

文章编号:1001-4810(2012)01-0099-08

## 喀斯特洞穴氡研究综述

子涛,杨晓霞,石定芳

(西南大学地理科学学院,重庆400715)

**摘要:**氡对人体健康的影响向来是医学、化学、核物理学等学科的研究热点。近年来学术界虽然对喀斯特洞穴氡的来源(岩石、地下水)、氡浓度的影响因素(地质因素、洞体结构、洞内外气象参数)、氡浓度的测量(测量对象、测量仪器及方法)、氡的危害、氡的防治(隔离氡气渗入途径、排风通风、控制洞穴内停留时间减少摄入量、加强监测)等方面开展了研究并取得了不少的成果,但对于喀斯特洞穴氡的形成机理、喀斯特洞穴氡测量标准的制定及有效剂量的估算、喀斯特洞穴氡的防治技术及员工的健康管理等方面的研究还比较薄弱,有待加强。

**关键词:**氡来源;氡监测;氡危害;氡防治;喀斯特洞穴

**中图分类号:**P619.1

**文献标识码:**A

### 0 引言

氡是一种无色、无味,化学性质极不活泼的惰性气体,原子序数为86,是位于元素周期表第Ⅵ周期的零族元素<sup>[1-2]</sup>。在人类的生活环境中,氡是唯一能够接触到的天然放射性气体<sup>[3]</sup>。世界卫生组织将氡列为19种人类重要的致癌物之一<sup>[3]</sup>。人体长时间吸入高剂量的氡气,会增加罹患肺癌、白血病及其他呼吸系统疾病的几率<sup>[4]</sup>。由于喀斯特洞穴地质环境的特殊性,容易产生氡的富集<sup>[5]</sup>。随着喀斯特洞穴旅游开发,与氡接触的人越来越多,健康风险越来越大。因此,加强喀斯特洞穴氡研究,对于保证人们的身体健康,促进喀斯特洞穴旅游事业的发展具有重要的意义。本文通过对国内外该研究领域相关文献的回顾和梳理,总结了近年喀斯特洞穴氡研究取得到的主要成果,并在此基础上提出了有待加强的几个问题,以期在今后研究提供借鉴和参考。

### 1 喀斯特洞穴氡研究的主要内容及成果

对氡的研究始于1898年,德国科学家Dorn在

实验室发现了氡元素。随后,Marie和Pierre Curie于1990年在矿井测量中发现了氡气<sup>[2]</sup>。由于国外对氡的研究起步较早,时间跨度大,考虑到研究的时效性,本文参考的外文文献主要获自2001—2011年Elsevier SDOL (Science Direct Online, <http://www.sciencedirect.com>)数据库;本文所涉及的中文文献主要来自1979—2010年中国期刊网(CNKI, <http://dlib.cnki.net>)数据库。通过对文献的梳理发现,国内外研究者对喀斯特洞穴氡的研究主要集中在氡的来源、氡的测量、氡浓度的影响因素、氡的危害及氡的防治等方面。

#### 1.1 氡的性质

几乎所有涉及到氡及其子体的文献都对氡的性质进行了论述。常温下氡是一种无色、无味的放射性气体,分子直径为0.22 nm。氡一共有33种同位素,从<sup>196</sup>Rn到<sup>228</sup>Rn,最重要的是3个天然放射系(铀系、钍系和锕系)中镭的子体<sup>222</sup>Rn(Radon)、<sup>220</sup>Rn(Thoron)和<sup>219</sup>Rn(Actinium emanation)<sup>[6]</sup>。在研究中具有实际意义的是<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn和<sup>219</sup>Rn只有在特定情况下才具有卫生学意义<sup>[2]</sup>。氡的同位素<sup>222</sup>Rn

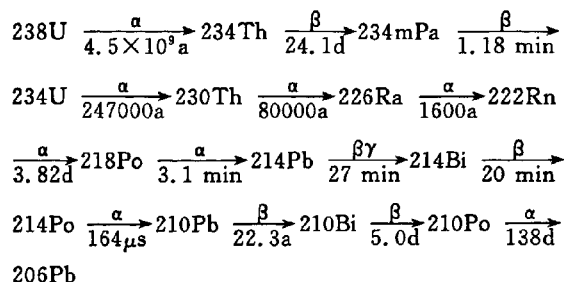
基金项目:重庆市委项目(CSTC,2010BC7004)

第一作者简介:子涛(1987—),女,硕士研究生。研究方向:旅游地理。

通讯作者:杨晓霞(1964—),女,博士,教授,硕士生导师。研究方向:洞穴旅游的开发与保护。

收稿日期:2011-09-16

由 $^{226}\text{Rn}$ 衰变而来,是最重要的核素。 $^{222}\text{Rn}$ 是铀衰变系的中间产物,半衰期为 3.82 天。在衰变过程中, $^{222}\text{Rn}$ 会产生一系列新的放射性核素,并释放出 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线,这些射线能够诱发肺癌、白血病和多发性骨髓瘤、甲状腺机能紊乱等多种人类绝症<sup>[7]</sup>。铀—镭放射系中氡及其子体的衰变链为:



其中,箭头线上方的希腊字母代表衰变类型,下方的数字代表半衰期<sup>[8-9]</sup>;a、d、min、s、 $\mu\text{s}$ 分别为年、天、分、秒和毫秒。

## 1.2 喀斯特洞穴氡的来源

氡由铀( $^{238}\text{U}$ )经过一系列衰变链衰变而来,1 Bq 镭每秒钟产生  $2 \times 10^{-6}$  Bq 的氡<sup>[2]</sup>。铀是自然界中分布广泛的一种微量元素,氡的来源因此也具有多样性特点。喀斯特洞穴具有观光、探险、科考、疗养等功能<sup>[10]</sup>。随着人们环境安全和保健意识的不断增强,洞穴内氡的水平和浓度普遍引起关注。与此同时对洞穴中氡的来源与分布的研究发展很快<sup>[11]</sup>。洞穴氡的来源主要包括以下几个方面:

### 1.2.1 岩石

喀斯特洞穴内岩石和沉积物产生的氡气通过扩散及岩石孔隙、裂隙的渗析作用进入洞穴,并成为洞穴氡的主要来源<sup>[11]</sup>。洞穴围岩中含有的铀、镭、钍等放射性元素衰变后就会产生氡。铀、镭等元素的含量越高,产生的氡及其子体的浓度就越大<sup>[12]</sup>。火成岩中铀的含量随二氧化硅含量的增加而增大;沉积岩中铀的含量与沉积环境和所含有机质、炭质、磷质等有关;变质岩中铀的含量变化相对复杂,与变质作用和原岩类型有关<sup>[13]</sup>。花岗岩、磷矿石、铜矿石、萤石等

岩矿中铀、钍、镭的含量较高,石灰岩中镭的质量分数为  $0.5 \times 10^{-12} \%$ <sup>[14]</sup>。地质断裂构造作用的发生,使得岩石中的氡从地层断裂带逸散出来,在相对封闭的空间内聚集,形成了高浓度的氡<sup>[15]</sup>。Tadeusz Andrzej Przylibski 对波兰西南部的 Sudety 山的研究认为 Sudety 山内旅游洞穴游览线路中氡的来源主要是其周围的片麻岩、灰岩<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 地下水

地下水会把地壳深处的氡带到地表从而释放在大气中,地下水中的氡浓度一般在  $1.85 \times 10^5$  Bq/ $\text{m}^3$  左右,高者可达  $1.85 \times 10^7$  Bq/ $\text{m}^3$ ,可能形成局部地区的重要氡源<sup>[2]</sup>。由于氡易溶于水,洞穴内地下水会溶解岩石和土壤中的氡。地下水沿着断裂带将氡携带到溶洞中,由于温度升高、压力降低,溶解度减小,氡从地下水中逸出,从而增加了洞穴内氡和子体的浓度<sup>[17]</sup>。因此,地下水在氡的搬运、传递过程中起着关键作用<sup>[2]</sup>。

### 1.2.3 其他来源

洞穴建筑废弃物等也是洞穴氡的来源之一<sup>[17]</sup>。随着喀斯特洞穴旅游的开发,在施工过程中的建筑材料,如采用工业废渣做原料的煤渣砖、矿渣水泥,利用铁矾土生产矾的废渣红砖水泥等,也会对氡浓度产生影响<sup>[2]</sup>。

## 1.3 喀斯特洞穴氡浓度的影响因素

喀斯特洞穴氡浓度在不同的观测时间,不同的观测位置具有较大的差异,影响氡浓度分布的因素主要有洞穴的地质特征、洞体结构、洞穴水和洞内外气象参数等。

### 1.3.1 地质因素

#### (1) 岩石及沉积物性质

洞穴内的岩石及沉积物的性质不同,其铀、钍、镭的含量不同,衰变所产生的氡含量也有较大差异<sup>[13]</sup>。岩石风化作用充分,土壤的孔隙度高,孔隙连通情况好,有利于氡的释放、富集和搬运<sup>[18]</sup>。但就现有的测量结果来看(表 1),喀斯特洞穴围岩的岩性与氡浓度的高低之间关系不明显。

表 1 国内外部分洞穴氡浓度值

Tab. 1 Radon concentration values (Bq/ $\text{m}^3$ ) in caves at home and abroad

| 洞穴名称    | 类型 | 所在国家/地区 | 氡浓度/Bq/ $\text{m}^3$ | 参考文献 |
|---------|----|---------|----------------------|------|
| Karaca  | 灰岩 | 土耳其     | 1 023(冬),823(夏)      | [19] |
| Çal     | 灰岩 | 土耳其     | 264(冬),473(夏)        | [19] |
| Gabriel | 灰岩 | 墨西哥     | 956~4 931            | [20] |
| Sannur  | 灰岩 | 埃及      | 836±150              | [21] |

续表 1

| 洞穴名称             | 类型  | 所在国家/地区  | 氡浓度/Bq/m <sup>3</sup> | 参考文献 |
|------------------|-----|----------|-----------------------|------|
| Altamira         | 灰岩  | 西班牙      | 186~7 120,3 562(平均)   | [22] |
| Radochowska      | 灰岩  | 波兰       | 60~1 370              | [23] |
| Niedzwiedzia     | 灰岩  | 波兰       | 100~4 180,1 300(平均)   | [23] |
| Postojna         | 灰岩  | 斯洛文尼亚    | 2 300~4 200           | [24] |
| Aillwee          | 灰岩  | 爱尔兰      | 500~4 200,2 040(平均)   | [25] |
| Mitchelstown     | 灰岩  | 爱尔兰      | 3 100~9 200,5 590(平均) | [25] |
| Crag             | 灰岩  | 爱尔兰      | 6 362                 | [25] |
| Gadime           | 灰岩  | 科索沃      | 400~1 000             | [26] |
| 黑水洞              | 灰岩  | 中国(云南蒙自) | 936                   | [11] |
| 龙宝洞              | 灰岩  | 中国(云南蒙自) | 1 416(冬),3 465(夏)     | [11] |
| 燕子洞              | 灰岩  | 中国(云南建水) | 1 200~1 400           | [11] |
| 盘龙洞              | 灰岩  | 中国(广西桂林) | 332                   | [27] |
| 茅茅头大岩            | 灰岩  | 中国(广西桂林) | 447                   | [27] |
| 飞霞洞              | 灰岩  | 中国(广西兴安) | 392                   | [27] |
| 万华岩              | 灰岩  | 中国(湖南郴州) | 83                    | [27] |
| 崆山白云洞            | 灰岩  | 中国(河北临城) | 1 927.8               | [28] |
| 石花洞              | 灰岩  | 中国(北京)   | 1 537                 | [29] |
| 龙崆洞              | 灰岩  | 中国(福建龙岩) | 47.36~667.2,400(平均)   | [30] |
| Robin Hood's     | 白云岩 | 英国       | 27~2 700              | [31] |
| Castanar de Ibor | 白云岩 | 西班牙      | 32 246(平均)            | [22] |
| 堂乐洞              | 白云岩 | 中国(湖南)   | 452.2                 | [32] |
| 慈迷洞              | 白云岩 | 中国(湖南)   | 453.9                 | [32] |
| 云南个旧某洞穴          | 白云岩 | 中国(云南个旧) | 1 110(冬),3 214(夏)     | [11] |

(2)断裂发育程度

洞穴岩层的断裂发育程度是影响氡浓度的重要因素之一。岩层断裂破碎带、裂隙节理、构造和岩性接触部位往往是高氡析出的部位。断层破碎带上的氡浓度一般是完整灰岩区的 5 倍,在气流向上运动的过程中扩散、迁移,释放到喀斯特洞穴空间内,造成洞穴氡浓度的增加<sup>[29]</sup>。比如,梁致荣等采用静电  $\alpha$  卡测氡法垂直断层走向测定 NE 向断层向地表释放氡的浓度,其中最高值可为背景值的 206 倍<sup>[33]</sup>。

1.3.2 洞体结构

洞穴的结构对氡浓度有很大的影响。洞穴的类型、大小、埋深和洞口数量对氡的浓度都有影响<sup>[5]</sup>。在相同的地质条件下,洞体较长,空间狭窄且只有 1 个洞口的洞穴,较宽敞、多洞口洞穴的氡浓度高<sup>[34]</sup>。如湖南省奇梁洞由于空间体积小,自然通风率较低,其氡浓度为 1 530.1 Bq/m<sup>3</sup>;九天洞自然通风率也较低,但由于空间体积大,洞顶有 9 个天窗,其氡浓度为 360.3 Bq/m<sup>3</sup><sup>[32]</sup>。在同一洞穴内,由于受通风条件的限制,洞

口的氡浓度较洞穴内部低,而最深最窄、空气流通最不畅的部位氡浓度最高<sup>[35-36]</sup>。比如,广西桂林盘龙洞洞口附近的氡浓度为 339 Bq/m<sup>3</sup>,而封闭条件较好的洞穴中部的氡浓度为 620 Bq/m<sup>3</sup><sup>[27]</sup>。

1.3.3 洞穴水

氡具有极易溶于水的特性,在水中氡的溶解度为 50 %<sup>[17]</sup>。地下水运动是氡迁移到洞穴空间内的一种途径,地下水的流动速度决定了氡在水中迁移和扩散的程度<sup>[6]</sup>。同时,地下水涌水量的多少也与氡浓度呈正相关关系<sup>[32]</sup>。

1.3.4 洞内外气象参数

一年中的不同季节,甚至一天内的不同时段,由于受洞穴内温差和气压差的影响,氡浓度具有一定的差异<sup>[18]</sup>。就全年来看,1—2 月氡浓度最低,6—7 月氡浓度最高。Peter Jovanovic 在斯洛文尼亚测量了 8 个喀斯特洞穴的氡浓度,发现该区域夏季氡浓度是冬季的 10 倍<sup>[37]</sup>。就一天而言,清晨大气温度梯度为逆温,大气处于稳定状态,近地表大气中氡浓度最高;

太阳出来后,逆温被破坏,氡浓度下降;日落后大气稳定度又开始增加,氡浓度又上升。

1.4 喀斯特洞穴氡浓度的测量

氡及其子体浓度的准确测量与监控,是氡防治的前提和基础,研究者在该领域取得的成果最多,涉及测量对象、测量仪器和测量方法等。

1.4.1 喀斯特洞穴氡浓度测量的对象

洞穴氡浓度测量的对象主要涉及空气氡浓度和水氡浓度等。

对空气氡浓度的测量必须在一个稳定的空间中完成,氡及其子体处于平衡状态,通过测量氡衰变放射出的 $\alpha$ 粒子从而监测空气中的氡浓度<sup>[38]</sup>。为了增加测量的准确度,一般采用累积测氡法,长时间对一个地点的氡浓度进行测量。田德源曾利用最优化的三段法(即改进的 Tsivigliou 法)测量待测空气中氡短寿命子体浓度<sup>[39]</sup>;陈佩琴、梁林林对空气中氡浓度测量的仪器读数和仪器检定的不确定性进行了评定,使空气氡浓度测量更加标准<sup>[40]</sup>。

由于氡易溶于水的特性,水氡对人体健康的影响引起了广泛关注,水氡的监测也成为氡浓度测量的重要内容<sup>[41]</sup>。不同类型水体的氡浓度相差较大,一般情况下,江、河、湖等地表水的氡浓度相对较低,而地

下水、温泉水中氡的浓度相对较高<sup>[42]</sup>。对居民生活用水、饮用水的氡含量的测量主要基于人体健康考虑,绝大部分研究成果表明,以地下水作为来源的生活用水、饮用水中氡含量较高<sup>[43-45]</sup>。对洞穴地下水氡含量的测量目前主要应用于预测地震方面,需要进行连续、稳定的观测<sup>[46-47]</sup>。

1.4.2 喀斯特洞穴氡浓度测量仪器及方法

喀斯特洞穴氡浓度的测量仪器和测量方法有很多,每一种方法都有其适用的范围和局限性<sup>[48]</sup>。根据测量目的不同,可以分为氡气监测、氡子体及其 $\alpha$ 潜能测定;根据采样方式不同,可以分为源法和无源法<sup>[49-52]</sup>。环境中的温度、湿度、气压、海拔高度及仪器的本底、灵敏度、响应时间等都会对测量结果造成影响<sup>[2]</sup>。在实际测量的过程中,应当根据不同的目的选择不同的测量方法。国内外研究者采用的喀斯特洞穴氡气测量仪器和测量方法各不相同(表 2),除部分未注明测量仪器或测量方法的文献外,多采用 CR-39 固体核径迹探测器及核径迹探测法(solid state nuclear track detectors,缩写为 SSNTD)测量洞穴氡浓度。其中,核径迹探测法能够较好地避免温度、气压的变动和人为的扰动,故被较多研究者选用<sup>[11,53]</sup>。

表 2 国内外喀斯特洞穴氡浓度测量采用的仪器及方法  
Tab. 2 Instruments and measures to detecting the concentration of radon in caves at home and abroad

| 洞穴名称            | 所在国家/地区  | 测量仪器                    | 测量方法         | 参考文献 |
|-----------------|----------|-------------------------|--------------|------|
| Karaca          | 土耳其      | LR-115 固体核径迹探测器         | —            | [19] |
| Çal             | 土耳其      | LR-115 固体核径迹探测器         | —            | [19] |
| Postojna        | 斯洛文尼亚    | SARAD EQF3020/EQF3020-2 | —            | [24] |
| Altamira        | 西班牙      | CPRD 连续被动测氡仪            | 径迹蚀刻测量法      | [22] |
| Sannur cave     | 埃及       | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [21] |
| Radochowska     | 波兰       | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [23] |
| Niedzwiedzia    | 波兰       | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [23] |
| Aillwee         | 爱尔兰      | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [25] |
| Mitchelstown    | 爱尔兰      | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [25] |
| Crag            | 爱尔兰      | CR-39 固体核径迹探测器          | 核径迹探测法 SSNTD | [25] |
| Gabriel         | 墨西哥      | —                       | 核径迹探测法 SSNTD | [20] |
| Gadime          | 科索沃      | —                       | 径迹蚀刻测量法      | [26] |
| 崆山白云洞           | 中国(河北临城) | CR-39 固体核径迹探测器          | 径迹蚀刻测量法      | [28] |
| 石花洞             | 中国(北京)   | 1023 型氡连续检测仪            | 径迹蚀刻测量法      | [29] |
| 奇梁洞、堂乐洞、慈迷洞、九天洞 | 中国(湖南)   | FD-71A 闪烁辐射仪            | 托马斯三段法       | [32] |
| 龙崆洞             | 中国(福建龙岩) | DOSEman Pro 氡子体检测仪      | —            | [30] |

氡浓度测量仪器的更新使氡测量的准确性也由此提高。由于不同的测量仪器和不同的测量方法能够对测量结果造成不同的影响,许多研究者对各种测氡仪器和测量方法进行了比较研究。R. Vinas · A 和 Eff-Darwich · J. A. 通过对地下环境中 3 种连续测氡仪测量结果的比较,发现各种测氡仪所测得的空气氡浓度因为测量时间长短和方法的不一致,结果会有一些出入<sup>[54]</sup>。因此,为了获取更加精确的测量结果,进行氡测量仪器的检定和校准也是研究的一个方面。利用氡浓度动态稳定技术来实现氡浓度的自动调控,运用夹胶钢化玻璃制作氡测试室以达到保温和减少箱体对氡的吸附等,都是氡测量仪器研究的新进展<sup>[55]</sup>。除了测量仪器的研究外,更多的工作是利用特定测氡仪和测氡方法对特定洞穴的实证研究<sup>[56]</sup>。如 J. Lario 利用连续被动测氡仪(CPRD)对西班牙北部的 Altamira 溶洞进行了以一年为周期的测量,发现该洞穴中氡浓度差异很大,在 186~7 120 Bq/m<sup>3</sup>之间<sup>[22]</sup>。

1.5 喀斯特洞穴氡的危害

氡危害的研究起源于对地下矿工的健康问题的调查。人们对工作环境和室内氡对人体健康的危害给予了极大关注,既开展了人群流行病学调查和动物实验研究,也进行了细胞生物学和分子生物学研究。这些不同方法、不同途径的研究为确定氡对人体的危害提供了大量的资料<sup>[57]</sup>。对喀斯特洞穴氡危害的研究,主要通过对洞穴内氡浓度和氡子体浓度的测量,以获取确切的数据判断氡的剂量是否会对旅游者 and 旅游洞穴工作人员产生危害<sup>[26]</sup>。

为了弄清喀斯特洞穴中的氡对洞穴工作人员和游客健康产生的危害,研究者们花了较大的精力测算(估算)旅游洞穴从业者和游客遭受氡辐射的有效剂量,以此作为对其健康危害评估的依据。由于不同洞穴的氡浓度相差较大、洞穴长度不一、停留时间各异,不同洞穴中的工作人员和游客遭受的氡辐射也不一样,在爱尔兰的 Crag 洞,洞穴工作人员遭受的氡辐射可高达 7.4 mSv/a(表 3)。

表 3 国内外部分喀斯特洞穴工作人员及游客遭受氡辐射情况  
Tab. 3 Radon radiation situation to cave workers and visitors in some caves at home and abroad

| 洞穴           | 类型  | 国家/地区  | 有效剂量          |                   | 参考文献 |
|--------------|-----|--------|---------------|-------------------|------|
|              |     |        | 洞穴工作人员/mSv/a  | 游客/mSv/人          |      |
| Aillwee      | 灰岩  | 爱尔兰    | 2.0           | 0.003             | [25] |
| Mitchelstown | 灰岩  | 爱尔兰    | 4.5           | 0.007             | [25] |
| Crag         | 灰岩  | 爱尔兰    | 7.4           | 0.012             | [25] |
| Karaca       | 灰岩  | 土耳其    | 2.3(夏),2.9(冬) | —                 | [19] |
| Çal          | 灰岩  | 土耳其    | 1.1(夏),0.6(冬) | —                 | [19] |
| Gadime       | 灰岩  | 科索沃    | 3.5           | 0.037(夏),0.025(冬) | [26] |
| Robin Hood's | 白云岩 | 英国     | 0.4           | 0.016             | [31] |
| 石花洞(2—3 层)   | 灰岩  | 中国(北京) | 2             | 0.004             | [29] |
| 石花洞(2—4 层)   | 灰岩  | 中国(北京) | 4             | 0.008             | [29] |
| 平均值          |     |        | 3.028         | 0.011 6           |      |

就总体而言,洞穴从业者由于遭受氡辐射的时间较游客长,其健康受到的威胁较大。R. M. Anjos 等对阿根廷 San Luis 省被开发为旅游景点的金矿矿山的氡暴露剂量和 γ 射线进行测量,认为辐射剂量对旅游者的影响较小,而对导游的影响则取决于其在洞穴内的停留时间<sup>[58]</sup>。J. Olszewski 等对波兰地下旅游点的氡进行监测,发现洞穴、塔底、原矿区的氡浓度较高,所有地下景点的平均氡浓度为 400 Bq/m<sup>3</sup>,最大值可达 2 000 Bq/m<sup>3</sup>,短时间的接触对旅游者健康没有影响<sup>[59]</sup>。

1.6 喀斯特洞穴氡的防治

由于喀斯特洞穴氡对旅游者和旅游从业人员的危害已经得到广泛认可,因此,采取必要的防治措施以确保人体健康就成为喀斯特洞穴氡研究的最终目的。

1.6.1 隔离氡气渗入途径

消除氡源是防治氡污染的根本,但由于喀斯特洞穴位置的固定性,不能避让迁移,所以从源头上消除氡几乎无法实现。因此只能采取相应的措施进行屏蔽防护,使地下水 and 岩石中的氡不易渗透到空气中。

铺垫隔离层,设置扩散屏障和涂覆封闭剂等都是隔离氡气的有效方法<sup>[31]</sup>。为此,防氡的材料和涂料也成为研究的重点<sup>[60]</sup>。对于洞穴内断裂破碎带区域,在不影响景观的前提下可采用屏蔽降氡法。高秀峰等利用复合砂浆使楼房内混凝土材料所释放的氡浓度由 2 500 Bq/m<sup>3</sup>降至 200 Bq/m<sup>3</sup><sup>[61]</sup>。洞穴氡的屏蔽防护可借鉴这一成功案例。

### 1.6.2 排风通风

加强空气流动是降低洞穴氡浓度、提高空气质量最简单有效的方法。通风能加速氡及其子体的均匀化,从而使浓度下降<sup>[62]</sup>。多数洞穴氡及其子体浓度过高主要就是由于通风不畅所致。因此,对于只有一个洞口的通道式洞穴,应利用各种勘查手段,寻找新的洞口;对于深度大、埋深大的洞穴应增加通风设备以降低氡浓度<sup>[63]</sup>。同时,出于对洞穴内旅游景观的保护,在使用排风通风的措施时,应注意洞穴内空气流通所产生的“烟囱效应”,合理设置排风口和排风时间,以减少对洞穴景观的破坏<sup>[30]</sup>。

### 1.6.3 控制洞穴内停留时间,减少氡气吸入量

喀斯特旅游洞穴中游客一般只停留 1~2 小时,这种短时间的停留所接受的氡照射剂量并不足以对游客的健康产生影响<sup>[64]</sup>。但是,对于长时间在洞穴内工作的旅游从业人员来说,氡的影响相对明显。因此,旅游企业应合理安排从业人员的工作时间,尽量减少其在洞内的滞留时间,以减少氡气的吸入量<sup>[17]</sup>。吕金波通过对北京石花洞各层氡浓度的测定,并根据国际放射防护委员会第 60 号出版物(1990)的规定,制定了石花洞内工作人员的工作时间上限。其中,带领游客参观 2~3 层的导游人员年工作时间上限为 300 小时,带领游客参观 2~4 层的导游人员年工作时间上限为 200 小时,而在第 4 层售票窗口工作的售票人员年工作时间上限为 400 小时<sup>[29]</sup>。

### 1.6.4 加强洞穴内氡及其子体浓度的监测

在对喀斯特洞穴进行旅游开发的过程中,把洞穴氡及其子体的浓度作为评价指标,对于浓度严重超标的溶洞或某段洞穴应不予开发。对于已经开发利用的洞穴,应由环保、质监部门定期监测,对于超过标准的应当采取相应的降氡措施<sup>[5]</sup>。

## 2 述评与展望

喀斯特洞穴氡的研究,是伴随着越来越多的喀斯特洞穴开发为旅游目的地后出现的一个新的研究领域。通过对该研究领域已有的中外文献的统计和梳理发现,尽管研究者已经对氡的来源、影响因素、测

量、危害、防治等方面展开了较为全面的研究,但研究的视角大都为化学、医学等学科,研究的对象主要集中在于矿山、建筑工程、居室等,真正属于喀斯特洞穴氡的研究成果较少。近年来,我国开始出现针对喀斯特洞穴氡的专门研究,但这些研究大都借用传统的方法,以某一特定区域的喀斯特洞穴,或者某一个具体的洞穴作为研究对象,对氡的来源、浓度的影响因素、浓度的测量、危害和防治等进行个案研究,研究结果普适性不强。

对喀斯特洞穴氡的研究,笔者认为今后应着力于以下几个方面:

(1)喀斯特洞穴氡的形成机理。洞穴氡从生成到对人体产生危害需要经历生成、迁移、累积等阶段,在这一过程中,岩性、洞穴沉积物、洞穴构造、水文、气象等因素都会对氡的形成产生影响。目前对洞穴氡在这一系列过程中作用机制和主要影响因素的研究较少,也缺乏对洞穴氡污染的模型研究。因此,通过对各阶段相互作用机制的研究,建立相应的理论模型,并通过一定的实验和测量进行验证是今后研究的思路之一。

(2)喀斯特洞穴氡测量标准的制定及有效剂量的估算。目前对洞穴氡测量方法和仪器的选取较为随意,缺乏专门应用于洞穴氡的测量标准。应根据洞穴环境的特殊性,选取最适宜的监测方法和仪器设备,以达到效能一代价的最优化。除了缺乏专门应用于洞穴氡的测量标准外,从洞穴氡浓度推导到有效剂量的换算还存在很大的不确定性,这对开展洞穴氡的其他研究带来了难度。因此,选取合适的标准,准确进行洞穴氡有效剂量的估算是研究的一个方向。

(3)喀斯特洞穴氡的防治技术及工作人员的健康管理研究。目前,洞穴氡的防治措施大多属于理论层面,实际的指导作用并不明显。因此,应当遵循辐射防护最优化的原则,在保证洞穴景观不受破坏的前提下,以最少的代价将洞穴氡水平降至最低。同时,随着喀斯特洞穴的旅游开发,从旅游企业和管理者的角度而言,在保证维护喀斯特洞穴日常旅游活动正常进行的前提下,如何采取有效的防护措施保证工作人员的健康是喀斯特洞穴旅游经营管理中亟待解决的问题。

### 参考文献

- [1] 孙世基. 人类辐射危害评价[M]. 北京:原子能出版社,1996:157-158.
- [2] 郑天亮,周竹虚,尚兵. 建筑工程防氡技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:3-5,8-9,210-211,97-98.
- [3] 秦思昌,鲁永杰. 氡监测研究进展[J]. 海军医学杂志,2006,27

- (2):166—169.
- [4] 童建. 氡致肺癌:生物学效应与防护[J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(5):7—11.
  - [5] 吕惠进. 旅游溶洞内氡污染和从业人员的辐射防护[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2):137—139.
  - [6] 周竹虚, 郑天亮. 人防工程建筑防氡材料研究报告[R]. 总参工程兵第四设计研究院内部资料, 2002.
  - [7] 商迎庆. 室内氡的危害研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(4):350—352.
  - [8] 刘亚民, 刘垚. 氡的性质及空气中氡浓度的测量综述[J]. 中国测试技术, 2005, 31(5):121—124.
  - [9] 张延安, 李寿兴. 地下建筑中氡气对人类健康的危害及其防护[J]. 中国建筑防水, 1997(6):4—6.
  - [10] 陈为民, 程国霞, 姚明和. 岩溶洞穴旅游价值评价标准探讨[J]. 世界标准信息, 2006(2):88—89.
  - [11] 卢伟. 洞穴氡来源、分布、测定及旅游评价[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3):251—259.
  - [12] 程业勋, 王南萍, 侯胜利, 等. 空气氡的大地来源理论研究[J]. 辐射防护通讯, 2001, 21(2):15—18.
  - [13] 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.
  - [14] 张延安, 李寿兴. 地下建筑中氡气对人类健康的危害及其防护[J]. 中国建筑防水, 1997(6):4—6.
  - [15] 秦宗会, 谢兵. 氡的特性、来源及国家控制标准[J]. 中国西部科技, 2011, 10(20):4—18.
  - [16] Tadeusz Andrzej Przylibski. Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Zloty Stok (Sudety Mountains, SW Poland)[J]. Journal of Environment Radioactivity, 2001, 57(2):87—103.
  - [17] 吕惠进. 旅游溶洞内氡污染及其防治[J]. 世界地质, 2002, 21(3):271—274.
  - [18] 赵亚民译. 环境中氡来源及危害[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:59—61.
  - [19] Cevik Ugur, Kara Ayhan, Celik Necati, et al. Radon survey and exposure assessment in Karaca and Cal Caves, Turkey[J]. Water Air Soil Pollut, 2011, 214(1—4):461—469.
  - [20] Espinosa G, Golzarri J I, Gammage R B, et al. Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method[J]. Radiation Measurements, 2008, 43(1):364—368.
  - [21] Rafat M. Amin · M. F. Eissa. Radon level and Radon effective dose rate determination using SSNTDs in Sannur cave, Eastern desert of Egypt[J]. Environ Monit Assess, 2008, 143(1—3):59—65.
  - [22] Lario J, Sanchez-Moral, Canaveras J C, et al. Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 80(2):161—174.
  - [23] Tadeusz, Andrzej, Przylibski. Radon concentration changes in the air of two caves in Poland[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1999, 45(1):81—94.
  - [24] Janja vaupotic. Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave[J]. Science of the Total Environment, 2008, 393(1):27—38.
  - [25] Duffy J T, Madden J S, Mackin G M, et al. A reconnaissance survey of Radon in show caves in Ireland[J]. Environment International, 1996, 22(1):415—423.
  - [26] Bahtijari M, Vaupotic J, Gregoric A, et al. Exposure to radon in the Gadime Cave, Kosovo[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(2):343—348.
  - [27] 李彬, 林玉石, 徐胜友, 桂, 湘某些岩溶洞穴氡及其子体分布特征的初步研究[J]. 中国岩溶, 1995, 14(4):345—351.
  - [28] 周开建, 井四文, 杨彦文, 等. 临城崆山白云洞内的氡水平及其剂量估算[J]. 中国辐射卫生, 1994, 3(4):231—234.
  - [29] 吕金波. 北京石花洞氡浓度的研究[J]. 北京地质, 1997(2):29—32.
  - [30] 刘玉贵, 林伟, 曾庆明. 龙岩市石灰石景观溶洞氡水平调查[J]. 2006, 15(4):387—389.
  - [31] Gavin K Gillmore, Malcom Sperrin, Paul Phillips, et al. Radon hazards, geology, and exposure of cave users: A case study and some theoretical perspectives[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000, 46(3):279—288.
  - [32] 罗开训, 高益群, 周朝玉, 等. 湖南省溶洞中氡及其子体浓度与剂量估算[J]. 中国辐射卫生, 1996, 5(1):36—37.
  - [33] 梁致荣, 刘彝钧, 黎烈均, 等. 居室氡污染的环境因素及防治方法研究[J]. 中山大学学报论丛, 2002, 20(4):239—243.
  - [34] 陈煜有, 李镇照. 旅游溶洞内氡及其子体辐射防护的探讨[J]. 贵州医药, 1995, 19(4):251—252.
  - [35] Carlos Sainz, Luis Santiago Quindos, Ismael Fuente, et al. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon does in workplace: The case of tourist caves[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 145(3):368—371.
  - [36] Frederic Perrier, Patrick Richon. Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101(4):279—296.
  - [37] Peter Jovanovic. Radon Measurements in Karst Caves in Slovenia[J]. Environment International, 1996, 22(1):429—432.
  - [38] 丁卫撑, 方方, 阮菊红, 等. 空气氡浓度瞬时测量方法研究[J]. 核技术, 2009, 32(7):545—549.
  - [39] 田德源. 空气中氡子体测量程序[J]. 中国辐射卫生, 1994, 3(1):56—58.
  - [40] 陈佩琴, 梁林林. 室内空气中氡浓度测量的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2007, 34(12):58—60.
  - [41] 李晓辉, 申仲华, 李建华. 水中氡的危害及监管现状[J]. 现代预防医学, 2005, 32(10):1313, 1323.
  - [42] 屈雅斋, 卢新卫. 西安东南郊区居民饮用井水中氡的含量水平[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(5):993—996.
  - [43] 卢新卫. 西北主要城市生活用水中氡浓度及降氡措施[J]. 干旱区资源与环境, 2004(1):133—136.
  - [44] 谈成龙. 饮用水和生活用水中的氡及其研究现状[J]. 铀矿地质, 2005, 9(1):318—319.
  - [45] 查永如. 饮用水中氡及其控制[J]. 职业医学, 1997, 24(1):47—49.
  - [46] 张建勋. 地下水中氡含量的动态变化及其应用研究[J]. 科技博

- 览, 2010(32):315.
- [47] 廖丽霞, 郑永通, 袁丽雯. 华安汶内井水氧对闽台地震的映震特征差异性分析[J]. 地震, 2010, 30(4):133-139.
- [48] 秦思昌, 鲁永杰. 氧监测研究进展[J]. 海军医学杂志, 2006, 27(2):166-169.
- [49] 谈成龙. 当今测氧方法及设备面面观[J]. 世界核地质科学, 2003, 20(4):213-223.
- [50] 卢伟. 测氧仪器概述[J]. 现代仪器, 2002(2):5-8.
- [51] Hafez A F. A study of radon and thoron release from Egyptian building materials using polymeric nuclear track detectors[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 54(2):291-298.
- [52] 朱昌寿, 尚兵. 室内空气空气中氧的测量和质量保证[J]. 中国环境卫生, 2002(2):164-172.
- [53] Misdaq M A, Ouguidi J. Concentrations of radon, thoron and their decay products measured in natural caves and ancient mines by using solid state nuclear track detectors and resulting radiation dose to the members of the public[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2011, 287(1):135-150.
- [54] Vinas A R, Eff-Darwich V, Soler J A, Castro-Almazan M C, et al. Comparative analysis of continuous radon sensors in underground environments[J]. Environmental Geology, 2004, 46(8):1108-1117.
- [55] 唐方东, 何林峰, 张雄杰, 等. 氧测量仪器检定/校准装置的研制[J]. 中国测试, 2010, 36(1):57-60.
- [56] Somlai J, Haki J, kavasi N, et al. Annual average radon concentration in the show caves of Hungary[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2010, 287(2):427-433.
- [57] 张守志, 侯长松. 室内氡诱发肺癌研究进展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2003, 23(3):220-222.
- [58] Anjos R M, Umisedo N, da Silva A A R, et al. Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101(2):153-158.
- [59] Olszewski J, Chrusciewski W, Jankowski J. Radon on underground tourist routes in Poland[J]. International Congress Series, 2005, 1276(2):360-361.
- [60] 何登良, 邓厥权, 董发勤, 等. 环保型防氡、防辐射建筑材料研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(9):79-82.
- [61] 高秀峰, 谭志明, 高文帆, 等. 用复合砂浆防止来自楼房建筑物内混凝土氧污染的研究[J]. 辐射防护通讯, 2001, 21(1):15-19.
- [62] 苏世标, 童建. 氧暴露致肺癌相关基因研究的进展[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2005, 23(2):102-107.
- [63] Papastefanou C. An overview of instrumentation for measuring radon in soil gas and groundwater[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 63(3):271-283.
- [64] Al-Mustafa Hanan, Al-Jarallah M I, Fazal-ur-Rehman, et al. Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia[J]. Radiation Measurement, 2005, 40(2):707-710.

## Review of the research on radon in karst caves

ZI Tao, YANG Xiao-xia, SHI Ding-fang

(School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Health effects of radon on the human body have always been a hotspot in medical, chemical, nuclear physical and some other researching area. In recent years, the academia have studied on the sources of radon (rocks and groundwater), the influence factors of radon concentration (geologic factors, cave structure, meteorological parameters inside and outside the cave), radon concentration measurement (measuring object, measuring instruments and methods), the harm of radon, radon prevention and control (to isolate radon infiltration, enhance ventilation to reduce radon, reasonable arrangement of schedule to reduce the inhaled amount, strengthen monitoring) and some achievements have been got, but weak in the following researches such as the formation mechanism of radon in karst caves, establishment of karst cave radon measurement standards and effective dose estimates, controlling techniques of radon in karst caves and health management of show cave staff.

**Key words:** source of Radon; Radon monitoring; hazards of Radon; Radon controlling; karst cave