

贵阳地铁1号线氡浓度特征及其潜在健康效应评估

翁 绪^{1,2}, 罗维均^{1,3,4,*}, 王彦伟^{1,3}, 贾玉鹤⁵, 王世杰^{1,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所 地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州省高校乡村振兴研究中心,
贵州 安顺 561000; 5. 沈阳市生态环境事务服务中心, 沈阳 110011)

摘要: 地铁轨道交通逐渐成为人们日常出行的首选, 但作为较封闭的地下空间环境易导致氡积聚, 对于工作人员和乘客存在潜在的电离辐射暴露风险, 有必要进行监测评估。贵阳地铁1号线于2018年12月开通运营, 所穿越地层主要为碳酸盐岩, 该地层风化过程中常常产生氡异常, 尤需引起关注。本研究利用RAD-7电子测氡仪, 分别于2020年7月29日和2021年1月7日对该地铁全线20个地下站点及车厢中空气氡浓度进行监测, 分析其时空变化特征及主要影响因素, 估算人员暴露剂量, 评估潜在健康效应。结果表明: 贵阳地铁1号线氡浓度水平为9.6~257.5 Bq/m³, 均值为38.9 Bq/m³, 高于我国主要城市地铁氡平均值(28.9 Bq/m³), 低于国外平均值(105.2 Bq/m³); 且不同站点存在较大差异, 整体上氡浓度夏季低于冬季。计算发现, 站内工作人员因氡及其子体暴露导致的有效剂量为0.28 mSv/a, 小于天然背景辐射值(约为2.4 mSv/a), 属于低剂量辐射范围, 不存在健康风险。

关键词: 地铁; 氡; 电离辐射; 低剂量; 健康效应评估

中图分类号: X82; X83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2022)01-0131-09 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2022.50.103

氡作为唯一的天然放射性气体, 无色无味且无处不在, 与其衰变子体成为环境中的隐形杀手, 是当前环境辐射研究的重点^[1]。1988年国际癌症研究机构发现了氡及其子体的致癌性, 后通过动物实验^[2]和流行病学调查^[3]得以证实。2009年世界卫生组织宣布住宅中氡及其子体的长期暴露是仅次于吸烟的肺癌致病因子, 对于不吸烟者, 氡是最主要的致肺癌因子^[4]。作为天然辐射源的氡衰变时会产生电离辐射并损害人体健康, 一个人所遭受的电离辐射主要以Gy或Sv来计量(对于常见的辐射类型, 如 γ 辐射、 x 射线和 β 粒子, 1 Gy = 1 Sv)。高剂量辐射会对人体健康造成危害, 但最近的研究表明, 低剂量(<0.1 Gy)辐射的健康效应尚不明确, 是否存在阈值以及低剂量辐射的健康效应还存在争论^[5-6]。

伴随着城市人口的增加, 交通拥堵问题愈发严峻, 许多城市建设了地铁轨道交通, 我国一线城市中每天通过地铁出行的人数接近3 000万^[7]。地铁

隧道、车站以及车厢等地下环境空间因相对封闭易导致氡的积聚, 这关系到乘客和乘务工作者的健康与安全。我国北京^[8]、香港^[9]、上海^[10]、广州^[11]、深圳^[12]、成都^[13]、武汉^[14]、天津^[15]、南京^[16]、西安^[17]、南宁^[18]、宁波和杭州^[19]等城市均开展了有关地铁氡浓度的检测与剂量评估工作。大量研究表明, 地铁环境氡浓度远低于地下室、洞穴等高氡环境, 但也普遍高于外界大气背景值。在提倡选择地铁低碳出行的同时, 地铁环境空气质量也值得关注, 特别是氡及其子体所致的电离辐射暴露情况。

碳酸盐岩中铀含量较少, 是一类极贫铀的岩石类型, 但因铀易富集在碳酸盐岩风化残余剖面上, 常引起风化剖面氡异常^[20]。世界各地的岩溶洞穴中均有监测到了较高的氡浓度^[21-22], 在贵州地区的一岩溶洞穴中更测得氡浓度高达十几万 Bq/m³^[23]。贵阳是典型的喀斯特山区城市, 喀斯特地貌占比达总面积71.8%^[24], 该地区的人工地下空间中很可能存在较高氡浓度, 因此有必要对贵阳地铁进行氡气

收稿日期: 2021-06-10; 改回日期: 2021-09-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB400202001); 国家自然科学基金项目(41673121); 贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648)。

第一作者简介: 翁绪(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事喀斯特环境质量研究。E-mail: wengxu@mail.gyig.ac.cn.

* 通讯作者: 罗维均(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为喀斯特关键带物质循环。E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn.

监测。本研究拟对贵阳地铁1号线空气氡浓度进行调查,计算地铁工作人员氡暴露剂量,评估人体健康效应,为现有在建和后续拟建地铁线路空气质量管理提供科学依据。

1 研究区概况

贵阳地处我国西南喀斯特核心区,海拔高度约1 100 m,当地年均气温15.3℃,年均相对湿度77%,属于典型亚热带湿润温和型气候。研究区内地层从震旦系灯影组至第四系均有出露,由于形成环境的不同,不同时代的地层在岩相上存在明显差异,并以二叠、三叠系分布最广,岩性主要以不同时代的白云岩、白云质灰岩、灰岩为主,其次为二叠系和三叠系的泥质灰岩、砂岩、页岩等,以及第四系的粘土类^[24]。总体上,研究区内88%均为碳酸盐岩类,少量碎屑岩和第四系零星分布其中。该区岩层褶皱明显,由于断层的破坏,碳酸盐岩形成断块分布^[24]。

贵阳地铁1号线(图1)由5个地面站台和20个地下站台组成,全长35.2 km,地下线路29 km,主要连通观山湖区、云岩区和南明区,日均客运量约11.5万人次^[25]。贵阳市轨道交通网计划由9条线路组成,预计建设车站258座,建成后总里程可达460多km^[26]。

2 研究方法

2.1 检测和评价标准

检测方法:《环境空气中氡的标准测量方法》(GBT14582-1993)。

评价标准:《地下建筑氡及其子体控制标准》(GBZ116-2002)、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)。

2.2 监测仪器

DURRIDGE公司生产的RAD-7型电子测氡仪:RAD-7电子氡气检测仪主要由采样部件和主机构成。气体被仪器自带泵体先经过干燥剂干燥,再经过空滤过滤后泵入半球形内腔的静电收集部件,氡及其子体衰变时产生的 α 粒子在高压下被探测器接收,仪器通过对 α 粒子探测实现氡浓度测量,探测范围从3.7 Bq/m³至百万Bq/m³。

2.3 监测时间及点位

通过前期调研,发现地面站台通风较好,站台上氡气浓度与大气背景值基本一致,因此,本研究

着重于对20个地下站点以及地铁车厢内部的空气氡浓度进行监测。

监测时间:2020年7月29日和2021年1月7日。

车站布点:仪器放置于监测站点站台中部,两次监测均在站台同一侧,测量时间为半小时,测量三个值取平均值。

车厢布点:以普通乘客身份,携带RAD-7仪器,从车站始发站至终点站为一个监测周期,以每5分钟取一次数据,把整个周期内监测的结果求平均。

2.4 数据处理

本文采用联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)推荐模式估算地铁平衡当量氡浓度和氡及其子体所致地铁工作人员人均年有效剂量^[27],公式如下:

$$EEC_{Rn} = F \cdot C_{Rn} \quad (1)$$

式中, EEC_{Rn} —平衡当量氡浓度, Bq/m³; C_{Rn} —氡浓度, Bq/m³; F —平衡因子,室内环境取0.40;

$$H_e = F \cdot C_{Rn} \cdot f \cdot t \quad (2)$$

式中, H_e —有效剂量, mSv; C_{Rn} —氡浓度, Bq/m³; F —平衡因子; f —氡剂量转换因子,取9 nSv·m³/(Bq·h); t —停留时间, h(乘务人员年均工作250 d,每天8 h)。

3 结果与分析

3.1 氡浓度

图2显示,贵阳市地铁1号线2020年7月份(夏季)各站氡浓度水平为3.7~176 Bq/m³,其中北京路站氡浓度最低(3.7 Bq/m³),贵阳北站氡浓度最高(176 Bq/m³),全线站台氡平均浓度为23.1 Bq/m³,车厢内平均氡浓度与站台平均浓度相当,为24.2 Bq/m³;2021年1月份(冬季)各站氡浓度水平为15.5~339 Bq/m³,其中清水江路站氡浓度最低(15.5 Bq/m³),贵阳北站氡浓度最高(339 Bq/m³),全线站台平均氡浓度为54.7 Bq/m³,车厢内平均氡浓度也接近于站台平均浓度,为50.1 Bq/m³;全年氡浓度水平为9.6~257.5 Bq/m³,平均浓度为38.9 Bq/m³,车厢内全年平均氡浓度同样接近于站台平均浓度,为37.1 Bq/m³。同期贵阳室外氡浓度监测结果分别为10.1 Bq/m³和14.2 Bq/m³(图3),均低于地铁站台浓度。

根据公式(1)计算,贵阳地铁1号线车站的平衡当量氡浓度为15.5 Bq/m³,车厢内的平衡当量氡

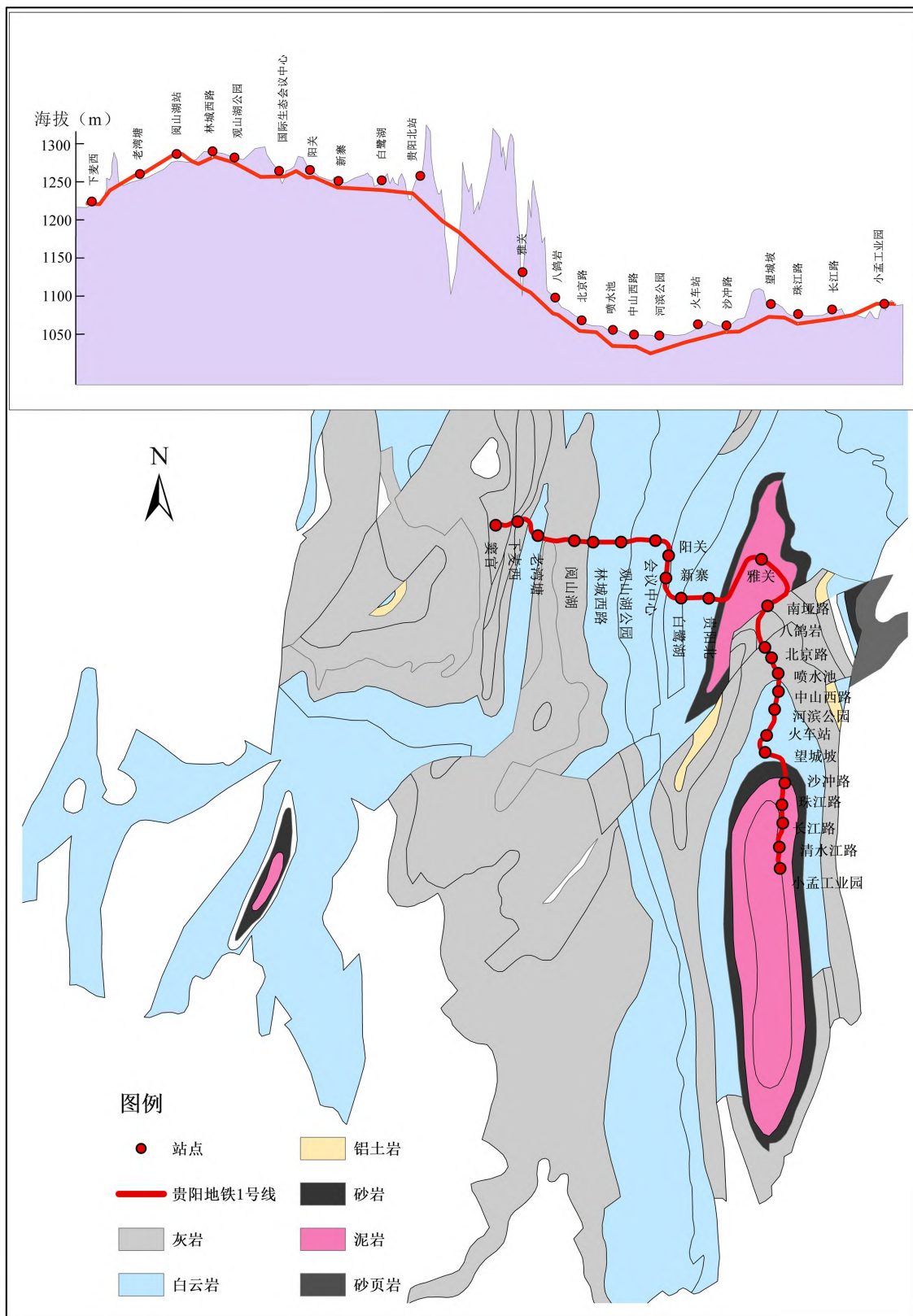


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological map of the study area

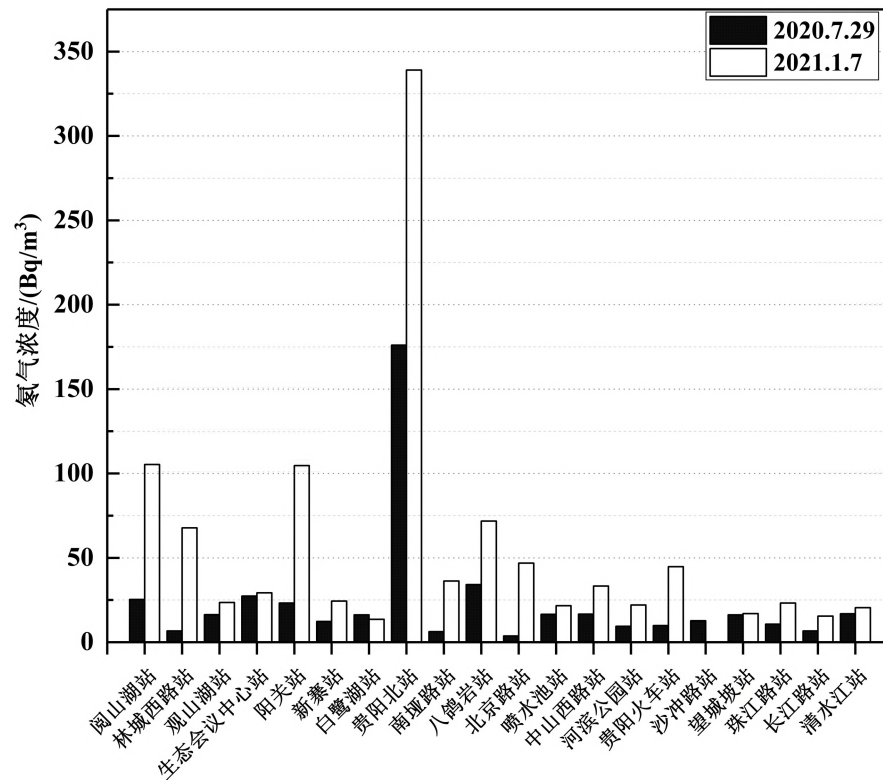


图2 贵阳市地铁1号线各站点氡浓度

Fig. 2 Radon concentration at each station of the Guiyang subway line 1

浓度为 14.8 Bq/m^3 , 所测站点最高值的平衡当量氡浓度为 135.6 Bq/m^3 , 地铁线路空气平衡当量氡浓度均显著低于《地下建筑氡及其子体控制标准》(GBZ116-2002)中所规定限值(400 Bq/m^3)^[28]。

3.2 剂量估算

根据贵阳地铁1号线车站平均氡浓度值 38.9 Bq/m^3 , 采用公式(2)计算得出, 贵阳地铁1号线站台乘务人员因吸入站内环境氡所致年均有效剂量为 0.28 mSv 。贵阳北站站点平均氡浓度为 257.5 Bq/m^3 , 计算得该站点乘务人员氡暴露年均有效剂量为 1.8 mSv , 低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定的工作人员年有效剂量限值(20 mSv), 但略高于该标准中规定的公众受照年有效剂量限值(1 mSv)^[29]。

3.3 氡来源判别

地铁站中氡主要来源于建筑材料、土壤和基岩的释放, 但在不同地区、不同站点氡的来源和浓度有较大差异。印度加尔各答地铁氡浓度为 23.1 Bq/m^3 , 主要来源于建筑材料的析出, 而非非来自地下土壤^[30]; 韩国首尔地铁氡浓度为 35.7 Bq/m^3 , 认为在花岗岩地区的地下车站可能存在较高的氡

值^[31]; 贵阳地铁1号线车站及其通道四壁建筑装饰材料均为花岗岩、大理石, 这会向地铁环境中释放一部分氡。开罗地铁新旧两站点氡浓度分别为 207.2 Bq/m^3 和 329.3 Bq/m^3 , 研究表明建筑年代久远的站点密封性不足, 基岩中的氡扩散至站台致使较高的氡值^[32]; 芬兰赫尔辛基地铁氡浓度为 100 Bq/m^3 , 与基岩放射性背景值较高有关^[33]; 委内瑞拉加拉加斯地铁氡浓度为 30 Bq/m^3 , 但在断层上的站点测得最高值可达 112 Bq/m^3 ^[34]; 土壤和基岩可能是导致地下建筑较高氡浓度的主要原因之一, 贵州土壤铀镭含量较高^[35], 且该地区多为碳酸盐岩, 岩石风化过程会导致铀的富集, 因此贵阳地铁1号线某些站点较高的氡浓度, 可能与该地区的土壤和基岩氡的释放有关(表1), 经对比发现, 白云岩和石灰岩地区的站点氡浓度, 均高于泥岩地区的站点。与岩溶地区洞穴测得的氡浓度相比, 地铁站内氡浓度低一到三个数量级, 这可能由洞穴和地铁站台的环境不同所造成, 地铁站台是人工建造而成, 大量的建筑材料封堵了岩层中氡向站台释放的通道, 因此土壤和岩层环境向地铁站台释放氡较少, 其次较好的人工通风也是地铁站氡浓度远低于天然洞穴

的原因之一。

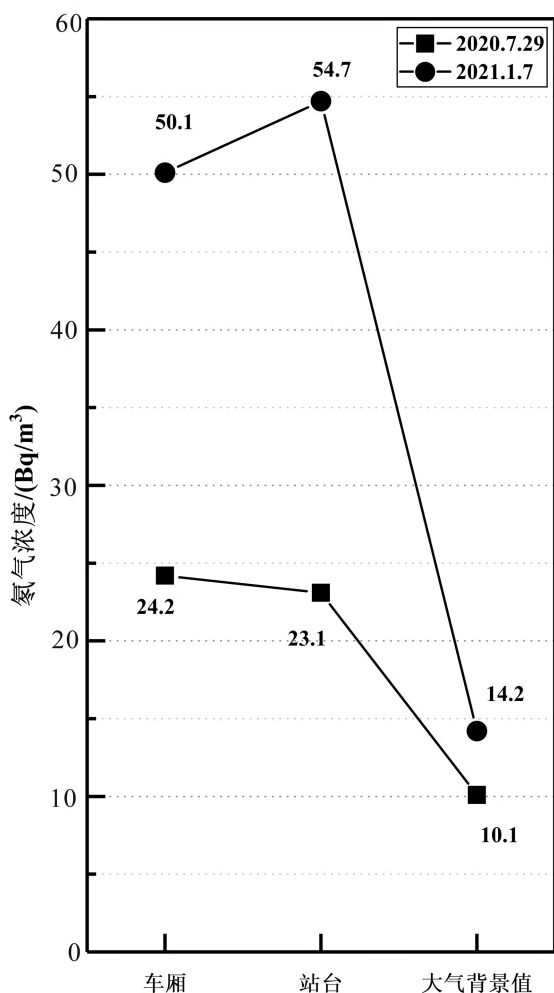


图 3 贵阳地铁 1 号线车厢内、站台和大气中氡浓度
Fig. 3 Radon concentration in compartments, platforms and atmosphere of the Guiyang subway line 1

表 1 岩性对地铁站氡浓度的影响

Table 1 Influence of lithology on the radon concentration in different subway stations

岩性	白云岩	石灰岩	泥岩
站点	阅山湖、观山湖公园、会议中心、阳关、新寨、白鹭湖、贵阳北、北京路、喷水池、中山西路、河滨公园、火车站、沙冲路	林城西路、观山湖公园、会议中心、阳关、八鸽岩、火车站	望城坡、珠江路、长江路、清水江路
氡浓度/ (Bq/m ³)	14.9 ~ 257.5; 均值 46.5	19.9 ~ 63.9; 均值 38.3	11.1 ~ 18.7; 均值 15.8

封闭的环境中, 氡浓度易积累而达到较高水平。我国室内外平均氡浓度分别为 46.1 Bq/m³ 和 14 Bq/m³[36]; 贵阳室内氡浓度相比较, 为 72.7

Bq/m³[37]; 贵阳地区室外氡浓度为 14.3 Bq/m³[38], 与本次实验所测值基本一致。贵阳市地铁 1 号线氡浓度低于贵阳市室内氡值, 但高于贵阳地区室外氡值, 相较于室外, 地铁站台通风较弱, 但其人工通风明显好于室内环境, 因此地铁站台氡值处于两者之间较合理。贵阳地处西南喀斯特核心区, 地质条件较复杂, 站台建设深度各有不同, 建设最深的贵阳北站, 处于地下负 4 层, 其余站台均为地下负 1~2 层, 并且贵阳北站建于山体内部, 站台环境密闭, 这也可能是造成该站点氡积聚, 高于其他站点的主要因素。

3.4 季节性变化分析

地铁环境中氡浓度大小与通风效果息息相关, 地铁站台的主要通风为向上的出入口、人工通风设备和列车运动的活塞效应, 不同的通风模式极大的影响着环境中的氡值, 贵阳地铁 1 号线氡因夏冬季的通风强度不同而呈现夏低冬高。东京地铁氡浓度为 10.9 Bq/m³, 认为较低的氡值与较好的通风有关[39]; 香港地铁氡浓度为 45.3 Bq/m³, 并且早上氡浓度较高, 在开启通风后浓度开始降低[9]。贵阳地铁 1 号线氡浓度与广州地铁 1 号线[11]、西安地铁[17]、北京地铁[8] 等已有季度监测结果的规律一致, 均呈现出夏低冬高的特征。夏季, 地铁站因加大送排风量, 稀释了站内氡浓度, 并且空调降温导致地铁环境和室外的温差增大, 加速了站内与室外的空气对流, 氡气浓度进一步降低; 冬季, 地铁站内为保持温暖舒适温度, 降低了通风速率, 并且回排风会与新风混合再次进入地铁站台以达到保持温度的目的, 从而人工通风强度降低, 氡易于积聚。因此在国内各地铁线路测得氡值均呈现夏低冬高的特点。本次实验所测得贵阳室外氡浓度也呈现夏天低冬天高的特征, 有研究表明大气氡浓度与空气稳定性呈线性关系[40], 冬季空气较稳定, 对流作用较弱, 因此空气中氡得以积聚。

3.5 健康效应评估

与国内外其他地铁车站环境氡浓度相比, 贵阳地铁 1 号线氡浓度处于一个适中的水平, 平均氡浓度均呈现出较低值, 极个别地铁站点氡浓度偏高, 可以采取一定措施, 加强该站点的通风, 稀释氡浓度; 或做相应的换班处理, 降低工作人员的暴露时间。而对于普通大众乘客, 不存在健康风险。对国内外各大地铁监测数据统计可知(表 2), 地铁环境

中氡暴露剂量远小于 100 mSv,均处于低剂量范围之内,因此地铁环境内的氡暴露并不会给公众身体健康造成伤害。

自从发现 x 射线以来,人们已经认识到与高剂量电离辐射暴露有关的确定性和随机效应,相比之下,低剂量辐射对健康的影响则较为模糊。人们对低剂量电离辐射危害的了解来自于传统 LNT 模型(线性无阈值模型),即剂量与危害成正比,但该模型在低剂量区域的健康效应有待商榷。对广岛和长崎原子弹幸存者所遭受电离辐射剂量分析研究表明,在接受全身剂量大于 100~200 mSv 的研究对象中,检测到肿瘤发病率的增加,但在这一水平下没有表现出统计学上的显著影响^[41]。另外,根据调查,人们吸收来自天然背景辐射约为 2.4 mSv/a^[42]。许多地区本底辐射水平远高于此,在中国阳江、巴西瓜拉帕里、印度喀拉拉邦以及伊朗拉姆萨尔,平均值分别为 6.4 mSv/a、6 mSv/a、7 mSv/a 和 6 mSv/a,并且在印度喀拉拉邦最大可达 45 mSv/a,在伊朗拉姆萨尔最高可达 131 mSv/a^[43]。但相关的流行病学研究均未发现这些地区有较高的癌症发病率^[44]。

对于低剂量辐射对人体的健康效应(有益的一面)而言,最近研究表明并不符合于 LNT 模型,并且

越来越多的研究更倾向于低剂量可能带来辐射兴奋效应。与高剂量辐射导致的免疫抑制不同,低剂量辐射可调节多种免疫反应,表现出免疫兴奋的特性^[45-48]。流行病学和实验结果表明,低剂量辐射可以增强免疫反应,进而抑制肿瘤的发生、生长以及转移^[49]。在不同动物模型中的研究表明,在接种肿瘤细胞之前,低剂量照射的转基因小鼠可以促进生长和延长预期寿命^[50]。一项针对美国人民遭受低于阈值的背景辐射研究表明,男性和女性的预期寿命与背景辐射水平成显著的正相关,低剂量辐射所导致癌症发病率的降低,可使该地区男性和女性的预期寿命最多增加 2.7 岁和 2.4 岁^[51]。并且暴露于低剂量辐射还能获得对高剂量辐射所带来破坏性的抵抗力^[52]。针对地铁环境中氡及其子体所带来的低剂量辐射对人体的健康效应,还需进一步研究。

4 结论

贵阳地铁 1 号线氡浓度呈现出显著的空间变化和季节变化规律,空间上的浓度差异主要与站台封闭性和地质背景相关,时间上的浓度差异则与通风条件相关。贵阳地铁 1 号线车站的氡浓度为 9.2~257.5 Bq/m³,平均值为 38.9 Bq/m³,远低于国家标准的限值。贵阳地铁 1 号线站台乘务人员因吸入站

表 2 国内外各城市地铁线路空气氡浓度

Table 2 Atmospheric radon concentration in subway lines of various cities at home and abroad

城市	线路	范围/(Bq/m ³)	平均值/(Bq/m ³)	暴露剂量/mSv	测量仪器	参考文献
上海	98 个随机站点	1.2~28.4	9.9	0.07	AB-4	[10]
武汉	2、4 号线	4.7~27.9	13.4	0.1	RAD-7	[14]
南京	1 号线	3.3~45.8	13.5	0.1	RAD-7	[16]
成都	1 号线	12.4~29.0	16.6	0.12	Model1027	[13]
深圳	1 期工程	1.7~95.3	18.3	0.13	FD-125/FH463 A	[12]
南宁	1 号线	8.9~35.9	18.5	0.13	FD-125/FH463B	[18]
宁波	1 号线		20.3	0.15		[19]
北京	35 个随机站点	14.8~38.7	22.3	0.16	RAD-7、SSNTD	[8]
天津	1 号线		23.8	0.17	RAD-7、SSNTD	[15]
贵阳	1 号线	9.6~257.5	38.9	0.28	RAD-7	本研究
香港	港岛线、荃湾线、鱼涌线	29.6~63.5	41.6	0.3	RAD-200	[9]
杭州	1 号线		44.6	0.32		[19]
广州	1 号线		59.8	0.43	SSNTD	[11]
西安	1 号线	3.7~166.5	60.7	0.43		
	2 号线	3.7~133.2	32.5	0.23	Model1027	[17]
东京			10.9	0.078	SSNTD	[39]
加尔各答		13.5~39	23.1	0.17	Alpha Guard PQ2000 PRO	[30]
加拉加斯		~112	30	0.22	SSNTD	[34]
首尔		7.4~92.5	35.7	0.27	Model1027	[31]
赫尔辛基			100	0.72	SSNTD	[33]
开罗	1 号线		329.3	2.37		
	3 号线		207.2	1.49	SSNTD	[32]

内环境氡所致年均有效剂量为 0.28 mSv,不会对相关工作人员及公众的身体健康造成伤害。对国内外已有氡监测的地铁相关数据分析,发现在地铁环

境中均不存在较高的氡暴露风险,而地铁环境中氡及其子体所带来低剂量辐射暴露导致的人体健康效应,还需深入研究。

参 考 文 献

- [1] 程业勋. 环境中的隐形杀手氡及其子体的危害与控制[J]. 自然杂志, 2008, 30(3): 143-150.
- [2] Collier C G, Strong J C, Humphreys J A, et al. Carcinogenicity of radon/radon decay product inhalation in rats—Effect of dose, dose rate and unattached fraction[J]. International Journal of Radiation Biology, 2005, 81(9): 631-647.
- [3] Laughlin J M. An historical overview of radon and its progeny: Applications and health effects[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2012, 152(1-3): 2-8.
- [4] David S T. WHO handbook on indoor radon: A public health perspective[J]. The International Journal of Environmental Studies, 2010, 67(1): 100-102.
- [5] Charles W P, Jeffry A S. The linear no-threshold model of low-dose radiogenic cancer: A failed fiction[J]. Dose-Response, 2019, 17(1): 1-10.
- [6] Shizuyo S. A message to Fukushima: Nothing to fear but fear itself[J]. Genes and Environment, 2016, 38(1): 1-9.
- [7] 陈旭锐. 客流量和室外环境对地铁空气质量的影响分析[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(14): 143-144.
- [8] 高鹏, 刘陆, 甘睿琳, 等. 北京市地铁站台及车厢内氡浓度水平调查[J]. 核安全, 2021, 20(1): 17-21.
- [9] Yu K N, Young E C M, Wong K C. A survey of radon properties in underground railway stations in Hong Kong[J]. Journal of Radiological Protection, 1996, 16(1): 37-43.
- [10] 翟江龙, 朱国英, 张燕燕, 等. 2009年上海市地铁车站放射性水平[J]. 环境与职业医学, 2012, 29(7): 407-410.
- [11] 张林, 胡灿云, 何展, 等. 广州地铁一号线车站氡浓度[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2003, 23(5): 383-384.
- [12] 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.
- [13] 王成明. 成都地铁一号线站内空气中氡浓度分布状况研究[J]. 四川环境, 2015, 34(1): 146-149.
- [14] 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, 162(2): 106-107.
- [15] 田义宗, 高建政, 张奇, 等. 天津市地铁一号线车站氡浓度水平调查[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(2): 79-81.
- [16] 朱晓翔, 周程, 徐萍. 南京市地铁车站氡浓度水平的初步调查[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(1): 29-31.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 刘鸿诗, 薛会, 张为民, 等. 浙江省地下轨道交通氡浓度水平调查及污染防治[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(6): 157-159.
- [20] 陈荣. 碳酸盐岩风化壳岩—土界面风化作用中铀的释放/富集机制[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [21] Waring C, Hankin S, Solomon S, et al. Cave radon exposure, dose, dynamics and mitigation[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2021, 83(1): 1-19.
- [22] 子涛, 杨晓霞, 石定芳. 喀斯特洞穴氡研究综述[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1): 99-106.
- [23] Wang Y W, Luo W J, Zeng G N, et al. High ^{222}Rn concentrations and dynamics in Shawan cave, southwest China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, 199: 16-24.
- [24] 张罗致. 贵阳市轨道交通1号线主要水文地质问题分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [25] 岳端, 韦一茜. 贵阳进入地铁时代[J]. 当代贵州, 2019, 517(3): 48-49.
- [26] 王冰. 贵阳的地铁时代[J]. 贵阳文史, 2018, 169(3): 24-27.
- [27] UNSCEAR. Effects and risks of ionizing radiation[M]. United Nations, New York, 2000.
- [28] 中华人民共和国卫生部. GBZ116—2002, 地下建筑氡及其子体控制标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB18871—2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [30] Argha D, Mahasin G, Gopa B, et al. Exposure to underground radon in and around Kolkata municipal corporation area: An exhaustive study[J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 2017, 311(1): 375-384.
- [31] Sung H H, Wha M P. Radon and PM10 concentrations in underground parking lots and subway stations with health risks in south Korea[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(35): 242-248.
- [32] 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.
- [33] Annanmäki M, Oksanen E. Radon in the Helsinki metro[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1992, 45(1-4): 179-181.
- [34] Liendo J, Sajó-Bohus L, Pálfalvi J, et al. Radon monitoring for health studies in the Caracas subway using ssntds[J]. Radiation Measurements, 2019, 123: 106-110.

- 1997, 28(1-6): 729-732.
- [35] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国土壤中天然放射性核素含量调查研究(1983—1990年)[J]. 辐射防护, 1992, 2: 122-142.
- [36] 卢志娟, 涂彧, 俞荣生. 三十年来我国室内外氡浓度的变化[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(1): 124-127.
- [37] 霍铭群, 颜敏, 白郁华, 等. 贵阳室内氡时空分布特征研究[J]. 中国环境监测, 2010, 26(1): 53-58.
- [38] 李锁照, 金益和. 贵阳地区氡浓度的连续观测[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(4): 56-57.
- [39] Doi M, Kobayashi S. Surveys of concentration of radon isotopes in indoor and outdoor air in Japan[J]. Environment International, 1996, 22(S1): 649-655.
- [40] Wang F, Chambers S D, Zhang Z, et al. Quantifying stability influences on air pollution in Lanzhou, China, using a radon-based “stability monitor”: Seasonality and extreme events[J]. Atmospheric Environment, 2016, 145: 376-391.
- [41] Ozasa K, Cullings H M, Ohishi W, et al. Epidemiological studies of atomic bomb radiation at the radiation effects research foundation[J]. International Journal of Radiation Biology, 2019, 95(7): 879-891.
- [42] 郑钧正. 联合国原子辐射效应科学委员会 2008 年报告书概述[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(4): 39-43.
- [43] Hendry J H, Simon S L, Wojcik A, et al. Human exposure to high natural background radiation: What can it teach us about radiation risks? [J]. Journal of Radiological Protection, 2009, 29(2A): 29-42.
- [44] Ludwik D, Krzysztof W F, Ludwig E F. Cancer mortality among people living in areas with various levels of natural background radiation[J]. Dose-Response, 2015, 13(3): 1-10.
- [45] Jiu W C, Guo Z Y, Zhen Y P, et al. Hormetic response to low-dose radiation: Focus on the immune system and its clinical implications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(2): 280-292.
- [46] Jerry M, Cuttler. Commentary on Fukushima and beneficial effects of low radiation[J]. Dose-Response, 2013, 11(4): 432-443.
- [47] Paunesku T, Stevanović A, Popović J, et al. Effects of low dose and low dose rate low linear energy transfer radiation on animals-review of recent studies relevant for carcinogenesis[J]. International Journal of Radiation Biology, 2020, 96(8): 1060-1067.
- [48] Seong K M, Seo S, Lee D, et al. Is the linear no-threshold dose-response paradigm still necessary for the assessment of health effects of low dose radiation? [J]. Journal of Korean Medical Science, 2016, 31(s1): 10-23.
- [49] Feinendegen L E. Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis[J]. British Journal of Radiology, 2005, 78(925): 3-7.
- [50] Yuta S, Hironobu N. Overview of biological, epidemiological, and clinical evidence of radiation hormesis[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 1-16.
- [51] David E, Wolfson M, Fraifeld V E. Background radiation impacts human longevity and cancer mortality: Reconsidering the linear no-threshold paradigm[J]. Biogerontology, 2021, 22(2): 189-195.
- [52] Tapio S, Jacob V. Radioadaptive response revisited[J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2007, 46(1): 1-12.

Atmospheric Radon Concentration in Guiyang Subway Line 1 and the Potential Health Effects

WENG Xu^{1,2}, LUO Weijun^{1,3,4}, WANG Yanwei^{1,3}, JIA Yuhe⁵, WANG Shijie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China; 4. College Rural Revitalization Research Center of Guizhou, Anshun 561000, China; 5. Shenyang Ecological Environment Affairs Service Center, Shenyang 110011, China)

Abstract: Subway has gradually become the first choice for people's daily travel, but the radon accumulation could not be ignored due to the closed underground environment. It is necessary to monitor and evaluate the potential risk of ionizing radiation exposure for staff and passengers. Guiyang subway line 1 was put into operation in December 2018, and the strata passed through are mainly carbonate rocks. Radon anomalies often occur in the process of weathering, which needs special attention. In this study, RAD-7 electronic radon detector was used to monitor the atmospheric radon concentration in 20 underground stations and the carriages of the subway on July 29,

2020 and January 7, 2021, respectively. The temporal and spatial variation characteristics and the main influencing factors were analyzed, in addition, the exposure dose was estimated, and the potential health effects were evaluated. The results show that the range of radon concentration in Guiyang subway line 1 is 9.6 to 257.5 Bq/m³, and the average value is 38.9 Bq/m³, which is higher than the average value of radon in major cities in China (28.9 Bq/m³), but is much lower than the foreign average (105.2 Bq/m³), and there are great differences among different stations, showing obvious seasonal variation with lower values in summer and higher ones in winter. The calculated effective dose of radon and its daughter elements exposure to the staff in the station was 0.28 mSv/a, which was less than the natural background radiation value (about 2.4 mSv/a), indicating it belongs to the low-dose radiation range, and there was no health risk.

Key words: subway; radon; ionizing radiation; low dose; health effect assessment