

中国环境天然辐射外照射水平调查及居民受照剂量的评价

执笔 王其亮 何苗挺

指导 史元明教授*

(全国环境电离辐射水平调查课题组)

引 言

天然环境电离辐射不仅累及到全世界的居民,而且是世界居民集体剂量的最大贡献者(占全部环境电离辐射的百分之八十以上)。因此,评价人类受到天然辐射源照射的辐射剂量具有特别重要的意义。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)自五十年代末期起,到现在已有六份报告书对天然辐射源的照射作了评述。其中的“水平”部分汇集了世界上有关国家的天然辐射水平和居民剂量评价的主要资料。由于测量次数的不断增加,因此,剂量评价尤其是对外照射的剂量评价也愈益精确。UNSCEAR利用目前已掌握的资料,在1982年报告书中估计的世界平均室外 γ 辐射水平为 $5 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,室内为 $6 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。天然 γ 辐射对居民产生的年有效剂量当量为 $350 \mu\text{Sv}$,宇宙射线为 $300 \mu\text{Sv}$,其中电离成分为 $280 \mu\text{Sv}$ (1)。

根据(81)国科发五字066号文件和(81)卫工字2号文件的精神,为了实现《全国放射医学和放射防护学规划座谈会》纪要提出的要求,落实“1981~1990年全国放射医学与放射防护科学技术发展规划纲要”中的第七研究项目(环境放射水平和全民受照剂量的研究),卫生部委托工业卫生实验所牵头,组织全国各省、自治区和直辖市的卫生防疫站、工卫所、劳卫所、职防院(所)和医科院(所)等单位,共同完成“我国环境天然辐射及居民受照剂量的调查与评价”的任务。从1982年到1984年完成了我国29个省、区、市的现场调查工作(台湾省除外,南海诸岛及其他较小的岛屿也未测量)。本调查包括全国97%左右的人口,约90%的面积。《中华放射医学与防护杂志》1985年第5卷(增刊)发表了各省、区、市的调查结果以及有关的方法学问题。到1985年底完成了整个调查的资料总结工作。

通过这一调查研究,基本查清了我国天然环境外照射水平及其分布;估算了天然辐射外照射对居民产生的人均年有效剂量当量和集体年有效剂量当量;发现了部分本底较高与较低的地区。为我国核能开发、战备防原、保护人民健康、制订放射卫生防护标准等方面提供了有关环境外照射水平的基本国情资料,同时,也填补了国际资料中四分之一人口的环境外照射剂量数据。对研究低水平和小剂量率的辐射效应以及研究肿瘤病因学也有一定的意义。

本文一般只涉及天然 γ 辐射和宇宙射线电离成分,而不包括只产生小的外照射剂量的宇宙射线中子和天然 β 辐射。对核试验落下灰产生的 γ 辐射也不作专门的讨论。根据北京和西

安土壤样品 γ 能谱分析的结果,估计 ^{137}Cs 对离地面1米处 γ 辐射水平的贡献一般在 $0.1 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,约占我国室外 γ 辐射水平的百分之一。

本文中关于各省、区、市的数据,与有的省、区、市自己处理的结果有小的出入,这是由于个别计算步骤的差别等原因造成的。例如计算空气吸收剂量率人口加权平均值时,取权不同计算的结果就可能有一些出入,进而使居民年有效剂量当量产生小的差别(这里差别一般在 $\pm 2\%$ 以内)。这是需要说明的。

地 理 概 况^[2]

我国位于北半球,在亚洲的东部,太平洋的西岸,北纬 $4^{\circ} \sim 53^{\circ}$ (宇宙射线地磁纬度效应明显的区域),面积约为960万平方公里。人口103,188万(1982年普查数字),约占全世界人口总数的四分之一。

我国五种地形俱全,平原面积约占全国总面积的12%,高原约占26%,山地约占33%,丘陵约占10%,盆地约占19%。

我国地势西高东低,大致呈阶梯状分布。西南部号称“世界屋脊”的青藏高原,是我国地势最高的一级阶梯,平均海拔4,000米以上。从青藏高原往北跨过昆仑山和祁连山,往东跨过横断山到大兴安岭——太行山——巫山——雪峰山,属我国地势的第二阶梯,大部分为1,000~2,000米的高原和盆地。再往东属第三阶梯,主要是丘陵和平原交错的地区,海拔多在500米以下。

我国的江河众多,流域面积在1,000平方公里以上的就有1,500多条。长江和黄河是我国的第一和第二条大河,流域面积分别为180和75万平方公里。我国众多的淡水湖多集中在长江中、下游地区,主要有鄱阳湖、太湖、洪泽湖和洞庭湖。主要的咸水湖有青海湖和纳木错湖。我国大陆的东部和南部濒临渤海、黄海、东海和南海,总面积约为473万平方公里。

我国岩石种类繁多,地质构造复杂,各种地层相互交错。中酸性花岗岩类侵入岩在我国分布十分广泛,约占全国基岩面积的四分之一到三分之一,常组成一些山脉的主干,特别是福建、广东沿海和东北北部花岗岩类的分布更广^[3],东北地区的花岗岩,后期受到玄武岩浆侵入的影响。

仪 器 与 方 法

一、测量仪器

由于天然环境电离辐射的成分复杂,辐射水平低,影响现场测量的因素多,因此,准确地测量天然环境电离辐射水平是比较困难的。一个比较理想的环境辐射监测或调查仪器应当满足以下要求^[4],

1. 可以测量 $1 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的环境 γ 辐射;
2. 有适当长短的时间常数,适合进行大量的测量;
3. 对环境辐射有均匀的和接近各向同性的响应;
4. 对环境因素特别是温度变化反映不灵敏;
5. 体积小、重量轻、便于携带。

基于上述要求并结合当时的实际情况,本调查选取了美制RSS-111型高压电离室(HP IC)^[5]作为“次级标准”仪器。选取国产FD-71型闪烁辐射仪^[6~8]作为现场调查仪器(对

于水面、岩洞、地下设施等特殊环境点以及风景游览区等，一律用高压电离室的测量结果)。FD-71的探测下限约为 $0.5\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ ；单点测量的读数经过修正以后，一般可以和HPIC在10%以内相符合；多点测量的平均值与HPIC可在5%以内符合。FD-71辐射仪的主要性能及与其他仪器测量结果的比较见附一。HPIC用标准镭源阴影屏蔽法刻度(镭源的准确度为3%)，FD-71通常用HPIC在环境辐射场中进行现场刻度。HPIC的测量结果总误差通常不大于5%，FD-71通常不大于12%。同时用海拔计测量调查点的海拔高度，以确定该点的宇宙射线剂量率。

二、仪器读数的修正方法

由于FD-71的能量响应问题，其读数必须经过适当的修正。修正公式*为

$$\dot{X}=0.5\dot{X}_{\text{FD}}+0.925\dot{X}_{\text{c}}-0.2 \quad (1)$$

$$\dot{X}_{\gamma}=0.5\dot{X}_{\text{FD}}-0.075\dot{X}_{\text{c}}-0.2 \quad (2)$$

式中 $\dot{X}$ ——FD-71的读数修正值($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)；

$\dot{X}_{\text{FD}}$ ——FD-71的读数($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)；

$\dot{X}_{\text{c}}$ ——宇宙射线电离成分的等效照射量率($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)；

$\dot{X}_{\gamma}$ ——FD-71测量的天然 γ 辐射修正值($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)；

0.5、0.925、0.075和0.2分别是与FD-71对天然 γ 辐射、宇宙射线响应系数及其自身本底有关的常数。

式(1)和式(2)可直接表示为空气吸收剂量率的形式：

$$\dot{D}=0.436\dot{X}_{\text{FD}}+0.808\dot{X}_{\text{c}}-0.17 \quad (3)$$

$$\dot{D}_{\gamma}=0.436\dot{X}_{\text{FD}}-0.065\dot{X}_{\text{c}}-0.17 \quad (4)$$

式中 $\dot{D}$ ——所测量的天然环境外照射剂量率($10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)；

$\dot{D}_{\gamma}$ ——所测量的 γ 辐射剂量率($10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)；

其它符号同上。 $\dot{X}_{\text{c}}$ 的取值⁽⁹⁾见表1和表2。

表1 不同地理纬度宇宙射线电离成分随高度的变化($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)

纬度间隔 (°N)	海 拔 高 度 (米)							
	0	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
<28	3.3	3.6	4.1	6.3	9.4	14.4	23.1	35.2
28~	3.4	3.6	4.2	6.5	9.6	14.7	23.6	35.9
33~	3.4	3.7	4.3	6.6	9.9	15.1	24.1	36.7
38~	3.5	3.8	4.4	6.7	10.1	15.4	24.6	37.5
43~	3.6	3.9	4.5	6.9	10.3	15.7	25.1	38.3
48~53	3.7	4.0	4.6	7.0	10.5	16.0	25.6	39.1

注：宇宙射线强度随地磁纬度变化，在我国范围内，同一地点的地磁纬度数值比地理纬度数值约低10~12度。

*因为仪器直接测照射量率($\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$)，所以这里仍用 $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 表示， $1\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}=0.873\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

表2 对房屋建议的宇宙射线屏蔽系数(S)

平 房	S	楼 房*	S
木 房	1.00	平 台	1.00
草 顶 房	1.00	1 层	0.90
瓦 房	0.95	2 层	0.80
砖(上、下)房	0.90	3—8层	0.70
(房顶为土层或水泥板)		9—20层	0.60
窑 洞	0.50	21—35层	0.50

*由顶层向下数,即把习惯说法倒过来

三、选点与测量

本次调查规定以县或相当于县的行政区域为一个调查区;大、中城市以区、县为一个调查区;小城市以整个城市为一个调查区。每个调查区内包括若干个调查点,每个调查点分别测量室内、室外和道路。另外,对一些特殊环境点(如大水面、岩洞、风景游览区等)也进行了测量。

天然环境辐射调查的质量,在某种意义上取决于调查点数的多少,调查点太少会失去环境调查的意义。本调查确定调查点数的一般原则是:首先根据已有的资料,估计各调查区天然辐射场的可能变化范围,规定对抽样误差的限制,然后根据统计学中样本容量的计算公式⁽¹⁰⁾,估算出每个调查区大约应选的调查点数。这里假定各调查区辐射场的变异系数在20%~30%的范围内变化,规定抽样误差约为10%,取95%的置信限,则计算的样本容量约为15~30,即每个调查区大约选择15~30个调查点就可满足统计学要求。

调查点的分配原则是:调查点分布应尽量均匀,对少数交通不便的调查区可适当减少调查点数,对交通十分困难的边远地区,还可进一步减少调查点数;天然环境辐射调查的目的之一是估算居民的受照剂量,因此,对人口较多的调查区或人口较密的地区,可适当增加调查点数,反之,可适当减少调查点数;对地质结构或建筑情况复杂的调查区,可适当增加调查点数,否则,可适当减少调查点数;室内选点要注意不同的建筑材料和不同的建筑类型;室外选点要照顾每种主要的地质区域;道路选点要考虑不同的筑路材料。

由于天然辐射水平随时间变化,所以测量时间应尽量选择能代表全年平均辐射水平的季节,并应避开雨、雪和大气层核试验对辐射场的影响。测量高度为 1 ± 0.3 米。室外测量点离开建筑物50米以上,离开公路20米以上,在约100平方米的范围巡测5点。室内测房间的中央和四角,测点离开墙壁30厘米以上。道路测量中央,在约10米的范围巡测5点。

四、居民剂量估算方法

居民所受天然环境辐射外照射剂量由两部分组成,即天然 γ 辐射和宇宙射线。居民剂量的估算采用UNSCEAR1982年报告书介绍的模式⁽¹⁾。天然 γ 辐射产生的有效剂量当量率与空气吸收剂量率的比值为 0.7SvGy^{-1} ,此值适用于男性和女性,适用于室内环境和室外环境。室内、外居留因子分别取0.8和0.2。那么天然 γ 辐射对居民产生的人均年有效剂量当量计算公式为:

$$H_{\text{eff}}(\gamma) = 1226 \dot{D}_{\gamma\text{外}} + 4906 \dot{D}_{\gamma\text{内}} \quad (5)$$

式中 $H_{\text{eff}}(\gamma)$ ——天然 γ 辐射产生的人均年有效剂量当量(Sv);

$\dot{D}_{\gamma\text{内}}$ 、 $\dot{D}_{\gamma\text{外}}$ ——室内和室外天然 γ 辐射致空气吸收剂量率人口加权平均值 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)。

假定宇宙射线电离成分致空气吸收剂量率能足够好的代表人体的所有器官和组织中的吸收剂量率,其品质因子取作1,那么,宇宙射线电离成分产生的人均年有效剂量当量的计算方法为:

$$H_{\text{eff(c)}} = 1752 \dot{D}_{\text{c外}} + 7008 \dot{D}_{\text{c内}} \quad (6)$$

式中 $H_{\text{eff(c)}}$ ——宇宙射线电离成分产生的人均年有效剂量当量 (Sv);

$\dot{D}_{\text{c内}}$ 、 $\dot{D}_{\text{c外}}$ ——分别表示宇宙射线电离成分致室内和室外空气吸收剂量率人口加权平均值 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)。

天然外照射产生的总人均年有效剂量当量为:

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{eff}(\gamma)} + H_{\text{eff(c)}} \quad (7)$$

集体年有效剂量当量的计算公式为:

$$S_{\text{eff}} = \sum_i H_{\text{eff}i} N_i \quad (8)$$

式中 S_{eff} ——天然外照射产生的集体年有效剂量当量 ($\text{man} \cdot \text{Sv}$);

$H_{\text{eff}i}$ ——群体中第*i*组内的 N_i 名居民所受天然环境辐射外照射人均年有效剂量当量 (Sv)。

质 量 保 证

我国天然环境辐射外照射剂量率调查的质量保证措施主要包括以下几方面:

1. 统一调查方案 各参加单位根据总体方案提出的要求和本地区的实际情况,制订本地区的具体实施方案。

2. 统一调查仪器 根据当时的实际情况,统一采用国产FD-71型闪烁辐射仪为现场调查仪器,两台美制RSS-111型HPIC为质量保证仪器。

3. 统一仪器刻度 在剂量率调查期间,每年统一刻度一次仪器⁽⁷⁾ (共统一刻度过三次)。对个别单位需要刻度的仪器,随时进行不定期刻度。

4. 定期现场比对 在全国剂量率调查期间,统一组织过三次仪器的现场比对⁽⁷⁾。结果表明,测量一般水平的环境辐射场时,FD-71之间的分散性在5%以内,FD-71均值与HPIC一般在4%以内符合。FD-71闪烁辐射仪的三次刻度和比对详见附二。

5. 定时检验仪器 对参加调查的仪器统一配备 ^{137}Cs 检验源,定时检验仪器的工作情况,规定每天工作开始和结束都要检验仪器的工作状态,以保证数据的可靠性。

6. 建立环境辐射参考点 为了保证仪器正常工作,使前后测量数据之间具有可比性,规定建立室内、室外和大水面的典型环境参考点。要求参考点上的环境辐射水平随时间变化不大。在1982~1984年,RSS-111型HPIC在不同的环境参考点上,测量值的变异系数在1.9%~2.6%之间。

7. 对照测量 在调查中,除了用FD-71仪器之外,有的同时还用环境热释光剂量计(TLD)、 γ 能谱仪(分析土壤样品),与FD-71的结果相对照。有的专门配备高压电离室进一步核对FD-71的调查结果。

8. 复核调查结果 根据总体方案的规定,统一用RSS-111型HPIC复核各省、区、市

的调查结果。

9. 研究天然 γ 辐射水平随时间的变化,为分析调查结果的可靠性提供依据。

10. 比较调查结果 为了进一步说明调查结果的可靠程度,把用FD-71在北京等五个地区的调查结果与用HPIC在相应地区的调查结果进行了比较,除了在武汉地区两种仪器的结果差别接近10%以外(其中包括 γ 辐射场随时间的变化引起的误差和抽样误差在内),其余四个地区的结果二者均在4%以内符合。

结 果 与 讨 论

一、天然辐射外照射水平

1. 宇宙射线

宇宙射线电离强度主要受海拔高度的影响,其次是地磁纬度的影响^[4,11]。我国幅员辽阔,地势多样,在有人居住的地区,海拔高度变化范围约从海平面到4,000米。地磁纬度的变化范围约为 $10^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 。在我国宇宙射线强度随海拔高度和地磁纬度广泛变化。

我国室外宇宙射线空气吸收剂量率范围为 $(2.88\sim 26.70)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (实际调查过的地区),按点求算术均值为 $3.74\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按县求算术均值为 $3.79\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按省求算术均值为 $3.96\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;面积加权均值为 $5.22\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;人口加权均值为 $3.30\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (此值与UNSCEAR1982年报告书估算世界居民平均接受的宇宙射线年有效剂量当量时采用的 $3.2\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 很接近)。以上五种均值的总平均值为 $4.00\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

考虑到建筑物对宇宙射线的屏蔽减弱作用,得到我国室内宇宙射线空气吸收剂量率范围为 $(1.40\sim 18.09)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (实际调查过的建筑物),按点求算术均值为 $3.28\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按县求算术均值为 $3.43\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按省求算术均值为 $3.57\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;面积加权均值为 $4.66\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;人口加权均值为 $3.00\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。五种均值的总平均值为 $3.59\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

表3列出了全国各省、区、市室内、外宇宙射线剂量率的范围、均值以及室内与室外的比值。各省均值以广东最低,其人口加权均值室外为 $2.91\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,室内为 $2.47\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;以西藏最高,其室外人口加权均值为 $11.90\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,室内为 $10.61\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。全国室内宇宙射线与室外的比值平均为0.9,与文献^[12]采用的数值一致。

2. 天然 γ 辐射

(1) 室外 γ 辐射水平

全国室外调查点数共38,611个。 γ 辐射水平范围为 $(1.16\sim 52.29)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,按点求算术均值为 $8.15\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为30%;几何均值为 $8.20\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为30%;按县求算术均值为 $8.27\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为24%,县均值变化范围为 $(2.62\sim 18.80)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按省求算术均值为 $8.05\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为17%,各省的均值范围为 $(6.03\sim 11.99)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;面积加权均值为 $8.23\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;人口加权均值为 $8.03\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。六种均值相当接近,最大和最小仅相差3%。六种均值的总平均值为 $8.16\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

表3 全国各省、区、市宇宙射线空气吸收剂量率 ($\times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

省、区、市 名称	室 内				室 外				室内 — 室外
	调查 点数	范 围	算 术 均 值	人口加 权均值	调查 点数	范 围	算 术 均 值	人口加 权均值	
北 京	623	2.78—3.01	2.83	2.81	576	3.09—3.34	3.15	3.12	0.90
上 海	442	1.78—2.67	2.51	2.52	227	...	2.97	2.07	0.85
天 津	308	...	2.70	2.70	236	...	3.00	3.00	0.90
河 北	292	2.88—6.70	3.18	3.06	316	3.20—7.40	3.53	3.40	0.90
山 西	3,454	1.42—6.01	3.11	3.08	1,842	3.14—6.68	3.84	3.73	0.81
内 蒙	1,620	2.75—5.27	3.63	3.49	1,620	3.06—5.85	4.01	3.85	0.91
黑 龙 江	2,093	2.79—4.41	2.97	2.96	2,650	3.10—4.90	3.30	3.29	0.90
吉 林	1,273	2.20—5.40	2.95	2.90	1,107	3.20—6.30	3.32	3.27	0.89
辽 宁	472	2.48—3.23	2.91	2.91	481	3.07—3.39	3.15	3.13	0.92
山 东	2,149	2.15—3.82	2.92	2.93	2,149	3.02—4.02	3.08	3.08	0.95
江 苏	2,331	...	2.67	2.67	808	...	2.97	2.97	0.90
安 徽	1,549	2.08—4.12	2.80	2.80	1,549	2.97—5.15	3.00	3.00	0.93
浙 江	1,312	2.60—4.10	2.74	2.73	1,312	2.89—4.50	3.00	3.00	0.91
江 西	2,093	1.72—3.72	2.69	2.70	896	2.88—3.91	2.95	2.94	0.91
福 建	6,694	1.73—3.40	2.74	2.76	1,276	2.88—3.58	3.01	2.97	0.91
河 南	4,077	1.40—4.10	2.75	2.75	2,236	2.97—4.50	3.03	3.02	0.91
湖 北	1,462	1.67—5.22	2.77	2.76	1,439	2.97—5.80	3.11	3.04	0.89
湖 南	1,679	2.70—4.30	2.90	2.85	1,534	2.90—4.50	3.00	3.02	0.97
广 东	1,712	1.40—3.06	2.48	2.47	1,712	2.88—4.10	2.91	2.91	0.85
广 西	1,555	1.50—4.80	2.81	2.78	1,555	2.88—4.70	3.01	2.98	0.93
陕 西	894	2.77—5.37	3.23	3.14	901	3.08—6.27	3.56	3.47	0.91
宁 夏	992	2.63—6.68	3.76	3.92	230	3.67—7.42	4.36	4.56	0.86
甘 肃	850	2.12—12.30	5.26	5.10	853	3.65—17.00	5.80	5.59	0.91
青 海	231	4.65—13.46	7.69	6.77	267	5.17—13.94	8.63	7.69	0.88
新 疆	3,250	1.80—10.80	3.93	3.65	2,510	2.90—16.80	4.50	4.10	0.87
四 川	6,846	2.00—12.40	3.55	2.97	4,707	2.97—26.70	3.96	3.29	0.90
贵 州	698	2.40—6.10	3.55	3.67	682	2.97—6.81	3.82	3.95	0.93
云 南	2,198	2.74—13.43	4.49	4.45	2,126	2.88—14.10	4.72	4.68	0.95
西 藏	803	4.27—18.00	10.90	10.61	759	5.49—21.05	11.62	11.90	0.94
中 国	53,952	1.40—18.09	3.28	3.00	38,611	2.88—26.70	3.74	3.30	0.90± 0.03*

* 0.90为各省的均值, 人口加权均值为0.91, 各县均值为0.91, 各点均值为0.88

UNSCEAR1982年报告书公布的全世界室外 γ 辐射空气吸收剂量率人口加权平均值为 $5 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 显然我国的室外值比世界平均值高60%以上。而与法国($8.1 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)、罗马尼亚($8.1 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)相当, 比东德($9.4 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)、瑞士($8.7 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)稍低。属于正常天然本底范围^[1]。

表4列出了我国各省、区、市的室外 γ 辐射空气吸收剂量率的范围、均值和标准差。福建省最高,按点均值为 $11.20 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,按县均值为 $11.99 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,人口加权均值为 $11.92 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。北京市最低,按点均值为 $6.07 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,按县均值为 $6.03 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,人口加权均值为 $5.97 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。福建比北京约高1倍,这主要是由于侵入岩遍布福建全省,各类岩石都有出露,而且酸性和中酸性的黑云母花岗岩、花岗闪长岩最为发育⁽³⁾引起的。除了上海以外,长江以南的各省、区室外 γ 辐射水平都高

表4 全国各省、区、市室外 γ 辐射空气吸收剂量率 ($\times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

省、区、市 名称	调查点数	范 围	按点算 术均值	标准差	按县算 术均值	标准差	人口加 权均值	总均值
北 京	576	1.74—12.30	6.07	1.16	6.03	0.32	5.97	6.02
上 海	227	4.86—16.15	6.95	0.93	7.07	0.51	6.98	7.00
天 津	236	4.90—11.10	7.42	0.90	7.42	0.33	7.38	7.41
河 北	316	3.20—13.70	6.67	1.05	6.69	0.47	6.60	6.65
山 西	1,842	1.16—13.70	6.93	1.30	6.95	0.92	6.97	6.95
内 蒙	1,620	2.90—13.80	6.93	1.30	6.96	0.90	7.02	6.97
黑 龙 江	2,650	4.40—12.00	7.00	1.40	7.13	1.17	7.28	7.14
吉 林	1,107	3.10—15.90	7.69	1.60	7.63	0.74	7.73	7.68
辽 宁	481	2.40—12.70	6.85	1.20	6.72	1.05	6.70	6.76
山 东	2,149	1.70—22.60	7.70	1.58	7.68	0.92	7.61	7.66
江 苏	808	3.75—10.90	6.92	0.87	6.91	0.59	6.89	6.91
安 徽	1,549	...	7.00	1.00	7.08	0.97	6.96	7.01
浙 江	1,312	2.40—19.80	9.31	2.30	9.43	1.51	9.23	9.32
江 西	896	5.30—44.90	10.27	2.47	10.18	2.39	9.90	10.12
福 建	1,276	3.60—28.80	11.20	3.10	11.99	1.65	11.92	11.70
河 南	2,236	3.10—16.50	7.69	1.00	7.71	0.68	7.72	7.71
湖 北	1,439	2.31—22.60	7.50	1.64	7.45	1.06	7.30	7.42
湖 南	1,534	1.70—27.10	9.20	2.80	9.15	1.77	8.91	9.09
广 东	1,712	1.50—29.10	10.25	3.30	10.21	2.79	10.42	10.29
广 西	1,555	2.00—43.80	9.12	3.50	9.11	1.92	9.30	9.18
陕 西	901	1.72—14.50	6.84	0.61	6.61	0.85	6.70	6.73
宁 夏	280	5.37—10.95	7.42	0.95	7.51	0.72	7.63	7.52
甘 肃	853	3.60—12.70	8.02	1.14	7.99	0.72	8.11	8.04
青 海	257	2.65—11.79	7.76	0.89	7.72	0.90	7.82	7.77
新 疆	2,510	2.50—31.30	8.54	2.30	8.09	1.48	8.19	8.27
四 川	4,707	1.20—24.30	8.08	1.70	8.18	1.06	7.93	8.06
贵 州	682	2.18—33.50	9.43	2.88	9.43	1.72	9.19	9.35
云 南	2,191	1.40—29.50	8.71	...	8.95	2.46	8.73	8.80
西 藏	759	2.67—52.29	9.74	3.52	9.45	2.47	9.41	9.53
中 国	38,611	1.16—52.29	8.15	2.45	8.27	1.96	8.03	8.15

于全国平均值,而且变异系数大(平均变异系数为30%);长江以北各省、区、市(新疆除外)室外 γ 辐射水平都低于全国平均值,而且变异系数小(平均变异系数为17%)。全国室外 γ 辐射水平最高的县是江西省寻乌县,为 $18.80 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$;最低的县是云南省勐腊县,为 $2.62 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

全国室外 γ 辐射频率分布见图1~3。图1为我国室外 γ 辐射空气吸收剂量率的频率分布。图2是人口加权频率分布。我国约95%的居民生活在室外 γ 辐射水平为 $(5 \sim 12) \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间的地区。图3是我国室外 γ 辐射空气吸收剂量率的累积频率分布。由此可见,我国室外 γ 辐射空气吸收剂量率近似正态分布,因此求算术均值是合理的。

图4是根据全国2,090个室外 γ 辐射空气吸收剂量率的县均值(由于河北省调查点数少而为10个地区的均值)绘制的剂量率分布。

图5是按照具有显著性差异的剂量率分组绘制的室外 γ 辐射水平分区图。在室外 γ 辐射剂量率之间具有显著性差异的15个区域中,有10个高于全国平均值的辐射水平区 $[(8.9 \sim 12.9) \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}]$ 和5个低于全国平均值的辐射水平区 $[(4.7 \sim 7.5) \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}]$ 。由图可见,我国室外 γ 辐射水平南高北低,长江以南 γ 辐射水平较高。在全国10个较高的区域中除了1个在新疆境内以外,其余9个均处在长江以南。长江以南的其余部分和长江以北各省、区、市均为较低的 γ 辐射水平区域。全国15个辐射水平区域概况见附表1。

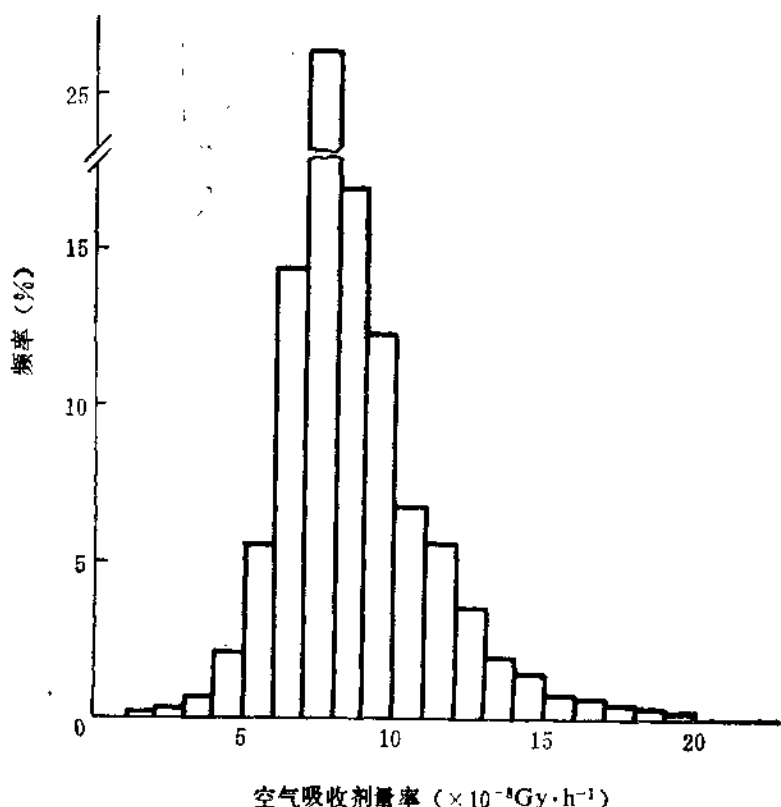


图1 全国室外 γ 辐射空气吸收剂量率频率分布

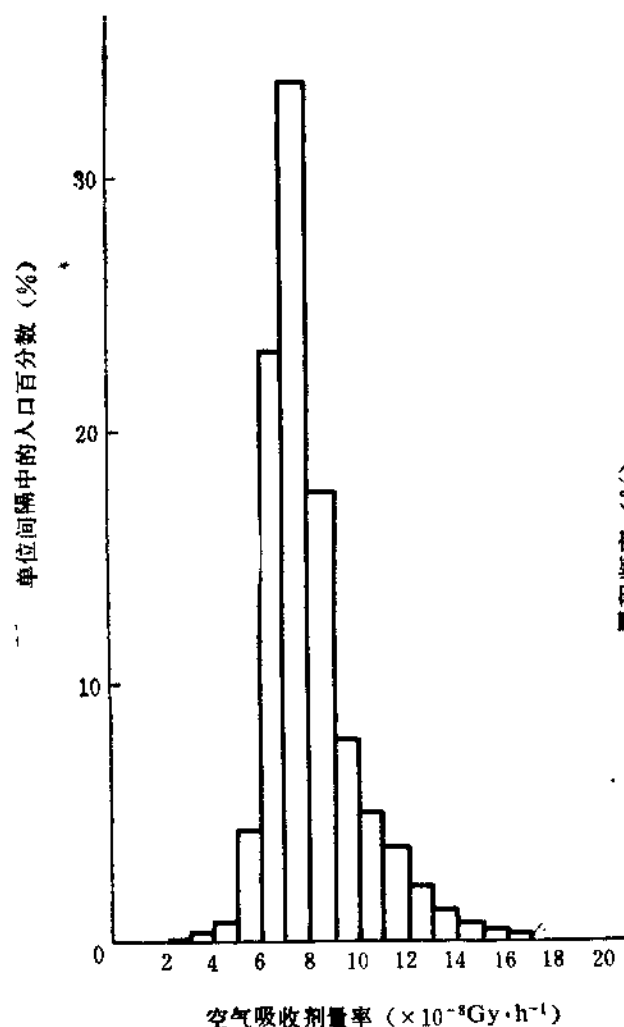


图2 全国室外 γ 辐射空气吸收剂量率
人口加权频率分布

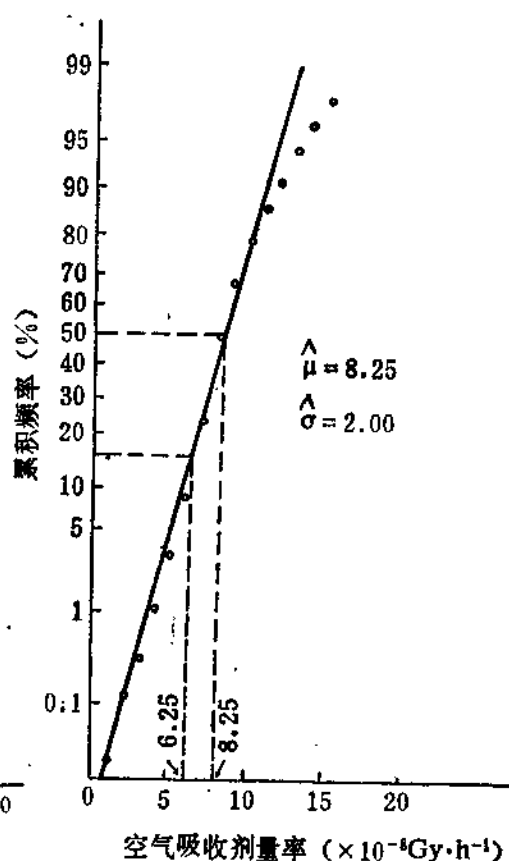


图3 全国室外 γ 辐射空气吸收
剂量率累积频率分布

10个较高区的人口数为23,848万,室外 γ 辐射空气吸收剂量率人口加权平均值为 $10.44 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$; 5个较低区的人口数为76,539万,室外 γ 辐射空气吸收剂量率人口加权平均值为 $7.33 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由15个水平区得到的全国室外 γ 辐射空气吸收剂量率人口加权平均值为 $8.07 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,与前述的 $8.03 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 非常接近。

室外 γ 辐射水平与地质结构存在着一定的关系。10个较高 γ 辐射水平区,一般以天然放射性核素含量较高的中酸性花岗岩分布为主, γ 辐射水平较低的5个区域,多以天然放射性核素含量较低的石灰岩和硷性岩类以及各类土壤分布为主。表5是在不同岩石表面(1米高)测量的 γ 辐射剂量率。

在一般情况下, ^{40}K 、 ^{238}U 和 ^{232}Th 对室外 γ 辐射空气吸收剂量率的相对贡献分别约为35%、25%和40%(3),但这个比例也随地区变化(表6)。北京地区 ^{238}U 系对 γ 辐射剂量率贡献很少(平均14%);福建省主要是 ^{232}Th 系的贡献(平均56%);贵阳地区主要是 ^{238}U 系的贡献(52%);广东高本底地区主要是 ^{232}Th 系的贡献(66%)。

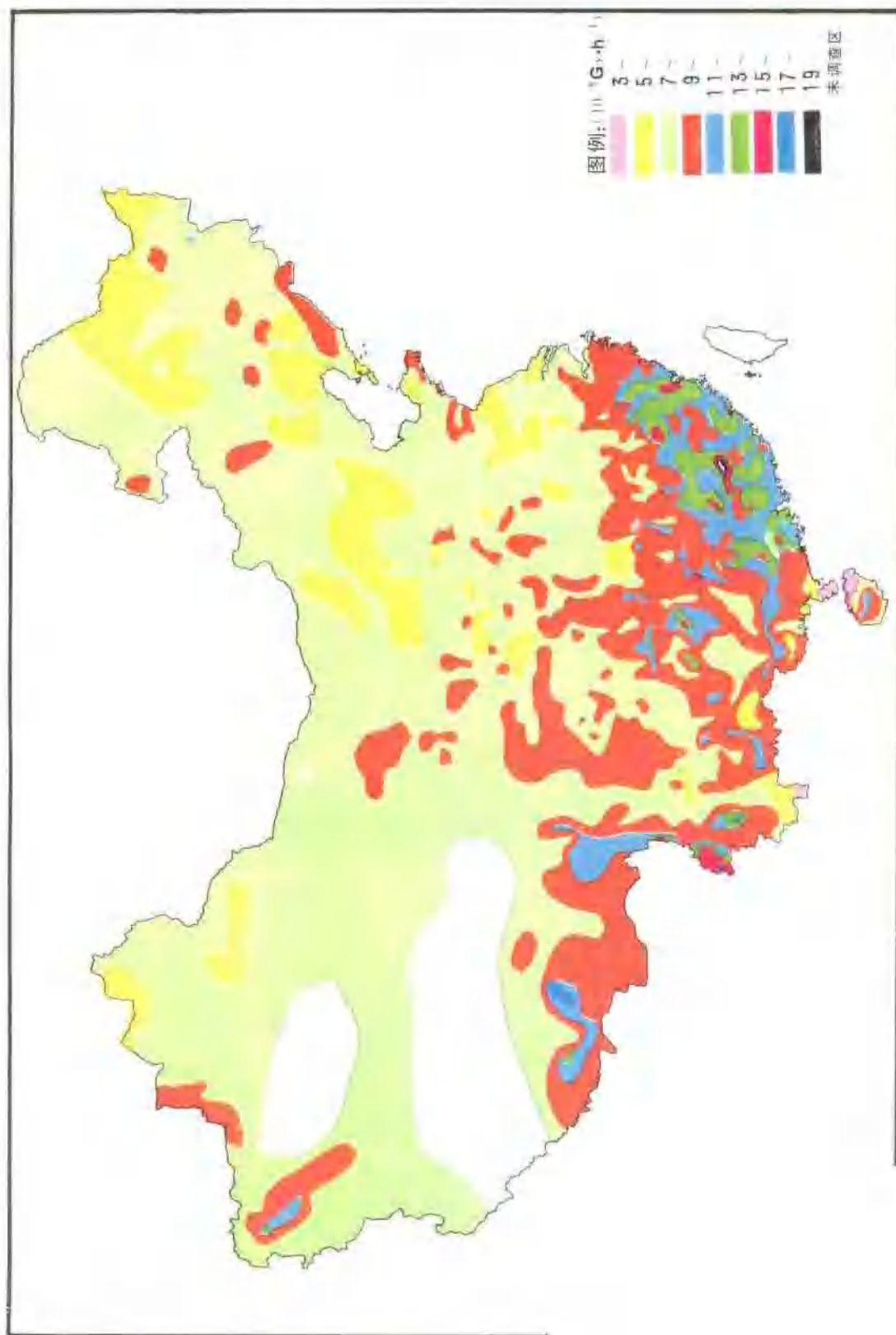


图 4 全国室外 γ 辐射空气吸收剂量率县平均分布

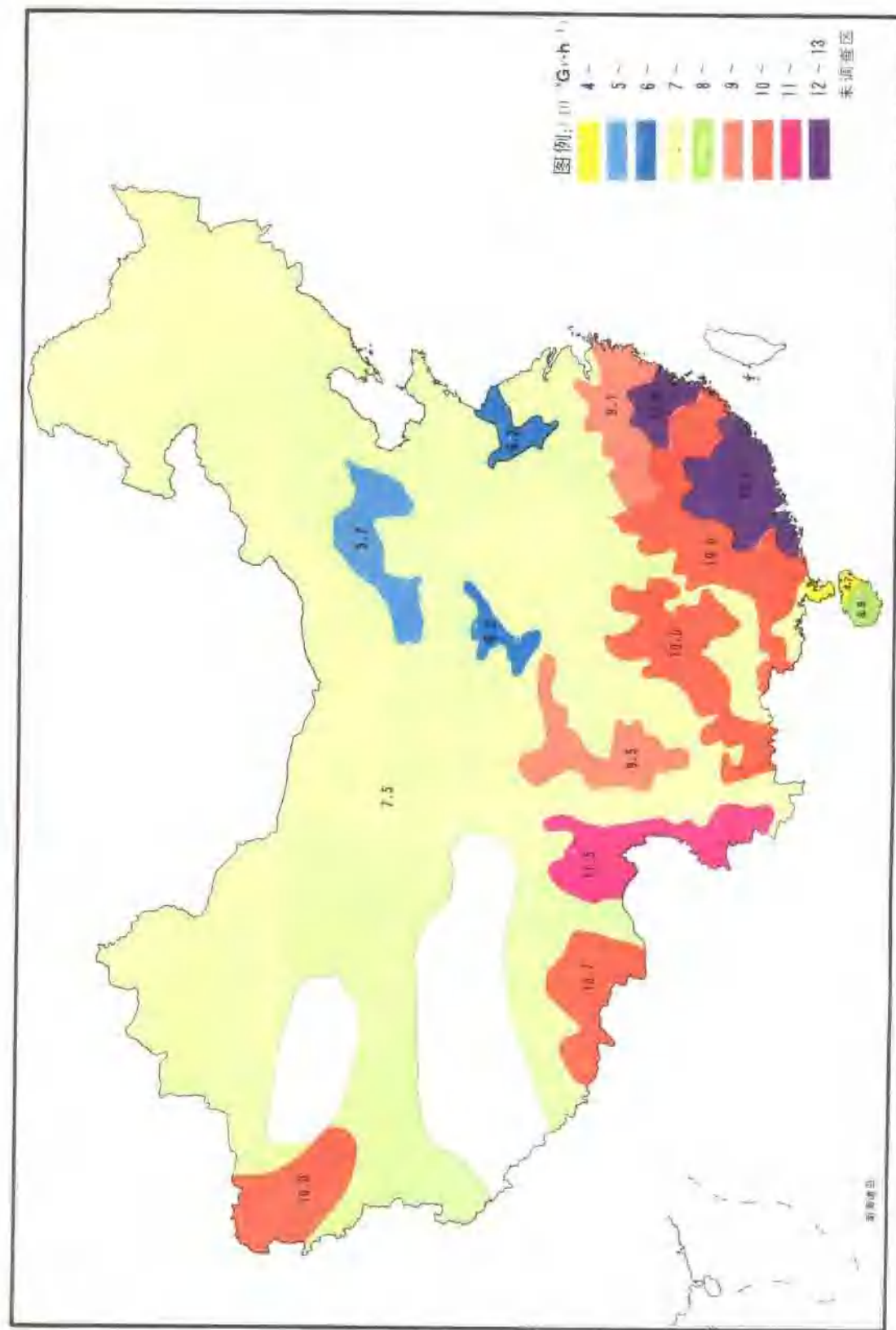


图 5 全国室外 γ 辐射水平区域分布

表5 在不同岩石表面1米高处测量的 γ 辐射剂量率($\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)

岩石类型	测点数	范围	均值	标准差
火 成 岩				
花 岗 岩(甘肃)	46	9.03—12.7	10.10	1.03
花 岗 岩(江西)	118	7.00—26.00	12.80	4.50
花 岗 岩(广西)	86	10.50—35.00	15.10	4.70
花 岗 岩(北京)	30	5.01—9.28	7.20	1.20
花 岗 岩(安徽黄山)	2	14.75—26.89	20.82	8.58
闪 长 岩(甘肃)	55	7.00—7.98	7.53	0.30
辉 长 岩(甘肃)	41	6.06—6.98	6.53	0.29
橄 榄 岩(甘肃)	18	5.15—5.94	5.60	0.22
正 长 岩(甘肃)	18	3.60—6.80	5.48	1.02
水 成 岩				
石 灰 岩(北京)	23	1.40—4.47	2.94	0.96
石 灰 岩(广西伊岭岩)	1	1.99—1.99	1.99	...
石 灰 岩(山东)	16	1.70—5.40	3.80	2.47
石灰岩(广东星湖天柱峰顶)	1	0.62—0.62	0.62	...
页 岩(北京)	31	4.36—13.04	7.91	2.23
沙 岩(山东)	6	5.80—9.30	7.60	1.35

表6 ^{40}K 、 ^{238}U 和 ^{232}Th 对室外 γ 辐射空气吸收剂量率的相对贡献(%)

地 区	样 品 数	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	剂 量 率 ($\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)
北 京	143	45	14	41	5.66
西 安	96	25	21	44	8.48
福 建	90	21	23	56	13.80
贵 阳	9	21	52	27	5.60
广东阳江*	16	9	25	66	17.12

*野外 γ 谱仪测量结果(2) 室内 γ 辐射水平

全国室内调查点共53,952个。 γ 辐射水平范围为 $(1.40\sim 174.1)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,按点求算术均值为 $12.41\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为26%;几何均值为 $12.10\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为27%;按县求算术均值为 $12.11\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为22%,全国各县的均值范围为 $(3.36\sim 33.10)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;按省求算术均值为 $11.88\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,变异系数为14%;省与省之间变化范围为 $(8.97\sim 16.00)\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;人口加权均值为 $11.95\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。五种均值相当接近,最大和最小约相差4%。以上五种均值的总平均值为 $12.09\times 10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。我国室内 γ 辐射空气吸收剂量率人口加权平均值约为世界均值的2倍^[1],并高于文献^[1]所列的所有国家。

表7列出了全国各省、区、市的室内 γ 辐射空气吸收剂量率的范围、均值和标准差。

室内 γ 辐射水平以福建省最高, 按点平均为 $15.70 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 按县平均为 $16.00 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 人口加权平均为 $16.16 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。北京市最低, 按点平均为 $8.90 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 按县平均为 $8.97 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 人口加权平均为 $8.90 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。福建约为北京的1.8倍, 与室外结果相似。全国室内 γ 辐射水平最高的县是江西省广丰县($33.10 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$), 最低的是云南省勐腊县($3.36 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$), 最高县为最低县的10倍。

表7 全国各省、区、市室内 γ 辐射空气吸收剂量率($\times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

省、市、区 名 称	调 查 点 数	范 围	按点算 术均值	标准差	按县算 术均值	标准差	人口加 权均值	总均值	室内 室外
北 京	623	1.12—17.47	8.90	1.75	8.97	0.82	8.90	8.92	1.48
上 海	442	8.26—16.16	11.86	0.47	11.92	0.47	11.87	11.88	1.70
天 津	308	6.60—15.30	12.31	1.10	11.86	0.98	11.71	11.96	1.61
河 北	292	5.80—12.60	9.70	...	9.70	1.43	9.70	9.70	1.46
山 西	3,454	4.05—24.63	10.92	2.10	10.55	1.37	10.59	10.69	1.54
内 蒙	1,620	4.50—20.20	10.53	1.90	10.56	1.24	10.65	10.58	1.52
黑龙江	2,093	7.60—14.30	11.00	1.70	10.76	1.24	10.91	10.89	1.53
吉 林	1,273	4.30—19.10	10.95	2.10	11.04	1.16	10.99	10.99	1.43
辽 宁	472	4.71—19.60	9.81	2.20	9.74	1.38	9.80	9.72	1.44
山 东	2,149	3.80—31.60	11.57	2.62	11.56	1.63	11.57	11.57	1.51
江 苏	2,331	3.90—16.70	11.26	1.00	10.83	1.20	10.70	10.93	1.58
安 徽	1,549	6.84—41.00	10.30	1.00	10.56	1.51	10.41	10.42	1.49
浙 江	1,312	6.40—50.70	15.18	3.20	15.33	1.95	15.14	15.22	1.63
江 西	2,093	5.10—174.1	14.75	4.01	14.71	4.01	14.43	14.63	1.45
福 建	6,694	4.40—37.60	15.70	3.80	16.00	2.14	16.16	15.95	1.36
河 南	4,077	4.50—20.20	11.76	1.00	11.79	1.05	11.81	11.79	1.53
湖 北	1,462	3.80—31.60	11.31	2.32	11.21	1.47	11.27	11.26	1.52
湖 南	1,679	3.40—42.50	13.10	3.70	12.98	2.41	13.04	13.04	1.43
广 东	1,712	2.30—46.60	15.51	4.90	15.41	3.91	15.82	15.58	1.51
广 西	1,555	2.30—54.20	12.87	5.20	12.75	3.10	13.36	12.99	1.42
陕 西	894	6.00—21.27	11.11	2.10	10.64	1.36	10.83	10.86	1.61
宁 夏	992	6.51—17.36	12.27	1.50	12.16	0.87	12.16	12.20	1.62
甘 肃	850	5.52—18.80	11.72	1.46	11.68	1.10	11.86	11.75	1.46
青 海	231	6.55—17.65	11.71	0.94	11.67	0.95	11.39	11.59	1.49
新 疆	3,250	4.90—45.60	12.37	2.80	12.39	2.10	12.41	12.39	1.50
四 川	6,846	2.70—33.90	11.71	2.00	11.78	1.39	11.65	11.71	1.45
贵 州	698	2.36—42.80	11.08	3.50	11.09	2.01	11.25	11.14	1.19
云 南	2,198	1.40—33.80	12.01	3.92	12.29	3.07	12.00	12.10	1.38
西 藏	803	4.99—33.06	12.89	4.27	12.61	3.31	12.64	12.71	1.33
中 国	53,952	1.40—174.1	12.41	3.36	12.11	2.66	11.95	12.16	1.49

各省、区、市室内 γ 辐射空气吸收剂量率与室外比值的变化范围为1.19~1.70, 全国平均为1.49。根据北京市土壤样品分析结果, 利用文献〔1、13〕的方法, 计算得到的北京室内与室外比值为1.45, 此值与实测的1.48相当接近。福建省的计算值为1.46, 实测值为1.36, 二者在10%以内一致。

图6是室内 γ 辐射空气吸收剂量率的频率分布, 图7是人口加权频率分布。全国大约95%的居民生活在室内 γ 辐射水平为 $(7\sim17)\times10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间的地区。图8是室内 γ 辐射空气吸收剂量率的累积频率分布。室内 γ 辐射空气吸收剂量率近似正态分布, 因此, 用算术均值表示全国室内 γ 辐射的平均水平是合理的。

表8是我国7种主要建筑材料的室内 γ 辐射空气吸收剂量率的比较。土木结构的房屋室内 γ 辐射水平最高, 木(草、竹、毡)结构的最低, 7种建材的室内 γ 辐射水平的顺序是土木>砖木>砖石土木>砖混凝土>石木>钢筋水泥>木(草、竹、毡)。各类建材的室内 γ 辐射空气吸收剂量率的变化范围都是较大的, 砖混凝土结构的室内之间 γ 辐射水平相差最小, 但最高值仍是最低值的9倍; 石木结构的室内 γ 辐射水平相差最大, 最高值是最低值的34倍, 这是因为有的石木结构的房屋是以放射性核素含量很高的花岗岩为材料, 有的是以放射性核素含量很低的石灰岩为材料。由于木(草、竹、毡)材料本身放射性核素的含量很低, 它对室外 γ 辐射的屏蔽减弱也较小, 所以, 木(草、竹、毡)材料的房屋室内 γ 辐射水平取决于室内外地面的辐射水平, 一般比室外低或与其相近。表中数据 $1.40\times10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 是在云南省西双版纳州的一座竹楼内得到的, 此值接近当地的室外 γ 辐射水平。砖木和土木结构的室内 γ 辐射水平主要取决于砖和土中天然放射性核素的含量, 而砖一般是以土为原料的, 从建材考虑, 这两种建材室内 γ 辐射水平之间不应该存在非常显著的差别, 但事实相反, 二者之间却存在

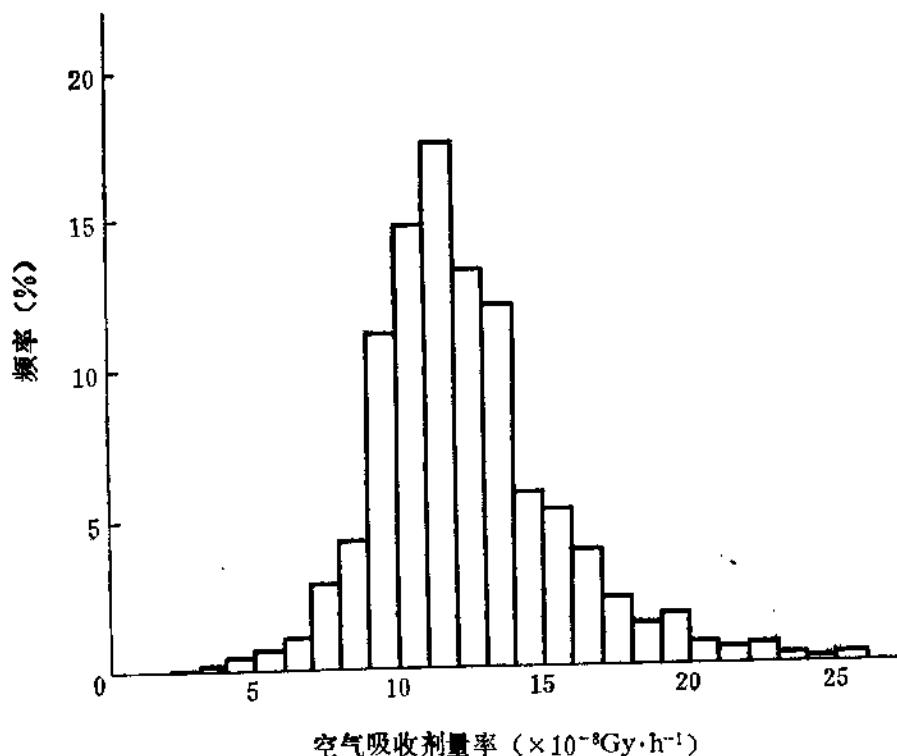


图6 全国室内 γ 辐射空气吸收剂量率频率分布

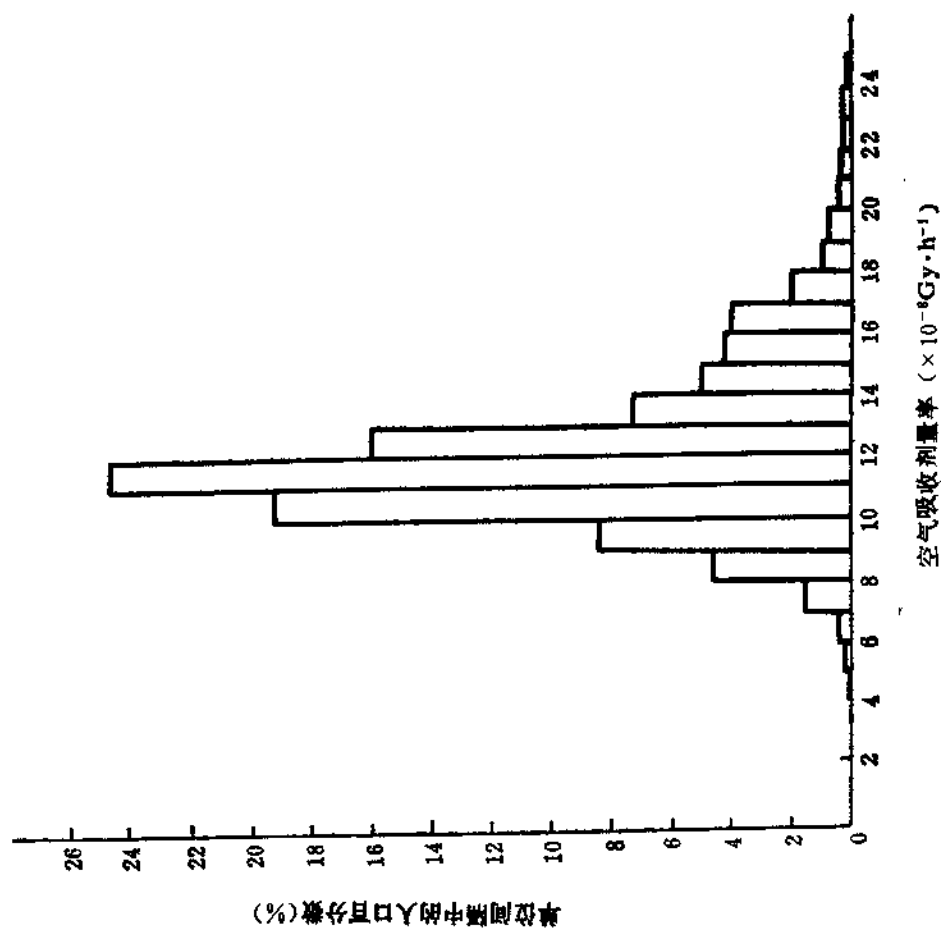


图 7 全国室内 γ 辐射空气吸收剂量率的人口加权频率分布

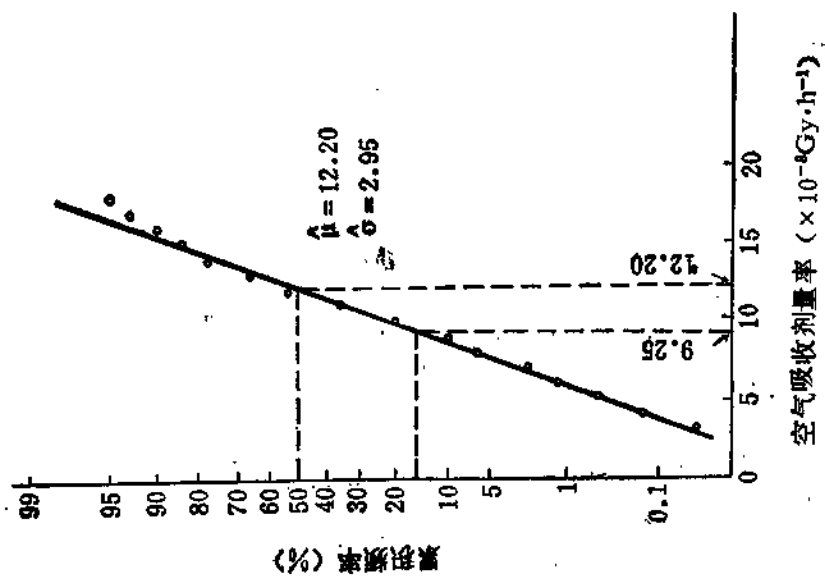


图 8 全国室内 γ 辐射空气吸收剂量率累积频率分布

非常显著的差别(从对居民剂量贡献考虑,也许这种差别并没有实际意义),土房室内 γ 辐射水平高于砖房的原因,估计是土房墙体一般比砖房的厚,门窗面积比砖房小引起的。7种建材室内均值的范围为 $(9.90 \sim 12.86) \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,最高值仅为最低值的1.3倍。可见,以上7类主要建材的室内 γ 辐射空气吸收剂量率之间的差别并不很大,而在同类建材内部,室内 γ 辐射水平的差别却达9倍至34倍(而木、草、竹、毡建材室内 γ 辐射水平的差别主要反映不同地区地面 γ 辐射水平之间的差别)。因此,就全国而言,不同种类的建材之间,室内 γ 辐射水平的差别不是主要的,而同类建材内部的室内 γ 辐射水平的差别却是很大的。

表8 不同建筑材料的室内 γ 辐射空气吸收剂量率 ($\times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

建材名称	调查点数	范围	均值
砖 木	18,252	3.10—56.90	12.39
土 木	12,702	2.70—56.60	12.86
石 木	5,103	2.30—78.40	11.20
木(草、竹、毡)	2,650	1.40—27.70	9.90
砖(石、土)木	3,807	3.30—33.80	12.10
钢筋混凝土	1,868	3.00—46.50	10.80
砖混凝土	3,586	4.00—35.80	11.46

的均值为 $77.10 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,也为当地平均室内 γ 辐射水平的5倍。湖南、湖北和四川等省也有这类石煤渣房。由于以上两种建材的样本数量少,所以,未统计在表8内。

山东省和湖北省^[14]注意到了一些建材的室内 γ 辐射水平随建造年代变化的问题。山东省的结果表明,土房内的 γ 辐射水平与房屋的建造年代无关,而砖房则随建造年限的缩短而室内 γ 辐射水平明显的增高,最近几年建造的砖房比三十年前建造的砖房室内 γ 辐射水平约高25%。湖北省通过建材样品分析发现近代红砖中 ^{226}Ra 的含量比古代青砖高30%,而 ^{232}Th 和 ^{40}K 的含量二者没有明显的差别。可能的原因是近代砖已有一部分不完全是用土作原料,而掺杂了煤渣或其它工业废渣,它们的放射性水平比土壤高。另外,现代多用煤烧砖,而古代是烧木头等,这样,在现代砖的烧制过程中也可能增加放射性核素的含量。而古代青砖和土壤基本不受这些因素的影响。

影响室内 γ 辐射水平的主要因素是建筑材料中天然放射性核素的浓度(其它还有门窗面积、房间大小、密闭情况、墙体厚度和密度及室外辐射水平等)。文献^[14, 15]报道了湖北、浙江两省的不同建材中 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的含量。表9列出了浙江省的部分结果,表明建材中放射性核素浓度的差别是很悬殊的。

Karpov^[13]和Koblinger^[16]研究给出了室内 γ 辐射空气吸收剂量率与建材中 ^{40}K 、 ^{238}U (^{226}Ra)和 ^{232}Th 浓度的关系式(在实际计算中假定门窗减弱系数为0.7,忽略其它因素的小的影响),可使实际测量的室内 γ 辐射剂量率与计算值相比较。表10是根据浙江、湖北建材调查数据,用Karpov和Koblinger的方法计算的结果与两省室内 γ 辐射空气吸收剂量率实测结果的比较。计算值与实测值基本一致(其中包括抽样误差在内)。

近年来有些地区开始使用某些矿渣建材和石煤渣建材。包头地区的高炉渣水泥房室内 γ 辐射水平的变化范围为 $(21.00 \sim 140.0) \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,均值为 $58.90 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,为当地室内均值的5倍。江西省调查了少数的石煤渣房,室内 γ 辐射水平范围是 $(15.40 \sim 174.1) \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为 $91.40 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。浙江省通过建材样品分析得到的石煤渣房室内 γ 辐射水平为 $62.80 \times 10^{-8} \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,江西和浙江两省