

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.04.015

• 辐射监测/论著 •

矿渣综合利用于建材所致居民辐射影响

伏亚萍¹, 宋毅倩², 孙朋¹, 陈凌¹

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 山东省核与辐射安全监测中心, 山东 济南 250117

摘要: **目的** 本研究拟分析矿渣及其建材的放射性水平, 估算矿渣综合利用于建材所致居民的有效剂量, 为合理利用矿渣提供依据。 **方法** 收集 2005—2016 年矿渣产生量和综合利用于建材量的资料, 以及不同时期、不同地区的矿渣及其建材放射性水平调查与检测的资料等。采用混凝土结构房间模型、室内建材中²²⁶Ra 比活度推算平衡当量氡浓度的模式分别估算矿渣综合利用于建材所致居民的外照射和内照射剂量, 进而估算居民年附加有效剂量和集体剂量。 **结果** 矿渣中²²⁶Ra 和²³²Th 的含量相对较高, ⁴⁰K 含量较低, 矿渣水泥中的放射性核素含量较矿渣中明显降低; 矿渣用于混凝土和水泥混合材料相对普通水泥住房导致公众附加年有效剂量分别为 0.40 mSv · a⁻¹ 和 0.20 mSv · a⁻¹, 矿渣用于建材所致公众年附加集体剂量和 50 年集体剂量分别为 3.87 × 10³~1.84 × 10⁴ 人 · Sv 和 1.94 × 10⁵~9.20 × 10⁵ 人 · Sv。 **结论** 矿渣综合利用于建材使居民附加有效剂量有所增加, 利用某些矿渣生产建材需要引起一定的重视; 此外, 矿渣综合利用于建材的方式、利用量、建材使用量等对其所致居民年附加有效剂量的影响也需关注。

关键词: 矿渣; 综合利用; 辐射水平; 辐射影响; 剂量估算

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)04-0463-07

Radiation effects on residents caused by comprehensive utilization of slag in building materials

FU Yaping¹, SONG Yiqian², SUN Peng¹, CHEN Ling¹

1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China; 2. Shandong Nuclear and Radiation Safety Monitoring Center, Ji'nan 250117 China

Abstract: **Objective** This study intends to analyze the radioactivity level of slag and its building materials, estimate the effective dose of the residents caused by the comprehensive utilization of slag in building materials, and provide basis for rational utilization of slag. **Methods** Data of slag production and its comprehensive utilization in building materials, radioactive level investigation and detection of slag and building materials in different periods and regions were collected from 2005 to 2016. Using the room model of concrete structure and the model of calculating equilibrium equivalent radon concentration with the specific activity of ²²⁶Ra in indoor building materials, the external and internal radiation doses of residents caused by comprehensive utilization of slag for building materials were estimated respectively, and then the annual additional effective dose and collective dose of residents were estimated. **Results** The contents of ²²⁶Ra and ²³²Th in the slag were relatively high, while the contents of ⁴⁰K were relatively low. The radionuclide content in slag cement decreased significantly. The annual additional effective doses of slag used in concrete and cement mixture relative to ordinary cement were 0.40 mSv · a⁻¹ and 0.20 mSv · a⁻¹ respectively. The annual additional collective dose and 50-year collective dose caused by slag used in building materials were 3.87 × 10³~1.84 × 10⁴ man · Sv and 1.94 × 10⁵~9.20 × 10⁵ man · Sv respectively. **Conclusion** The comprehensive utilization of slag in building materials increases the additional effective dose of residents, so the use of some slag in building materials needs to be paid more attention to. In addition, the influence of comprehensive utilization of slag in building materials, such as the way, the amount of slag and the amount of building materials, on the annual additional effective dose of residents caused should also be paid attention to.

Keywords: Slag; Utilization; Radioactive Level; Radiation Effects; Dose Estimation**Corresponding author:** SUN Peng, E-mail: sunpeng_hp@ciae.ac.cn

钢铁冶炼过程中会产生大量的高炉矿渣,目前综合利用途径主要为生产矿渣微粉和做水泥混合材,以实现改善建筑材料性能和资源循环利用。由于矿渣中含有一定量的放射性核素,综合利用后将导致建筑材料放射水平升高,可能给居民带来额外剂量。但目前针对矿渣基建材辐射影响的研究较少,矿渣综合利用对居民的辐射影响程度及变化尚不明确,难于规范和指导矿渣综合利用于建材的方式和用量。因此,本研究在对矿渣及掺矿渣建材放射性水平调查和研究分析的基础上,估算矿渣综合利用于建材所致的居民剂量,探讨矿渣综合利用于建材的方式和掺加量对居民剂量的影响,为科学地利用矿渣生产建筑材料提供依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源与分析 本研究主要通过专业数据库检索正式发表的论文文献获得基础数据资料。

收集统计 2005—2016 年矿渣产生量、综合利用于建材的相关数据,分析矿渣综合利用方式及其利用量的发展趋势,作为居民集体剂量估算的数据基础。

收集统计不同时期的全国或者各地矿渣及其建筑材料中镭(^{226}Ra)、钍(^{232}Th)和钾(^{40}K)等天然放射性核素含量等数据资料,分析数据资料的代表性,剔除重合的数据,确保数据资料具有一定时间长度和地区分布广度,得到矿渣及矿渣水泥中天然放射性核素的平均含量,以此估算矿渣综合利用于建材所致居民的剂量。

1.2 居民剂量估算方法

1.2.1 γ 外照射年有效剂量估算 矿渣综合利用途径主要是生产矿渣微粉和矿渣水泥,因此,外照射剂量估算采用混凝土结构房间模型的剂量转换关系^[1],见式 1)。

$$D_{in} = 0.92C_{Ra} + 1.1C_{Th} + 0.080C_K \quad (1)$$

式中: D_{in} 为辐射剂量率, nGy/h; C_{Ra} 、 C_{Th} 、 C_K 分别为 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的放射性活度浓度, Bq/kg。

室内 γ 外照射的年有效剂量 $H_{E外}$ ^[2], 由下式计算:

$$H_{E外} = 0.7 \times 0.8 \times 8760 \times 10^{-6} \times D_{in} \quad (2)$$

式中: $H_{E外}$ 为外照射年有效剂量, mSv/a; D_{in} 为室内 γ 辐射剂量率, nGy/h; 系数 0.7、0.8、8760 分别为 γ 射线空气吸收剂量率转换为人体吸收剂量率的转换系数(Sv/Gy)、居住因子和全年的小时数。

1.2.2 内照射剂量估算 室内氡(^{222}Rn)射气来源于地层、建材、天然气及水源。其浓度不仅取决于这些材料的含 ^{226}Ra 的量、物理性质(如孔隙率、孔隙大小等)、环境条件(温度、湿度、气压等)和时间因素(季节、昼夜),而且决定于室内的通风率。

采用 Krisihk 等提出的室内建材中 ^{226}Ra 的比活度推算平衡当量氡浓度模式^[3]。

$$C_{Rn}^e = F \cdot C_{Ra} \quad (3)$$

$$C_{Rn} = \frac{Q \cdot S}{\lambda_v \cdot V} \times 3.6 \times 10^3 \quad (4)$$

式中: C_{Rn} 室内氡浓度, Bq/m³; F 为氡子体的平衡因子,取 0.485^[4-6]; Q 为建材中单位面积上氡的析出率, Bq/(m²·s); S 为室内墙、地板、天花板的表面积, m²; V 为房间空间的体积, m³,取 $S/V = 1.67$ (房间尺寸 6 m×3 m×3 m,实际需根据房屋结构特点选取参数计算); λ_v 为室内通风率,可取 0.5/h^[6-7]。

建材中氡的析出率与建材中 ^{226}Ra 比活度,建材的密度、厚度及材料的性质有关。根据文献^[8],室内氡的析出率可用下式表示:

$$Q = C_{Ra} \cdot \eta \cdot \lambda \cdot d \cdot \rho \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5)$$

式中: C_{Ra} 为建材中 ^{226}Ra 的放射性活度浓度, Bq/kg; λ 为氡的衰变常数, 2.1×10^{-6} /s; d 为墙的半厚度,取 0.12 m; η 和 ρ 分别为材料的氡释放系数和密度,混凝土分别取 10% 和 2.2×10^3 kg/m³^[9-10]。

将有关参数代入平衡当量氡浓度公式,则有:

$$C_{Rn}^e = 0.32C_{Ra} \quad (6)$$

根据室内氡子体浓度与内照射年有效剂量转换因子为 0.061(mSv/a)/(Bq/m³),则室内氡子体内照射年有效剂量 $H_{内}$ 计算公式为:

$$H_{内} = 0.061C_{Rn}^e = 1.97 \times 10^{-2}C_{Ra} \quad (7)$$

1.2.3 普通水泥的辐射照射剂量 根据文献^[11],水泥的 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 比活度分别为 50、32 和 140 Bq/kg,按照上述居民有效剂量估算方法,普通水泥作混凝土原料所致居民年有效剂量为 1.2 mSv/a。

1.2.4 掺矿渣建材所致居民附加有效剂量估算 掺矿渣建材所致居民附加年有效剂量为室内 γ 外照射剂量和内照射剂量之和,然后减去普通水泥作混凝土原料所致居民年有效剂量 H_0 , 见公式 8)。

$$H_{E附} = (H_{E外} + H_{E内}) - H_0 \quad (8)$$

新增居民附加集体剂量估算见式 9), 假设房屋使用寿命为 50 年, n 为每年新增矿渣建材所建居室的居民数。

$$\Delta H_n = H_{E\text{附}} \cdot n \cdot 50 \quad (9)$$

式中: ΔH_n 为居民附加集体剂量, (人 · Sv); $H_{E\text{附}}$ 为居民附加年有效剂量, mSv/a; n 为新增居民数量, 人; 50, 房屋使用寿命假设为 50 年。

2 结 果

2.1 矿渣产生与综合利用 伴随着经济发展与技术进步, 矿渣产生量和用于建材的量均逐年增长, 见表 1^[12-14]。2013 年前, 矿渣产生量每年以 10% 左右的速度增长, 之后产生量则略有下降; 而矿渣综合利用用于建材的量则逐年增加, 利用率由 60% 提高到 80% 左右。由此可见, 矿渣建材的产量越来越大, 使用也愈发广泛。

表 1 矿渣产生和用于建材的量

Table 1 Amount of slag produced and used for building materials

年份/年	2005	2006	2007	2008	2009	2010
产生量/亿t	1.15	1.41	1.50	1.60	1.85	2.01
用于建材量/亿t	0.71	0.88	0.99	1.06	1.35	1.45
年份/年	2011	2012	2013	2014	2015	2016
产生量/亿t	2.14	2.21	2.41	2.42	2.35	2.36
用于建材量/亿t	1.59	1.64	1.88	1.92	1.86	1.86

2.2 矿渣及其建材放射性水平 通过分析收集不同时期全国和各地关于矿渣及矿渣水泥的放射性调查研究文献资料, 得到全国矿渣及矿渣水泥中天然放射性核素的含量平均水平。见表 2 和表 3。

由表 2 和表 3 可知, 矿渣中 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的含量

表 2 矿渣中放射性核素含量

Table 2 The radionuclide content in slag

文献	核素种类/(Bq/kg)			备注
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
[9]	108	32.9	90.3	1982—1984年(29省市)
[15]	82.6	33.5	105.1	1987年(辽、滇、苏、湘、黔)
[16]	101.3	276.8	132.6	2007年(全国)
[8,17-27]	161.9	162.3	204.0	1984—2010年(辽、蒙、新、鲁、浙、湘、鄂、桂)
[28]	78	231	139	首钢、鞍钢、攀钢、马钢、本钢、包钢、太钢、宝钢
平均	106.4	147.3	134.2	

表 3 矿渣水泥中放射性核素含量

Table 3 The radionuclide content in slag cement

文献	核素种类/(Bq/kg)			备注
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
[9]	67.7	38.5	86.6	1982—1984年(29省市)
[15]	74.9	35.1	77.5	1987年(全国)
[29]	59.4	36.0	185.1	1991年(全国)
[30]	59.2	34.6	219.3	1993年(沪、赣、浙、苏、鲁)
[20,22,26,31-40]	89.1	59.8	245.6	1984—2012年(浙、鲁、鄂、豫、冀、渝、粤、滇、苏)
平均	70.1	40.8	162.8	
推荐废渣水泥典型值	110	50	300	
普通水泥典型值	50	30	140	

相对较高, ^{40}K 含量较低, 平均分别为 106.4 Bq/kg、147.3 Bq/kg 和 134.2 Bq/kg; 相较于矿渣, 矿渣水泥中的放射性核素含量明显降低, 分别为 ^{226}Ra 70.1 Bq/kg、 ^{232}Th 40.8 Bq/kg 和 ^{40}K 162.8 Bq/kg, 可能由于水泥生产中添加其他原料的稀释作用所致; 矿渣水泥中放射性核素 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的含量平均值低于推荐废渣水泥典型值, 但高于普通水泥典型值。

与我国 2011—2015 年环境天然辐射水平监测结果中的土壤中天然放射性核素活度浓度比较(^{232}Th 平均为 52~55 Bq/kg, ^{226}Ra 平均为 37~42 Bq/kg)^[41], 矿渣和矿渣水泥中 ^{226}Ra 的平均含量相对较高, 矿渣中 ^{232}Th 的含量相对较高, 但矿渣水泥 ^{232}Th 的基本与之处于同一水平。

2.3 矿渣综合利用与建材所致居民剂量

2.3.1 居民年附加有效剂量 按照《现代混凝土配合比设计手册》^[42] 推荐普通混凝土常用配合比参考 C40 掺加 22%(w/w%) 的水泥, 以普通水泥作为对照, 利用上述居民年附加有效剂量估算模式计算由矿渣综合利用用于建材所致居民年附加有效剂量。矿渣用于混凝土掺合料和矿渣水泥所致居民年附加有效剂量见表 4。

表 4 矿渣综合利用用于建材所致居民年有效剂量

Table 4 The annual additional effective doses of residents caused by comprehensive utilization of slag in building materials

项目方式	$H_{\text{外}}$	$H_{\text{内}}$	$H_{E\text{附加}}$
混凝土掺合料	0.7	0.9	0.4
矿渣水泥	0.6	0.8	0.2
推荐废渣水泥典型值	0.6	0.9	0.4
普通水泥典型值	0.5	0.7	0.0

单位:
mSv/a

我国矿渣用于混凝土掺合料和水泥混合材相对于普通水泥住房导致公众增加的年有效剂量分别为 $0.40 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.20 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$, 矿渣直接用于混凝土掺合料所致居民年附加有效剂量要远高于矿渣水泥, 这主要由于矿渣可直接大比例用作混凝土掺合料, 而在水泥生产中则不允许大比例掺加矿渣, 因此, 2 种综合利用方式所致居民年有效剂量差别较大。与推荐废渣水泥所致的居民年附加有效剂量相比, 矿渣直接用于混凝土所致居民有效剂量与其相当, 而矿渣水泥所致居民年附加有效剂量远低于推荐废渣水泥。此外, 矿渣 2 种综合利用方式所致居民附加年有效剂量分别约为我国环境中天然辐射照射所致公众人群年均有效剂量 ($3.1 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$, 2009 年)^[43] 的 12.9% 和 6.5%, 可见矿渣综合利用用于建材所致居民年有效剂量增加较为明显, 需要予以重视。

2.3.2 居民集体剂量 根据《建筑施工手册》^[44] 中民用建筑工程主要材料消耗参考指标, 每平米高层住宅消耗水泥 260 kg 左右, 以此分别计算利用矿渣粉生产混凝土和矿渣水泥可建造住宅面积, 进而按照现阶段我国人均居住面积 32.9 m^2 计算入住人口; 取房屋居住期为 50 年, 按照居民集体有效剂量计算方法, 得到不同年度的集体有效剂量值, 见表 5。

表 5 矿渣用于建材导致公众增加的集体有效剂量

Table 5 The additional collective doses caused by slag used in building materials

年度/年	用于住宅的量 /万吨	可住人数 /万人	年附加集体剂量 /(人·Sv/a)	50年附加集体剂量 /(人·Sv)
2005	1775	281.3	3.87×10^3	1.94×10^5
2006	2200	344.3	5.06×10^3	2.53×10^5
2007	2475	382.3	5.99×10^3	2.99×10^5
2008	2650	404.1	6.74×10^3	3.37×10^5
2009	3375	507.9	8.98×10^3	4.49×10^5
2010	3625	536.4	1.02×10^4	5.09×10^5
2011	3975	554.3	1.32×10^4	6.61×10^5
2012	4100	536.8	1.57×10^4	7.86×10^5
2013	4700	615.4	1.82×10^4	9.01×10^5
2014	4800	628.5	1.84×10^4	9.20×10^5
2015	4650	608.8	1.78×10^4	8.92×10^5
2016	4650	608.8	1.78×10^4	8.92×10^5
合计	42975	6008.9	1.42×10^5	7.09×10^6

我国 2005—2016 年期间, 矿渣用于建材所致公众年附加集体剂量和 50 年集体剂量分别为 $3.87 \times$

$10^3 \sim 1.84 \times 10^4$ 人·Sv 和 $1.94 \times 10^5 \sim 9.20 \times 10^5$ 人·Sv。随着矿渣综合利用率的提高, 矿渣综合利用用于建材所致公众年附加集体剂量和 50 年附加集体剂量均明显升高, 其与矿渣产生量和综合利用量变化趋势一致, 在 2013 年后虽略有下降, 但趋于稳定。

3 讨论

随着经济发展速度调整, 矿渣产生量和综合利用用于建材的量在快速增长后, 虽略有下降但呈现趋于稳定的态势。由于经济发展规模已处于较高的水平, 而科技创新水平在不断提高, 矿渣产生量和综合利用用于建材的量将保持较高水平, 尤其是矿渣综合利用用于建材的量或将稳中有升。

矿渣和矿渣水泥放射性核素含量高于普通水泥典型值和土壤中天然放射性核素含量, 矿渣中 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的含量相对较高; 矿渣水泥中的放射性核素 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的含量低于矿渣, 因此矿渣综合利用用于建材所致居民年有效剂量增加较为明显, 同时矿渣的不同利用方式所致居民的附加年有效剂量相差较大。

矿渣产生量和综合利用用于建材的量随着经济发展和技术进步而变化的态势, 直接影响了矿渣综合利用用于建材所致居民年附加集体剂量和 50 年集体剂量的变化, 2 者显示出较为一致的变化趋势。由此, 矿渣综合利用用于建材所致居民附加集体剂量将长期保持当前水平, 亦或稳定增加。

调查发现, 矿渣综合利用用于建材的放射性指标绝大多数低于有关国家标准限值^[45], 所致居民附加有效剂量也属于低剂量照射。低剂量 γ 射线对人外周血 miRNA 的表达影响实验显示可使某些 miRNA 发生显著变化, 可能通过参与调控 MARK、RAS、P53、RIG-I 等信号通路影响细胞增殖、凋亡、DNA 损伤修复及免疫调控^[46]; 辐射流行病学及临床研究表明, 低剂量电离辐射可诱发癌症, 以及先天异常、心脑血管疾病、白内障等非癌疾病; 亦可激发有益的健康效应^[47]。虽然低剂量辐射造成癌症或遗传病的概率很低, 某些矿渣使用也应引起注意, 因此, 矿渣综合利用用于建材使居民附加有效剂量有所增加需予以重视。为减少矿渣综合利用的辐射影响, 需要从矿渣的利用途径、利用方式、利用量、矿渣基建材应用途径及使用量等多方面进行综合控制, 未来也要加强放射性水平评价、健康风险评价方面的研究, 既要做到资源循环利用、发挥最大经济效益, 又可兼顾保护居民身心健康。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 伏亚萍负责提出设计研究思路、研究方案、实施研究过程, 数据调研、计算和分析等、及负责撰写、修订论文; 宋毅倩负责文献调研整理、数据收集整理、输入和计算, 参与撰写论文; 孙朋负责确定研究对象范围, 提出研究方向、设计论文框架、确定估算和评价方法, 修订和审核论文; 陈凌负责审核研究方向、设计研究方案和论文

参考文献

- [1] Radiation protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials[R]. 1999.
- [2] Kayakökü H, Karatepe Ş, Doğru M. Measurements of radioactivity and dose assessments in some building materials in Bitlis, Turkey[J]. *Appl Radiat Isot*, 2016, 115: 172-179. DOI: [10.1016/j.apradiso.2016.06.020](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.06.020).
- [3] 李瑞香. 建筑材料放射性限制标准的研究[J]. 原子能科学技术, 1986, 20 (5): 596-601.
Li RX. An approach to the exposure limit of natural radioactivity from building materials[J]. *At Energy Sci Technol*, 1986, 20 (5): 596-601.
- [4] 周连江, 王昕, 吕翔, 等. 室内外氡子体的平衡因子F[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988, 8 (4): 261-263.
Zhou LJ, Wang X, Lv X, et al. Equilibrium factor F of radon progeny in indoor and outdoor environment[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1988, 8 (4): 261-263.
- [5] 尚兵, 贺青华, 王作元, 等. 中国室内氡行动水平的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2003, 23 (6): 462-465. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2003.06.032](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2003.06.032).
Shang B, He QH, Wang ZY, et al. Studies of indoor action level of radon in China[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2003, 23 (6): 462-465. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2003.06.032](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2003.06.032).
- [6] Ren TS, Lin LQ, Chen ZP, et al. Indoor ^{222}Rn measurements in the region of Beijing, People's republic of China[J]. *Health Phys*, 1987, 53 (3): 219-225. DOI: [10.1097/00004032-198709000-00001](https://doi.org/10.1097/00004032-198709000-00001).
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法(GB/T7106—2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Classification and test methods of air tightness, water tightness and wind pressure resistance of building external doors and windows(GB/T7106 —2008)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [8] 王玉文, 库德热提, 高清志, 等. 新疆建筑材料的天然放射性水平[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001 (3): 224-226. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2001.03.041](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2001.03.041).
Wang YW, Ku DRT, Gao QZ, et al. Natural radioactivity level of building materials in Xinjiang[J]. *Chin J Radiat Mediat Prot*, 2001 (3): 224-226. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2001.03.041](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2001.03.041).
- [9] 孙性善, 周仲兴, 潜郁燕, 等. 建筑材料放射性限制量研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1986, 6 (5): 289-293.
Sun XS, Zhou ZX, Qian YY, et al. Study on radioactive limit of building materials[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1986, 6 (5): 289-293.
- [10] Lavi N, Steiner V, Alfassi ZB. Measurement of radon emanation in construction materials[J]. *Radiat Meas*, 2009, 44 (4): 396-400. DOI: [10.1016/j.radmeas.2009.04.009](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.04.009).
- [11] 张永贵. 我国典型建筑材料放射性水平调查分析及外照射剂量模式的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
Zhang YG. The investigation and analysis on radioactivity levels of typical building materials in China and the study on external exposure dose models[D]. Hengyang, China: University of South China, 2013.
- [12] 中国废钢铁应用协会冶金渣开发利用工作委员会. 2009-2016年钢铁渣产生量[J]. 中国废钢铁, 2017 (1): 47.
CAMU. Iron and steel slag production in 2009-2016[J]. *Iron & Steel Scrap of China*, 2017 (1): 47.
- [13] 中国废钢铁应用协会冶金渣开发利用工作委员会. 2012年钢铁渣综合利用基本情况[J]. 中国废钢铁, 2013 (1): 39-39.
CAMU. Basic situation of comprehensive utilization of steel slag in 2012[J]. *Iron & Steel Scrap of China*, 2013 (1): 39-39.
- [14] 秦玲玲, 晁浏宏, 房景燕. 我国钢铁渣综合利用现状及发展方向[J]. 四川冶金, 2013, 35 (3): 71-73. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5108.2013.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5108.2013.03.016).
Qin LL, Chao LH, Fang JY. The comprehensive utilization status and development direction of China's metallurgical solid wastes[J]. *Sichuan Metall*, 2013, 35 (3): 71-73. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5108.2013.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5108.2013.03.016).
- [15] 孙性善. 我国工业废渣建材的放射性水平[J]. 硅酸盐建筑制品, 1987, 15 (4): 24-27.
Sun XS. Radioactivity level of industrial waste building materials in China[J]. *Silicate Building Product*, 1987, 15 (4): 24-27.
- [16] 刘扬林. 工业废渣生产建筑材料放射性污染分析及危害控制建议[J]. 中国资源综合利用, 2007, 25 (1): 33-36. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9500.2007.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9500.2007.01.013).
Liu YL. Analyze the radiation pollution of recycle building materials and control of its harm[J]. *China Resour Compr Util*, 2007, 25 (1): 33-36. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9500.2007.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9500.2007.01.013).
- [17] 马俊杰, 韩寿岭. 辽宁省建材产品放射水平调查与评价[J]. 环境保护与循环经济, 1993, 13 (3): 68-70.
Ma JJ, Han SL. Investigation and evaluation of radioactivity level of building materials in Liaoning Province[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 1993, 13 (3): 68-70.
- [18] 张宝忠, 谢玉敏. 内蒙古自治区部分建筑材料天然放射性核素含量调查[J]. 内蒙古环境保护, 1996, 8 (4): 37-38.

- Zhang BZ, Xie YM. A survey of natural radioactive nuclide content in some building materials in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Inn Mong Environ Prot*, 1996, 8 (4): 37-38.
- [19] 宝文宏, 常瑞卿, 蔡隆九. 利用工业废渣生产建筑材料的放射性影响分析[J]. *包钢科技*, 2010, 36 (4): 76-79. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5438.2010.04.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5438.2010.04.026).
- Bao WH, Chang RQ, Cai LJ. Analysis on radiological effects of building materials produced with industrial residue[J]. *Sci Technol Baotou Steel Group Corp*, 2010, 36 (4): 76-79. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5438.2010.04.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5438.2010.04.026).
- [20] 刘志和, 朱晨, 卢霞, 等. 山东省建筑材料中天然放射性水平[J]. *中国辐射卫生*, 1996, 5 (4): 20-23.
- Liu ZH, Zhu C, Lu X, et al. Natural radioactivity level of building materials in Shandong Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 1996, 5 (4): 20-23.
- [21] 陈英民, 李福生, 许家昂, 等. 新型墙材用工业废渣中天然放射性核素分布研究[J]. *中国辐射卫生*, 2006, 15 (1): 20-22. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2006.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2006.01.009).
- Chen YM, Li FS, Xu JA, et al. Distribution of natural occurring radionuclide in some industries residue used in new type wall materials[J]. *Chin J Radiol Health*, 2006, 15 (1): 20-22. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2006.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2006.01.009).
- [22] 潜郁燕, 邵庆翔, 任玉翠, 等. 浙江建筑材料中天然放射性水平[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1984, 4 (4): 39-42. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1984.04.114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1984.04.114).
- Qian YY, Shao QX, Ren YC, et al. Natural radionuclide level of building materials in Zhejiang Province[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1984, 4 (4): 39-42. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1984.04.114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1984.04.114).
- [23] 唐耀远, 唐述林. 湖南省建筑用水泥的辐射安全评价[J]. *中国辐射卫生*, 2004, 13 (2): 128-129. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.025).
- Tang YY, Tang SL. Radiation safety evaluation of the cement for building in Hunan Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 2004, 13 (2): 128-129. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.025).
- [24] 陈益兰, 刘承伟, 唐婕, 等. 工艺因素对掺工业废渣的烧结建材产品放射性的影响[J]. *新型建筑材料*, 2009, 36 (5): 40-42. DOI: [10.3969/j.issn.1001-702X.2009.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-702X.2009.05.012).
- Chen YL, Liu CW, Tang J, et al. Effect of technology factors on the radiation of sintering products in building materials contained industrial waste slag[J]. *New Build Mater*, 2009, 36 (5): 40-42. DOI: [10.3969/j.issn.1001-702X.2009.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-702X.2009.05.012).
- [25] 赵时敏, 徐利亚, 林丹, 等. 福建省建筑材料天然放射性水平调查分析[J]. *海峡预防医学杂志*, 2002, 8 (3): 36-38. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2705.2002.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2705.2002.03.012).
- Zhao SM, Xu LY, Lin D, et al. Investigation on natural radioactivity level of building materials in Fujian, China[J]. *Strait J Prev Med*, 2002, 8 (3): 36-38. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2705.2002.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2705.2002.03.012).
- [26] 张述林, 罗启芳. 建筑材料用工业废渣的放射性水平及评价[J]. *同济医科大学学报*, 1999, 28 (2): 153-155. DOI: [10.3870/j.issn.1672-0741.1999.02.024](https://doi.org/10.3870/j.issn.1672-0741.1999.02.024).
- Zhang SL, Luo QF. Radioactive levels of industrial wastes used to make building materials and assessment[J]. *Acta Univ Med Tongji*, 1999, 28 (2): 153-155. DOI: [10.3870/j.issn.1672-0741.1999.02.024](https://doi.org/10.3870/j.issn.1672-0741.1999.02.024).
- [27] 胡秀兰. 武汉市建筑材料放射性水平调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1999, 19 (3): 222. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.03.032](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.03.032).
- Hu XL. Investigation on radioactive level of building materials in Wuhan[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1999, 19 (3): 222. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.03.032](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.03.032).
- [28] 李瑞香, 刘新华, 甘霖. 工业废渣天然放射性核素水平及综合利用评价[C]//中国核科技报告, 北京: 原子能出版社, 1994, 1-16.
- Li RX, Liu XH, Gan L. Determination of Natural Radionuclide Level in Industrial Waste Slags and Evaluation of Comprehensive Utilization[C]//China Nuclear Science & Technology Report, Beijing: China Atomic Energy Press, 1994, 1-16.
- [29] 刘如业, 李瑞香, 杨钦元, 等. 我国建筑材料的放射性水平与评价[J]. *中国公共卫生学报*, 1991, 10 (6): 340-342.
- Liu RY, Li RX, Yang QY, et al. Radioactive level and assessment of building materials[J]. *Chin J Public Health*, 1991, 10 (6): 340-342.
- [30] 吴锦海, 袁政安, 任礼华, 等. 我国部分省(市)建筑材料中的放射性水平[J]. *中国辐射卫生*, 1993, 2 (2): 62-63.
- Wu JH, Yuan ZA, Ren LH, et al. Radioactivity level of building materials in some provinces (cities) of China[J]. *Chin J Radiol Health*, 1993, 2 (2): 62-63.
- [31] 武丽, 秦文华, 王建华. 河南省工业废渣建筑材料放射性水平与剂量估算[J]. *中国辐射卫生*, 2003, 12 (3): 175-175, 177. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2003.03.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2003.03.023).
- Wu L, Qin WH, Wang JH. Radioactive level and dose evaluation of building materials made of industrial waste residue[J]. *Chin J Radiol Health*, 2003, 12 (3): 175-175, 177. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2003.03.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2003.03.023).
- [32] 杨彦文, 赵智慧, 张京战, 等. 河北省工业废渣建筑材料放射性水平与剂量估算[J]. *中国辐射卫生*, 2006, 15 (2): 212. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2006.02.049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2006.02.049).
- Yang YW, Zhao ZH, Zhang JZ, et al. Radioactive level and dose evaluation of the building materials made of industrial waste residue[J]. *Chin J Radiol Health*, 2006, 15 (2): 212. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2006.02.049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2006.02.049).
- [33] 张胤莲, 吴富荣. 重庆市建筑材料辐射水平与剂量估算[J]. *中国辐射卫生*, 1996, 5 (3): 166-167.
- Zhang YL, Wu FR. Radioactive level and dose estimation of construction materials made with industrial waste residue in Chongqing[J]. *Chin J Radiol Health*, 1996, 5 (3): 166-167.
- [34] 高兆华, 舒冬珍. 广东省建筑材料天然放射性水平与评价[J]. *中国辐射卫生*, 1994, 3 (3): 159-161.
- Gao ZH, Shu DZ. Natural radioactivity level and evaluation of

- building materials in Guangdong Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 1994, 3 (3): 159-161.
- [35] 张林, 胡灿云, 梁婷婷. 广州市建筑材料放射性核素含量与外照射剂量估算[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1999, 15 (5): 351-352. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.05.021](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.05.021).
- Zhang L, Hu CY, Liang TT. Estimation of radionuclide content and external radiation dose of building materials in Guangzhou[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1999, 15 (5): 351-352. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.05.021](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1999.05.021).
- [36] 徐文萍, 樊芳, 牟胜. 2009年云南省建筑材料放射性检测结果分析[J]. *职业与健康*, 2011, 27 (1): 77-78. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.01.003](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.01.003).
- Xu WP, Fan F, Mou S. Analysis on detection result of radioactivity of building materials in Yunnan Province in 2009[J]. *Occup Heal*, 2011, 27 (1): 77-78. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.01.003](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.01.003).
- [37] 庞建明, 武国亮, 徐文萍, 等. 云南省建筑材料放射性水平分析[J]. *中国辐射卫生*, 2010, 19 (2): 169-170. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.02.002](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.02.002).
- Pang JM, Wu GL, Xu WP, et al. Analysis on radioactive level of building materials in Yunnan Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 2010, 19 (2): 169-170. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.02.002](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.02.002).
- [38] 胡培, 熊菊英, 杨璐, 等. 云南省某些建筑材料放射性水平[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1997, 17 (4): 279-280. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1997.04.125](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1997.04.125).
- Hu P, Xiong JY, Yang L, et al. Radioactivity level of some building materials in Yunnan Province[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1997, 17 (4): 279-280. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1997.04.125](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1997.04.125).
- [39] 熊菊英, 胡培, 黄荣钦, 等. 云南省水泥中放射性水平与剂量估算[J]. *中国辐射卫生*, 2003, 12 (4): 236. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2003.04.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2003.04.039).
- Xiong JY, Hu P, Huang RQ, et al. Radioactive level and dose estimation of cement in Yunnan Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 2003, 12 (4): 236. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2003.04.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2003.04.039).
- [40] 陆健. 南京市常用建筑材料放射性分析与评价[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- Lu J. Analysis and evaluation of radioactivity of commonly used building materials in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.
- [41] 徐茗荟, 孙亚敏, 王晓芬, 等. 2011—2015年我国环境天然辐射水平分析[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (5): 555-558, 566. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.027](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.027).
- Xu MH, Sun YM, Wang XF, et al. Analysis of the natural radiation level in China from 2011 to 2015[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29 (5): 555-558, 566. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.027](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.027).
- [42] 张应力. 现代混凝土配合比设计手册[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Zhang YL. Modern concrete mix design manual (2nd Edition)[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [43] 潘自强, 刘森林. 中国辐射水平[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 27-28.
- Pan ZQ, Liu SL. Radiation Levels in China[M]. Beijing: Atomic Press, 2010: 27-28.
- [44] 《建筑施工手册》(第五版)编委会. 建筑施工手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Editorial board of building construction manual (fifth edition). Building construction manual (fifth edition)[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [45] 黄强, 叶成, 张燕. 重庆市建筑材料放射性水平分析[J]. *中国辐射卫生*, 2018, 27 (2): 158-160. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2018.02.018](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2018.02.018).
- Huang Q, Ye C, Zhang Y. Analysis of the radionuclide level in building materials in Chongqing City[J]. *Chin J Radiol Health*, 2018, 27 (2): 158-160. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2018.02.018](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2018.02.018).
- [46] 董娟聪, 原雅艺, 党旭红, 等. 不同剂量 γ 射线对人外周血 miRNA 的表达影响[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (5): 458-461. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.003](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.003).
- Dong JC, Yuan YY, Dang XH, et al. Effects of the expression of miRNA in human peripheral blood after different doses of gamma rays[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29 (5): 458-461. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.003](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.003).
- [47] 党旭红, 左雅慧, 王仲文. 低剂量/低剂量率电离辐射对人体健康的影响[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 (6): 725-729. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.034](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.034).
- Dang XH, Zuo YH, Wang ZW. Impacts of low dose or low dose rate ionizing radiation on human health[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 (6): 725-729. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.034](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.034).

(收稿日期: 2021-03-24)