰中放射性核素比活度/(Bq·kg^{-1})				富集系数 k_1			
		^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
S-1	3.93	591	86.4	540	60.5	1 909	280	1 810	208	3.23	3.24	3.35	3.44
S-2	3.70	640	44.2	605	156	2 260	160	2 270	592	3.53	3.62	3.75	3.79
S-3	2.74	169	34.5	156	168	479	108	475	567	2.83	3.13	3.04	3.38
S-4	3.57	56.4	47.4	49.7	104	192	156	184	290	3.40	3.29	3.70	2.79
S-5	3.13	158	28.4	151	149	456	88.3	463	445	2.89	3.11	3.07	2.99
S-6	2.66	437	61.3	356	324	941	144	948	850	2.15	2.35	2.66	2.62
S-7	3.04	1 180	29.0	1 140	201	3 830	100	3 180	587	3.25	3.45	2.79	2.92
S-8	3.10	3 460	93.8	3 080	82.0	10 100	275	10 000	234	2.92	2.93	3.25	2.85
最大值	3.93	3 460	93.8	3 080	324	10 100	280	10 000	850	3.53	3.62	3.75	3.79
最小值	2.66	56.4	28.4	49.7	60.5	192	88.3	184	208	2.15	2.35	2.66	2.62
均值	3.24	836.4	53.1	759.7	155.6	2 520.9	163.9	2 416.3	471.6	3.03	3.14	3.20	3.10

由图 1 可知,4 种放射性核素(^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K)的富集系数变化趋势与煤矿燃烧的浓缩比变化趋势基本保持一致;并且不同放射性水平的原煤,经试验后求得的富集系数没有太大变化,说明放射性水平的高低对富集能力没有影响。考虑放射性核素的富集能力,以及最大程度保障放射性安全问题,可以将最大富集系数 3.79 作为从煤矿到粉煤灰转移过程放射性核素转移系数的推荐值。

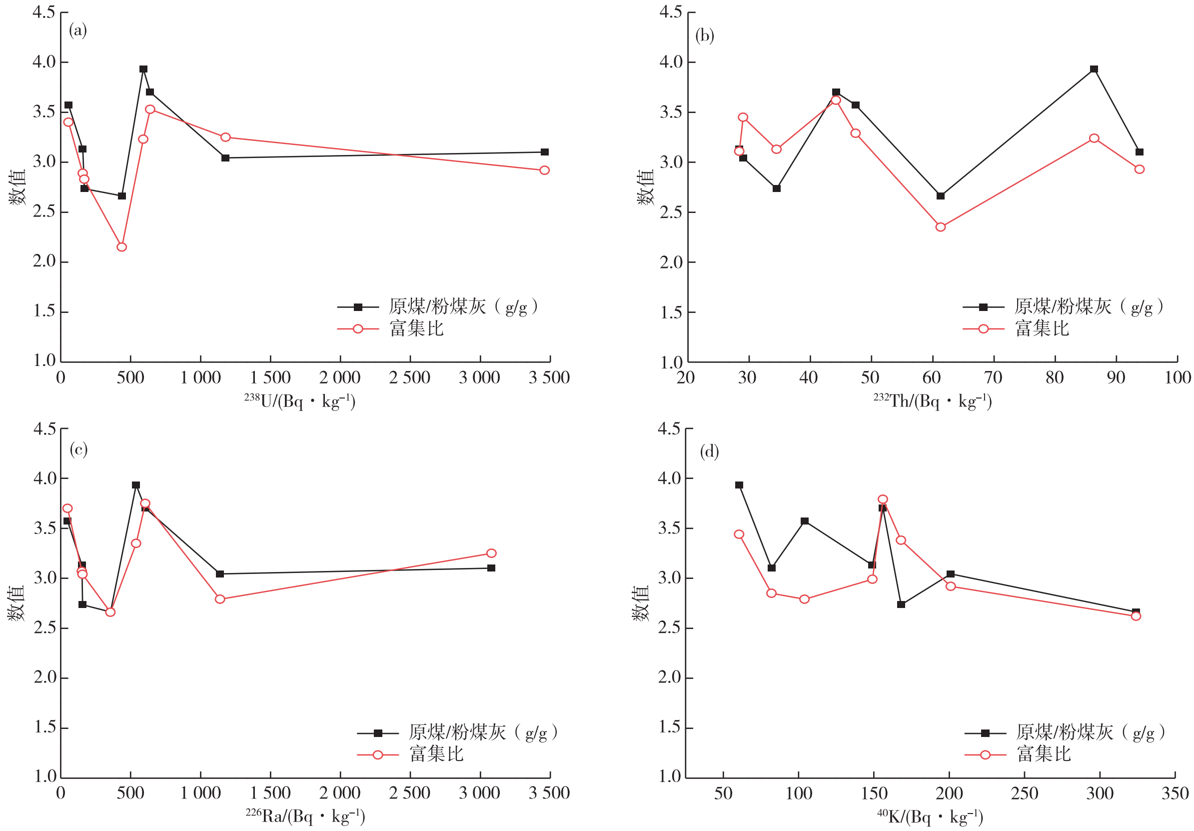

图 1　不同放射性核素原煤至粉煤灰富集比

Fig. 1　Enrichment ratios of raw coal to fly ash with different radionuclides

3.2　放射性核素从粉煤灰到粉煤灰砖的转移规律

为研究该地区粉煤灰砖的辐射水平，在该地区粉煤灰砖制造链中供应粉煤灰的燃煤发电厂里选取 13 个燃煤发电厂的粉煤灰进行粉煤灰砖模拟试验。粉煤灰砖模拟试验采用该地区各片区的粉煤灰作为主要原料，按照各片区典型的粉煤灰砖配比，采用相同的制备工艺模拟制备粉煤灰砖样品，样品制备完成后进行样品分析测试，测出转移前后粉煤灰和粉煤灰砖中^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的放射性比活度，结果见表 2。由表 2 可知，粉煤灰中^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的放射

表 2　不同粉煤灰/粉煤灰砖放射性核素活度及粉煤灰砖富集系数

Table 2　Different fly ash/fly ash brick radionuclide activities and fly ash brick enrichment coefficients

粉煤灰编号	粉煤灰掺比/%	粉煤灰中放射性核素比活度/(Bq · kg^{-1})				粉煤灰砖中放射性核素比活度/(Bq · kg^{-1})				富集系数 k_2			
		^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
X1	68.2	171	143	177	250	111	92.9	122	165	0.65	0.65	0.69	0.66
X2	72.2	148	94.6	142	425	108	67.2	126	374	0.73	0.71	0.89	0.88
X3	72.2	93.3	106	75.6	387	70.0	75.6	59.7	302	0.75	0.71	0.79	0.78
X4	72.2	352	168	355	216	243	121	277	171	0.69	0.72	0.78	0.79
X5	72.2	160	135	177	420	107	116	140	298	0.67	0.86	0.79	0.71
X6	73.3	154	75.4	178	504	114	64.1	137	418	0.74	0.85	0.77	0.83
X7	73.3	73.3	70.1	77.9	304	60.1	59.6	74	246	0.82	0.85	0.95	0.81
X8	75.0	279	157	272	193	215	119	204	201	0.77	0.76	0.75	1.04
X9	75.0	524	93.6	531	384	430	62.7	499	334	0.82	0.67	0.94	0.87
X10	75.0	178	100	160	395	141	71.3	134	296	0.79	0.71	0.84	0.75
X11	76.1	628	93.3	628	446	477	70.9	490	330	0.76	0.76	0.78	0.74
X12	76.1	370	93.0	429	528	285	65.1	343	375	0.77	0.70	0.80	0.71
X13	76.1	355	67.9	350	290	266	64.5	301	261	0.75	0.95	0.86	0.90
最大值	76.1	628	168	628	528	477	121	499	418	0.82	0.95	0.95	1.04
最小值	68.2	73.3	67.9	75.6	193	60.1	59.6	59.7	165	0.65	0.65	0.69	0.66
均值	73.6	268.1	107.5	273.2	364.7	202.1	80.8	223.6	290.1	0.75	0.76	0.82	0.81

性比活度分别为 73.3～628、67.9～168、75.6～628、193.3～528 Bq/kg，根据试验模拟出的粉煤灰砖中^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的放射性比活度分别为 60.1～477、59.6～121、59.7～499、165～418 Bq/kg。^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 富集系数 k_2 分别为 0.65～0.82、0.65～0.95、0.69～0.95、0.66～1.04，说明从粉煤灰到粉煤灰砖放射性核素的富集效果变弱。主要原因在于，粉煤灰砖的制造过程中需要加入石灰、脱硫石膏等其它物质，而石灰、脱硫石膏等物质的放射性核素含量低，整体质量的上升，核素含量的持平，导致粉煤灰砖对放射性核素的富集变弱。

由图 2 可知，该地区在当前主要工艺下，将粉煤灰加工成蒸压粉煤灰砖，其放射性核素的转移系数与粉煤灰掺比基本一致，说明^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 转移系数的主要影响因素为粉煤灰掺比。同时根据季晓檬等研究结果[21-22]，粉煤灰掺加量达 70%时，粉煤灰砖的抗压强度达到 11.2 MPa，能够满足《粉煤灰砖》(JC 239—2001)“粉煤灰砖抗压强度需≥8 MPa”的强度要求。本次研究粉煤灰砖掺比为 68.2%～76.1%，为满足粉煤灰砖的抗压强度要求和减少放射性危害，以粉煤灰掺比 70%，即富集系数 0.7，作为从粉煤灰到粉煤灰砖过程放射性核素转移系数的推荐值。

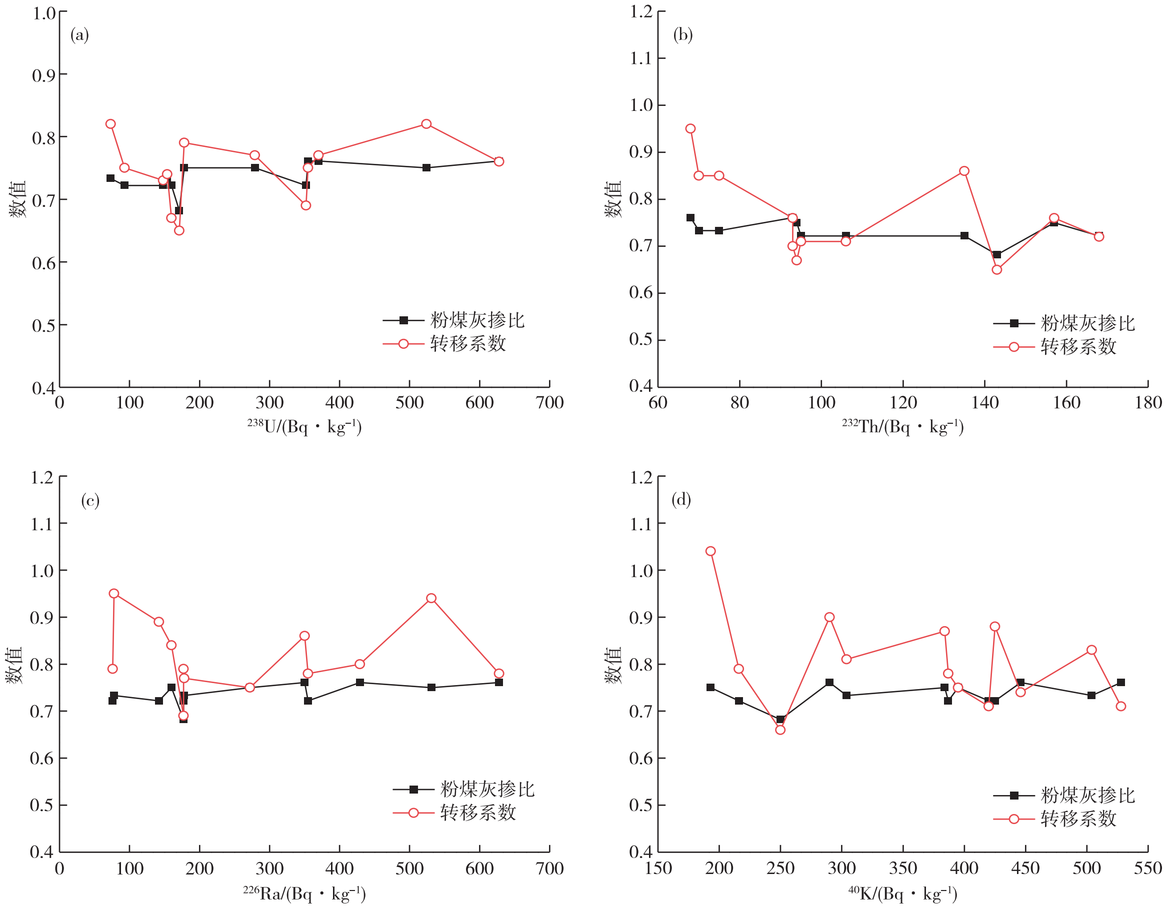

图 2　不同放射性核素粉煤灰至粉煤灰砖富集比

Fig. 2　Enrichment ratios of fly ash to fly ash brick for different radionuclides

3.3　粉煤灰砖放射性安全评估

3.3.1　粉煤灰砖放射性安全评估

粉煤灰砖安全评估结果显示(见表 3)，该地区 13 类粉煤灰砖样品的内照射指数(I_{Ra})在 0.3～2.5；外照射指数(I_γ)在 0.5～1.7。其中，粉煤灰砖 X-1、X-2、X-3、X-5、X-6、X-7、X-8、X-10 的 $I_{Ra}\leqslant1.0$，$I_\gamma\leqslant1.3$，满足 A 类装修材料标准，其产销与使用范围不受限制；除 X-8 外，符合 A 类装修材料标准的粉煤灰砖也可作为建筑主体材料($I_{Ra}\leqslant1.0$ 且 $I_\gamma\leqslant1.0$)。粉煤灰砖 X-4、X-9、X-11、X-12、X-13 的 $I_{Ra}>1.3$，$I_\gamma\leqslant2.8$，仅满足 C 类装修材料标准，只可用于建筑物的外饰面以及室外其他用途，不能作为建筑主体材料。总体而言，该地区 13 类粉煤灰砖中，有 8 类粉煤灰砖满足 A 类标准，合格率达

61.5%,可以作为安全建材使用,但有5类粉煤灰砖不满足A类标准,不合格率为38.5%,需要对此类粉煤灰砖放射性进行监控[23],避免此类放射性超标的粉煤灰砖应用到居室建筑中,威胁到居民生命安全。

表3 某地区粉煤灰砖安全评估结果

Table 3 Safety assessment results of fly ash bricks in a certain area

粉煤灰砖编号	I_{Ra}	I_{γ}	评估等级
X-1	0.6	0.7	A
X-2	0.6	0.7	A
X-3	0.3	0.5	A
X-4	1.4	1.3	C
X-5	0.7	0.9	A
X-6	0.7	0.7	A
X-7	0.4	0.5	A
X-8	1.0	1.1	A
X-9	2.5	1.7	C
X-10	0.7	0.7	A
X-11	2.5	1.7	C
X-12	1.7	1.3	C
X-13	1.5	1.1	C

3.3.2 粉煤灰砖放射性水平评价

13类粉煤灰砖的γ辐射空气吸收剂量率和年有效剂量计算结果如表4所示。计算结果表明,该地区粉煤灰砖产生的γ辐射空气吸收剂量率在82~270 nGy/h,均值为161 nGy/h,13类粉煤灰砖的γ辐射空气吸收剂量率都超过全国和世界水平,平均水平基本为全国和世界水平的2倍,说明该地区粉煤灰砖中放射性核素含量较高。该地区粉煤灰砖对人体的年有效剂量为0.36~1.19 mSv/a,平均值为0.71 mSv/a,有6类粉煤灰砖(X-1、X-2、X-3、X-6、X-7、X-10)的年有效剂量小于全国年有效剂量推荐背景值,作为建筑材料不会对人体造成辐射损伤;8类粉煤灰砖(X-4、X-5、X-8、X-9、X-11、X-12、X-13)的年有效剂量大于全国推荐背景值,可能会对人体造成辐射潜在威胁,需要对其制作工艺进行优化,使用用途进行监测评估。年有效剂量评价结果与粉煤灰砖放射性安全评估结果基本一致,两种方法可相互验证。

表4 放射性核素的γ辐射吸收剂量率和年有效剂量

Table 4 Radionuclide gamma radiation absorbed dose rates and annual effective dose rates

样品	γ辐射吸收剂量率/($nGy \cdot a^{-1}$)	年有效剂量/mSv
X-1	121	0.53
X-2	114	0.50
X-3	86	0.39
X-4	206	0.91
X-5	149	0.66
X-6	119	0.52
X-7	82	0.36
X-8	175	0.77
X-9	269	1.19
X-10	117	0.52
X-11	270	1.19
X-12	206	0.91
X-13	182	0.81
范围	82~270	0.36~1.19
平均值	161	0.71
全国推荐值[24]	81.50	0.595
国际推荐背景值[25]	80.00	0.460

4 结论

1)4种放射性核素(^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K)在粉煤灰生产利用过程中的富集系数为2.15~3.79,从原煤到粉煤灰放射性核素发生富集,粉煤灰富集能力强于原煤。在粉煤灰到粉煤灰砖过程中,^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K的富集系数为0.65~1.04,富集效果发生弱化。整个转移过程放射性核素基本没有发生损失,富集能力的增强与减弱主要在于整体质量的变化。综合考虑辐射安全问题,确定出该地区放射性核素在煤矿到粉煤灰过程中的转移系数为3.79,在粉煤灰到粉煤灰砖过程中的转移系数为0.7。

2)从原煤到粉煤灰过程中,放射性核素转移系数只与燃煤压缩比有关,并且放射性水平的高低并不影响放射性核素的转移;从粉煤灰到粉煤灰砖过程中,放射性核素转移系数只与粉煤灰的掺比有关。

3)粉煤灰放射性评价结果显示,该地区在当前主要的制作工艺下,产出的粉煤灰砖61.5%达到A类标准,可以不限制其产销与使用,剩下38.5%的粉煤灰砖需要对其使用以及后续生产进行监控;13类粉煤灰砖的放射性水平较高,但从年有效剂量来看,有6类粉煤灰砖的年有效剂量未超过全国推荐

背景值,可以用作安全建材使用;剩余 8 类粉煤灰砖的生产、使用需要进行进一步的优化与监督。

参考文献

[1] 陈志诚,王浙锋,傅雄.燃煤电厂粉煤灰资源化利用的思考[J].绿色环保建材,2021(8):60-61.
CHEN Z C,WANG Z F,FU X. Thoughts on utilization of coal fly ash in coal-fired power plants[J]. Green Environmental Protection Building Materials,2021(8):60-61.

[2] 杨昊睿,宁树正,丁恋,等.新时期我国煤炭产业现状及对策研究[J].中国煤炭地质,2021,33(增刊 1):44-48.
YANG H R,NING X Z,DING L,et al. Chinese coal industry status quo in new period and countermeasures study[J]. Coal Geology of China,2021,33(S1):44-48.

[3] 姜子英,张燕齐,陈晓秋,等.中国燃煤发电排放的放射性环境影响评价研究[J].辐射防护,2018,38(3):177-185.
JIANG Z Y,ZHANG Y Q,CHEN X Q,et al. Radiological impacts assessment of coal-fired power plants in China[J]. Radiation Protection,2018,38(3):177-185.

[4] 张立,王强.徐州煤和煤灰的放射性调查研究[J].能源技术与管理,2012(5):116-117.
ZHANG L,WANG Q. Investigation on radioactivity of Xuzhou coal and ash[J]. Energy Technology and Management,2012(5):116-117.

[5] 杨俊诚,朱永懿,陈景坚,等.粉煤灰的农业利用及其环境放射性污染评价[J].核农学报,1999(5):299-304.
YANG J C,ZHU Y Y,CHEN J J,et al. Agricultural application of coal ash and its radiactive contamination to environment[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,1999(5):299-304.

[6] 洪丽华,许琳,曹阳.粉煤灰与核污染建筑[J].辽宁建材,1998(1):30-32.
HONG L H,XU L,CAO Y. Fly ash and nuclear contaminated buildings[J]. Liaoning Building Materials,1998(1):30-32.

[7] 贾晓丹,卢新卫.宝鸡燃煤电厂原煤及粉煤灰中天然放射性水平[J].辐射防护,2006(5):310-313.
JIA X D,LU X W. Natural radioactivity level in coal and ash collected from Baoji coal-fired power plant[J]. Radiation Protection,2006(5):310-313.

[8] 欧频.燃煤电厂放射性产生及防治措施[J].技术与市场,2015,22(8):240.
OU P. Radiation generation and prevention measures in coal-fired power plants[J]. Technology and Market,2015,22(8):240.

[9] 刘承伟,陈益兰,纪涛,等.单纯形格子法研究掺渣建材产品放射性[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(3):478-482.
LIU C W,CHEN Y L,JI T,et al. Application of simplex grid-point design method in the investigation of radioactivity level of building material products mixed with slag[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2010,35(3):478-482.

[10] 陈亚尊.居室中放射性的来源与防治[J].中国科技信息,2005(9):107.
CHEN Y Z. The source of radioactivity in the bedroom and prevention and cure[J]. China Science and Technology Information,2005(9):107.

[11] 张琴.北京市使用天然石材放射性水平调查及风险评估[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
ZHANG Q. Investigation and risk assessment of radioactive level of natural stone in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences,2014.

[12] 王洪霞,许学健.居室中的放射性污染及其防治[J].天津科技,2009,36(3):24-25.
WANG H X,XU X J. Radioactive pollution in living room and its prevention and cure[J]. Tianjin Science & Technology,2009,36(3):24-25.

[13] 李海英.浅谈南雄市居室环境的放射性污染[J].广东科技,2010,19(2):45.
LI H Y. Discussion on the radioactive pollution of living room environment in Nanxiong city[J]. 2010,19(2):45.

[14] 罗林,钱志宽,甘甜,等.贵州典型电厂粉煤灰的放射性安全评估[J].地球与环境,2019,47(5):722-727.
LUO L,QIAN Z K,GAN T,et al. Radioactive safety assessment of the fly ash from typical power plants in Guizhou[J]. Earth and Environment,2019,47(5):722-727.

[15] 路建超,王少杰,杨旭,等.宝鸡市工业废渣放射性水平[J].中华放射医学与防护杂志,2000(1):71-72.
LU J C,WANG S J,YANG X,et al. Radioactive level of industrial waste residue in Baoji city[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection,2000(1):71-72.

[16] 过惠平,邓福威,周春林.西安某热电厂粉煤灰的天然放射性水平测量[J].辐射防护,2008(1):47-50.
GUO H P,DENG F W,ZHOU C L. Measurement of natural radioactivity level of ash from certain thermo electricity plant in Xi'an[J]. Radiation Protection,2008(1):47-50.

[17] ALMAHAYNI T,VANHOUDT N. Does leaching of naturally occurring radionuclides from roadway

pavements stabilised with coal fly ash have negative impacts on groundwater quality and human health? [J]. Journal of Hazardous Materials,2018,349:128-134.

[18] 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.
YAO H Y,WANG X G,SUN Y M,et al. Investigation of natural radioactivity level in coal, coal cinder and coal ash of coal-fired power plants in Zhejiang[J]. Energy Environmental Protection,2020,34(5):65-70.

[19] 陈志东.钽铌矿冶炼废渣的资源化利用[J].有色金属(冶炼部分),2021(11):122-127.
CHEN Z D. Resource utilization of Ta-Nb ore smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(11):122-127.

[20] 刘媛媛,张春艳,魏强林,等.铀尾矿库区稻田土中放射性核素的空间分布和放射性水平评价[J].生态毒理学报,2018,13(5):305-312.
LIU Y Y, ZHANG C Y, WEI Q L, et al. Spatial distribution and radiation evaluation of the radionuclides in paddy soil of the uranium tailings area[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2018,13(5):305-312.

[21] 季晓檬,李正昊.粉煤灰砖生产工艺技术综述[J].中国建材科技,2013,22(1):58-61.
LI X M,LI Z H. The production technology of fly ash brick summary[J]. China Building Materials Science & Technology,2013,22(1):58-61.

[22] 饶玲丽.粉煤灰理化性质分析及粉煤灰透水砖的制备研究[D].贵阳:贵州大学,2006.
RAO L L. The research of the fly-ash physicochemical property and the fly-ash preparation permeable bricks[D]. Guiyang:Guizhou University,2006.

[23] 余晓阳,韦亮光,张世高.广西建筑主体材料放射性调查与研究[J].广西大学学报(自然科学版),2008,33(增刊1):46-49.
YU X Y, WEI L G, ZHANG S G. Investigation on radiation from main building materials in Guangxi[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2008,33(S1):46-49.

[24] 潘自强,郭明强,崔广志,等.中国天然辐射本底水平和居民剂量估算[J].辐射防护,1992(4):251-259.
PAN Z Q, GUO M Q, CUI G Z, et al. Estimation natural radiation background level and population dose estimation in China[J]. Radiation Protection,1992(4):251-259.

[25] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. annex A: Exposure from natural sources of radiation[R]. New York:United Nations,1993:4.