

西宁市建筑主体材料放射性水平及氡析出率的研究

巢世刚^{1,2}, 卢新卫^{2,*}, 翟永洪¹, 王建荣¹

1. 青海省环境科学研究设计院, 青海 西宁 810007; 2. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062

摘要:采用低本底多道 NaI(Tl) γ 能谱仪和 ERS-2-S 氡钍射气析出仪对西宁市建筑主体材料中天然放射性核素比活度及氡的析出率进行测定, 并按照相关标准进行评价。结果表明, 除红砖、碎石和砂子外, 其他建筑材料中 ^{40}K 的比活度均低于西宁市区土壤 ^{40}K 的平均值, 红砖、灰渣砖、加气块和水泥中 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的平均比活度均高于该区域土壤中相应核素的平均值。所调查建筑材料内、外照射指数均小于 1, 其放射性水平满足国标限量要求; 部分样品的居民接受有效剂量当量率略高于最大允许限值 1 mSv/a, 生产加工过程中须控制工业废渣的使用。

关键词: 建筑材料; 比活度; 照射指数; 氡的析出率; 西宁

中图分类号: R144.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2018)05-0330-06

doi: 10.7538/hhx.2018.YX.2017051

Natural Radioactivity Level and Exhalation Rates in Main Building Materials From Xining City

CHAO Shi-gang^{1,2}, LU Xin-wei^{2,*}, ZHAI Yong-hong¹, WANG Jian-rong¹

1. Environmental Science Research and Design Institute of Qinghai Province, Xining 810007, China;

2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: The specific activities of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th and radon exhalation rates of building materials in Xining were determined by using low background multi-channel NaI(Tl) γ spectrometer and ERS-2-S radon-thoron analyzer, respectively. The results were evaluated in accordance with the relevant standard methods. The results show that the specific activities of ^{40}K , except for red-clay brick, gravel aggregate and sand, in the building materials are lower than the mean of local soil, while the specific activities of ^{226}Ra and ^{232}Th in red-clay brick, ash brick, aerated block and cement exceed the corresponding means of local soil. The values of internal exposure and external exposure indexes of the analyzed building materials are lower than 1 which can be used anywhere. While, the annual effective dose equivalent rate of some red-clay and aerated block samples are slightly higher than or close to the maximum limit of 1 mSv/a suggested by the European Commission. The radon (^{222}Rn) exhalation

收稿日期: 2017-07-26; **修订日期:** 2018-04-23

作者简介: 巢世刚(1987—), 男, 青海互助人, 工程师, 从事环境风险调查与评估、环境污染治理与修复工作, E-mail: chaoshi-gang2012@163.com

*** 通信联系人:** 卢新卫(1968—), 男, 陕西蓝田人, 教授, 博士生导师, 从事环境污染与修复、环境评价与治理工作, E-mail: luxin-wei@snnu.edu.cn

网络出版时间: 2018-07-03; **网络出版地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20180703.0816.002.html>

rate of building materials is related to the level of ^{226}Ra specific activity.

Key words: building materials; specific activity; exposure index; radon exhalation rates; Xining

天然放射性辐射环境是人类生存环境的重要组成部分^[1]。由于现在我国绝大部分人一生中80%以上的时间都在各种钢筋混凝土或砖混结构的建筑物内部活动,因此此类建筑物所用的建筑材料的放射性核素含量水平与人类的健康密不可分。建筑材料中放射性核素是建筑物放射性的主要来源之一^[2]。研究表明,岩石、土壤、水体、沉积物及各类建筑材料中放射性核素含量分布广泛^[3]。建筑材料的放射性水平主要取决于建筑材料中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 这些长寿命天然放射性核素比活度的高低^[4],其对人体的辐射危害表现在 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 及其子体和 ^{40}K 因 γ 衰变对人体造成的外照射,以及 ^{226}Ra 、 ^{224}Th 及其衰变子体(^{222}Rn 和 ^{220}Rn)通过呼吸进入人体因 α 衰变对人体呼吸系统造成的内照射^[5-7]。随着建筑材料工业和建筑行业的飞速发展,建筑材料的天然放射性水平引起国内外学者的广泛关注,已有研究资料表明^[5-11],各地建筑材料天然放射性水平呈现较大差异。

氡是自然界唯一的天然放射性惰性气体。由于氡无色无味,很容易被人们忽视,但其被呼吸系统截留后,在体内长期不断累积。达到一定浓度后可诱发肺癌等疾病^[12]。国内外学者研究表明^[13-20],建筑材料氡的析出率和氡浓度对于室内环境有着重要影响。开展建筑材料放射性水平以及氡析出率研究调查对各地建筑材料安全使用及居民辐射防护具有重要意义。为此,国内对各地建筑材料的天然放射性核素水平及氡的析出进行了大量研究报道^[7-12],而西宁市建筑材料在此方面鲜有报道^[21]。

西宁市是青海省的省会城市,位于青海省东部,是国务院首批确定的内陆开放城市之一^[22]。改革开放尤其是西部大开发以来,西宁市城市化快速发展,目前市区面积497.4 km²,截至2016年末,西宁市常住人口为229.07万人,城镇人口为157.15万人,城镇化率为68.61%,比2015年提高0.81个百分点,城市面貌变化巨大。然而,关于西宁市建筑主体材料的天然放射性水平的研究较为少见,尤其氡析出率方面极为匮乏。1991—1994年,李玉芝等^[21]曾对青海省水泥、石灰、粘土砖、砂子、大瓦、碎石等建筑材料的放射性核素含量进行

了调查分析,调查区域涵盖青海省范围,但样品数偏少,大部分建筑材料仅采2~7个样品,且对建材氡析出率未做研究。为了解西宁市常用建筑主体材料的天然放射性水平和氡的析出率,本工作于2015年8月对西宁市的城南、城北、城西、城东和城中五个市区的建筑工地随机进行了样品采集,根据国家标准《GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量》^[23]及欧洲委员会提出的放射卫生相关原则对样品中天然放射性核素 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的活度及氡的析出率进行分析研究。

1 实验部分

1.1 样品采集与制备

在西宁市常用的建筑主体材料中采集主要的红砖、水泥、砂子、蒸压加气混凝土砌块(即加气块)、碎石和灰渣砖为研究对象,对西宁市五个城区的建筑工地建材样品进行随机采集,每种建筑材料采集5~8个样,每个样品重1.5~2.0 kg。据调查,这些建筑主体材料主要产自本地和周边地区。样品采回实验室后,根据国家标准^[23],将所有样品用颚式破碎机破碎、并用玛瑙磨细过筛,使其粒径不大于0.16 mm,在恒温箱中((105±5)℃)烘干至恒重,用FA2004N型电子天平(中国上海精密科学仪器有限公司,精度0.1 mg)准确称量,装入与存放标准样品一样的柱状聚乙烯盒中,封存30~40 d,用于放射性核素 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 比活度的测定。测定氡析出率时,将上述磨好的样品取出一部分平铺在事先准备的玻璃平面上,尽量使表面平整并用硅胶环确定范围。在测样品之前做大量空白试验,取平均值作为空白对照。

1.2 仪器与测量方法

样品中天然放射性核素(^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th)的含量采用低本底多道 γ 能谱仪(中核(北京)核仪器厂)测定^[8-10]。每个样品的测量时间设定为5 h,每个样品用两台相同参数仪器各测试1次,结果取其平均值。

采用德国生产 ERS-2-S 氡、钍及氡钍射气析出率分析测定仪测定建材中氡的析出率,测样品之前,在保证仪器测量稳定的前提下,做大量空白试验,并取平均值作为空白对照。将粉碎过筛的

样品平铺在事先准备的玻璃平面上,将 ERS-2-S 氦、钍及氡钍射气析出率分析测定仪的衰变计数室置于平整的建材粉末表面上,保持建材表面平整并用硅胶环确定范围,同时对硅胶环外围进行密封,这种方法较简单,但受条件限制。每个样品测 5~7 次取其平均值,不确定度小于 25%,测量时实验室温度(23±1)℃。ERS-2-S 氦、钍及氡钍射气析出率分析测定仪抽吸模式使用新型的活塞泵抽气。氦气进入密闭的计数室后,衰变产生的带正电的子体在衰变室壁高压的作用下聚集到探测器表面,这些子体衰变产生具有特征能量的 α 能谱,通过 α 能谱识别²¹⁸Po和²¹⁶Po特征峰,并根据系统参数计算得到²²²Rn和²²⁰Rn比活度。

2 结果与分析

2.1 西宁市建筑主体材料放射性核素含量

所研究西宁市各类建筑主体材料天然放射性核素的测量结果列于表 1。从表 1 可见,西宁市

建筑主体材料的天然放射性核素⁴⁰K、²²⁶Ra和²³²Th的比活度分别为 228.0~1 036.2、11.6~120.6、10.2~107.1 Bq/kg。由表 1 可以看出,不同建筑材料中天然放射性核素含量存在较大差异,⁴⁰K:水泥(293.9 Bq/kg)<加气块(398.1 Bq/kg)<灰渣砖(400.2 Bq/kg)<碎石(569.1 Bq/kg)<砂子(764.1 Bq/kg)<红砖(937.8 Bq/kg);²²⁶Ra:砂子(21.5 Bq/kg)<碎石(37.2 Bq/kg)<灰渣砖(53.6 Bq/kg)<红砖(55.2 Bq/kg)<水泥(76.3 Bq/kg)<加气块(91.0 Bq/kg);²³²Th:砂子(32.7 Bq/kg)<碎石(39.1 Bq/kg)<水泥(46.2 Bq/kg)<灰渣砖(46.7 Bq/kg)<红砖(58.4 Bq/kg)<加气块(80.7 Bq/kg)。除红砖、碎石和砂子外,其他建筑材料中⁴⁰K比活度均低于西宁市区土壤⁴⁰K的平均值(548.9 Bq/kg)^[24],红砖、灰渣砖、加气块和水泥中²²⁶Ra和²³²Th的平均含量也均高于青海省土壤中相应核素的平均值(分别为 38.3 Bq/kg 和 45.3 Bq/kg)^[24]。

表 1 西宁市建筑主体材料中天然放射性核素比活度

Table 1 Specific activity of ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra and ²³² Th in main building material from Xining Bq/kg						
建筑材料	⁴⁰ K		²²⁶ Ra		²³² Th	
	数值范围	均值±标准差	数值范围	均值±标准差	数值范围	均值±标准差
红砖	801.4~1 036.2	937.8±52.0	43.4~70.7	55.2±8.0	50.7~64.7	58.4±3.7
碎石	243.6~922.5	569.1±220.9	12.5~95.8	37.2±16.3	10.2~67.6	39.1±17.0
灰渣砖	262.9~637.1	400.2±122.4	16.9~90.3	53.6±22.2	17.7~70.5	46.7±18.0
加气块	350.5~490.3	398.1±39.1	79.6~120.6	91.0±11.7	67.0~107.1	80.7±12.7
砂子	608.7~948.6	764.1±104.5	11.6~38.2	21.5±8.3	16.3~52.3	32.7±9.0
水泥	228.0~381.4	293.9±34.7	51.3~101.5	76.3±14.0	27.4~64.8	46.2±8.2

图 1 给出了西宁市与咸阳^[4]、西安^[7]、延安^[8]、长治^[9]、包头^[10]、宝鸡^[25]等西北几大城市常见建筑材料砂子、水泥、红砖和碎石中天然核素⁴⁰K、²³²Th和²²⁶Ra研究结果的比较。由图 1 可见,在比较的几种样品中,西宁市砂子中⁴⁰K平均比活度低于宝鸡、咸阳和延安,高于其他城市;²²⁶Ra的平均比活度略低于宝鸡和长治,与西安和咸阳接近,高于延安和包头;²³²Th平均比活度低于宝鸡市平均水平,与咸阳和长治接近,高于西安、延安和包头。碎石中⁴⁰K平均比活度低于包头和延安,而高于其他城市;²²⁶Ra的平均比活度低于长治,与延安接近,但高于其他城市;²³²Th平均比活度低于长治和延安,而高于其他城市。水泥中⁴⁰K平均比活度略低于包头和延安,高于其他城市;²²⁶Ra平均比活度除低于长治

外,均高于其他城市;²³²Th平均比活度低于包头、延安和长治,但高于其他城市。红砖中⁴⁰K平均比活度均高于其他城市;²²⁶Ra平均比活度与长治、咸阳和西安接近,但略高于其他城市;²³²Th平均比活度低于长治,与咸阳和延安接近,高于其他城市。因此,建筑材料中天然放射性水平因其材料来源或加工所用原材料的不同而表现出含量大小差异^[8]。

2.2 辐射风险分析

根据所采西宁市建筑主体材料样品的用途及其可能带来的辐射危害,依据《GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量》^[23]及欧洲委员会(EC, 1999)给出的居民年有效剂量计算公式和限值^[26]进行评价。内照射指数 I(Ra)和外照射指数 I_γ的计算公式分别为:

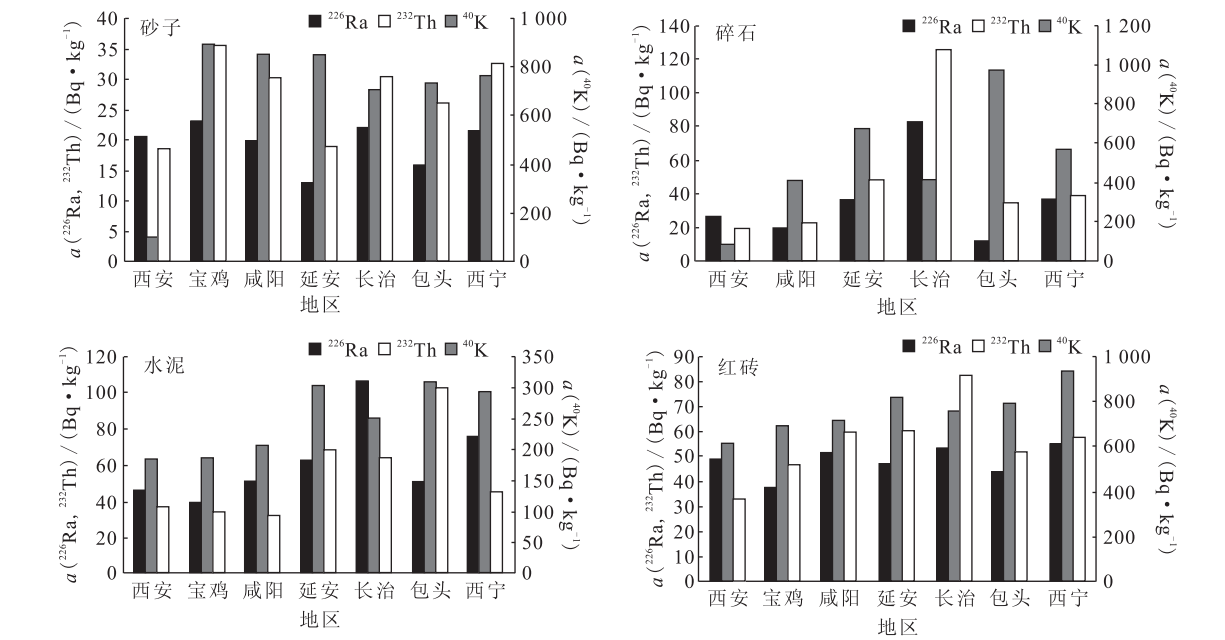


图1 部分地区常见建筑材料放射性核素平均含量比较

Fig.1 Mean concentration of natural radionuclide in common building material from different areas

$$I(^{226}\text{Ra}) = a(^{226}\text{Ra})/200 \tag{1}$$

$$I_\gamma = a(^{226}\text{Ra})/370 + a(^{232}\text{Th})/260 + a(^{40}\text{K})/4 \tag{2}$$

式中: $a(^{226}\text{Ra})$ 、 $a(^{232}\text{Th})$ 和 $a(^{40}\text{K})$ 分别表示 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的比活度, Bq/kg ;200为仅考虑内照射情况下,建筑材料中放射性核素 ^{226}Ra 的放射性比活度限量, Bq/kg ;370、260、4 200分别为仅考虑外照射情况下,本标准规定的建筑材料中

天然放射性核素 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 在其各自单独存在时的限量, Bq/kg 。

所调查的西宁市建筑材料的内、外照射指数的计算结果列于表2。表2表明,所调查的西宁市建筑材料的内、外照射指数均小于1,其放射性水平满足《GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量》^[23]中对建筑材料天然放射性核素水平的限量要求。

表2 西宁市常用建筑主体材料内、外照射指数及年有效剂量当量率

Table 2 Values of $I(^{226}\text{Ra})$, I_γ and annual effective dose equivalent rate ($\dot{H}$) in main building materials from Xining

建筑材料	$I(^{226}\text{Ra})$		I_γ		$\dot{H}/(\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1})$	
	数值范围	均值±标准差	数值范围	均值±标准差	数值范围	均值±标准差
红砖	0.22~0.35	0.28±0.04	0.54~0.66	0.60±0.04	0.84~1.04	0.93±0.06
碎石	0.06~0.48	0.19±0.08	0.13~0.63	0.39±0.13	0.21~0.97	0.60±0.21
灰渣砖	0.08~0.45	0.27±0.11	0.18~0.59	0.42±0.14	0.28~0.92	0.65±0.22
加气块	0.40~0.60	0.46±0.06	0.57~0.83	0.65±0.08	0.88~1.27	1.00±0.13
砂子	0.06~0.19	0.11±0.04	0.24~0.52	0.37±0.07	0.38~0.80	0.57±0.11
水泥	0.26~0.51	0.38±0.07	0.36~0.55	0.45±0.06	0.57~0.86	0.71±0.09

欧洲委员会(EC,1999)推荐的建筑材料天然放射性所致居民年外照射剂量率($\dot{D}$)的计算公式为^[26]:

$$\dot{D} = 0.92a(^{226}\text{Ra}) + 1.1a(^{232}\text{Th}) + 0.08a(^{40}\text{K}) \tag{3}$$

式中, $\dot{D}$ 为居民外照射剂量率, nGy/h 。依据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR,2000)^[3]居民年室内暴露时间(8 760 h/a)、外照射剂量率($\dot{D}$)、居民接受有效剂量的转换因子(0.7 Sv/Gy)、居民室内居留因子(0.8)等相关参数,居民

接受有效剂量当量率 $\dot{H}$ 为:

$$\dot{H} = \dot{D} \times 8\,760 \times 0.8 \times 0.7 \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中,剂量当量率 $\dot{H}$ 的单位为 mSv/a, 10^{-6} 为单位换算因子。依据公式(1)–(4),西宁市建筑材料用于房屋建筑所致内、外照射指数,居民年有效剂量当量率结果列于表 2。由表 2 可以看出,西宁市建筑材料所致居民年有效剂量当量率为 0.21~1.27 mSv/a。部分样品所致居民年有效剂量当量率接近或超过欧洲委员会提出的建筑材料所致居民年有效剂量当量率的控制上限(1 mSv/a)^[26]。建筑材料的放射性超标,直接影响儿童、老人和孕妇的身体健康,破坏人类免疫系统,有诱发白血病、肺癌等疾病的风险。因此在加工新型建筑材料前应将原料按规定送至权威机关检测。

等效 Ra 浓度评价方法是目前应用较为广泛的评价含有 K、Th、U 等放射性核素的材料危险指数的评价模型^[10],土壤、沉积物等环境介质中天然放射性分布具有不平衡性,因此,将沉积物中

⁴⁰K、²²⁶Ra和²³²Th放射性核素比活度换算成等效 Ra 浓度作为辐射暴露指标。

2.3 氡析出率

西宁市常用建筑主体材料中氡的析出率测定结果列于表 3。由表 3 可以看出,加气块的氡析出率最高,砂子最低。所研究建筑主体材料的氡析出率变化表现为:加气块>红砖>水泥>灰渣砖>碎石>砂子。实验中所测的²²²Rn是²²⁶Ra的衰变子体。图 2 给出西宁市常用建筑主体材料中²²⁶Ra比活度均值与对应建材氡(²²²Rn)析出率的关系。由图 2 可以看出,建筑材料中²²⁶Ra比活度与氡(²²²Rn)的析出率存在相关性,即²²⁶Ra比活度越大,其氡(²²²Rn)的析出率越大。可见,建筑材料中²²⁶Ra含量的高低是室内空气中²²²Rn浓度水平的一大重要控制因素。当然,室内空气中²²²Rn浓度的高低还受到房屋结构类型、通风、空气流通程度等因素影响。因此居民应注意居住和办公环境的日常通风,以降低室内氡浓度。

表 3 西宁市建筑主体材料中氡的析出率

Table 3 Exhalation rates of radon in main building materials from Xining

建筑材料	氡析出率/(mBq·m ⁻² ·s ⁻¹)		建筑材料	氡析出率/(mBq·m ⁻² ·s ⁻¹)	
	数值范围	平均值±标准差		数值范围	平均值±标准差
红砖	2.31~9.10	4.79±2.76	加气块	4.56~9.07	6.28±1.73
碎石	1.89~10.20	3.48±1.77	砂子	2.37~3.89	3.28±0.59
灰渣砖	2.84~4.73	3.71±0.85	水泥	3.75~6.35	4.41±1.10

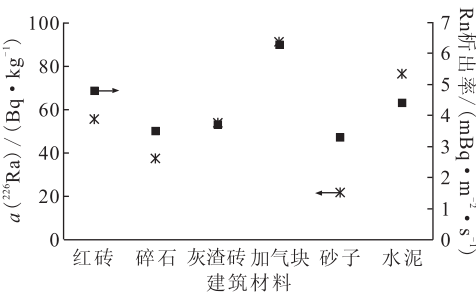


图 2 建筑材料中放射性核素²²⁶Ra含量与氡析出率的变化关系

Fig. 2 Mean concentration comparison of ²²⁶Ra and exhalation rates of radon in common building materials

3 结 论

(1) 所调查西宁市常用建筑主体材料样品中天然放射性核素⁴⁰K、²²⁶Ra、²³²Th的比活度分别为 228.0~1 036.2、11.6~120.6、10.2~107.1 Bq/

kg。不同建筑材料的天然放射性核素存在较大差异,⁴⁰K:水泥<加气块<灰渣砖<碎石<沙子<红砖;²²⁶Ra:沙子<碎石<灰渣砖<红砖<水泥<加气块;²³²Th:沙子<碎石<水泥<灰渣砖<红砖<加气块。除红砖、碎石和砂子外,其他建筑材料中⁴⁰K的比活度均低于西宁市区土壤⁴⁰K的平均值,红砖、灰渣砖、加气块和水泥中²²⁶Ra和²³²Th的平均含量均高于该区域土壤中相应核素的平均值。

(2) 调查中部分样品所致居民年有效剂量当量率接近或超过控制上限(1 mSv/a),在加工过程中,应有效地控制工业废渣的用量,以免给居民带来辐射伤害。

(3) 建筑主体材料中的氡(²²²Rn)析出率变化为:加气块>红砖>水泥>灰渣砖>碎石>砂子。建筑材料氡(²²²Rn)析出率的大小与建材中²²⁶Ra的比活度高低密切相关。

参考文献:

- [1] 代杰瑞,董志成,喻超,等. 青岛市地表天然放射性水平及其主控因素特征[J]. 世界核地质学,2012,29(3):173-182.
- [2] 林莲卿,逢虎. 北京建筑材料中天然放射性核素含量及其所致居民剂量[J]. 辐射防护,1987(6):450-455.
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source, effects and risks of ionizing radiation[R]. New York: United Nations, 2000.
- [4] Lu X, Yang G, Ren C. Natural radioactivity and radiological hazards of building materials in Xianyang, China[J]. Radiat Phys Chem, 2012, 81: 780-784.
- [5] Turhan S. Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and its raw materials[J]. J Environ Radioact, 2008, 99: 404-414.
- [6] Ahmed N. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt[J]. J Environ Radioact, 2005, 83: 91-99.
- [7] 卢新卫,张斌. 西安常用建筑材料天然放射性核素水平[J]. 中华放射医学与防护杂志,2004,24(5): 461-462.
- [8] 李楠,卢新卫,杨光,等. 延安市建筑材料天然放射性及其辐射危害[J]. 核技术,2012,35(12):907-910.
- [9] 杨光,卢新卫,赵彩凤,等. 长治市建筑主体材料天然放射性水平[J]. 核电子学与探测技术,2012,32(7):798-800,819.
- [10] 赵彩凤,卢新卫,李楠,等. 包头市建筑主体材料天然放射性水平[J]. 核技术,2012,35(8):611-614.
- [11] 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,2006,26(5):310-313.
- [12] 周开建,赵智慧,张京战,等. 石家庄地区室内氡浓度调查及影响因素分析[J]. 辐射防护,2010,30(5):312-315,322.
- [13] Mavi B, Akkurt I. Natural radioactivity and radiation hazards in some building materials used in Isparta, Turkey[J]. Radiat Phys Chem, 2010, 79: 933-937.
- [14] Sonkawade R G, Kant K, Muralithar S, et al. Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials[J]. Atmos Environ, 2008, 42: 2254-2259.
- [15] Ahmed N K, Abbady A, El-Kamel A H, et al. Radon concentration and exhalation rates of powdered phosphate samples: the determination of radon exhalation rates[J]. Nucl Sci J, 2000, 37(3): 222-229.
- [16] Petropoulos N P, Anagnostakis M J, Simopoulos S E. Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials[J]. J Environ Radioact, 2002, 61: 257-269.
- [17] Bavarnegin E, Fathabadi N, Moghaddam M V, et al. Radon exhalation rate and natural radionuclide content in building materials of high background areas of Ramsar, Iran[J]. J Environ Radioact, 2013, 117: 36-40.
- [18] 卢新卫,李贵斌. 室内氡暴露及其对人体健康影响[J]. 辐射防护,2005,25(2):122-127.
- [19] Righi S, Bruzzi L. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings[J]. J Environ Radioact, 2006, 88: 158-170.
- [20] Kobeissi M A, El Samad O, Zahraman K, et al. Natural radioactivity measurements in building materials in Southern Lebanon[J]. J Environ Radioact, 2008, 99: 1279-1288.
- [21] 李玉芝,王合迅,张全禄,等. 青海省建筑材料放射性水平[J]. 中国辐射卫生,1995,4(2):83-84.
- [22] 陈克龙,苏茂新,李双成,等. 西宁市城市生态系统健康评价[J]. 地理研究,2010,29(2):214-221.
- [23] GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [24] 郭立本,王心明,胡晓林,等. 青海省土壤中天然放射性核素含量调查研究[J]. 辐射防护,1994,14(3): 226-229.
- [25] Lu X, Zhang X. Radionuclide content and associated radiation hazards of building materials and by-products in Baoji, West China[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2008, 128: 471-476.
- [26] European Commission. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, radiation protection report 112[R]. Geneva: European Commission, 1999.