

综述 (364 ~ 377)

地下建筑内氡分布与去除技术研究进展

吕功煊, 甄文龙, 宁晓峰

(中国科学院兰州化学物理研究所, 羰基合成与选择氧化国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要: 地球上氡来自于放射性元素的衰变, 氡无色无味, 在地下密闭空间中的浓度高低依赋存条件变化差异很大. 欧盟和我国对室内氡水平有较为严格的要求, 分别为 50 Bq/m^3 和 100 Bq/m^3 . 氡具有放射性, 其半衰期为 3.83 d, 衰变的子体多为金属, 仍具有放射性. 人员长期暴露于氡浓度水平较高的环境中, 会因氡和衰变子体的放射性引发内照射使滞留在这些空间中的人员受到放射性沾染, 引发各种病症, 多见为呼吸系统肿瘤. 较为详尽的综述了近年来国内外对室内氡污染水平, 特别是典型地下密闭空间氡污染水平的研究, 并重点介绍了地铁 ($1.2 \sim 166.5 \text{ Bq/m}^3$)、典型坑道 ($105.3 \sim 4\,434.2 \text{ Bq/m}^3$)、矿井 ($1\,952 \sim 5\,121 \text{ Bq/m}^3$)、国防工程 ($39 \sim 17\,169 \text{ Bq/m}^3$)、地下实验室 ($28 \sim 482 \text{ Bq/m}^3$) 的氡污染水平. 已有研究表明, 在一些通风不畅或者较难通风的密闭空间中氡超标比较严重. 还介绍了近年来国内外密闭空间内氡防护和去除技术研究的发展情况, 分析了各种技术的特点, 提出隔离防氡和变压吸附分离富集去除氡是较为可行和应重点发展的研究方向.

关键词: 地下建筑; 氡污染水平; 隔离防氡; 变压吸附分离去除氡

中图分类号: O69; X132

文献标志码: A

文章编号: 1006-3757(2023)04-0364-14

DOI: [10.16495/j.1006-3757.2023.04.005](https://doi.org/10.16495/j.1006-3757.2023.04.005)

Radon Distribution and Removal Technology Advance in Underground Buildings

LV Gongxuan, ZHEN Wenlong, NING Xiaofeng

(Lanzhou Institute of Chemical Physics, State Key Laboratory for Oxo Synthesis and Selective Oxidation,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Radon on earth comes from the decay of radioactive elements, which is colorless and odorless gas. Its concentration in underground enclosed space is significantly dependent on environmental conditions. The Radon restriction standards of European Union and China for indoor rooms, are 50 Bq/m^3 and 100 Bq/m^3 , respectively. Radon is radioactive with a half-life of 3.83 d, and most of its decay daughters are metal particles, which are still radioactive. Long-term exposure of personnel to environments with high levels of Radon concentration can lead to radioactive diseases due to the radiation contamination of Radon and its decay daughters, most commonly respiratory tumors. The levels of indoor Radon pollution at home and abroad in recent years were reviewed, especially in typical underground enclosed spaces. Typically, the Radon pollution levels in subways were $1.2 \sim 166.5 \text{ Bq/m}^3$, and the data of typical tunnels, mines, national defense engineering and underground laboratories were $105.3 \sim 4\,434.2 \text{ Bq/m}^3$, $1\,952 \sim 5\,121 \text{ Bq/m}^3$, $39 \sim 17\,169 \text{ Bq/m}^3$, and $28 \sim 482 \text{ Bq/m}^3$, respectively. It has been shown that Radon exceeds the standard more seriously in some enclosed spaces which are poorly ventilated or more difficult to ventilate. The development of the technologies of Radon protection and removal in enclosed spaces in recent years were also introduced. The characteristics of various technologies were analyzed, and proposed that isolation and protection of Radon, pressure swing adsorption separation and collection for Radon removal are more feasible ways and should be focused on the development of the research direction in future.

Key words: underground buildings; Radon pollution level; isolation and protection of Radon; pressure swing adsorption

收稿日期: 2023-09-27; 修订日期: 2023-11-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 22272189) [National Natural Science Foundation of China (No.22272189)]

作者简介: 吕功煊 (1964-), 男, 研究员, 主要从事能源与环境催化方面的研究, Email: gxlu@licp.cas.cn.

separation for removing Radon

氡(Radon, Rn)是由放射性元素镭衰变产生的惰性气体,无色、无味、无嗅、有放射性,是人体所受天然辐射的重要污染源,占人体所受总辐射剂量的 42%。一般认为,氡是继吸烟之后诱发肺癌最重要的原因,已经被世界卫生组织确定为 19 种主要环境致癌物之一^[1-2]。一些建筑和装修材料(如水泥、砂岩、花岗岩、石膏及瓷砖等)都会释放一定量的氡,地基下的氡还会通过地板、墙壁或地基的裂缝扩散进入住宅中,并在室内聚集,也可从土壤、地下水、各种管道释放出来进入室内。氡在户外浓度极低,而在气流交换不畅的地下密闭空间中,如地下坑道、地铁、矿井、国防工程和地下实验室等,就会积聚起来,达到比较高的浓度,进而增加肺癌的发病率^[3]。对于需要长期滞留在这样密闭空间的人员,应关注室内氡的水平,并开发出更为有效的防氡渗透入室内和去除室内氡污染的技术^[4-8]。

1 氡的形成与危害

如图 1 所示,氡有三种同位素,²¹⁹Rn、²²⁰Rn 和 ²²²Rn,都具有放射性,其中²¹⁹Rn 的半衰期(3.96 s)和 ²²⁰Rn 的半衰期(55.6 s)都很短,通常不会对人体造成危害,²²²Rn 的半衰期较长(3.83 d),容易在密闭环境中积累而达到较高的浓度。²²²Rn 本身具有放射性,会发生 α 衰变,产生一系列衰变子体,如²¹⁸Po(3.05 min)、²¹⁴Pb(26.8 min)、²¹⁴Bi(19.7 min)、²¹⁴Po(160 μs)和²¹⁰Pb(22 a)^[9]。氡及子体粒子因放射性会在空气中形成放射性气溶胶,当这些气溶胶被人体吸入后,便会沉积在气管、支气管等部位,并会不断发射出

能量很高的 α 粒子,破坏细胞 DNA,使肺细胞受损,从而诱发肺癌。氡还具有较强的亲脂性,沉积在身体中的一些重要部位,如造成神经系统的损害^[10-12]。我国已经制定了室内氡浓度的控制国家标准,住宅中氡浓度应低于 100 Bq/m³,而欧盟最新制定标准是室内氡浓度不高于 50 Bq/m³,预计我国也将会调整室内氡的指标,参照国际标准修改^[13-19]。

2 氡暴露致肺癌病例

文献曾对室内氡暴露导致的肺癌病例进行过统计,在一些国家,由氡诱发肺癌的病例占比很高。以亚美尼亚为例,氡引发的肺癌占该国所有肺癌病例的 29%(图 2),而在日本和荷兰的病例占比则比较低,约为 4%,其它的一些国家接近 10%~15%,如俄罗斯为 15%、加拿大为 13%、韩国为 12.5%、美国为 11%^[13, 20-25]。我国每年约有 5 万例肺癌病例是由室内氡辐射引起,占有肺癌患者的 14%^[23-24]。王作元等提出我国的氡污染所引起肺癌的危险度指数为 0.19,这意味着室内空气中的氡浓度每增加 100 Bq/m³,人患肺癌的风险就会相应增加 19%^[26]。根据我国住房和城乡建设部公开的室内氡调查结果,我国住房室内氡浓度超过 100 Bq/m³的比例约为 6.5%,超过 200 Bq/m³的比例约为 1.0%,这个比例近年来有逐渐增加的趋势,原因与建筑混凝土使用再生料比例升高有关^[27]。

地下建筑是室内封闭环境,大多通风条件有限,地下岩石、土壤和水源释放渗出的氡再加上地下建筑物所使用的建材中释放的氡,使得许多长期工作

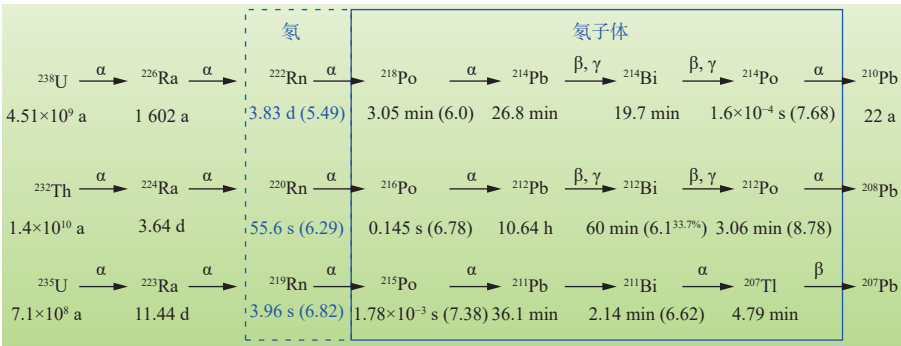


图 1 形成氡的天然放射系简化衰变图(括号内为 α 粒子能量,单位 MeV)^[9]

Fig. 1 Simplified decay diagram of natural radiation systems that form Radon (In parentheses: α Particle energy, in MeV, with the exponent in parentheses indicating the branching ratio)^[9]

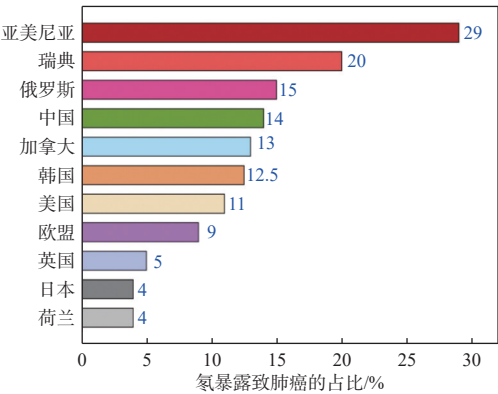


图 2 不同国家因长期氡暴露引起肺癌患者的占比
Fig. 2 Proportion of lung cancer patients caused by long-term Radon exposure in different countries

在地下仓库、地下工程设施中的人员持续暴露在高氡浓度的环境中,诱发了比较严重的职业病,影响了地下工作人员的身体健康与安全^[28-29]。所以,详细研究地下建筑内氡浓度水平与分布特征,对于发展新的氡防护措施具有重要意义。

3 部分地下建筑内氡浓度的现状

3.1 地铁

地铁站中的氡主要来源于基岩、土壤和建筑材料的释放,不同城市、不同站点氡的水平 and 分布状况有较大差异^[30]。国外曾开展了地铁站内环境中氡浓度的调查^[31-34],首尔、大田、慕尼黑、赫尔辛基、东京、开罗等城市地铁中氡水平监测结果如表 1 所列,部分区域氡浓度比较高,远超限制值,接近 460.0 Bq/m³,平均值为 78.2 Bq/m³。

表 1 国外城市地铁站空气环境中氡浓度水平
Table 1 Radon concentration levels in air environment of subway stations in foreign cities

序号	城市	氡浓度范围/ (Bq/m ³)	平均值/ (Bq/m ³)	文献
1	首尔	18.5~52.8	35.7	[31]
2	大田	9.4~98.2	34.1	[31]
3	慕尼黑	8.0~25.0	14.2	[31]
4	赫尔辛基	50.0~460.0	100.0	[31]
5	东京	7.2~24.3	10.9	[31]
6	开罗	126.9~387.4	329.3	[32]
7	加尔各答	13.5~39.0	23.1	[32]
均值	—	—	78.2	

表 2 列出了北京、上海、天津、深圳、香港等城市地铁站内氡浓度监测结果^[35-43],上海和南京地铁站氡浓度较低,而乌鲁木齐与西安地铁氡浓度较高,这可能与地铁建造地基、岩石、土壤、使用材料有关。这 12 个代表性城市的地铁站空气环境中氡浓度分布范围是 1.2~166.5 Bq/m³,平均值为 25.8 Bq/m³,大部分符合《地下建筑氡及其子体控制标准》国家标准的限制要求。

表 2 国内城市地铁站空气环境中氡浓度水平
Table 2 Radon concentration levels in air environment of domestic urban subway stations

序号	城市	氡浓度范围/ (Bq/m ³)	平均值/ (Bq/m ³)	文献
1	北京	10.8~80.4	23.5	[36]
2	上海	1.2~28.4	9.9	[36]
3	天津	9.8~38.8	23.8	[36]
4	南京	3.3~45.8	11.8	[36]
5	成都	12.4~29.0	16.6	[36]
6	西安	3.7~166.5	46.4	[37]
7	深圳	1.7~95.2	18.3	[38]
7	武汉	4.7~28.0	13.4	[39]
9	南宁	8.9~35.9	18.5	[40]
10	长沙	22.5~53.0	35.3	[41]
11	乌鲁木齐	10.6~158.4	50.1	[42]
12	香港	29.6~63.5	41.6	[43]
均值			25.8	

3.2 地下建筑工程

地下洞库、仓库、隧道等工程也是氡浓度水平较高的区域,这些地点通常结构密闭、通风不畅^[44-46]。滞留其中的人员有可能长期暴露于较高的氡环境中。曾晔等^[47]曾对某地两条地下坑道中(1 号坑道和 2 号坑道)的氡浓度水平进行了调查,结果如表 3、4 所列。由表 3 可知,1 号坑道在 2014~2016 年间氡浓度极值达到了 4 434.2 Bq/m³,2014~2016 年连续 3 年氡浓度检测年平均值都超过了 1 000 Bq/m³,2016 年年均值为 2 181.2 Bq/m³。如此高的氡浓度水平和坑道施工中未开启通风系统,导致坑道内通风不足,同时施工过程中造成了许多地面裂缝,也加速了氡气泄漏扩散。而 1 号坑道内在 2017 年增添通风装置后,氡浓度水平分别下降了 78.1% 和

表 3 某地下 1 号坑道 2014~2017 年工作区氡浓度水平测量结果^[47]

Table 3 Measured results of Radon concentration levels in working area of tunnel 1 from 2014 to 2017^[47]

/(Bq/m³)

时间	第一季度		第二季度		第三季度		第四季度		年均值
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
2014年	503.4~2 620.2	1 558.8	237.2~489.5	301.3	119.0~471.1	324.2	697.3~4 434.2	2 552.0	1 184.1
2015年	550.9~1 791.4	1 323.9	1 052.4~1 985.4	1 691.6	252.7~1 548.4	773.1	738.6~1 521.4	1 096.3	1 221.2
2016年	631.4~2 158.7	1 516.0	1 817.6~3 129.3	2 174.6	1 677.2~3 317.9	2 482.0	697.3~4 434.2	2 552.0	2 181.2
2017年	160.0~428.9	265.5	105.3~251.0	206.1	141.3~375.2	249.6	114.7~1 206.0	347.4	267.2

87.7%, 表明通风是有效的地下坑道氡浓度降低的手段。

相比 1 号坑道, 2 号坑道为新建坑道。开工时就非常重视通风条件、环境控制与坑道内壁涂覆去除

氡的工作, 氡浓度水平下降明显。如表 4 所列, 在 2015~2017 年氡浓度极值只达到 1 336.0 Bq/m³, 整体低于 1 号地下坑道氡浓度水平。但其平均值也超过地下建筑氡水平控制标准。

表 4 某地下 2 号坑道 2015~2017 年工作区氡浓度水平测量结果^[47]

Table 4 Measured results of Radon concentration levels in working area of tunnel 2 from 2015 to 2017^[47]

/(Bq/m³)

时间	第一季度		第二季度		第三季度		第四季度		年均值
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
2015年	249.6~386.8	335.2	122.3~502.6	244.0	150.0~366.1	257.6	64.1~619.5	266.9	275.9
2016年	—	—	146.0~1 029.6	417.0	158.0~372.3	287.4	87.5~307.0	213.2	305.9
2017年	184.1~615.8	352.9	283.6~1 336.0	615.7	148.6~584.5	302.3	91.1~560.2	342.1	403.2

3.3 矿井

调查结果显示, 大多数矿井内空气中氡的浓度远高于地面数值^[48-49]。李秀兰等^[50]曾报道了山西省某铁矿井下氡浓度水平(如表 5 所列), 6 个矿井中氡浓度均值为 (3 778±1 128) Bq/m³, 极值达到 (5 121±3 357) Bq/m³, 其中 6 号矿井氡浓度较高。工作面的

氡浓度高达到 (4 477±2 666) Bq/m³, 运输巷、井下工作房和回风口处的氡浓度分别为 4 290、3 496 和 3 702 Bq/m³, 其均值为 (3 622±920) Bq/m³, 这与矿井下的地址条件、通风率不足有关。

张德华等^[51]曾调研了某地下的铀矿井内氡浓度, 发现氡浓度水平与监测点距地面高度成反比,

表 5 不同矿井下氡浓度水平以及矿井不同工作场所氡浓度水平^[50]

Table 5 Radon concentration levels in different mines and workplaces^[50]

/(Bq/m³)

矿井编号	样品数	氡浓度		采用地点	样品数	氡浓度	
		均值	范围			均值	范围
1	35	3 997±3 045	109~13 340	运输巷	24	4 290±2 537	622~9 601
2	21	4 455±1 397	2 238~7 296	工作面	55	4 477±2 666	618~13 340
3	22	1 952±1 312	196~4 148	井下工作房	20	3 496±2 296	368~7 476
4	19	3 008±910	1 500~4 524	回风口	13	3 702±2 184	196~7 557
5	15	4 132±2 534	937~7 688	进风口	21	2 143±1 982	109~7 688
6	21	5 121±3 357	686~12 329	均值		3 622±920	109~13 340
均值		3 778±1 128	109~13 340				

氡浓度的极值为 2 700 Bq/m³ [图 3(a)]. 孙璐^[52] 调研了某锡矿井内氡浓度与季节之间的变化规律, 发现在夏季(6 月)和秋季(9 月)矿井内氡浓度水平较高, 平均值分别为 9 491 和 9 366 Bq/m³, 而在春季

和冬季氡浓度水平较低 [图 3(b)], 说明矿井内氡浓度水平与环境温度有密切关系. 当井内壁温度增加时, 氡在地下渗流的速率升高, 扩散系数变大, 氡析出速率增大.

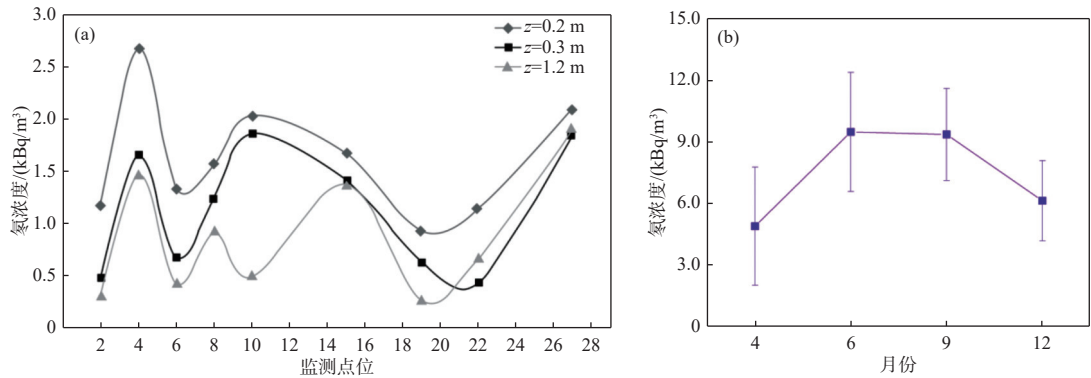


图 3 (a) 铀矿井中车场、主巷、风管支巷等距离地面不同高度的监测点氡浓度均值变化示意图^[51], (b) 锡矿井内在 4、6、9 及 12 月空气中氡浓度^[52]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of average variation of Radon concentration at monitoring points at different heights from ground, such as parking lots, main alleys, and air duct branches in uranium mines^[51], (b) Radon concentration in air of tin mines in April, June, September, and December^[52]

3.4 国防工程

国防工程一般建造于地下, 因需要具备较好的整体防护、隐蔽和伪装能力, 因而不适于配置大流量通风设备, 主要依靠内部空气净化设备实现空间中空气质量的控制. 随之而来的问题是虽然空间中可挥发有机物(VOC)、氨类化合物的浓度可以保持在较低的水平, 但是氡等化学惰性的有害气体反而会聚集^[53]. 调研结果显示, 在同样地质条件下国防工程内部环境中的氡污染要比地面民用建筑室内严重(约是地面建筑氡浓度的 1~2 个数量级)^[54-55]. 金晓公^[56] 调研了我国南方某 3 个国防工程内部环境中氡浓度分布情况(如表 6 所列), 国防工程 01 氡浓度范围是 607~660 Bq/m³(均值 634 Bq/m³), 国防工程 02 氡浓度范围是 847~899 Bq/m³(均值 874 Bq/m³), 国防工程 03 氡浓度范围是 448~485 Bq/m³(均值 469 Bq/m³), 均超出规定的控制标准.

图 4 展示了其它 12 个国防工程中氡浓度的监测浓度, 氡浓度范围是 39~17 169 Bq/m³, 均值虽为 2 702 Bq/m³, 但是极值相当高. 除 6 和 12 号国防工程外, 其余国防工程内部环境中氡污染十分严重^[57]. 2007~2008 年, 某工程科研设计所对一拟改扩建工程区域进行了为期一年的氡浓度跟踪检测(实测 347 d), 氡浓度范围为 62.9~9 475.7 Bq/m³, 均值为

2 055 Bq/m³, 其中氡浓度高于 400 Bq/m³ 的占 254 d, 超标的天数占总测试天数的 73.2%. 2009~2010 年该所又对该工程的内部环境的氡浓度进行多次测量, 其超标的状况仍未改变.

表 6 南方某 3 个国防工程内部环境中氡浓度^[56]

Table 6 Radon concentration in internal environment of three national defense projects in South^[56]

国防工程编号	检测点的氡浓度			均值
01	636	660	607	634
02	847	899	877	874
03	448	485	474	469

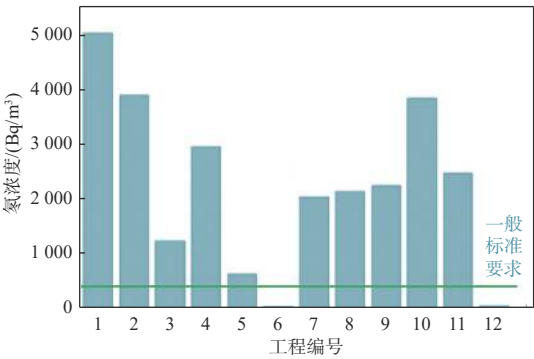


图 4 部分国防工程中氡污染实测现状图^[57]

Fig. 4 Actual measurement status of Radon pollution in some national defense projects^[57]

3.5 地下实验室

笔者对某研究所地下负一层的实验室环境中氡浓度水平进行了 5 个月的跟踪监测, 监测点分布如图 5、6 所示. 检测结果显示, 库房前门口(监测点①)和库房内部(监测点②)的氡浓度分布范围分别是 66~482 Bq/m³ 和 76~436 Bq/m³, 库房外过道(监测点③)与实验室外过道(监测点④)的氡浓度分布范围分别是 28~427 Bq/m³ 和 11~205 Bq/m³. 氡浓度变化趋势表明大部分氡来源于库房内部, 是通过扩散经过道转移至实验室侧的, 且超标情况相当严重.

该实验室氡浓度变化也表现出季节的差异性. 如图 6 所示, 冬季(12 月、1 月)和春季(2 月、3 月、

4 月)监测期间, 氡浓度的分布范围是 86~309 Bq/m³ 和 76~384 Bq/m³, 在 5 月氡浓度的分布范围是 253~436 Bq/m³. 随环境温度的上升, 氡浓度逐渐呈上升趋势, 显然环境温度上升加快了地下氡的扩散析出. 整体上看, 地下实验室环境中氡污染比较严重, 氡浓度超标天数较多.

为有效降低地下环境中氡浓度水平, 笔者借助自制的氡富集去除分离器对负一层实验室氡进行了分离富集和去除试验, 结果如图 5(a)所示. 当环境本底氡(吸附器附近测试点⑤)的极值为 372 Bq/m³ 时, 富集分离器出口(测试点⑥和⑦)的氡浓度可达到 409 和 535 Bq/m³, 显示出较好的氡去除能力.

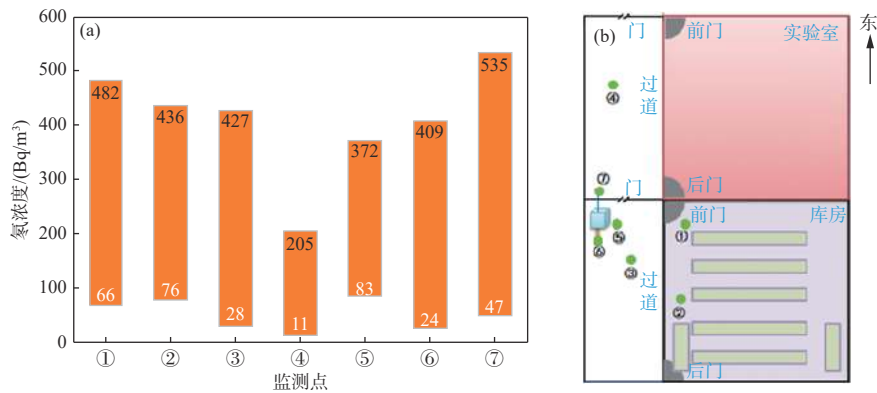


图 5 (a) 地下实验室不同监测点氡浓度分布范围, (b) 监测点分布平面图(①库房前门口附近, ②库房内部, ③库房外过道, ④实验室外过道, ⑤变压吸附器附近, ⑥变压吸附器 A 口, ⑦变压吸附器 B 口)

Fig. 5 (a) Distribution range of Radon concentration at different monitoring points in underground laboratory, (b) monitoring points (①near front entrance of warehouse, ②inside warehouse, ③outside corridor of warehouse, ④outside laboratory, ⑤near pressure swing adsorption equipment, ⑥outlet A and ⑦outlet B)

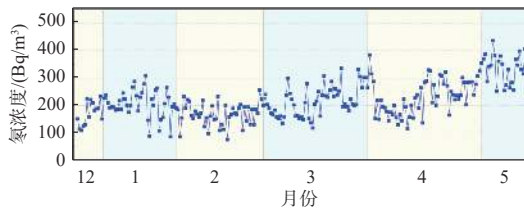


图 6 某研究所地下实验室的氡浓度分布情况 (监测点②)

Fig. 6 Distribution of Radon concentration in underground laboratory of a certain research institute (monitoring point ②)

3.6 其他建筑

除上述氡水平调研外, 笔者也跟踪监测了某基地和一些景点室内的氡分布水平, 结果如表 7 所列. 某基地氡浓度分布范围是 39~313 Bq/m³, 某石窟内

氡浓度是 13~237 Bq/m³, 均高于氡标准阈值. 某博物院 I 环境中氡水平极值为 644 Bq/m³, 是博物院 II 环境氡浓度极值的 12 倍. 在某博物馆 III 和某博

表 7 我国某基地与部分景点环境氡水平
Table 7 Environmental Radon levels in a training base and some scenic spots in China

序号	监测点	氡浓度范围/(Bq/m³)	平均值/(Bq/m³)
1	某基地	39~313	116
2	某石窟	13~237	67
3	某博物院I	13~644	185
4	某博物院II	14~52	33
5	某博物馆III	11~105	51
6	某博览园	47~91	64
7	某陵墓展馆I	18~135	70
8	某陵墓展馆II	19~73	46

览园中, 氡浓度的整体水平较低, 上限值为 100 Bq/m^3 左右. 陵墓展馆 I 和 II 的氡范围分别是 $18\sim 135$ 和 $19\sim 73 \text{ Bq/m}^3$, 基本不会对参观公众身体健康造成伤害. 总的来说, 上述代表性景点与训练基地内氡浓度水平有明显不同, 且变化较大. 为了降低环境中氡对人们辐射, 应将不同环境氡分布数据库告知于众, 同时必须发展出一些高效降氡、除氡的新技术.

4 氡的防护、降低和去除措施研究趋势

4.1 通风降氡

通风是最直接、最有效的降氡和氡去除方式, 借助通风系统将地面新鲜空气输送至地下建筑内对高含氡空气进行置换, 可以有效降低氡空间内的氡浓度水平^[58-59]. 按照通风方式不同又可分为压入

式通风、抽出式通风和压抽联合式通风 3 种, 大部分地下工程通风采用压入式通风. 温伟伟等^[60]研究了某地下工程在 24 h 氡浓度随通风的变化趋势, 研究结果显示, 当通风系统开启, 氡的浓度下降. 通风结束, 氡浓度短暂维持在较低水平, 由于空气的扩散对流, 氡浓度会缓慢逐渐升高至 $1\ 180 \text{ Bq/m}^3$ [图 7(a)]. 李昆仑等^[61]报道某国防坑道在通风系统开启 2 h 后, 氡浓度可从 389.7 Bq/m^3 下降到 167.1 Bq/m^3 . 值得注意的是, 当通风超过 1.5 h, 氡浓度不再显著降低, 这意味着延长通风时间对降低氡浓度已无太大作用 [图 7(b)]. 此外, 对于一些地下建筑, 其进风通道没有覆层, 裸露岩体中氡更容易随气体析出进入通道内, 氡浓度甚至可累积达到数万 Bq/m^3 , 所以在通风前, 应先将积累在通道内大量氡排出后再进行通风降氡.

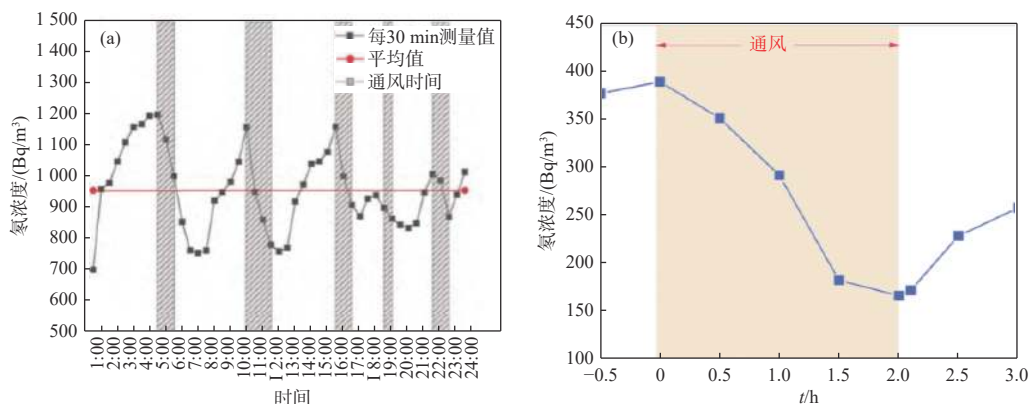


图 7 (a) 地下工程某点位 24 小时空气中氡浓度变化曲线^[60], (b) 某测试点通风前后的氡水平^[61]

Fig. 7 (a) Variation curve of Radon concentration in air at a certain underground engineering site within 24 h^[60], (b) Radon level before and after ventilation at a certain testing point^[61]

4.2 吸附降氡

吸附降氡是利用吸附剂(如活性炭)具有高比表面积和多孔结构的特性来吸附滞留在空气中的氡^[62], 通常氡吸附效果主要与吸附剂质量、吸附温度和吸附压强等因素有关. 研究表明, 吸附剂越多, 其吸附和滞留氡的量也越大. 降低吸附温度或增加气体吸

附压强, 可提高吸附剂吸附氡的系数, 可实现快速吸附降氡^[63-64]. 96901 部队^[60]曾研发了一种新型连续吸附降氡装备, 具体构成如图 8 所示. 当测氡仪监测到环境中氡浓度超过设定值时, 抽气泵能快速将室内气体经预冷器传输至吸附炭床进行氡吸附. 当吸附量达到某一临界值时, 电加热装置启动工作

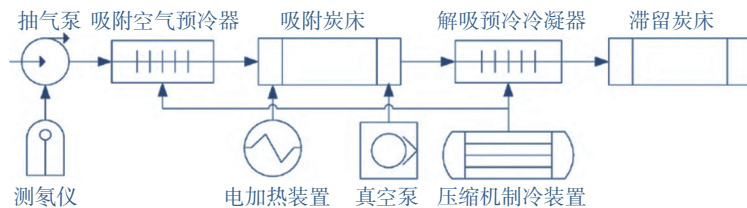


图 8 吸附装置构成及工作原理图^[60]

Fig. 8 Composition and working principle diagram of adsorption device^[60]

进行吸附炭床的热解吸,同时在真空泵辅助下产生负压,快速解吸氡气并进入冷凝器后经炭床吸附滞留发生衰变消除,该装备在 2 h 内可使 80 m^3 空间的氡浓度降低 55%。

叶茂林等^[65]曾研究了具有不同比表面积的颗粒状活性炭、球状活性炭和柱状活性炭对氡的吸附性能,如图 9(a)~(c)所示。结果表明,氡吸附能力与活性炭的比表面积显著相关,比表面积较大的颗粒状活性炭可将室内氡浓度降低 33.18%。在图 9(d)中,

选择以单位质量活性炭比较了氡吸附性能,结果显示颗粒活性炭的氡吸附量最高,达到 $85.8 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg})$,柱状活性炭的氡吸附性能为 $45.8 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg})$,球状活性炭的氡吸附性能最差为 $30.4 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg})$ 。刘力^[66]制备了比表面积为 $679.25 \text{ m}^2/\text{g}$ 活性炭/三维石墨烯 AC/3DG2(石墨烯占 2%)吸附剂,其氡的吸附系数是 6.02 L/g ,经过 5 次循环测试吸附氡(每次吸附 15 h),吸附能力衰减 14.4% [图 10(a)]。活性炭/凹凸棒土 AC/AT3(凹凸棒土占

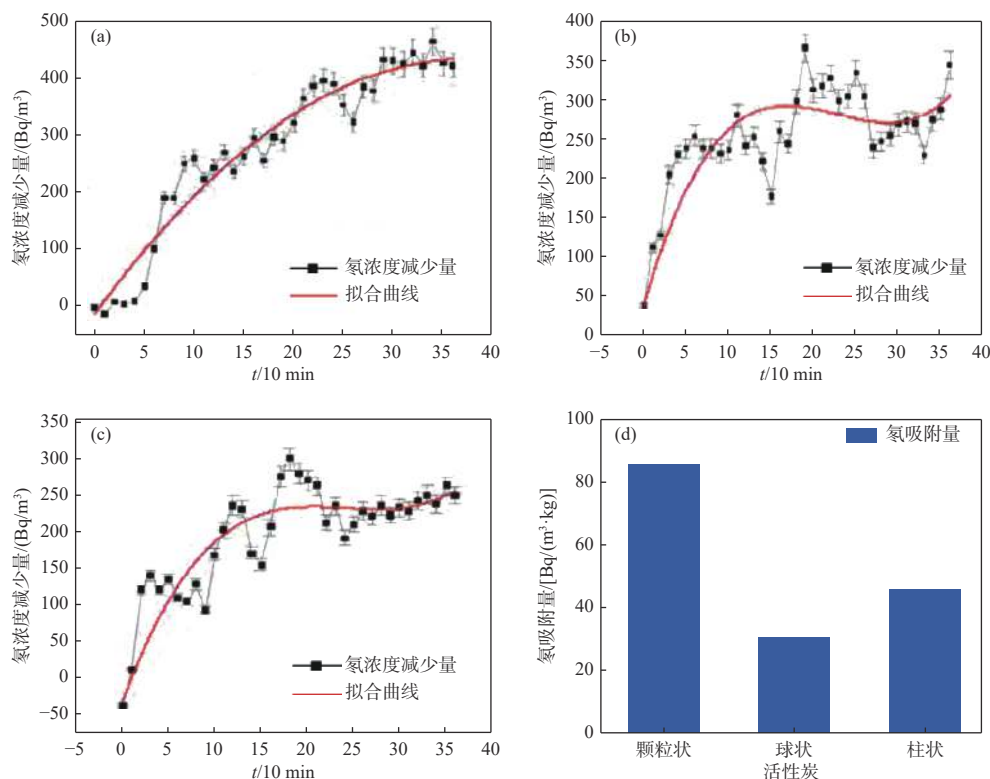


图 9 (a) 颗粒状、(b) 球状、(c) 柱状活性炭除氡的浓度与时间变化关系, (d) 不同形状活性炭的氡吸附量对比^[65]

Fig. 9 Concentration versus time relationship of (a) granular, (b) spherical, and (c) columnar activated carbon for Radon removal, and (d) comparison of Radon adsorption capacity of activated carbon with different shapes^[65]

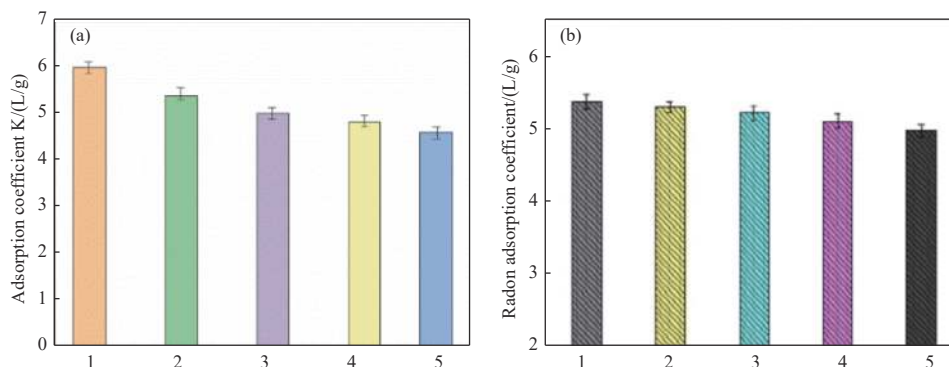


图 10 (a) AC/3DG2 和 (b) AC/AT3 复合材料吸附氡的循环稳定性^[66]

Fig. 10 Cyclic stability of (a) AC/3DG2 and (b) AC/AT3 composite materials for adsorbing Radon^[66]

3%)的吸附剂比表面积为 1 072.9 m²/g, 对应的氢的吸附系数是 5.35 L/g, 循环吸附降氢 5 次后, 吸附量为初始的 92.7%[图 10(b)]. 衰减可能是因为吸附剂表面氢吸附位点被衰变的氡子体(金属元素)占据, 吸附效率逐渐降低. 总体上看, 吸附剂的使用寿命分别为 17.3 和 34.2 d, 氢去除仅靠吸附方法仍较困难.

4.3 屏蔽降氢

屏蔽降氢主要是将某种特定材料涂覆在岩体或墙面裂缝处来阻断岩体内部氢向外扩散析出^[67]. 传统的屏蔽材料是活性炭、沸石、海泡石、重晶石、硫酸钡、石膏等, 这些材料仅适用于地面建筑“堵”氢. 因地下建筑环境内湿度大、氢浓度高、密闭性好, 传统屏蔽材料面临难成膜、易因氢辐射老化、生霉菌、产生裂纹或脱落等问题, 导致防氢效果差^[68-69]. 一种由聚酰亚胺树脂、高性能氟硅功能助剂和阻氢功能材料等组成的防氢板材和防氢凝胶, 具有优异阻氢性能、耐老化性能、良好的环境相容性与稳定性^[70-71]. 在地下建筑降氢过程中, 以板材为主体材料、凝胶作为粘接材料, 实现板材与岩体的壁面紧密接触, 阻断氢扩散, 可满足高效降氢、绿色环保的工程应用的需求. 利用纯丙烯酸乳液、钛白粉和超细微二氧化硅, 通过调节物料比例研制的防氢涂层材料防氢效率可达到 84%^[72-73]. 表 8 展示了不同措施的防氢效果、工程量、建设费用、运维难易度以及适用范围^[60]. 整体上, 屏蔽降氢效果最优, 但工程量大建设费用高. 通风降氢的效果稍低于屏蔽降氢, 但其适合于特殊场所、大区域降氢. 吸附降氢的效果较好, 但建设费用较大, 运维困难.

表 8 常用的地下建筑氢防护措施效能对比^[60]

Table 8 Comparison of effectiveness of commonly used Radon protection measures in underground buildings^[60]

措施	降氢效果	工程量	建设费用	运维难易度	适用范围
通风降氢	较好	中	小	稍难	大区域
吸附降氢	较好	小	中	困难	人员集中区域
屏蔽降氢	优秀	大	大	容易	高析出率区域

4.4 变压吸附分离-转移降氢方法初步研究

在一些特殊场合中, 因地下建筑内温度与湿度的要求, 通风降氢方法并不适用. 而屏蔽降氢虽然降低了空间中氢的浓度水平, 却带来了较大的火灾隐患和更高的 VOC 浓度, 真可谓“顾此失彼”. 吸

附降氢在短时间内可显著降低空间中氢水平, 但是氢很快会吸附饱和, 且氢衰变子体占据吸附位点, 致使吸附剂寿命极短. 笔者提出应改变降氢去氢的策略, 利用变压吸附的手段降氢. 这种技术的突出优势是可将空间中的氢连续转移至空间外, 而不需要频繁地更换吸附剂, 装置可以连续服役较长的时间. 若将该装置与制氧装置连用, 还可以解决高原地区的空间补氧难题. 笔者利用变压吸附法对地下实验室环境内氢分离富集去除进行了研究, 结果如表 9 所示. 当本底氢的范围为 82~397 Bq/m³, 分离器后 A 出口氢的浓度范围为 6~21 Bq/m³, 而 B 出口氢的浓度范围是 124~439 Bq/m³, 分离倍率(B/A)基本保持在 14.2~25.2 范围内, 这些表明变压吸附可以实现氢的高选择性分离.

表 9 变压吸附分离氢的分离前本底值以及分离后 A 出口、B 出口浓度变化与分离倍率

Table 9 Pressure swing adsorption separation of Radon: background value before separation, concentration at outlet A and outlet B after separation, and separation ratio

本底/ (Bq/m ³)	A出口/ (Bq/m ³)	B出口/ (Bq/m ³)	分离倍率 ^a
82	6	124	20.7
120	10	205	20.5
153	15	213	14.2
184	21	344	16.4
195	14	227	16.2
202	14	353	25.2
239	13	310	23.8
397	18	439	24.4

^a分离倍率=富集后B出口氢浓度/A出口氢浓度

选用富集率(富集后氢浓度/本底氢浓度×100%)作为指标可更为显著地展示变压吸附对氢的富集和去除性能. 如表 10 所列, 当实验室环境中氢的本底值低于 150 Bq/m³ 时, 富集率的范围是 114.0%~165.9%. 当本底值高于 150 Bq/m³ 时, 富集率的范围是 110.6%~187.0%, 这表明无论氢浓度本地值高或者低, 变压吸附都是可以实现氢有效分离、富集和去除的手段.

此外, 笔者将改性吸附材料用于氢的变压吸附分离、去除, 结果显示改性的材料对氢的富集、去除能力有了显著提升, 富集率保持在 120% 左右(表 11).

表 10 地下实验室氡浓度在富集前后变化与富集率
Table 10 Changes in Radon concentration and collection ratio in underground laboratory before and after collection

本底<150/ 富集后/ (Bq/m ³) (Bq/m ³)			富集率 ^a /%		
88	146	165.9	153	213	139.2
93	134	144.1	175	239	136.6
102	132	129.4	184	344	187.0
114	130	114.0	202	353	174.8
121	146	120.7	213	386	181.2
133	162	121.8	239	310	129.7
142	178	125.4	251	366	145.8
148	194	131.1	397	439	110.6

^a富集率=富集后氡浓度/本底氡浓度*100%

当环境本底氡为 535 Bq/m³ 时, 富集后的氡浓度与相应的富集率可达到 693 Bq/m³ 和 129.5%。证明该改性材料能够强化氡的吸附分离/富集过程, 有望应用于实现地下建筑内氡的高效转移去除。

表 11 改性分子筛吸附剂变压吸附分离富集地下实验室氡的浓度变化

Table 11 Pressure swing adsorption separation and collection of Radon concentration in underground laboratory using modified molecular sieve adsorbents

本底值/(Bq/m ³)	富集后/(Bq/m ³)	富集率 ^a /%
81	95	117.3
118	122	103.4
143	161	112.6
158	187	118.4
169	248	146.7
263	317	120.5
413	592	143.3
501	629	125.5
509	552	108.4
535	693	129.5

^a富集率=富集后氡浓度/本底氡浓度×100%

5 展望

随着我国地下建筑设施数量的急剧增加, 其环境空间生存的健康性、安全性、舒适性要求越来越高, 而部分地下密闭空间内氡污染严重超标, 如地

铁、典型坑道、矿井、国防过程和地下实验室环境中氡污染水平分别是 1.2~166.5、105.3~4 434.2、1 952~5 121、39~17 169、28~482 Bq/m³。氡防护措施应根据地下建筑的特征, 包括面积、建材、人员密集度、温度、湿度等要素“因地制宜”, 确定环境中氡的分布水平, 选择适宜的除氡方法。应该更关注变压吸附法高效分离-转移氡技术。在后续研究中重点关注氡的处理量、环境中氡浓度降低至安全阈值所需时间、变压吸附操作过程中的各种工艺参数、氡吸附分离机制、设备服役寿命、温度/湿度/压强对降氡效果的影响规律, 变压吸附与其他降氡措施的有机组合能有效实现地下建筑中氡高效去除。

参考文献:

[1] 赵寅超, 任向红, 曾逸智, 等. 室内空气氡检测技术进展[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(1): 53-55. [ZHAO Yinchao, REN Xianghong, ZENG Yizhi, et al. Advances in indoor Radon detection technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49 (1): 53-55.]

[2] 丘寿康. 有关氡危害与评价的认识问题[J]. 辐射防护通讯, 2001, 21(6): 3-7. [QIU Shoukang. Appreciation of Radon risk and evaluation[J]. Radiation Protection Bulletin, 2001, 21 (6): 3-7.]

[3] 马天赐, 向东, 程卫亚, 等. 吸入氡子体肺部有效剂量转换系数的影响因素研究[J]. 辐射防护, 2023, 43(1): 64-71. [MA Tianci, XIANG Dong, CHENG Weiya, et al. Study on the influencing factors of pulmonary effective dose conversion coefficient of inhaled Radon progeny[J]. Radiation Protection, 2023, 43 (1): 64-71.]

[4] 王喜元, 金元, 陈泽广. 中国室内氡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [WANG Xiyuan, JIN Yuan, CHEN Zeguang. Study on indoor Radon in China[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[5] 王倩雪, 吴文保, 员秀梅, 等. 建筑室内氡检测的方法探讨[J]. 辐射防护, 2019, 39(3): 198-201. [WANG Qianxue, WU Wenbao, YUN Xiumei, et al. Discussion on the method of indoor Radon measurement[J]. Radiation Protection, 2019, 39 (3): 198-201.]

[6] 王倩雪, 王喜元. 全国室内氡-土壤氡关联性研究课题启动[J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(1): 14-17. [WANG Qianxue, WANG Xiyuan. Initiation of a countrywide project on relationship between indoor Radon and soil Radon[J]. Radiation Protection Bulletin, 2009, 29 (1): 14-17.]

- in, 2009, 29 (1): 14-17.]
- [7] 刘宏奎, 王喜元, 冯勇, 等. 建筑室内辐射污染控制与改善关键技术研究[J]. 建设科技, 2011(23): 42-45. [LIU Hongkui, WANG Xiyuan, FENG Yong, et al. Research on key technologies of indoor radiation pollution control and improvement in buildings[J]. Construction Science and Technology, 2011 (23): 42-45.]
- [8] 彭金梅, 王兴飞, 刘学峰, 等. 部分建筑材料氡析出率测试分析[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(1): 28-31. [PENG Jinmei, WANG Xingfei, LIU Xuefeng, et al. Measurement of Radon exhalation rate from some construction materials[J]. Radiation Protection Bulletin, 2012, 32 (1): 28-31.]
- [9] 孙昌昊. 环境中未结合态氡子体测量方法及其特征参数现场调查研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021. [SUN Changhao. Field survey and measurement method of the characteristic parameters of unattached Radon progeny in environment[D]. Hengyang: University of South China, 2021.]
- [10] 寇珊珊, 武云云, 宋延超, 等. 降氡方法在室内氡污染治理中的应用与分析[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(2): 149-152. [KOU Shanshan, WU Yunyun, SONG Yanchao, et al. Application and analysis of Radon-reduction methods in indoor Radon pollution control[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31 (2): 149-152.]
- [11] 孟煜, 白莉. 室内氡气及其子体研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(4): 102-105. [MENG Yu, BAI Li. Study on indoor Radon and its daughters[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39 (4): 102-105.]
- [12] 张乐, 刘书魁, 林兴德, 等. 低本底条件下氡及其子体的抑制研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(5): 975-979. [ZHANG Le, LIU Shukui, LIN Xingde, et al. Study on the inhibition of Radon and its daughters under low background conditions[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2020, 57 (5): 975-979.]
- [13] 何明来, 贾代勇, 隋鲁彦. 室内氡危害及案例分析[J]. 洁净与空调技术, 2010(2): 1-4. [HE Minglai, JIA Daiyong, SUI Luyan. The hazard of indoor Radon and analysis of cases[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2010 (2): 1-4.]
- [14] 孙璐, 王小春, 潘艳, 等. 云南省某矿区氡浓度水平调查分析[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29(1): 57-60. [SUN Lu, WANG Xiaochun, PAN Yan, et al. Investigation and analysis of Radon concentration in a mining area in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, 29 (1): 57-60.]
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 室内氡及其子体控制要求: GB/T 16146—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Requirements for control of indoor Radon and its progeny: GB/T 16146—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.]
- [16] 薛向明, 武钊, 李雷, 等. 贵阳市地铁一号线氡浓度水平调查及其评估[J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(6): 887-891. [XUE Xiangming, WU Zhao, LI Lei, et al. Survey and assessment of Radon concentration in Guiyang metro line 1[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, 40 (6): 887-891.]
- [17] Riudavets M, Garcia de Herreros M, Besse B, et al. Radon and lung cancer: current trends and future perspectives[J]. Cancers, 2022, 14 (13): 3142.
- [18] Organization W H. WHO handbook on indoor Radon: a public health perspective[M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2009.
- [19] 朱立, 唐莉. 氡监测与防护研讨班文集[R]. 中国地质科学院生物环境地球化学研究中心, 1997: 41-46. [ZHU Li, TANG Li. Collected papers of Radon monitoring and protection seminar[R]. Bioenvironmental Geochemical Research Center of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1997: 41-46.]
- [20] Seltenerich N. Radon risk: a global estimate of Radon's contribution to lung cancer[J]. Environmental Health Perspectives, 2019, 127 (2): 024001.
- [21] Gaskin J, Coyle D, Whyte J, et al. Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential Radon[J]. Environmental Health Perspectives, 2018, 126 (5): 057009.
- [22] Darby S, Hill D, Auvinen A, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies[J]. BMJ (Clinical Research Ed), 2005, 330 (7485): 223-226.
- [23] 曾祥素. 我国每年因氡致肺癌5万例[N]. 中国质量报, 2005-05-12.
- [24] 雷苏文, 张守志. 室内氡与肺癌关系的病例-对照研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1999, 19(4): 290-291.
- [25] 程业勋. 环境中氡及其子体的危害与控制[J]. 现代

- 地质, 2008, 22(5): 857-868. [CHENG Yexun. Hazard and control measures of Radon and its progenies in the environment[J]. *Geoscience*, 2008, 22 (5): 857-868.]
- [26] Lubin J H, 王作元, Boice Jr J D, 等. 肺癌危险度与室内氡关系研究: 中国两项研究的汇总分析结果[J]. *中国辐射卫生*, 2003, 12(4): 193-197.
- [27] 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. [SHANG Bing, HE Qinghua, WANG Zuoyuan, et al. Studies of indoor action level of Radon in China[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2003, 23 (6): 462-465.]
- [28] 徐荣政, 温伟伟, 吴友朋, 等. 地下工程氡浓度监测与剂量评价[J]. *核电子学与探测技术*, 2021, 41(5): 789-794. [XU Rongzheng, WEN Weiwei, WU Youpeng, et al. Radon concentration monitoring and does estimation in underground engineering[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2021, 41 (5): 789-794.]
- [29] 谭延亮. 氡析出率测量若干问题研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011. [TAN Yanliang. Study on some problems of Radon exhalation rate measurement[D]. Hengyang: University of South China, 2011.]
- [30] Kim D, Cho S, Mohiuddin H, et al. Spatial modeling for Radon concentrations in subway stations in Seoul, Korea[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2022, 24 (1): 116-126.
- [31] 范延新. 地铁站空气环境中氡浓度监测现状[J]. *黑龙江科学*, 2022, 13(14): 142-145. [FAN Yanxin. Current situation of Radon concentration monitoring in subway station air environment[J]. *Heilongjiang Science*, 2022, 13 (14): 142-145.]
- [32] 翁绪, 罗维均, 王彦伟, 等. 贵阳地铁1号线氡浓度特征及其潜在健康效应评估[J]. *地球与环境*, 2022, 50(1): 131-139. [WENG Xu, LUO Weijun, WANG Yanwei, et al. Atmospheric Radon concentration in Guiyang subway line 1 and the potential health effects[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50 (1): 131-139.]
- [33] Hwang S H, Park W M. Radon and PM₁₀ concentrations in underground parking lots and subway stations with health risks in South Korea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (35): 35242-35248.
- [34] Ghada B, Mennat A L, Nabil E F. Unnoticed daily exposure to Radon in Cairo's subway[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2015, 133 (4): 471-481.
- [35] 鞠志萍, 黄伊林, 彭文斌, 等. 南宁市地铁一号线氡浓度调查与分析[J]. *广西科技大学学报*, 2019, 30(4): 1-5, 14. [JU Zhiping, HUANG Yilin, PENG Wenbin, et al. Investigation and analysis of Radon concentration in Nanning metro line one[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2019, 30 (4): 1-5, 14.]
- [36] 王成明. 成都地铁一号线站台内空气中氡浓度分布状况研究[J]. *四川环境*, 2015, 34(1): 146-149. [WANG Chengming. Research on the distribution of Radon concentrations in the air of Chengdu metro line 1 stations[J]. *Sichuan Environment*, 2015, 34 (1): 146-149.]
- [37] 景军波, 卢新卫, 李长卓, 等. 西安市地铁车站氡浓度调查与分析[J]. *辐射防护*, 2015, 35(5): 317-320. [JING Junbo, LU Xinwei, LI Changzhuo, et al. Investigations and analysis of Radon concentration in Xi'an metro station[J]. *Radiation Protection*, 2015, 35 (5): 317-320.]
- [38] 慈捷元, 时劲松, 陈峰, 等. 深圳地铁一期工程各站段放射性水平与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2006, 15(4): 474-475.
- [39] 王虹, 石梦蝶, 白文娟, 等. 武汉市地铁内氡浓度检测结果分析[J]. *公共卫生与预防医学*, 2018, 29(2): 100-101.
- [40] 卢秀芳, 赵新春, 马一龙, 等. 南宁市地铁1号线各站段氡浓度水平以及地表 γ 剂量率水平研究[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(1): 72-75. [LU Xiufang, ZHAO Xinchun, MA Yilong, et al. Study on the Radon concentration and the surface level of γ radiation dose rate in the stations of Nanning metro line[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2019, 28 (1): 72-75.]
- [41] 陈东辉, 朱国祯, 李植纯, 等. 长沙市地铁一号线车站内氡活度浓度的调查与评价[J]. *辐射防护*, 2020, 40(4): 286-289. [CHEN Donghui, ZHU Guozhen, LI Zhichun, et al. Investigation and evaluation of Radon activity concentration in the stations of Changsha Metro Line 1[J]. *Radiation Protection*, 2020, 40 (4): 286-289.]
- [42] 朱伟寿, 林静, 李仲修, 等. 乌鲁木齐地铁一号线氡浓度调查[J]. *疾病预防控制中心通报*, 2021, 36(4): 59-60, 72. [ZHU Weishou, LIN Jing, LI Zhongxiu, et al. Investigation on Radon concentration in Urumqi metro line 1[J]. *Bulletin of Disease Control & Prevention (China)*, 2021, 36 (4): 59-60, 72.]
- [43] Yu K N, Young E, Wong K. A survey of Radon prop-

- erties in underground railway stations in Hong Kong[J]. *Journal of Radiological Protection*, 1996, 16 (1): 37-43.
- [44] 杜杰, 高淑萍, 李蓉. 地下坑道氡水平调查[J]. *中国辐射卫生*, 2004, 13(2): 110-111. [DU Jie, GAO Shuping, LI Rong. Investigation on Rn level in the underground tunnel[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2004, 13 (2): 110-111.]
- [45] 尚爱国, 于春文, 秦晋, 等. 地下坑道空气中氡浓度变化的测量研究[J]. *辐射防护*, 2008, 28(2): 118-124. [SHANG Aiguo, YU Chunwen, QIN Jin, et al. Measurement and research of variations in Radon concentrations in underground tunnel[J]. *Radiation Protection*, 2008, 28 (2): 118-124.]
- [46] 牛冠毅, 陈剑杰, 王君. 地下坑道周围山体内氡运移力学解析[J]. *计算物理*, 2012, 29(2): 239-244. [NIU Guanyi, CHEN Jianjie, WANG Jun. Mechanical analysis of Radon transport in vicinity of an underground tunnel[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2012, 29 (2): 239-244.]
- [47] 曾晔, 罗忠辉, 田新, 等. 坑道氡浓度监测及所致剂量估算[J]. *核电子学与探测技术*, 2018, 38(5): 694-698. [ZENG Ye, LUO Zhonghui, TIAN Xin, et al. Radon concentration monitoring in tunnels and dose estimation[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2018, 38 (5): 694-698.]
- [48] 吴国祥, 陈远华. 矿井氡监测与评价探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 1993, 21(1): 40-43. [WU Guoxiang, CHEN Yuanhua. Monitor and assessment of the Radon in coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1993, 21 (1): 40-43.]
- [49] 刘超, 邢亚飞, 赵潇, 等. 活性炭盒法测定矿井氡采样方法的初步研究[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29(6): 615-617, 624. [LIU Chao, XING Yafei, ZHAO Xiao, et al. Preliminary study on Radon sampling method in mine by activated carbon box[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2020, 29 (6): 615-617, 624.]
- [50] 李秀兰, 王润溪, 蒋维礼, 等. 山西省某铁矿井下氡浓度与所致矿工剂量[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2000(5): 364-365. [LI Xiulan, WANG Runxi, JIANG Weili, et al. Radon concentration and induced miner dose in a certain iron mine in Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Radiation Mediation and Protection*, 2000 (5): 364-365.]
- [51] 张德华, 刘晓超, 王汉青. 复杂管网式地下铀矿井氡浓度分布研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(3): 15-20. [ZHANG Dehua, LIU Xiaochao, WANG Hanqing. Study on the concentration distribution of Radon in complex pipeline network underground uranium mine[J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 2019, 33 (3): 15-20.]
- [52] 孙璐. 某矿井下作业人员辐射损伤标志物筛选及其作用机制的研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2020. [SUN Lu. Study on screening of radiation damage markers for underground workers in a mine and its mechanism[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2020.]
- [53] 陈军. 人防工程防氡除氡技术措施[J]. *智能城市*, 2021, 7(19): 65-66. [CHEN Jun. Technical measures for Radon prevention and removal in civil air defense projects[J]. *Intelligent City*, 2021, 7 (19): 65-66.]
- [54] 黄伟, 苏勇. 地下建筑中氡的危害及防氡措施研究[J]. *山西建筑*, 2009, 35(29): 335-336. [HUANG Wei, SU Yong. Study on the Radon hazard and Radon preventing measures in underground building[J]. *Shanxi Architecture*, 2009, 35 (29): 335-336.]
- [55] 廉国斌, 廖韩林, 金华, 等. 地下工程中氡气的危害与防护措施[J]. *中国辐射卫生*, 2014, 23(2): 143-144, 147.
- [56] 金晓公. 国防工程内部氡污染消除技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2009. [JIN Xiaogong. Research on internal Radon pollution elimination technology in national defense engineering[D]. Nanjing: Army Engineering University of PLA, 2009.]
- [57] 亓伟, 耿世彬, 高虎杉, 等. 国防工程降氡技术研究现状及应用[J]. *洁净与空调技术*, 2011(1): 38-42. [QI Wei, GENG Shibin, GAO Hushan, et al. The research status and application of Radon reduction technology in defense projects[J]. *Contamination Control & Air-Conditioning Technology*, 2011 (1): 38-42.]
- [58] 田蓉, 刘迎云. 建筑室内氡污染研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(1): 35-42. [TIAN Rong, LIU Yingyun. Research progress of indoor Radon pollution in dwellings[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6 (1): 35-42.]
- [59] 柳景景, 李阳, 张德全, 等. 某溶洞放射性废物库通风降氡技术研究[J]. *铀矿冶*, 2021, 40(2): 170-173. [LIU Jingjing, LI Yang, ZHANG Dequan, et al. Research on ventilation and Radon reduction technology for decommissioning radioactive waste repository in a Karst cave[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2021, 40 (2): 170-173.]

- [60] 温伟伟,徐荣政,吴友朋,等.地下工程氡防护方法及能力研究[J].[辐射防护](#),2022,42(1):48-53. [WEN Weiwei, XU Rongzheng, WU Youpeng, et al. Methods and performance of Radon reduction techniques in underground facilities[J]. [Radiation Protection](#), 2022, 42 (1): 48-53.]
- [61] 李昆仑,王金栋,周洪庆.某国防坑道氡子体防护浅析[J].军民两用技术与产品,2019(8):64-66. [LI Kunlun, WANG Jindong, ZHOU Hongqing. Analysis on Radon daughter protection in a national defense tunnel[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2019 (8): 64-66.]
- [62] 陈良,饶仲群.加压贮存和活性炭吸附在核电站放射性废气处理中的应用[J].中国核电,2009,2(3):262-266. [CHEN Liang, RAO Zhongqun. Application of pressurized gas storage system and activated carbon sorption system in gaseous radioactive waste processing for NPPs[J]. *China Nuclear Power*, 2009, 2 (3): 262-266.]
- [63] 谢德福,肖德涛,丘寿康.活性炭对惰性气体动态吸附影响因素的讨论[J].辐射防护,2011,31(2):105-108,114. [XIE Defu, XIAO Detao, QIU Shoukang. Factors influencing dynamic absorption of noble gases by activated carbon[J]. *Radiation Protection*, 2011, 31 (2): 105-108, 114.]
- [64] 冯旭,肖德涛,丘寿康,等.活性炭高压吸附氡气技术研究[J].原子能科学技术,2016,50(4):763-768. [FENG Xu, XIAO Detao, QIU Shoukang, et al. Research on high pressure adsorption of Radon on activated carbon[J]. [Atomic Energy Science and Technology](#), 2016, 50 (4): 763-768.]
- [65] 叶茂林,姜建中,刘琪,等.活性炭除氡性能对比实验研究[J].防护工程,2022,44(6):15-19. [YE Mao-lin, JIANG Jianzhong, LIU Qi, et al. Comparative experiment on the performance of activated carbon for removal of Radon[J]. [Protective Engineering](#), 2022, 44 (6): 15-19.]
- [66] 刘力.活性炭复合氡吸附材料的研制[D].衡阳:南华大学,2021. [LIU Li. Development of activated carbon composite Radon adsorption material[D]. Hengyang: University of South China, 2021.]
- [67] 叶刚,邓跃全,李敏,等.某地下工程氡辐射涂层屏蔽效果研究[J].绿色建筑,2022,14(5):86-89. [YE Gang, DENG Yuequan, LI Min, et al. Research on the shielding effect of Radon radiation coating in an underground project[J]. [Green Building](#), 2022, 14 (5): 86-89.]
- [68] 刘汉钦,肖仁义,曾新元.871防氡涂料的研制[J].辐射防护,1990,10(4):248-254. [LIU Hanqin, XIAO Renyi, ZENG Xinyuan. Development of 871 anti-Radon coating[J]. *Radialization Protection*, 1990, 10 (4): 248-254.]
- [69] 曲瑞雪,董发勤,邓跃全,等.一种新型地下工程用防氡涂层性能的研究[J].功能材料,2012,43(2):205-208. [QU Ruixue, DONG Faqin, DENG Yuequan, et al. Study on the performances of a new anti-Radon paintcoat in underground engineering[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43 (2): 205-208.]
- [70] 薛素妹,堵庆苏,万骏.防氡涂料研究进展与展望[J].特种功能型涂料,2017,20(12):14-16. [XUE Sumei, DU Qingsu, WAN Jun. Research progress and prospect of anti-Radon coatings[J]. *Special Functional Paint*, 2017, 20 (12): 14-16.]
- [71] 郑天亮,李英波,杨青,等.建筑防氡涂料防氡效果的研究[J].中华放射医学与防护杂志,2005,25(4):389-390. [ZHENG Tianliang, LI Yingbo, YANG Qing, et al. Study on Radon prevention effect of building Radon prevention coating[J]. [Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection](#), 2005, 25 (4): 389-390.]
- [72] 郭保生,杨明理.水性环保防氡涂料研究[J].科技导报,2008,26(6):70-72. [GUO Baosheng, YANG Mingli. Research on a Radon proof hydrous paint[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26 (6): 70-72.]
- [73] 郭保生,陈华钢,袁富贵.绿色建筑材料防氡腻子研究[J].广东建材,2013,29(1):27-29. [GUO Baosheng, CHEN Huagang, YUAN Fugui. Study on Radon-proof putty for green building materials[J]. [Guangdong Building Materials](#), 2013, 29 (1): 27-29.]