

医学参考报

放射医学与防护频道

Radiological Medicine and Protection

Number 06

执行主编介绍



尚兵 研究员

中国疾控中心辐射防护与核安全医学所研究员。长期从事环境放射性检测与辐射防护技术研究与应用，主持和参与多项国家自然科学基金和科技部公益基金项目，负责起草国家卫生行业标准2项，参与编写专著5部，发表专业论文60余篇。

导读

- 食品和水中的天然放射性核素 **2版**
- 高本底地区天然辐射的剂量学研究 **3版**
- NORM管理现状及面临挑战 **4版**
- NORM工业开发利用引发环境问题 **5版**
- 宇宙射线对航空机组人员的照射 **6版**
- 加强含放射性消费品的运输管理——从海关截获放射性超标磁疗垫说起 **7版**
- 第八届国际天然放射性物质学术讨论会简介 **8版**

医学参考报社网站已开通，以放射医学与防护频道为主的各频道，现正免费注册网站会员，并可网上阅读报纸以及参加继续医学教育等学术活动。
网址：www.yxckb.com

天然辐射的研究与控制

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 尚兵

人类始终受到天然辐射照射，这是一种持续的，不可避免的辐射。天然辐射包括宇宙射线和地球上天然放射性核素对人体产生的外照射（即陆地 γ 辐射）以及这些核素随空气、水和食物进入人体后产生的内照射。内照射放射卫生学中有重要意义的天然放射性核素主要有天然 U、天然 Th、 ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{40}K 和 ^{14}C 等。

1 我国的天然辐射水平

自上个世纪八十年代以来我国开展了大规模的天然辐射水平调查。如中国环境电离辐射水平及居民受照剂量的调查、全国土壤和建材放射性核素调查、室内外氡及其衰变产物浓度的调查，中国食品放射性所致内照射剂量研究、全国水体放射性核素活度浓度调查等。通过这些全国范围的调查，基本摸清了我国天然辐射的本底水平和公众受照剂量，也发现一些有研究价值的现场和人为活动引起天然辐射增高场所，为天然辐射的控制和研究提供了技术支持。

1.1 环境 γ 辐射剂量率

根据国家环保局的调查，我国室外和室内 ($n=8,805$) γ 剂量率的均值分别为 $62.8 \pm 31.2\text{nGyh}^{-1}$ 和 $99.1 \pm 36.4\text{nGyh}^{-1}$ ，室内与室外比值为 1.58。原野 γ 辐射水平的地理分布见表 1。卫生系统测量室内 49,795 个点，室外 30,961 个点，涉及全国人口 97%，覆盖面积约 90%。室外 γ 剂量率均值超过 100nGyh^{-1} 有福建、广东；超过 90nGyh^{-1} 有江西、西藏、贵州、浙江、湖南、广西等省。广东阳江地区室内外 γ 剂量率均值为 331nGyh^{-1} 和 165nGyh^{-1} ，分别为全国均值的 3.3 和 2.7 倍，被确定为天然辐射高本底地区。

1.2 宇宙射线剂量率

宇宙射线包括电离成分和中子成分，海拔高度是影响宇宙射线直接致电离辐射剂量率的主要因素。我国宇宙射线强度最高的地

区是西藏、青海和甘肃，最低的地区是上海、江苏和安徽。根据 2010 年版《中国辐射水平》，我国居民所受宇宙射线年有效剂量，电离辐射成分为 $260\mu\text{Sv}$ ，中子成分为 $100\mu\text{Sv}$ 。

1.3 我国室内外氡水平

1986 ~ 1992 年我国开展了第一次室内外氡水平调查，并按氡浓度递增顺序排列了我国部分地区室内、外氡浓度的均值与分布。室内氡浓度较高的地区为福建，与室外 γ 剂量率的结果一致。

2000 年后随着城市化进程加快，我国的住房结构发生很大改变，为了解室内氡浓度的变化，卫生部，建设部和核工业集团采用累积氡探测器相继进行了 3 次较大规模的室内氡浓度调查（表 2）。与第一次调查结果 ($23.7\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) 相比，室内氡浓度约增加了 1.4 ~ 1.8 倍。其原因除了测量方法不同引起的一些差异外，还与高发射率建筑材料广泛使用及建筑节能设计导致房屋通风率下降等因素有关。

第一次调查得到的我国室外氡浓度典型值为 $12.6\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，北京大学 2003 ~ 2007 年在北京地区连续 5 年观测结果为 $12.7\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，可见，我国室外氡浓度的变化不大。

1.4 土壤天然放射性核素与氡析出率的研究

表 3 为国家环保局对土壤天然放射性核素活度浓度的调查结果。我国土壤中天然放射性核素的活度浓度均高于世界典型值，其中天然 Th 含量为世界均值的 1.64 倍。

下转第 7 版

表 2 我国不同年代居室氡浓度测量数据比较 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

时间	地区数	样品数	范围值	均值	方法	比值
1986 ~ 1992	26	9,967		23.7	瞬时	
2003 ~ 2005	26	3,098	7 ~ 596	43.8	累积	1.8
2008 ~ 2010	9	2,808	4 ~ 170	34.9	累积	1.5
2008 ~ 2010	17	2,029	5 ~ 183	32.6	累积	1.4

表 3 我国土壤中天然放射性核素活度浓度 (Bq/kg)

	天然 U		天然 Th		^{226}Ra		^{40}K	
	R	X	R	X	R	X	R	X
我国均值	19 ~ 71	40	34 ~ 96	49	21.4 ~ 67	37	332 ~ 670	580
世界典型值	16 ~ 114	33	11 ~ 82	30	16 ~ 114	35	140 ~ 850	400
中国/世界		1.2		1.6		1.1		1.5

表 1 我国原野 γ 辐射水平的地理分布

剂量率 (Gyh^{-1})	地理位置	省、市、自治区按调查区面积加权均值大小排列	均值范围 (Gyh^{-1})	面积 (10^4km^2)
> 70	南部	福建、广东、西藏、浙江、江西、湖南	70.7 ~ 92.3	201.4
60 ~ 70	中西部	云南、贵州、广西、甘肃、四川、陕西、辽宁、河南、宁夏、湖北	60.8 ~ 66.0	259.8
< 60	北部东部	青海、新疆、天津、山东、北京、安徽、河北、上海、吉林、山西、台湾、黑龙江、内蒙、江苏	50.3 ~ 59.8	501.8

本期点评

天然辐射照射水平和国民剂量估算

人类生存空间中原始放射性核素（尤其是地壳中铀、钍、镭、钾等）、宇宙空间的宇宙射线以及由宇宙射线连续不断产生的感生放射性核素构成了天然照射的来源。

随着人类生活方式和人类文明的不断演变，特别是随着人类技术开发活动的不断扩大和深入，一方面使得有越来越多的人类活动可能导致增高或减少了天然辐射的照射；另一方面由于科学的进步，人们开始注意到过去并未注意到的天然照射（如氡和子体）的危害问题，以及由于人类自身活动原因所引起的天然辐射照射的增加问题，即 NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) 问题。

自上世纪八十年代起，我国逐步开展了全国天然辐射水平的调查，九十年代中国核学会辐射防护学会发起召开了“人为引起天然辐射照射增加对公众的照射”研讨会（中国香港，1999），2000 ~ 2010 年间召开三次“我国天然辐射水平和控制中一些问题的讨论”（北京，2000，2005，2010），2007 年国家科技部、中国

科学院又组织了“氡及其子体危害健康与控制”研讨会（北京香山科学会议第 304 次）。2011 年潘自强等人以“人为活动引起的天然辐射照射的增加——当前我国国民所受人为活动照射的最大者”为题发表文章，强调关注 NORM 照射及管理。可见，21 世纪初天然辐射照射的研究已成为我国辐射防护的重点。

天然辐射照射对居民剂量的贡献是多少呢？UNSCEAR (2000) 给出全球居民平均年有效剂量为 2.4mSv 。上世纪九十年代我国居民平均年有效剂量为 2.3mSv ，2009 年给出的估计值则为 3.1mSv ，而美国最新的居民平均年有效剂量为 3.11mSv (NCRP, 2009)。更值得关注的是，室内氡照射对居民受照剂量贡献最大，约占年有限剂量一半。

可见，应该关注天然辐射照射水平和估算居民受照剂量的演变；关注氡及其子体对居民的照射和辐射危害的研究；更要关注 NORM 导致职业照射的巨大群体 (> 600 万人)。

(白光 尚兵 刘福东)

终校	排版设计	年 月 日	经营监管部	年 月 日
	编辑出版	年 月 日	总编室	年 月 日

食品和水中的天然放射性核素

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 拓飞

专家介绍



拓飞 研究员

硕士生导师。中国疾病预防控制中心辐射安全所辐射检测与评价室主任。主要从事 γ 能谱分析、食品放射性监测与风险评估、辐射检测等相关技术的应用研究。承担国家科技支撑项目、卫生行业科研专项、卫生部政法司卫生标准制修订等多项科研项目,发表研究论文10余篇。

天然放射性核素主要分为两大类,一类是宇宙射线的粒子与大气中的物质相互作用下产生,主要有 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^3H 等;另一类是地球形成时就已存在的核素及其衰变产物,主要是地壳(土壤、岩石等)中含有的 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{87}Rb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 。天然放射性核素存在于矿石、土壤、天然水、大气及动植物中,可通过食物链和呼吸等途径进入人体。人体内长寿命天然放射性核素的照射是继陆地 γ 和宇宙射线之后,天然辐射照射另一个重要来源。

1、我国食品和水中的天然放射性核素水平的限制标准

我国在20世纪90年代就建立了食品中放射性物质限制浓度标准GB 14882-1994(见表1)。该标准是在1984年颁布的《放射卫生防护基本标准》基础上,为适应ICRP26号出版物对辐射防护基本剂量限制、剂

量限制体系及内照射次级限制等的改变而制定,自1994年起颁布实施至今。GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》只给出总 α 和总 β 的指导值,超过规定水平,需要进行核素分析,根据ICRP26号出版的公众个人年剂量限制1mSv和GB 14882的计算方法确认导出限制浓度。

2、我国食品中天然放射性核素辐射水平

为了解我国食品环境天然放射性核素的水平及对居民所致内照射剂量,1981~1988年卫生部工业卫生实验所组织全国28个省、自治区、直辖市开展了全国食品和水中的天然放射性核素的水平调查。食品样品包括粮食、叶菜、根茎菜、果实菜、肉类、水产品、奶类、蛋类、干鲜果品等25类,共采80余种2,840个样品。食品中U、Th、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 含量水平分别为 $4.4 \times 10^{-2}\text{Bq/kg}$ 、 $1.8 \times 10^{-2}\text{Bq/kg}$ 、 $8.8 \times 10^{-2}\text{Bq/kg}$ 和 74.9Bq/kg ,其中 ^{226}Ra 平均含量最高的地区为福建和江西,这与该地区土壤中 ^{226}Ra 含量有关。调查结果显示食品U、Th、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 的含量存在显著性差异,趋势为 $^{40}\text{K} > ^{226}\text{Ra} > \text{U} > \text{Th}$,其分布特点是北方食品中U、Th、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 的含量高于南方的食品。食品中各核素的含量与当时

UNSCEAR报告中各国的均值相当,均属于正常水平。

2014~2016年我国又开展第二次全国范围的食物放射性水平调查,采集样品3,085份,获得27,489个核素监测数据,有5份样品中的天然放射性核素活度浓度超出GB 14882-1994规定的限值。其中广西一萝卜样的 ^{226}Ra 活度浓度为 32Bq/kg ,超出限值(11Bq/kg)近2倍。进而对种植区的土壤进行了分析, ^{226}Ra 与 ^{238}U 的含量分别为19,672和85,917Bq/kg。种植区在桂北铀矿附近,铀矿开采过程中产生含有 ^{238}U 、 ^{226}Ra 等核素的放射性废物已经影响到种植区土壤,并通过放射性生态转移

进入种植的农作物中。萝卜中 ^{238}U 并未超标,出现这种差异可能与 ^{226}Ra 转移系数及植物吸收特异性有关。另外,萝卜和萝卜叶中的 ^{226}Ra 含量分别为32.3和66.7Bq/kg, ^{226}Ra 在土壤-萝卜和萝卜叶的迁移系数分别为 1.61×10^{-3} 和 3.40×10^{-3} 。

世界居民所受平均待积有效剂量98.8%来源于 ^{226}Ra (5.6%)、 ^{210}Pb (19.5%)、 ^{210}Po (59.1%)、 ^{228}Ra (14.6%)。通过对比发现我国谷类食物中的 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 和 ^{228}Ra 的含量低于世界典型值;水果中 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 大致与世界典型值相同,约30~40mBq/kg;但鱼类中 ^{228}Ra 的含量为世

下转第8版

表1 GB 14882-1994 规定的各类食品中天然放射性核素的限制浓度

食品类型	限制浓度				
	^{210}Po (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{228}Ra (Bq/kg)	天然钍 (mg/kg)	天然铀 (mg/kg)
粮食	6.4	1.4×10	6.9	1.2	1.9
薯类	2.8	4.7	2.4	4.0×10^{-1}	6.4×10^{-1}
蔬菜及水果	5.3	1.1×10	5.6	9.6×10^{-1}	1.5
肉鱼虾类	1.5×10	3.8×10	2.1×10	3.6	5.4
鲜奶*	1.3	3.7	2.8	7.5×10^{-1}	5.2×10^{-1}

注: *除天然铀、钍单位为mg/L外,鲜奶其他核素单位均为Bq/L。

表2 我国水体中天然放射性核素浓度

类型	U ($\mu\text{g/L}$)		Th ($\mu\text{g/L}$)		^{226}Ra (mBq/L)		^{40}K (mBq/L)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
淡水湖	0.04~19.2	2.10^2	0.02~0.93	0.24	0.5~22.7	5.51	4.8~2,640	102
咸水湖	1.07~387	22.4	0.04~8.60	0.64	1.30~43.2	11.3	$54.8 \sim 2.2 \times 10^6$	2,108
水库	0.03~19.5	0.73	LD~2.04	0.09	0.5~65.6	4.69	3.2~12.5	50
江河	0.02~42.4	2.56	LD~9.07	0.33	0.5~99.5	6.24	8~7,149	134
温泉	0.02~18.6	0.87	0.02~4.85	0.25	0.5~5,940	204	5.1~8,125	567
冷水泉	0.04~14.9	1.17	LD~1.50	0.20	0.5~290	10.7	2.9~1,830	108
农村	LD~101	3.82	LD~6.29	0.15	0.5~178	7.16	3.3~5,867	192
井水	0.02~359	2.95	LD~1.32	0.16	0.83~34.6	5.81	1~923	65.5
海水	0.07~5.20	2.21	LD~5.92	0.53	1.60~46.0	11.7	2,500~21,600	10,320

表3 不同国家食品中天然放射性核素的活度浓度

类别	国家	活度浓度 (mBq/kg)					
		^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{235}U
奶类	美国	0.7	5.7	11		0.27	0.05
	意大利		3~19				
	德国		2~130	5~280	2~80		
	英国	0.1~4.9	<0.4~200	35~88	20~220		
肉类	美国	0.8~2.3	20	18		0.3~2	0.02
	日本	13	36			2.3	
	波兰	1.6~5.6	11~19	98~105	99~102	0.5~3.6	
谷类	英国	4.9	2.6~74	40~3,700	62~67,000		
	美国	3~23	7~100	33~81		0.1~2.8	0.1~1.3
	德国	20~400	20~2,900	40~4,000	37~1,900		
	波兰	4.7~11	80~110	110~160	90~140	2.0~21	
叶菜类	英国	6.2~35	0.7~5,200	56~120	27~260	12	
	美国	24	56	41		18	1.2
	德国	6~2,200	6~1,150	4~4,100	4~7,400		
	波兰	14~15	37~43	43~51	40~67	4~7	
根茎水果类	英国	9.8~400	2.2~170	16~3,300	3~3,300		
	美国	0.9~7.7	7~47	8~150		0.08~1.4	0.1
	日本	26	11			2.3	
	德国	10~2,900	5~9,400	20~4,900	22~5,200		
海产品	波兰	0.9~10	11~215	24~93	28~210	0.7~7.1	
	罗马尼亚	6~120	9~190	19~44	12~140	0.4~2.1	
	美国	13~1,900	30~59	14~1,800	150~55,000	1.2~30	0.4~90
	德国		100~7,400	20~4,400	50~5,200		
英国	2.5	8.5~2,100	180~4,800	60~53,000			

医学参考报

放射医学与防护频道

理事长兼总编辑: 巴德年
副理事长: 曹雪涛等
理事会秘书长: 周赞
社长: 魏海明
副社长: 吕春雷
副社长: 周赞

社址: 北京西城区红莲南路30号4层B0403
邮编: 100055
总机: 010-63265066

名誉主编: 吴祖泽 潘自强
主编: 马力文
副主编: 陈英 刘强 梁莉 刘芬菊 尚兵
常务编委: 陈红红 丁振华 郭国栋 江其生 金顺子 吕慧敏 吕玉民 李君利 李蓉 李连波 刘玉龙 田梅 问清华 万玲 邢志伟 张照辉 朱国英
编委: 崔凤梅 崔勇 曹宝山 高林峰 高玲 何玲 鞠永健 金义光 刘福东 凌光华 李丹 刘鉴峰 林智 廖京辉 马庆录 马国林 宁静 任福利 邹家龙 乌丽娅 王墨培 王嘉东 王治东 魏伟奇 肖德涛 谢萍 肖宇 徐畅 余长林 余祖胤 杨文峰 尹再哲 岳瑶 张继勉

张玉松 张庆 朱卫国 赵刚 赵超英 左雅慧
专家委员会主任委员: 尉可道
专家委员会副主任委员: 贾廷珍 白光
委员: 傅宝华 龚守良 龚怡芬 姜恩海 李开宝 罗庆良 施仲齐 粟永萍 童建 王洪复 王继先 王文学 王桂林 杨业鹏 周湘艳 张淑兰

编辑部主任: 张照辉
编辑部副主任: 曹宝山 廖京辉 宋娜玲
编辑: 陈森 岳瑶 尹文净 张煜
学术发展部主任: 梁莉
学术发展部副主任: 王墨培

高本底地区天然辐射的剂量学研究

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 朱卫国

低剂量率持续电离辐射照射,尤其是累积剂量小于100mSv的照射,导致的人体健康影响特别是癌症危险估计尚存在很大不确定性。在我国阳江天然放射性高本底地区(High Background Radiation Area, HBRA)开展的天然放射性高本底辐射与居民健康关系的研究始于1972年,定量估计居民受照剂量是研究小剂量持续照射导致健康危险特别是癌症危险的基础。

1 国内阳江高本底辐射剂量学研究现状

对HBRA和对照地区(Control Area, CA)的剂量学研究采用照射量率、累积剂量和野外 γ 谱3种方法与居民健康调查同步进行,研究分五个阶段。第一阶段(1972~1977年)预调查,测量了部分村庄室内外 γ 辐射水平。第二阶段(1978~1981年),采用闪烁辐射仪对野外辐射水平进行扫描式测量,根据辐射水平划分了调查地区的范围,并逐步采用热释光剂量计进行累积剂量测量。第三阶段(1982~1984年),按自然村的地理位置进行抽样调查,对抽样村庄内的居民日常活动的场所进行了现场测量。第四阶段(1985~1990年)为前期研究的总结阶段,同时对各村庄的辐射水平进行复核,分析了各地区的饮食以及生物标本中的天然放射性核素的含量。研究第五阶段(1991年后)为我国的研究者与日本体质研究会合作研究阶段,采用现场测量和累积测量补充测量了以往研究中遗留地区的辐射水平,并对两种方法进行了比较。估算了HBRA和CA人员年有效剂量,分别为 (2.12 ± 0.29) 和 (0.69 ± 0.09) mSv $^{-1}$ 。不包含宇宙射线的贡献,HBRA居民所接受的地球 γ 射线平均辐射剂量约为CA居民的4倍,包含宇宙射线的情况下其比值约为3倍。

袁镛龄按外照射所致居民年吸收剂量将HBRA分成高、中、低3个组,CA为对照组,采用TLD热释光剂量计实测的HBRA和CA居民年有效剂量 $E_{\text{年}}$ 分别是2.11、0.70mSv $^{-1}$ 。同时对佩戴剂量计人员所在环境进行了辐射水平的测量,估算出的平均 $E_{\text{年}}$ 略高于TLD方法实测的 $E_{\text{年}}$ 。潘自强等指出这两种方法的差异来自于剂量计的修正因子的取值,不同地区的能谱组成是不同的,应针对不同的能谱确定合适的能量响应修正因子,方能计算出更为精确的剂量结果。

为解决上述问题,笔者通过 γ 能谱的分析,根据阳江高本底地区天然辐射的实际情况经一定的简化建立照射模型,采用无源效率刻度方法,分析了阳江高本底地区和对照地区居民包括红骨髓、结肠(壁)、甲状腺、眼晶体等30个人体器官的年器官吸收剂量和全身有效剂量(男性)。该方法将天然放射性核素所致居民器官吸收剂量的估算精确到核素各分支的不同能量进行计算,并且使用符合中国人体格特征的体系模型的数据进行计算,计算结果和前述的分剂量组别的居民剂量学研究结果相吻合。模型建立为阳江高本底辐射剂量学研究中器官剂量的估算提供了新的研究方法。

2 国外高本底辐射剂量学研究现状

SENGUPTA等采用HPGe γ 谱仪测量了位于印度奥里萨邦东南沿海的Erasama沿海地区土壤样品中的天然放射性核素的含量,并采用UNSCEAR的方法计算出地面上1m处 ^{232}Th 、 ^{238}U 和 ^{40}K 所造成的 γ 吸收剂量率的数值,由此估算的外照射年有效剂量为 (2.36 ± 0.88) mSv,此数值与MOHANTY等人所估计的Chhatrapur沿海地区天然放射性核素所致居民外照射年有效剂量的数值十分接近。

NAIR等人对印度克拉拉邦Karunagappally地区的住宅进行了辐射水平的测量,通过对测量结果的分析,该地区居民年有效剂量高达7.0mSv,通过对国内其他地区的测量,该地区的居民年有效剂量的平均值约为其他地区的7.5倍。流行病学调查的结果未发现该地区居民癌症死亡率和其他地区有显著的差异。

SELVASEKARAPANDIAN等对印度Agantheesaram沿海地区的周围环境 γ 剂量进行了测量,发现在该地区有不连续的剂量升高的现象。同时采用该地区采集的沙土样本核素分析结果估算的该地区居民平均年有效剂量为4.78mSv,此值比UNSCEAR2000报告中的正常水平高出4.7倍。采用印度东南沿海室内 γ 累积剂量率的结果计算出的年有效剂量为1.33mSv,为全球平均水平的2.5倍。对闪烁剂量计与TLD测量的空气 γ 剂进行了比较,比值范围为0.54~0.91,累积剂量越大此数值越趋近于1。

3 尚需解决的关键问题

对于来自体外辐射源的辐射效应评价,通常是通过实测天然 γ 射线吸收剂量率或累积剂量来计算有效剂量,但在对辐射效应的评估特别是器官剂量和相关器官癌症的发病率的评估上有一定的不足。ICRP第103号出版物指出,不同质的辐射的相对生物效能可引起很大的不确定性,这种不确定性主要来自于辐射的光子能量的差别,因此需要准确的估计HBRA居民的器官剂量需要先确定出HBRA的天然辐射的射线能量。ICRP第74号出版物指出,在放射防护实践中有重要意义的辐射场常常是一种以上的辐射组成的,只有一种类型的单能、单一方向的辐射组成的辐射场是罕见的。防护量和实用量间的转换系数都是对应单能的射线和特定的照射条

件的所确定的,因此在实际使用时,需要确定拟议中的量对该辐射谱的能量分布。如果要更为准确的研究小剂量电离辐射的生物效应,需要对居民居住环境的放射性核素构成、能量及能量分布进行进一步的研究。

在今后的研究中应当对HBRA和CA居室内外辐射环境进行就地 γ 谱测量,通过对不同环境下的 γ 谱测量和适当的解谱方法,得到不同能量射线的构成比例,以期更精确的计算居民的器官剂量当量,若有条件可进一步研究不同建筑类型对辐射环境中能量分布的影响。

4 HBRA地区居民健康影响的研究

截至到目前为止的阳江高本底辐射与癌症研究的剂量学研究,HBRA居民从天然辐射接受的内外照射年有效剂量约为CA地区的3倍,比CA高出约4mSv $^{-1}$,HBRA全部癌症死亡与CA相比无统计学差异,也未发现HBRA与辐射相关部位的癌症死亡率的增加。另外,流行病学调查观察到HBRA恶性肿瘤死亡率低于对照,HBRA居民的免疫功能有增加的趋势。印度、巴西研究显示,尽管HBRA地区居民受照剂量是对照地区居民的数倍,未梢染色体畸变率增加,但没有得到HBRA地区居民癌症增加的数据。伊朗拉姆萨尔地区辐射水平比正常本底高13倍,电离辐射对免疫系统影响研究结果显示,HBRA人群总血清抗氧化水平明显低于对照人群,而PHA淋巴细胞增殖反应未受到影响,以上研究结果对评价小剂量的职业照射和环境照射的致癌危险有重要的参考价值。

地下建筑及旅游溶洞的辐射水平

环境保护部核与辐射安全中心 陈鲁 刘福东

目前,地下建筑物(如:地铁、隧道、地下商场、人防工程等)和天然溶洞已成为城市地下空间利用或旅游开发的主流,在地下生活、工作和参与地下活动的人员也越来越多。据估计,全国在地下生活、工作和活动的人数可能达到数千万之多。地下建筑物和溶洞由于上部建筑物和地表覆盖层的屏蔽作用,基本屏蔽掉了大部分宇宙射线,因此所受到的 γ 辐射主要来自地下围岩和建筑材料中镭等核素的贡献。潘自强院士在1996年中国国民剂量初步评价中提到国民所受照射中天然本底辐射占93.4%,其中氡及其子体产生的照射约占天然本底辐射照射的48%。地下建筑由于建在地下,很容易受到围岩和土壤氡的影响。

地下建筑物的氡浓度及辐射水平受到地质条件、建筑材料所含放射性核素

表1 我国部分城市地下建筑物的年均氡浓度(Bq·m $^{-3}$)

城市	范围	平均	标准偏差
广州	22 ~ 267	71	76
阳江	15 ~ 49	32	24
汕头	40 ~ 504	195	167
厦门	33 ~ 498	142	120
泉州	62 ~ 201	97	49
福州	80 ~ 2,482	714	764
温州	27 ~ 639	170	188
宁波	41 ~ 548	120	157
上海	41 ~ 148	72.6	35
上饶	29 ~ 676	90	187
南昌	35 ~ 233	123	69
贵阳	27 ~ 2,075	231	566
呼和浩特	39 ~ 482	190	213
包头	76 ~ 2,286	705	845
集宁	35 ~ 462	190	157
鄂尔多斯	64 ~ 387	276	167
北京	54 ~ 266	153	71
济南	31 ~ 1,560	344	541
青岛	31 ~ 476	156	141
郑州	61 ~ 743	143	217
武汉	20 ~ 1,097	401	405
桂林	38 ~ 344	130	94
南京	65 ~ 458	168	78
杭州	50 ~ 576	200	124

下转第8版

NORM 管理现状及面临挑战

环境保护部核与辐射安全中心 刘福东

天然存在的放射性物质 (Naturally Occurring Radionuclide Material, NORM) 是指环境中天然产生的放射性物质, 主要是长寿命放射性核素, 包括天然铀、天然钍、钾-40 及其各自的放射性衰变产物如镭和氡等。一些人为了活动引起 NORM 活度浓度增加或改变了放射性核素分布, 使得工作场所或周围环境的辐射水平升高。当放射性活度浓度或者工作人员及公众所受年有效剂量超过审管部门的规定时, 需要进行审管控制。

人为活动引起 NORM 照射水平升高涉及行业范围很广, 国际原子能机构 (IAEA) 建议主要包括铀矿冶炼及制造、稀土提取、钍萃取和应用、铀提取、石油和天然气、二氧化钛生产、磷酸盐生产、锆和氧化锆、金属生产、燃煤、水 (温泉) 处理、建材生产等工业。我国法规将铀矿的冶炼及制造工业纳入核安全监管范畴, 因此, 我国所涉及的 NORM 范围不包括铀矿的冶炼及制造工业。

由于矿产资源在开发利用过程中使得 NORM 放射性核素得以浓集、迁移和扩散, 导致一些工业工作场所中放射性核素活度浓度或操作人员所受年有效剂量明显高于当地本底水平。调查数据显示: 有些工业活动产生废弃物活度浓度高于当地本底水平 2 ~ 5 个数量级, 操作人员所受年有效剂量超过当地居民十几倍到上千倍, 受到的辐射剂量高于职业人员。由于 NORM 活动引起辐射水平升高可能直接对工作人员或公众造成影响, 使得局部环境受到污染, 形成潜在辐射环境问题, 这些问题已日益受到国内外广泛关注。国际放射防护委员会 (ICRP) 最新建议书已建议把人为 NORM 纳入其放射防护体系, 并成立工作组制定 NORM 照射情况的控制框架; 国际原子能机构 (IAEA) 在其基本安全标准的修订中, 也把 NORM 照射的控制作为重要内容纳入了监管范围, 制定了一系列的安全报告和管理导则。

人为活动引起 NORM 照射水平升高所涉及的行业中, 无论是 NORM 处于自然状态还是

经加工处理后提高了放射性材料的活度浓度, 其效果与辐射源所造成危害没有本质差别。但由于 NORM 涉及范围广泛, 与人们生活关系密切, 在处理天然辐射水平较高情形时, 需要结合本国实际情况, 即遵循辐射防护基本原则, 又必须考虑干预的代价。截止 2016 年国际上共召开八次 NORM 专题会议, 在北京召开的第七次 NORM 国际会议上达成两点共识: 1) 对 NORM 采用分级管理是合理的; 2) NORM 工业开发利用过程中对工作人员年有效剂量低于 1mSv 或者对公众附加年有效剂量低于 0.3mSv 是接受的, 企业可以不纳入审管范围。在巴西里约热内卢召开的第八次国际 NORM 会议上, 上述观点得到了广泛认可。

国际原子能机构推荐人为活动引起 NORM 照射水平升高的工业采用分级管理模式, 按照工作人员所受年有效剂量分四级管理, 见表 1。如果涉及工业中工作人员年有效剂量超过 1mSv, 或者附近公众所受年有效剂量超过 0.3mSv, 纳入审管范围。IAEA 管理模式中剂量控制是建议值, 各国可以根据实际情况和本国法律法规标准制定适合本国的剂量控制指标。

为了便于管理的可操作性, 基于剂量分级管理的约束

值, 考虑照射途径, 推导活度浓度值。对于人为活动引起 NORM 辐射水平升高的工业以工作人员 1mSv/a 或对公众 0.3mSv/a 为基础, 推导放射性物质活度浓度并与土壤放射性活度浓度进行比较。国际原子能机构及国际辐射防护委员会的委员们认为如果低于土壤放射性活度浓度, 则可以豁免, 否则适宜监督管理。因此目前 IAEA 仍建议除 ^{40}K 以外的其他核素为 1Bq/g, ^{40}K 为 10Bq/g, 但对于建筑材料中放射性核素或者被废物污染的饮用水不采用该豁免值。

我国在资源开发利用涵盖了 IAEA 提及所有行业, 《中华人民共和国放射性污染防治法》明确将伴生放射性矿开发纳入监管范围。在环境保护部统一安排下进行了首次污染源调查, 对稀土矿、锆石矿、煤矿等行业辐射水平进行较为详细调查, 获得很有价值的信息。在首次污染源调查基础上, 环境保护部 (国家核安全局) 提出了《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录 (第一批)》 (见表 2), 要求矿产资源开发利用单位如果纳入第一批管理名录, 并且原矿、中间产品、尾矿 (渣) 或者其他残留物中铀 (钍) 系单个核素含量超过 1Bq/g 的矿产资源开发利用项目, 建设单位应当委托具有核工业类评价范围的环境影响评

价机构编制辐射环境影响评价专篇。

NORM 活动引起的辐射水平增加已引起广泛关注并达成诸多共识, 如: 对 NORM 管理仅用于天然放射性核素, 不考虑人工核素; 对 NORM 宜采用分级管理; 公众 0.3mSv/a 或工作人员 1mSv/a 可作为豁免标准; NORM 管理应遵循辐射防护基本原则; NORM 开发利用不适用于应急照射; ^{40}K 应排除等。但也面临很多挑战: 1) 法规标准变更的挑战。IAEA 最新出版了“电离辐射防护和辐射源安全基本标准 (初版)”, 将原来照射分类即公众照射、职业照射以及医疗照射变为现存照射、计划照射和应急照射。对 NORM 管理面临是否采用以前标准、如何改变, 怎样改变更为合理等问题; 2) 辐射防护基本原则应用方面的挑战。基于实践和干预基础上提出辐射防护的三个原则, 对 NORM 管理怎么应用正当化原则? 由于 NORM 活动范围很广, 引起辐射照射增加程度相差很大, 豁免条件与放射性废物豁免有多大差异? 最优化原则怎样应用? 3) 三种照射评估的挑战。对于 NORM 管理, 在评估计划照射和现存照射时, 需要明确照射来源和途径, 废物或废渣固体废物管理是否考虑计划照射? 有的废渣是可以再循环再利用的,

专家介绍



刘福东 研究员

博士, 环保部核与辐射安全中心核与辐射安全研究所副所长。主要从事辐射防护和环境保护、废物处理处置等方面研究工作, 负责国家重大科技专项及国家自然科学基金多项。参与编写《中国辐射水平》、《辐射防护手册》等专著, 在 SCI, EI 等核心期刊发表论文四十多篇。担任国际放射防护委员会 (ICRP) 的 NORM 工作组成员, 废物处理处置协会委员, 《原子能科学技术》、《核技术》、《核科学与探测技术》、《中华放射医学与防护杂志》等核心期刊审稿专家。

这些再循环再利用生产产品是否考虑计划照射还是又有新的现存照射? 4) NORM 工业活动废物管理的挑战。人们希望废渣进行无害化处理, 且废渣产生的量越少越好。实际上人为活动过程中产生 NORM 废物量巨大, 这些废物有些是可以再循环再利用的。但是有些成员国认为: 如果和其他物质混合后再利用, 面临废物稀释嫌疑; 有的成员国认为可以混合使用, 但要符合辐射防护基本原则。因此, 在混合使用方面不同成员国看法不一。此外, NORM 工业产生副产品, 由于各个国家入境监测标准不同, 进口这些副产品也面临是否存在废物转移的问题; 5) NORM 工业厂址关闭后修复的挑战。NORM 涉及工业很多, 这些工业的工艺流程不同, 废物浓集水平差异很大, 这些关闭厂址的环境怎样整治, 整治标准如何制定? 6) 风险评估的挑战。NORM 产生废物通常半衰期很长, 对公众健康影响及风险评估等一系列问题。

表 1 IAEA 的分级管理模式

级别序号	管理方式	剂量控制 D (mSv/a)	说明
I	豁免标准	工作场所: 工作人员: $D < 1$ 公众: $D < 0.3$	需要综合考虑社会、政治、经济以及生存所需资源限制等因素, 同时考虑辐射防护的代价。个别案例可以高于此值。
II	通知	工作场所: $0.3 < D < 1$	类似豁免但应让对方知晓。
III	通知 + 登记	工作场所 $1 \leq D \leq 6$	进行备案并通知生产单位。1mSv/a 为进行调查下限。
IV	告知 + 许可证	工作场所 $D > 6$	要求许可证, 并由专门机构测量以便控制质量, 当处理高活度物质时需要这样程序。

表 2 矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录 (第一批)

序号	行业	工业活动
1	稀土	各类稀土矿 (包括独居石、氟碳铈矿、磷钇矿和离子型稀土矿) 的开采、选矿和冶炼
2	铀、钍	含铀、钍矿石的开采、选矿和冶炼
3	锆及氧化锆	石英石 (砂)、斜锆石的开采、选矿和冶炼
4	钒	钒矿的开采和冶炼
5	石煤	石煤的开采和使用

NORM 工业开发利用引发环境问题

环境保护部核与辐射安全中心 乔亚华 刘福东

在工业生产中,由于部分矿产资源通常与铀、钍等天然放射性元素共生,在开发利用过程中放射性核素又在废物中进一步富集,导致放射性含量高于天然放射性本底水平,可能会对环境造成一定的放射性污染。

一、NORM 涉及的主要工业活动

国际原子能机构 (IAEA)、欧盟 (EC) 和联合国原子辐射影响科学委员会 (UNSCEAR) 分别总结了需要引起关注的可能存在辐射照射的工业活动,主要包括稀土提取工业、铀的萃取和应用工业、铀提取开采、非铀开采、石油和天然气工业、TiO₂ 工业、磷酸盐工业、锆及氧化锆工业、金属生产工业、煤燃工业、等 12 类企业。有些工业企业可能排放一些含天然放射性核素较高的物质,使职业工人或公众受到显著照射,对人类健康和环境带来辐射影响。

二、我国第一次污染源调查总体情况

在 2008 年开展的第一次全国污染源普查中,符合普查技术规定要求的伴生放射性污染源普查对象有 1,433 家,其中伴生放射性矿产开采企业 876 家,伴生放射性矿产冶炼加工企业 587 家。我国伴生

放射性污染源主要分布在山西、四川、湖南、云南和重庆,分别为 310 家、143 家、131 家、107 家和 82 家,共有伴生放射性污染源 (第一次污染源普查定义) 773 家,占全国总量的 53.9%。这 5 个地区是我国煤、有色金属和黑色金属的主要产区。北京、天津、吉林、河北、宁夏、安徽和青海伴生放射性污染源,均不超过 10 家,七省合计 40 家,所占比例不到全国总量的 2.79%。首次污染源调查表明:我国伴生放射性污染源企业主要是煤 (含煤矸石)、铁和铅/锌,共 1,058 家,占总企业数 73.8%; 这些企业产生的工业固体废物中含放射性固体废物 (表面 1m 处的 γ 剂量率超出“当地本底水平 + 50nGy/h”) 1.714 亿吨,其中 1,000 万吨以上的省份有内蒙古、山西、云南、贵州和新疆,废物产生量合计 1.155 亿吨,占全国总计的 67.4%。各类伴生放射性污染源企业产生的工业固体废物中含放射性固体废物量较大的矿产种类是铁、煤和铜,产生含放射性固体废物 1.35 亿吨,占全部的 78.7%。主要是由于这三类矿产资源的开采量和冶炼加工原料使用量较多,相应的固体废物产生量较多。

三、NORM 工业引发的环境问题

随着我国工业技术的发展,涉及的 NORM 工业越来越多,在这些工业的开发利用过程中,铀、钍及其子体等天然放射性核素在产品、残留物、废物和工作场所中富集和扩散,会造成矿区周围环境的天然放射性水平升高,对人体健康和环境安全带来潜在危害。伴生矿物资源开发利用对环境问题主要包括: 1) 环境空气中的 γ 辐射剂量率水平; 2) 大气中的放射性气溶胶浓度; 3) 空气中氡浓度及其子体 α 浓度; 4) 水体中天然放射性核素活度浓度; 5) 土壤中天然放射性核素的含量。

已有调查数据显示,伴生矿区及开发加工企业厂区周围的环境地面 γ 辐射剂量率明显增高,由高到低排序为: 独居石 > 重氟碳铈矿 > 轻氟碳铈矿 > 铅锌矿 > 铝土矿 > 煤矿 > 磷石。

在伴生矿的开发利用过程中排放的废水中一般含有 ²³²Th、²³⁸U 和 ²²⁶Ra 等核素。在对 7 省市 400 余家企业周围地表水调查发现: ²³²Th 含量为 $3.9 \times 10^{-3} \sim 4.4 \times 10^{-1}$ Bq/L; 总 β 含量在 $6.0 \times 10^{-2} \sim 3.0$ Bq/L。 ²³²Th 和总 β 含量较高的地区主要分布在贵州。调查数据表明: 厂区周边 γ 空

气吸收剂量率平均值在 222 ~ 1,120nGy/h, 环境大气中氡浓度及子体 α 潜能水平也高于对照点的水平。

有数据表明,在地下煤矿开采过程中,有极少数小型煤矿地下氡的浓度可达 2,000 ~ 10,000Bq/m³。据联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) 2000 报告,全球地下矿山 (铀矿除外) 开采中因吸入氡子体所致年集体有效剂量 (1990 ~ 1994 年) 约为 3,230 人·Sv, 其中约 44% (1,410 人·Sv) 来自煤矿。矿井中氡的浓度与通风状况、地质结构、地下水中氡的浓度等因素有很大关系。通风不好的矿井氡浓度较高,将会对矿工造成较大危害。

有的伴生矿开发利用地区的人均年有效剂量要显著高于全国居民的平均水平。以石煤矿的开发利用为例,石煤中含有较高天然放射性核素,将石煤渣制做成为碳化砖,利用石煤或石煤渣充填房屋地基、路面,以及运输过程中石煤、石煤渣的撒落等多种途径,导致石煤矿区建筑物的室外原野与道路等场所的辐射剂量率约升高 3 倍左右。除此之外,20 世纪 90 年代以后,由于大量工业废渣被用于生产建筑材料,粘土砖使用逐渐减少,取而代之的是粉煤灰砌块

专家介绍



乔亚华 博士

高级工程师,核燃料循环与材料专业,现就职于环境保护部核与辐射安全中心,长期从事核电站等核设施周边的核与辐射环境影响评价及核与辐射环境管理等方面工作,国内外期刊发表文章 10 余篇。

砖,导致一部分住宅室内氡浓度和 γ 剂量率有所增加。通过对北京市某粉煤灰砖厂成品堆场的随机取样测量表明,若建材原料中 100% 为粉煤灰时,大约有 3% ~ 4% 的样品会超过国家标准,若原料中粉煤灰的配比适当,粉煤灰砖的放射性水平平均低于国家标准。但对贵州省煤渣砖抽查中发现,有些成品砖的放射性水平已超过国家标准,特别是 ²²⁶Ra 的活度浓度较高,应引起足够重视。

我国伴生矿辐射水平和工业废渣的管理

环境保护部核与辐射安全中心 刘福东

我国在上世纪八十年代由卫生部、国家环保总局 (现在更名为国家环保部)、中国原子能科学研究院、清华大学等单位对矿产资源开发利用过程辐射水平进行初步调查,主要集中在煤矿、稀土矿等资源开发过程中原材料、产品、副产品及废渣中放射性核素活度浓度测量。之后一些科研院所对其他行业,如人防工程、溶洞、温泉等场所的辐射水平进行调查。这些调查大多是对某一行业或者某一企业进行调查,由于采用的测量仪器和调查方法不同,数据间缺乏可比性。

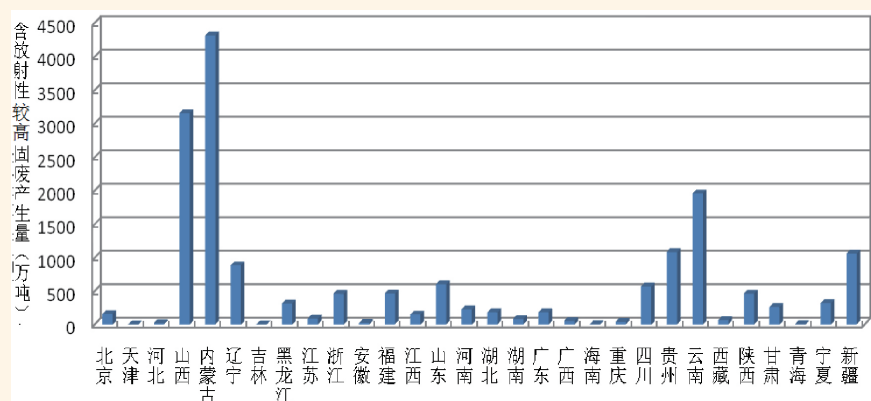


图 1 全国含放射性固体废物量 (本底 +50nGy/h) a

2006 ~ 2009 年国家环境保护部组织了第一次全国污染源普查,将稀土、铌/钽、锆石和氧化锆、锡、铅/锌矿、铜、铁、磷酸盐、煤 (包括煤矸石)、铝和钨等 11 类矿产资源,作为伴生放射性污染源普查对象。该调查采用了统一的技术方案,先通过初测确定取样监测分析对象,再对总 U、²³²Th、²²⁶Ra 进行取样监测。最终确定符合普查技术规定要求的伴生放射性污染源普查对象 1,433 家。全国调查显示含放射性废物最大省份是内蒙古,其次是山西,各省含放射性废物量见图 1。由于时间和财力等方面限制,未对我国石油、天然气行业辐射水平进行调查,缺乏较为详细的伴生矿废水中放射性核素含量调查数据。²²⁶Ra、²³²Th 超过 1,000Bq/kg、500Bq/kg 的企业和废物产生数量见表 1、表 2。

为保护环境、保护公众健康、促进铀 (钍) 矿以外的矿产资源开发利用可持续发展,环境保护部办公厅制定了《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录 (第一批)》,规定了需要做辐射专著要求。

我国对伴生矿产生废渣或者废物在很多法律法规上进行论述。《中华人民共和国放射性废物防治法》第三十九条规定:核设施营运单位、核技术利用单位、铀 (钍) 矿和伴生放射性矿开发利用单位,应当合理选择和利用原材料,采用先进的生产工艺和设备,尽量减少放射性废物的产生量。《中华人民共和国循环经济促进法》在第三十条也明确:企业应当按照国家规定,对生产过程中产生的粉煤灰、煤矸石、

下转第 7 版 ▶

宇宙射线对航空机组人员的照射

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 孙全富 苗晓翔 尚兵

宇宙射线是一种高能量的辐射,主要来自于太阳系之外的太空深处。1912年由奥地利物理学家赫斯(Victor F. Hess)发现。初级宇宙射线含有不同能量的粒子,较低能量的辐射来源于离我们最近的恒星(太阳)耀斑。绝大部分高能量的粒子来源于银河系,更重的粒子则起源于超新星爆发的喷射。太阳耀斑可以大大提高宇宙射线的剂量水平。宇宙射线的组成随海拔高度而有所变化。在大气层顶端(约1,000km以上),87%为质子,12%为 α 粒子,1%为其他的轻核。宇宙射线穿透大气层时,通过与物质的相互作用其粒子构成发生很大的变化,到达海平面时,63%为介子,15%为电子,21%为中子,其余为光子。

1、宇宙射线所致剂量估算的影响因素

宇宙射线是航空、航天活动中职业照射的重要来源。航空机组人员受到宇宙射线照射主要取决于航空器的飞行高度、飞行时间、航线区域(地磁纬度)、太阳活动和太阳耀斑等。影响最大的因素是地球大气对宇宙辐射的散射和吸收作用,它主要与飞行的海拔高度、大气密度有关。另外,电离成分和中子成分的比例也会随海拔高度而变化。在海拔高度6km以上,中子占60%~80%,海拔915~1,215km中子剂量贡献约为直接电离辐射的3~5倍。

地球磁场对宇宙射线有一定的屏蔽作用(用地磁截止刚度R表示),R与观测点到地心的半径和地磁纬度等有关。另外,受太阳活动周期影响,太阳磁场对宇宙射线也有一些屏蔽作用。在估计机组人员受照射剂量时,需考虑太阳活动(用日心势MV表示)的情况。最大太阳活动年时,太阳磁场屏蔽效应增大,因此宇宙辐射剂量率最低,最小太阳活动年时,屏蔽效应减弱,宇宙辐射剂量率最高。美国联邦航空署(FAA)航空医学研究所网站每月公布监测到的MV月均值,该值在计算程序中作为一个系数用于调节宇宙辐射有效剂量率。

海拔高度需要用大气厚度进行修正,UNSCEAR多年来一直采用Bouville和Lowder给出的估算不同海拔高度的宇宙

射线电离成分剂量率公式。地磁纬度对质子注量的影响,采用Florek公式估计。

2、国内开展的相关研究

1992~1993年于水等测量了地理经度(76~127)E、地理纬度(18~50)N范围内34条国内航线的宇宙射线剂量率。根据424个实测数据拟合的宇宙射线剂量率与海拔高度呈指数函数增加。所调查范围内,宇宙射线随地理经度变化不明显,但随地理纬度的增加呈线性增加。34条航线的平均起飞时间为(19.2±5.2)min,平均降落时间为(22.4±4.4)min,起降时间的近似均值为20min。航班巡航高度多数为10,000m。根据测量结果,作者拟合了海拔高度与宇宙射线剂量率之间的方程,求得海拔高度0~10,000m的平均剂量率为6.5~161($\times 10^{-8}$ Gy/h)。此后,王其亮采用RS-111型高压电离室和FD-3013型闪烁辐射仪测量了国内30条航线的宇宙射线剂量率为(12.0~917) 10^{-8} Sv h^{-1} 。按年飞行1,000h计,机组人员在飞行中所受年有效剂量范围为0.12~9.17mSv。陈英民对山东省航空公司的航班进行了测量,飞行高度在8,000m~10,000m和4,000m,机组人员受到的年有效剂量分别为2.40mSv和1.12mSv,中子成分的贡献为33%~55%。

许振华等对近地轨道飞船舱内辐射剂量进行了测定,穿越南大西洋异常区(SAA)上空1次,舱内剂量大约是其它区域飞行1圈所受剂量的4倍。

3、剂量估算的模型软件

航空机组人员受照射剂量的估算方法可分为三种。1)利用球形组织等效正比计数器等参考基准仪器对剂量率进行直接测量;2)采用TLD、CR-39等被动累积探测器进行个人剂量测量;3)根据粒子注量计算程序及实测数据编制的计算机

程序估算航空机组人员的受照射剂量。

最常用的计算机模拟程序软件有美国航空署的CARI-6、德国环境健康研究中心研发的EPCARD以及加拿大开发的SIEVERT等。这些软件的数据库内存储了航空飞行高度范围的三维等剂量率曲线,将飞行的起始机场、爬升和降落时间、巡航时间及巡航高度、飞行轨迹和日期等数据输入,即可计算出此次飞行剂量。不同软件对太阳活动周期(Solar Cycle)、太阳耀斑(Solar Flares)和地磁圈(Magnetosphere of the earth)等数据更新有所不同,计算结果有所差异。

国内软件主要有中国民航总局开发的民航飞行宇宙辐射有效剂量计算系统(CARD)和中国民航大学开发的CAUCARD。作者用此方法计算了乌鲁木齐到国内外6个城市机组往返一次的有效剂量,与利用CARI-6计算的剂量相比,最大相对偏差为8.6%。国内主要大城市航线飞行1,000h接受剂量约2mSv,主要国际航线飞行1,000h接受剂量约6mSv。海南航空股份有限公司与中国民航大学采用CARI-6,对2007年459个航班飞行人员的年剂量进行了估算。飞行员年飞行时间为400~1,000h,均值为800h,飞行员的个人宇宙辐射年有效剂量为0.76~1.90mSv,均值为1.53mSv。乘务人员飞行时间为800~1,400h,平均为1,000h,个人宇宙辐射年有效剂量为1.53~2.66mSv,年均值为1.90mSv。

由此可见,无论是实际测量结果还是依据国外软件估算结果,我国航空机组人员所接受的年剂量大于1mSv的公众照射限值,可能与其他职业的放射工作人员年剂量相当或高于传统的放射工作人员。如果没有航线轮换,国际航线机组人员剂量甚至可能高于核电站工作人员所接受的剂量。

4、集体剂量估计

假定飞行员的年均剂量为1.53mSv,乘务人员的年剂量为1.90mSv,根据民用航空局网站提供的2011年以来我国飞行员的人数和飞行人员与空乘人员

的标准比例(1:1.5)所得到的机组人员总数,计算了我国民航客机航空机组人员受天然辐射职业照射的年集体剂量。

在不考虑支线航班与干线航班交叉飞行以及两类航线机组人员飞行时间有明显差异的情况下,按支线航空6%占比,2015年我国干线航班(10,000m以上)和支线航班(10,000m以下)机组人员估计的年集体有效剂量分别为187.428人·Sv和11.964人·Sv。

另外需要提及的是我国航天员的宇宙射线剂量。截止2016年11月,我国共有14人乘坐神州系列飞船进入太空,累积飞行4,003.4小时。银河宇宙辐射对近地轨道飞行器舱内的剂量贡献约为0.18mSv/d,据此估计我国航天员的集体剂量为0.03人·Sv。

5、航空机组人员职业健康管理

考虑到现代商业民航客机飞行高度较高,也考虑到中子照射的贡献,特别是中子品质因子不断增大,ICRP1990年建议书(第60号报告)、IAEA1997年《国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准》(IAEA安全丛书No.115)均建议将机组人员受到的照射视为职业照射。1990年美国航空管理局首先将驾驶喷气式客机人员列为职业照射人员范畴,并采用了放射性职业人员的剂量限值。欧委会原子能指令(EC Directive 96/29 EURATOM)1996年要求对航空机组人员按照放射工作人员进行管理,开展剂量检测与估算。欧盟成员国在2000年以后逐步对本国辐射防护规定进行修订,规定要求需告知航空机组人员宇宙射线的危害,采取机组成员工作时间和航班计划等措施降低宇宙射线剂量,并由各航空公司或专业机构按照法定的软件,估计并报告航空机组人员的年剂量。

我国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)第3.1.3.2款也把航空机组人员的宇宙射线照射

专家介绍



孙全富 研究员

博士生导师。主要从事放射流行病学研究与辐射致健康效应危险评估,负责国家重大科技专项及国家自然科学基金多项。1986年以来,作为第一作者和通讯作者,发表论文100余篇,起草国家职业卫生标准和卫生行业标准多项。担任ICRP第一委员会会员、中华医学会放射医学与防护专业委员会主任委员,中国卫生监督学会放射卫生专业委员会副主任委员、中国辐射防护学会副秘书长。

视为职业照射。2002年我国颁布了针对空勤人员的国家职业卫生标准《空勤人员宇宙辐射控制标准》(GBZ140-2002),进一步明确航空空勤人员飞行期间所受宇宙射线为职业照射。

宇宙辐射属于天然辐射源的外照射,既无法取消,也不可能通过对飞机舱采取措施做到有效屏蔽。对机组人员主要的防护措施仅限于限制飞行时间、轮换不同飞行高度和纬度的航线等措施。对怀孕的女机组人员,则要求用人单位有责任改善怀孕女性工作人员的工作条件,以保证为胚胎和胎儿提供与公众成员相同的辐射防护水平。

最后,简要提及飞机乘客的受照射剂量。只要坐飞机,就会受到一定剂量的宇宙射线照射。剂量大小与飞行时间、航线、海拔高度和地磁纬度等因素有关,剂量率在0.003mSv/h左右。如果一年在国内飞行200个小时,受到的累积剂量约为0.6mSv,如果是国际线的旅客,剂量要大一些。另外需要说明的是,各国都不对飞行旅客的照射进行管理,认为这是“自愿的”行为,也没有法定的限值。

表1 我国航空机组人员天然辐射职业照射水平(mSv)

时间	年均飞行员数量(千人)	估计的年均乘务人员数量(千人)	估计的年集体有效剂量
2011	27.807	41.711	121.796
2012	31.381	47.072	137.450
2013	35.505	53.258	155.513
2014	39.881	59.822	174.680
2015	45.523	68.285	199.392

加强含放射性消费品的运输管理 ——从海关截获放射性超标磁疗垫说起

7月18日山东烟台检验检疫局从来自韩国航班的旅客行李中截获了一件放射性超标的保健垫。经检测保健垫表面的剂量当量率达到27.25Sv/h, 超过本底值255倍。这是山东口岸首次截获放射性超标的保健类生活用品, 并对保健垫进行了退运处理。

无独有偶, 今年5月浙江出入境检验检疫局发现一个β射线和γ射线均严重超标的邮件, 其中β射线值超标50倍以上。该邮件来自德国, 邮件内装有4块约5cm×5cm大小的矿石, 分别产自德、美等国。这些矿石含有较高的UO₂(二氧化铀)成分。收件人爱好收藏, 这些矿石是他从矿晶交流网站上购买的。因放射性水平超标, 根据国家有关规定, 入境检验检疫局对该邮件实施了退运处理。

近年来, 通过海关携带含放射性消费品的案例时有发生, 如厦门、石家庄机场还截获了放射性超标的负离子粉、矿石项链、手链等。由于国际邮件人货分离、渠道隐蔽、不强制要求申报等特点, 近年来通过邮路口岸邮寄核辐射有害因子入境的事件呈现快速增长态势。2016~2017年, 仅浙江出入境检验检疫局杭州邮检办事处就截获五批次放射性超标的进境邮件。包括含天然放射性核素的装饰材料, 相机镜头等, 部分邮件外照射剂量率超标达40倍以上。

相机镜头怎么会有放射性呢? 上个世纪40~70年代, 生产厂家为提高镜头的光学性能, 在玻璃透镜中添加了少量的氧化钍。有人对镜头表面的γ剂量率进行了测量, γ剂量率在500~

1,000nGy/h。这些因产品功能或制造工艺需要, 将放射性物质(包括天然铀、钍制品)作为原材料加入其中或以密封放射源结构装配在内, 或采用技术途径使之具有放射性的产品被称为含放射性物质消费品。有数据显示, 随着中国进境国际邮件数量快速增长, 2016年仅被中国邮路口岸截获放射性超标邮件达45批次, 同比上升125%。

为保护我国的生态环境和公众健康, 防止国外放射性超标物质入境, 早在1989年我国就颁布了《放射性物质安全运输规程》(GB11806-1989), 目前执行的是2004年修订版《含放射性物质运输安全标准》(GB11806-2004)。2010年国家质检总局又实施了国质检卫函[2010]424号《口岸核生化有害因

子监测技术方案》, 对放射性排查和超标货物的判定做出明确规定。当γ剂量当量率≥本底值3倍时, 就要启动放射性排查程序。对于放射性超标邮件的判定: 目前涉及到γ剂量当量率、表面α、表面β和中子4种射线。以下四种情况均被判定为放射性超标, 即γ剂量当量率≥1μSv/h; 物体表面α水平≥0.04Bq/cm²; 物体表面β水平≥0.4Bq/cm²; 检出中子; 只要达到或超过其中任一水平, 即被判定为放射性超标货物, 通常采用退运或销毁。GB11806对子给出了极为严格的规定, 其目的是严防核辐射超标物质通过口岸入境, 造成放射性污染或者被恐怖分子所利用, 切实保障国门安全和社会稳定。(尚兵 报道)

◀ 上接第1版

2 天然辐射照射的可控性

控制和减少公众所受天然辐射照射是辐射防护的重要任务。表4是我国国民所受天然辐射照射可控制程度分类表。随着科学技术的进步, 特别是随着辐射防护技术的发展, 采取一定措施, 大部分的天然辐射, 如室内γ和室内氡可以得到有效控制。

表4 我国国民所受天然辐射照射剂量与可控制程度分类表

可控制程度	射线源	年均有效剂量当量(mSv)	百分比(%)
不可控制的	室外宇宙射线	0.070	3.0
	室外氡(+ ²²² Rn)及其短寿命子体	0.137	5.0
	⁴⁰ K(内照射)	0.17	7.4
难以控制的	室内宇宙射线	0.247	10.7
	室外陆地γ辐射	0.074	3.2
	除 ⁴⁰ K外的其他核素产生的照	0.17	7.4
可以控制的	室内陆地γ辐射	0.466	20.3
	室内氡(+ ²²² Rn)及其短寿命子体	0.964	41.9

3 室内氡的控制

土壤和岩石是室内氡的主要来源。为了有效地控制氡进入室内, 一些国家提出了氡易出区(Radon-Prone Areas)或受氡影响地区(Radon-Affected Areas)的概念。²²⁶Ra是²²²Rn的母体核素, 图1是我国根据土壤²²⁶Ra含量的调查结果绘制的²²⁶Ra含量地理分布图。图2是根据土壤类型、渗透系数、水含量和²²⁶Ra含量绘制的²²²Rn析出率分布图。氡潜势图的绘制为建筑物选址和建筑防氡设计提供了依据。

新建筑物进行防氡设计和施工是防止氡进入室内最有效的方法。2002年我国颁布的GB50325民用建筑工程室内环境污染控制规范, 提出了建筑选址和对建筑工地进行土壤氡检测以及工程完成后对室内氡强制检测的要求, 2010年增加了高孔隙度墙体材料氡析出率的测量。2015发布的JGJ/T 349民用建筑氡防治技术规程对新建筑的防氡设计、施工、防氡材料性能要求以及通风给出了技术指导, 这些措施可以从源头上阻止氡气的进入, 使新建房屋中的氡水平得到较好的控制。

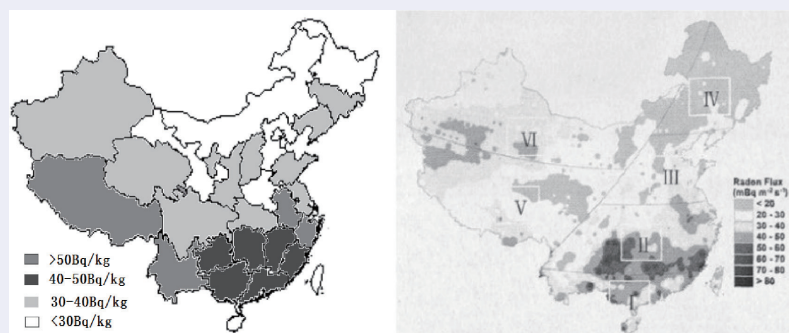


图1 我国土壤中²²⁶Ra含量的地理分布 图2 我国土壤中²²²Rn析出率的地理分布

◀ 上接第5版

表1 固体废物中²²⁶Ra不同活度浓度范围

矿产资源名称	²²⁶ Ra不同活度浓度C范围(Bq/kg)					
	100 ≤ C ≤ 500		500 < C < 1,000		C ≥ 1,000	
	企业数(家)	固废产生量(吨)	企业数(家)	固废产生量(吨)	企业数(家)	固废产生量(吨)
稀土	6	1.41 × 10 ⁵	3	1.69 × 10 ³	3	1.32 × 10 ³
铀/钍	0	2.65 × 10 ⁴	1	1.33 × 10 ³	3	3.34 × 10 ³
锆石	4	3.20 × 10 ⁵	1	9.24 × 10 ³	6	2.48 × 10 ⁴
锡	4	8.06 × 10 ⁶	0	0.0	4	9.10 × 10 ³
铅/锌	12	3.03 × 10 ⁶	1	1.70 × 10 ⁴	1	1.49 × 10 ⁴
铜	15	1.86 × 10 ⁶	0	0.0	1	7.86 × 10 ²
铁	31	3.72 × 10 ⁶	2	2.90 × 10 ⁵	2	5.46 × 10 ⁴
磷酸岩	30	6.76 × 10 ⁶	0	0.0	1	3.17 × 10 ⁴
煤	132	2.90 × 10 ⁷	17	4.20 × 10 ⁵	7	2.08 × 10 ⁵
煤矸石	11	1.41 × 10 ⁶	0	0.0		
铝	7	3.08 × 10 ⁶	3	9.20 × 10 ⁵		
砷	6	5.02 × 10 ⁵	6	4.15 × 10 ⁵	6	4.22 × 10 ⁵
其他矿	48	3.92 × 10 ⁶	7	2.23 × 10 ⁵	9	8.36 × 10 ⁵
合计	306	5.15 × 10 ⁷	41	2.30 × 10 ⁶	43	1.61 × 10 ⁶

表2 固体废物中²³²Th不同活度浓度范围

矿产资源名称	²³² Th不同活度浓度C范围(Bq/kg)					
	100 ≤ C ≤ 500		500 < C < 1,000		C ≥ 1,000	
	企业数(家)	固废产生量(吨)	企业数(家)	固废产生量(吨)	企业数(家)	固废产生量(吨)
稀土	4	1.10 × 10 ⁵	0	0	20	2.37 × 10 ⁵
铀/钍	1	5.0 × 10 ¹	0	0	4	3.12 × 10 ³
锆石	6	2.96 × 10 ⁴	2	1.67 × 10 ³	3	5.76 × 10 ³
锡	2	1.08 × 10 ⁵	1	4.57 × 10 ³	3	4.53 × 10 ³
铅/锌	5	6.12 × 10 ⁴			0	0
铜	2	1.11 × 10 ⁵				
铁	15	2.67 × 10 ⁷	1	3.22 × 10 ⁴	2	1.67 × 10 ⁷
磷酸岩	1	1.29 × 10 ⁵			0	0.00
煤	102	2.75 × 10 ⁷	4	1.30 × 10 ⁵		
煤矸石	18	1.60 × 10 ⁶				
铝	8	3.08 × 10 ⁶	3	9.20 × 10 ⁵		
砷	1	1.26 × 10 ⁵	1	6.60 × 10 ⁴	0	0.00
其他矿	45	3.42 × 10 ⁶	4	4.93 × 10 ⁵	1	4
合计	210	6.30 × 10 ⁷	16	1.65 × 10 ⁶	33	1.69 × 10 ⁷

尾矿、废石、废料、废气等工业废物进行综合利用。即将颁布国家标准《用于建筑材料的工业废渣放射性核素限制》中定义当量浓度: $C_e = C_{Ra} + 1.3C_{Th}$ (其中 C_{Ra} 、 C_{Th} 分别指工业废渣中天然放射性核素²²⁶Ra、²³²Th的活度浓度, Bq/kg), 根据当量浓度及镭活度浓度值, 将废渣分无限制使用、限制使用和禁止使用三类。如果工业废渣属于限制使用, 生产成品建筑材料应符合GB6566-2010标准。经过调查统计, 97%以上属于无限制使用范围。

第八届国际天然放射性物质学术讨论会简介

2016年10月18~21日由国际原子能机构(IAEA)、国际放射防护委员会(ICRP)、联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)、世界卫生组织(WHO)等机构负责主办,巴西核能委员会负责承办“第八届国际天然放射性物质学术讨论会(NORM VIII)”在巴西里约热内卢召开。本次会议的主题是天然放射性物质领域所面临的挑战和解决方案,会议收到论文180多篇,来自世界各地的200余名专家、科研人员及政府官员参加了会议。

会议围绕NORM工业实践标准、NORM工作人员与公众的风险交流、NORM废物处理处置、NORM工业放射性核素活度浓度测量、NORM工业环境影响评价、NORM特定工业研究、NORM辐射防护以及NORM工业关闭处理等8个专题领域邀请了11位专家做大会报告,以及来自美国、中国、法国、英国、德国、瑞典、丹麦、意大利、奥地利、加拿大、澳大利亚和巴西等32个国家的51位代表做专题报告。

IAEA的Okayar回顾了IAEA发布的一系列与NORM相关的安全报告、导则及即将出版的标准、导则和技术文件。在总结了NORM工业普遍缺乏安全防护文化、放射学风险通常不占优势、多种风险并存等行业风险后,提出国际辐射防护和辐射源安全的基础安全要求;同时,明确了需要监管或豁免的限值,推荐了可优化监管和分级监管方法。NORM领域所面临包括持续提供适当的监管标准和应用方法、修复被NORM残留物污染的场所以及NORM残留物的长期安全等方面的挑战。

ICRP第4委员会NORM工作组(TG76)主席Lecomte介绍了与NORM的最新工作进展、ICRP的辐射防护原则与框架;针对工作人员、公众、环境的防护方法与策略以及应急和现存照射下如何应用辐射防护个人剂量限值最优化。巴西核能委员会辐射防护与核安全分会主席介绍了NORM工业活动的监管要求,明确了辐射防护正当性、最优化以及剂量限值的主要原则,对国际上不同监管

导则、标准进行了比较分析。

来自WHO、UNSCEAR、美国EPA以及澳大利亚食品安全管理局等组织和机构代表分别对NORM工业活动、UNSCEAR在天然照射领域的取得成就及NORM与公众健康等进行了介绍。各国专家对技术增强的天然放射性物质(TENORM)的最新进展、监管导则对NORM管理的影响、最新基本安全标准分级在NORM监管中面临的挑战以及NORM监管原则、相应剂量限值及推荐管理的方法等进行了介绍。

IAEA辐射安全与监测部门负责人在大会总结发言中提议:要继续开展有关NORM的辐射防护工作,NORM残留物整治无法在短短几年内彻底解决,需要各国特别是发展中国家的支持和合作;关注燃煤电站和NORM运输、提高NORM工作人员辐射防护知识和意识、增加利益相关者的参与和介入,强化豁免水平等,并展望了下一届NORM国际研讨会的主要议题和关注焦点。

本次会议针对NORM行业面临的挑战提出了一些解决方案,讨论了NORM领域的辐射防护控制,探讨了工业应用和废物处置实践研究的案例,有利于了解世界NORM领域的最新研究成果和进展,评价国际或国家标准的实际影响,为我国NORM领域的核安全监管和审评提供了清晰的技术参考。(王博 刘福东 报道)

◀ 上接第2版

界典型值的3倍,另外肉类、蔬菜和鱼类中²²⁶Ra、²¹⁰Pb和²¹⁰Po均高于典型值,特别是鱼类中²¹⁰Pb(均值为3,520mBq/kg)和²¹⁰Po(均值为4,920mBq/kg)的含量明显高于世界典型值(²¹⁰Pb为200mBq/kg和²¹⁰Po为2,000mBq/kg)。

3、我国水体中天然放射性核素浓度

我国各类水体中天然放射性核素的浓度见表2。可见,我国不同水体中天然放射性核素Th的浓度较低,均值低于1μg/L。U相比Th的浓度要高,特别是咸水湖中U的浓度达到22.4μg/L。²²⁶Ra温泉中的浓度最高,均值为204mBq/L,是冷泉和井水19倍和35倍。不同水体中⁴⁰K含量差异很大,海水比淡水的浓度相对要高,温泉比冷泉水的浓度要高,浅井比深井浓度要高。从1995~2009年,对我国29个省(市、自治区)的自来水、井水和泉水水样放射性核素活度浓度的监测结果。监测结果表明,饮用水中放射性核素U、Th、²²⁶Ra、⁴⁰K活度浓度与参考值相比,均处于正常范围内。

4、国外食品和水中的放射性核素的水平

表3收集了美欧等国食品中天然放射性核素的含量。可见,同一种类食品中天然放射性核素的含量存在着较大差异,如意大利奶制品中²²⁶Ra含量为3~19mBq/kg,而在德国则为2~130mBq/kg。此外,同一种核素在不同种类的食品中其含量的差异较大,如海产品中²¹⁰Po的含量明显高于其他种类的食品。

UNSCEAR 2000报告中阐述了植物中天然放射性核素U是从土壤中U到植物中根或其他部位转移的结果,相比水中天然U的含量,蔬菜中U的含量相对较高。在谷类和蔬菜叶中²³⁸U的活度浓度分别为1~400mBq/kg和6~2,200mBq/kg,而²³⁵U的活度浓度却比²³⁸U低20倍;在牛奶和肉类中²³⁸U的活度浓度分别为0.1~17mBq/kg和1~20mBq/kg,²³⁵U的活度浓度又比²³⁸U高20倍。

IAEA安全标准系列GSG-2给出了核或放射事故发生后评价食品、奶和饮用水放射性活度的操作干预水平OIL6(包括357种放射性核素),其中天然放射性核素²²⁴Ra、²²⁶Ra、²²⁸Ra、²³²Th、²³⁸U、²¹⁰Po和²¹⁰Pb的OIL6值分别为2,000Bq/kg、20Bq/kg、3Bq/kg、4Bq/kg、100Bq/kg、5Bq/kg和2Bq/kg。我国GB 14882-1994《食品中放射性物质限制浓度标准》中也规定了各类食品中天然放射性核素的浓度限值及各类人员相应的年摄入量限值,具体数值见表1。

早年我国科研人员曾对福建省食品中的²¹⁰Pb进行过相关调查,调查发现菠菜、芥菜、竹笋、香菇(干)、虾、茶叶和烟草中的²¹⁰Pb含量较高,均高于1Bq/kg,尤以烟草中的含量为最,达133Bq/kg。Avadhani等学者调查了印度西南海岸食品中的²¹⁰Pb含量,发现鱼虾样品中²¹⁰Pb含量要明显高于蔬菜,而蔬菜中叶菜的²¹⁰Pb含量高于非叶菜。有学者研究了葡萄牙大西洋沿岸蚌中的²¹⁰Pb,发现蚌中²¹⁰Pb平均含量为45±19Bq/kg。挪威学者调查了浆果和蘑菇中的²¹⁰Pb含量,发现浆果和蘑菇中的²¹⁰Pb含量均不足5Bq/kg,但蘑菇中的²¹⁰Po含量较高。海产品对海水中的放射性核素具有很强的富集能力,有研究显示海洋生物从海水中累积的放射性物质浓度高于海水数倍。

◀ 上接第3版

浓度、地下深度、通风状况等因素影响,因此地下建筑和地下工程中的辐射水平各不相同。我国部分地区地下建筑物的年均氡浓度资料见表1。

为了能够更直观的了解地下建筑物的氡浓度,表2给出了部分城市地下建筑与地面建筑的氡浓度比值。

由表2可知,我国地下建筑物氡浓度普遍高于地面室内的氡浓度,在有统计资料的各省市中地下建筑物氡浓度比地面室内的氡浓度最高可达13.4倍。

在岩溶比较发育的地方,容易形成造型奇特的溶洞,在人们的开发下,成了著名的地质景观和风景名胜。但是,许多溶洞所处的地质环境比较特殊,很容易富集氡及其子体,尤其当溶洞周围岩石或土壤中铀、钍等放射性元素含量高、洞内通风不畅的时候,氡及其子体的浓度会更高。有的甚至超过放射性矿区坑道作业面上最大容许浓度,这在一定的程度上危害了旅游从业人员的身体健康。

旅游溶洞环境空气中的氡及其子体主要来源于溶洞岩石和洞内沉积物中的铀和钍、溶洞中的断层和裂隙、溶洞中流出的地下水等。表3给出了我国部分旅游溶洞的氡水平。

从表3可以看出国内多个省份旅游溶洞环境空气中氡浓度平均值为74~1,983Bq·m⁻³,有些省份的均值已超过工作场所中氡持续照射情况下采取补救行动水平的浓度1,000Bq·m⁻³;少数溶洞内最大值可达31,000Bq·m⁻³。

我国的旅游溶洞中普遍存在氡及其子体污染问题,须加强对旅游溶洞中氡及其子体污染状况的监测,以便采取合理的措施进行防治。为了使我国的旅游溶洞中氡得到控制,保护旅游工作人员和游客的身体健康,在开发旅游溶洞的时候,应避免岩石或土壤中镭含量高的溶洞,并加强通风,有条件的可采用局部净化技术等措施降低氡污染。

表2 不同环境氡浓度(Bq·m⁻³)及其比值

省市名	地面室内	地下工程	比值
广东	19	99.4	5.2
福建	51.8	318	6.1
浙江	17.2	145	8.4
上海	11.8	72.6	6.2
江西	20.7	107	5.2
贵州	26.3	231	8.8
内蒙古	31.5	340	10.8
北京	30.3	153	5.0
山东	18.7	250	13.4
河南	21.5	143	6.7
湖北	22.5	142	6.3
湖南	42.8	401	9.4
平均			7.6

表3 全国部分地区旅游溶洞中的氡及其子体浓度

地点	氡浓度(Bq·m ⁻³)		氡子体浓度(×10 ⁻⁷ J·m ⁻³)	
	平均值	范围	平均值	范围
江西	1,020	172~2,213	25.4	9.6~33.1
辽宁	782	81~31,000	76.4	12.6~140
湖南	74	360~1,530	20.1	8.2~44.1
河北	1,983	1,070~29,800	-	-
贵州	807	112~5,076	6.6	0.2~16.1
浙江	882	88~1,310	26.4	2.6~40.6