

第9章 放射性问题

本章的目的是为饮用水中放射性核素含量的安全性评估提供标准。这个准则既适用于天然产生的放射性核素，也可用于人工产生的放射性核素。

本准则第一版中所建议的饮用水中放射活度的准则值是根据辐射源照射的危险和辐射照射的健康结果为依据的。本准则的第二版已采纳了国际放射防护委员会（ICRP）于1990年提出的建议（ICRP，1991）。本准则的第三版体现了一些最新的发展，包括ICRP出版物中的关于持续照射和剂量转换系数的内容。

放射的危害可以来自饮用水中的一些放射性物质（化学物质）所发射的电离辐射。虽然来自饮用水的这些辐射危害通常很少危及公众健康，针对饮用水辐射危害的评估通常需要与其他来源的辐射暴露一起进行。

在本准则中，控制放射危害的方法分成二个阶段：

— 对总 α 和/或总 β 的活度的初始筛查，以确定其活度浓度（Bq/L）低于一定阈值，对此不需要采取进一步的行动。

— 如果总 α 和/或总 β 的活度浓度超过筛查水平，就应该对每一种放射性核素的活度浓度进行调查，并与规定的指导水平进行比较。

因饮用溶解有氡气的地下水而引起的照射风险通常要低于因吸入释放在空气中的氡及其子体放射性核素而导致的照射风险，但仍然不可忽视，因为在这两种情况都会发生照射。氡的最大照射通常是对周围空气的吸入和从陆地来源的氡吸入，这些气体不断地渗透到住宅中，特别是渗透到地下室内。来自地下水的氡通常占总氡中很小的一部分，但是可以表明，在地下水沉积的地区，所发射出的这部分氡将会渗透到地下室中。

筛查水平和指导水平适用于在常规（“正常”）操作条件下的现有的或者新建的一些饮用水供应设施。它们不适用于在应急照射期间（包括一些放射性核素释放到环境的情况）已被污染的水的供应设施。应急照射情况下的指导水平和通用行动水平可以在其他一些报告中得到（IAEA，1996，1997，1999，2002）。

本准则是依据：

— 待积有效剂量的推荐参考剂量水平（RDL），等于在1年内摄入的饮用水所致的0.1mSv剂量（即从1年饮用水的摄入量中可能的总放射性浓度导出的这个水平）。这个水平包括由ICRP对一些主要的农产品（例如食品和饮用水）在持续照射情况下推荐的干预豁免水平的10%，这种情况

主要与公众长期摄入饮用水有关（ICRP，2000）。这个0.1mSv 的RDL也相当于由ICRP（1991）和国际基本安全标准（IAEA，1996）所推荐的公众成员照射的年剂量限值的10%。这些已经被多数世界卫生组织成员国、欧盟、联合国粮食及农业组织（FAO）和世界卫生组织（WHO）等所采用。

— 由ICRP提供的成人剂量转换系数。

一般认为，经饮用水摄入放射性核素所致的0.1mSv年剂量照射对健康的附加危险较低，其理由如下：

- 辐射诱导的随机性健康效应包括全体人口中的致死癌、非致死癌和严重的遗传效应，其标称概率系数为 $7.3 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ （ICRP 1991）。以该系数乘以通过饮用水所致等于一个RDL的0.1mSv年照射，得出随机性健康效应的估计的上限终身危险约为 10^{-4} ；与其他健康危险相比，这个值相对较小。对于放射性核素的这个参考估计危险是相当可信的，因为它包括人类群体照射资料的广泛的科学研究数据库。而化学致癌危险的外推下限危险是零。
- 虽然在地球上天然本底辐射照射差异较大，但其年平均值约为2.4mSv；尽管照射水平最高的地区可比这个值高出10倍之多，但大量人群研究证实还没有发现任何增加的健康危险。因此，这0.1 mSv剂量仅表示在天然本底辐射水平上的一个很小的增量。

9.1 辐射照射来源及其对健康的影响

环境中辐射来源于大量的天然辐射源和人工辐射源。在环境中的任何地方都存在天然放射性物质（如铀、钍和钾-40）。对人类的辐射照射主要来自天然辐射源，包括宇宙辐射和地球辐射的外照射源和一些放射性物质吸入和食入后形成的内照射源（图9.1）。联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR, 2000）估计，天然辐射源对人类照射的全球年平均值为2.4mSv（表9.1）。还有一些辐射源（如铀）在矿业开采和其他一些工业活动中可能会被浓缩。

辐射对人类的照射因人而异，这取决于许多因素，如海拔、土壤中放射性核素的类型和数量（地球辐射）、空气、食物和饮用水中放射性核素的成分以及通过吸入和食入进入人体的放射性核素量。在世界上一些地区，如印度的喀拉拉邦部分地区和巴西的Pocos del Caldas 高原地区的本底辐射水平相当高。在这些地区的居民照射水平比表9.1中所示的年平均本底水平的2.4mSv要高10倍之多，但并没有发现这种升高的辐射照射可伴有对人体健康有害的影响（UNSCEAR, 2000）。

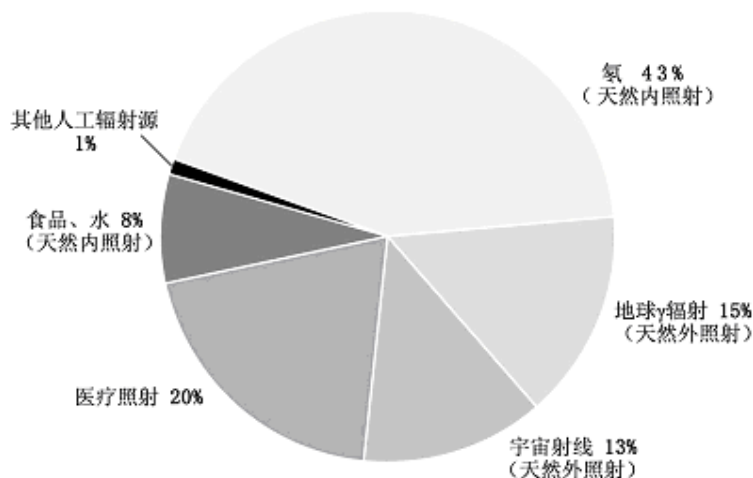


图 9.1 各种辐射源和世界全体人口辐射照射平均值的比例分布

人类活动和人工辐射源（如医学或工业使用的一些放射源）产生的一些放射性化合物可排放到环境中，进而渗入到饮用水供给设施。在世界范围内，2000年来自医学诊断检查的人均有效剂量为 0.4mSv/year （典型的范围为 $0.04\text{--}1.0\text{mSv/year}$ ，视卫生保健的水平而定）。核能生产和核武器试验对全球的辐射照射所产生的影响很小。据估计，在2000年，来自核武器试验所致的全球人均年有效剂量为 0.005mSv ，切尔诺贝利核电站事故为 0.002mSv ，核能生产为 0.0002mSv （UNSCEAR, 2000）。

表 9.1 来自天然辐射源所致平均辐射剂量

辐射源	全球范围平均年有效剂量 (mSv)	典型范围 (mSv)
外照射包括:		
宇宙射线	0.4	0.3-1.0
地球 γ 射线 ^a	0.5	0.3-0.6
内照射包括:		
吸入（主要为氡）	1.2	$0.2\text{--}10^b$
食入（食品和饮用水）	0.3	0.2-0.8
总计	2.4	1-10

^a 地球照射来自土壤中和建筑材料中放射性核素。

^b 在一些住宅内由吸入氡所致剂量可以超过 10mSv/year

表的来源：UNSCEAR报告书（2000）

9.1.1 由饮用水发生的辐射照射

饮用水的放射性的组成可能由下述因素造成：

— 天然放射性核素（例如，在饮用水源中含有钍和铀衰变系的一些放射性

核素），特别是铀226/228和几种其他放射性核素；

- 进行技术处理过程包含一些天然放射性核素（例如，矿石开采和矿砂的处理过程或者磷肥的生产过程）；
- 从核燃料循环设施排放的一些放射性核素；
- 加工放射性核素（生产和使用非密封源）作为定期向外排放这些核素的后果，可以进入到饮用水供应设施；特别是在不适当医学使用或工业使用过程中和对某些放射性物质的处置过程中而引起一些事件；这种事件不同于应急照射，因为应急照射不包括在本准则范围之内；
- 放射性核素排放到环境，包括向水源的排放。

上述这些因素对饮用水总照射的贡献通常很小，而且大部分是来自铀和钍衰变系中的天然放射性核素的贡献。然而，来自核燃料循环中的放射性核素和来自医学和其他领域使用放射性物质是可以进入到饮用水的供应设施的。一般地，通过对辐射源或实践操作实施监管可限制这些辐射源所产生的影响，并且，一旦发生辐射源污染饮用水的事件时，通过这种监管机制也可采取补救行动。

9.1.2 由饮用水所致辐射的健康效应

人类和动物研究的证据表明，在低剂量和中等剂量水平的辐射照射可以增加癌症的远期发病率。尤其是动物实验证明，辐射照射可以导致遗传畸形发生率的升高。

如果放射性核素的浓度低于指导水平（相当于待积有效剂量低于0.1mSv / year），摄入饮用水预期不会造成放射有害的健康效应。

当全身或身体大部分受到很高剂量照射时，可能会发生急性辐射健康的效应，导致血细胞数目降低，在一些很严重病例中，可能会发生死亡（IAEA，1998）。在饮用水供应设施中通常放射性核素活度的水平较低，因此，对饮用水供应设施不必担心会发生辐射的急性健康效应。

9.2 放射性活度的单位和辐射剂量的单位

放射性活度的国际单位制（SI）单位是贝可勒尔（becquerel），简称贝可（Bq），1Bq =1个衰变每秒。饮用水的指导水平用每一升的放射性核素的活度表示，称为活度浓度，用活度每升（Bq/L）表示。来自摄入单个放射性核素所致的辐射剂量取决于多个化学和生物学因素。这些因素包括放射性核素摄入后被消化道吸收的部分、放射性核素转移到器官或组织的部分和排泄前在器官和组织中放射性核素停留的时间等。此外，也必须考虑辐射在衰变时所发射的辐射性质和被照射的器官和组织对辐射的敏感性等因素。

吸收剂量是指在物质中辐射有多少能量被沉积。吸收剂量的国际单位制（SI）单位是戈瑞（Gray），称为戈（瑞）（Gy），1Gy =1J/kg（1焦耳每千克）。

当量剂量是吸收剂量与某一特殊类型的辐射（取决于该辐射的电离能力和电

离密度)有关的一个因子的乘积。

有效剂量用简单术语来表示,是被一个人所接受辐射对所有组织或器官用其“组织权重因数”加权后的当量剂量之和。这个剂量反映人体中不同的器官和组织对辐射有不同的敏感性。当量剂量和有效剂量的国际单位制(SI)单位是希沃特(Sievert),称为希(沃特](Sv), $1\text{Sv}=1\text{J}/\text{kg}$ (1焦耳每千克)。

为了反映放射性核素一旦被身体摄入后的储留特性,用待积有效剂量表示一个放射性核素被摄入后(内照射)在个人终身(70年)所接受的总的有效剂量的一种量度。

“剂量”这一术语可表示吸收剂量(Gy),也可表示有效剂量(Sv),视不同的场合而定。就监测目的而言,剂量可据给定物质中放射性核素的活度浓度而确定。以水为例,可用贝可每升(Bq/L)给出该核素的活度浓度。对每一种放射性核素,使用它的剂量转换系数(mSv/Bq)和每年平均摄入的饮水量(L/year),从水中该核素的活度浓度(Bq/L)可估算出其所致的年有效剂量(mSv/year)。

用一个剂量转换系数能够估算出在某一特定化学形式中的某种放射性同位素的食入所致的有效剂量。国际放射防护委员会(ICRP)和国际原子能机构(IAEA)已公布了一些放射性核素食入的年龄相关的剂量转换系数的数据。表9.2给出在饮用水供应设施中可能会发现一些天然发生的放射性核素或者人类活动产生的放射性核素被食入后所致的剂量转换系数。(IAEA, 1996; ICRP, 1996)。

表 9.2 成年公众成员因摄入一些放射性核素所致的剂量转换系数

类别	放射性核素	剂量转换系数 (mSv/Bq)
天然铀系	铀-238	4.5×10^{-5}
	铀-234	4.9×10^{-5}
	钍-230	2.1×10^{-4}
	镭-226	2.8×10^{-4}
	铅-210	6.9×10^{-4}
	钋-210	1.2×10^{-3}
天然钍系	钍-232	2.3×10^{-4}
	镭-228	6.9×10^{-4}
	钍-228	7.2×10^{-5}
裂变产物	铯-134	1.9×10^{-5}
	铯-137	1.3×10^{-5}
	锶-90	2.8×10^{-5}
	碘-131	2.2×10^{-5}
	氚	1.8×10^{-8}
其他放射性核素	碳-14	5.8×10^{-7}
	钷-239	2.5×10^{-4}
	镅-241	2.0×10^{-4}

9.3 饮用水中放射性核素的指导水平

表9.3列出在饮用水中一些来自天然辐射源产生的放射性核素或由于目前和过去的活动结果向环境排放的一些放射性核素的指导水平。这些指导水平也适用于在一年以前发生的一些核事故所排放的一些放射性核素。表9.3中列出的活度浓度值相当于每一个列出的放射性核素所致的剂量为0.1mSv/ year的一个参考剂量水平（RDL），其前提是这些放射性核素在过去一年间的饮用水中的活度浓度不超过这些值。本章的开头已给出相关的危险估计。不管用什么方法，在《国际基本安全标准》(IAEA, 1996)和世界卫生组织(WHO)与国际原子能机构(IAEA)其他相关出版物(WHO 1988; IAEA, 1997, 1999)中都描述了一次事故后第一年期间用于食品的通用行动水平。

以下公式可用于计算饮用水中放射性核素的指导水平：

$$GL=IDC/(h_{ing}\cdot q)$$

式中：GL =饮用水中某种放射性核素的指导水平（Bq/L），

IDC=个人剂量标准，对这种计算等于0.1mSv 每年（mSv/year），

h_{ing} =成年人食入某种放射性核素的剂量转换系数（mSv/Bq），

q =假设年摄入饮用水的容积为每年730升（L/year）。

对于儿童而言，虽然计算时采用较高的年龄相关的剂量转换系数（因为儿童有较高的吸收率和/或较高的代谢率），但由于婴儿和儿童消耗饮用水的平均容积较低，而不会造成明显较高的剂量。因此，从一年所消耗的饮水量推荐的0.1mSv /year的待积有效剂量的参考剂量水平（RDL）可适用任何年龄。

9.4 对溶解在水中的放射性核素的监测和评价

9.4.1 对饮用水供应设施的筛查

对识别单个放射性核素和测定它们的浓度的过程需要采用复杂的技术方法和昂贵的分析手段，这通常是不合宜的，因为大多数情况下饮用水中放射性核素的浓度是很低的。一个更加实用的方法是使用一种筛查的程序，首先测定以 α 辐射和 β 辐射形式表示的总放射性水平，而不需要知道这些特定放射性核素的性质。

饮用水的筛查水平表示低到不需要采取进一步行动的活度水平，即总 α 活度低于0.5Bq/L，总 β 活度低于1Bq/L 水平。本准则的第二版中已公布了总 β 活度的筛查水平和在较严重情况下（如Rn-222）估算的剂量接近0.1mSv /year 的指导参考剂量水平（RDL）。当这种放射性活度浓度所反映数值接近核素的规定的指导参考剂量水平（RDL）时，则对于总 α 活度的筛查水平不适用0.5Bq/L 而用0.1Bq /L代替。

表9.3 饮水中的一些放射性核素指导水平

核素	指导水平 (Bq/litre) ^a	核素	指导水平 (Bq/litre) ^a	核素	指导水平 (Bq/litre) ^a
³ H	10 000	⁹³ Mo	100	¹⁴⁰ La	100
⁷ Be	10 000	⁹⁹ Mo	100	¹³⁹ Ce	1000
¹⁴ C	100	⁹⁶ Tc	100	¹⁴¹ Ce	100
²² Na	100	⁹⁷ Tc	1000	¹⁴³ Ce	100
³² P	100	^{97m} Tc	100	¹⁴⁴ Ce	10
³³ P	1 000	⁹⁹ Tc	100	¹⁴³ Pr	100
³⁵ S	100	⁹⁷ Ru	1000	¹⁴⁷ Nd	100
³⁶ Cl	100	¹⁰³ Ru	100	¹⁴⁷ Pm	1000
⁴⁵ Ca	100	¹⁰⁶ Ru	10	¹⁴⁹ Pm	100
⁴⁷ Ca	100	¹⁰⁵ Rh	1000	¹⁵¹ Sm	1000
⁴⁶ Sc	100	¹⁰³ Pd	1000	¹⁵³ Sm	100
⁴⁷ Sc	100	¹⁰⁵ Ag	100	¹⁵² Eu	100
⁴⁸ Sc	100	^{110m} Ag	100	¹⁵⁴ Eu	100
⁴⁸ V	100	¹¹¹ Ag	100	¹⁵⁵ Eu	1000
⁵¹ Cr	10 000	¹⁰⁹ Cd	100	¹⁵³ Gd	1000
⁵² Mn	100	¹¹⁵ Cd	100	¹⁶⁰ Tb	100
⁵³ Mn	10 000	^{115m} Cd	100	¹⁶⁹ Er	1000
⁵⁴ Mn	100	¹¹¹ In	1000	¹⁷¹ Tm	1000
⁵⁵ Fe	1 000	^{114m} In	100	¹⁷⁵ Yb	1000
⁵⁹ Fe	100	¹¹³ Sn	100	¹⁸² Ta	100
⁵⁶ Co	100	¹²⁵ Sn	100	¹⁸¹ W	1000
⁵⁷ Co	1 000	¹²² Sb	100	¹⁸⁵ W	1000
⁵⁸ Co	100	¹²⁴ Sb	100	¹⁸⁶ Re	100
⁶⁰ Co	100	¹²⁵ Sb	100	¹⁸⁵ Os	100
⁵⁹ Ni	1 000	^{123m} Te	100	¹⁹¹ Os	100
⁶³ Ni	1 000	¹²⁷ Te	1000	¹⁹³ Os	100
⁶⁵ Zn	100	^{127m} Te	100	¹⁹⁰ Ir	100
⁷¹ Ge	10 000	¹²⁹ Te	1000	¹⁹² Ir	100
⁷³ As	1 000	^{129m} Te	100	¹⁹¹ Pt	1000
⁷⁴ As	100	¹³¹ Te	1000	^{193m} Pt	1000
⁷⁶ As	100	^{131m} Te	100	¹⁹⁸ Au	100
⁷⁷ As	1 000	¹³² Te	100	¹⁹⁹ Au	1000
⁷⁵ Se	100	¹²⁵ I	10	¹⁹⁷ Hg	1000
⁸² Br	100	¹²⁶ I	10	²⁰³ Hg	100
⁸⁶ Rb	100	¹²⁹ I	1000	²⁰⁰ Tl	1000
⁸⁵ Sr	100	¹³¹ I	10	²⁰¹ Tl	1000
⁸⁹ Sr	100	¹²⁹ Cs	1000	²⁰² Tl	1000
⁹⁰ Sr	10	¹³¹ Cs	1000	²⁰⁴ Tl	100
⁹⁰ Y	100	¹³² Cs	100	²⁰³ Pb	1000
⁹¹ Y	100	¹³⁴ Cs	10	²⁰⁶ Bi	100
⁹³ Zr	100	¹³⁵ Cs	100	²⁰⁷ Bi	100
⁹⁵ Zr	100	¹³⁶ Cs	100	²¹⁰ Bi ^b	100
^{93m} Nb	1 000	¹³⁷ Cs	10	²¹⁰ Pb ^b	0.1
⁹⁴ Nb	100	¹³¹ Ba	1000	²¹⁰ Po ^b	0.1
⁹⁵ Nb	100	¹⁴⁰ Ba	100	²²³ Ra ^b	1
²²⁴ Ra ^b	1	²³⁵ U ^b	1	²⁴² Cm	10
²²⁵ Ra	1	²³⁶ U ^b	1	²⁴³ Cm	1
²²⁶ Ra ^b	1	²³⁷ U	100	²⁴⁴ Cm	1
²²⁸ Ra ^b	0.1	²³⁸ U ^{b,c}	10	²⁴⁵ Cm	1

表9.3 续

核素	指导水平 (Bq/litre)	核素	指导水平 (Bq/litre)	核素	指导水平 (Bq/litre)
²²⁷ Th ^b	10	²³⁷ Np	1	²⁴⁶ Cm	1
²²⁸ Th ^b	1	²³⁹ Np	100	²⁴⁷ Cm	1
²²⁹ Th	0.1	²³⁶ Pu	1	²⁴⁸ Cm	0.1
²³⁰ Th ^b	1	²³⁷ Pu	1000	²⁴⁹ Bk	100
²³¹ Th ^b	1000	²³⁸ Pu	1	²⁴⁶ Cf	100
²³² Th ^b	1	²³⁹ Pu	1	²⁴⁸ Cf	10
²³⁴ Th ^b	100	²⁴⁰ Pu	1	²⁴⁹ Cf	1
²³⁰ Pa	100	²⁴¹ Pu	10	²⁵⁰ Cf	1
²³¹ Pa ^b	0.1	²⁴² Pu	1	²⁵¹ Cf	1
²³³ Pa	100	²⁴⁴ Pu	1	²⁵² Cf	1
²³⁰ U	1	²⁴¹ Am	1	²⁵³ Cf	100
²³¹ U	1000	²⁴² Am	1000	²⁵⁴ Cf	1
²³² U	1	^{242m} Am	1	²⁵³ Es	10
²³³ U	1	²⁴³ Am	1	²⁵⁴ Es	10
²³⁴ U ^b	10			^{254m} Es	100

^a表中的指导水平，根据对数表示的平均值四舍五入到整数

(如对计算值小于 3×10^{-n} 和大于 $3 \times 10^{-n-1}$ 范围内，则数值取 10^{-n})。

^b指天然放射性核素。

^c指饮用水中铀-238的暂定准则值，根据对肾脏的化学毒性规定为15 μ g/L(见8.5节)。

9.4.2 评价饮用水的方法

如果测量的二种总活度中有任何一个已超过了筛查水平，那么应鉴定产生这一活度值的某些特定的放射性核素，并测量它们每一种放射性核素的活度浓度。从已获得的数据对每一种放射性核素进行待积有效剂量的估算，然后确定这些核素的待积有效剂量之和。如果满足下面附加公式，则不需要采取进一步行动：

$$\sum_i \frac{C_i}{GL_i} \leq 1$$

式中：

C_i =测量的放射性核素i的活度浓度 (Bq /L) ，

GL_i =放射性核素i的指导水平值 (Bq /L) (见表9.3所示)，它表示如每天摄入2升水时，在1年中摄入的水得到该核素为0.1mSv /year的一个待积有效剂量值。

对于一次水采样这个总和超过1还不能说明什么，如果只要全年连续地测量而得到这些放射性核素的活度浓度相同的话，则可以说0.1mSv 的参考剂量水平 (RDL) 就会超过。**因此，这样一次采集样本本身并不能暗示这种水不适于饮用**，而是应把它看作一种迹象，需要做进一步调查，包括进行附加采样。首先，必须进行重复性的总 β 和总 α 的活度筛查，如果后续测量的总活度超过了推荐的实际

的筛查水平值时（如分别对总 β 为1Bq/L，对总 α 为0.5Bq/L），应再对单个放射性核素进行分析。

图 9.2 汇总了对这些建议的应用流程。

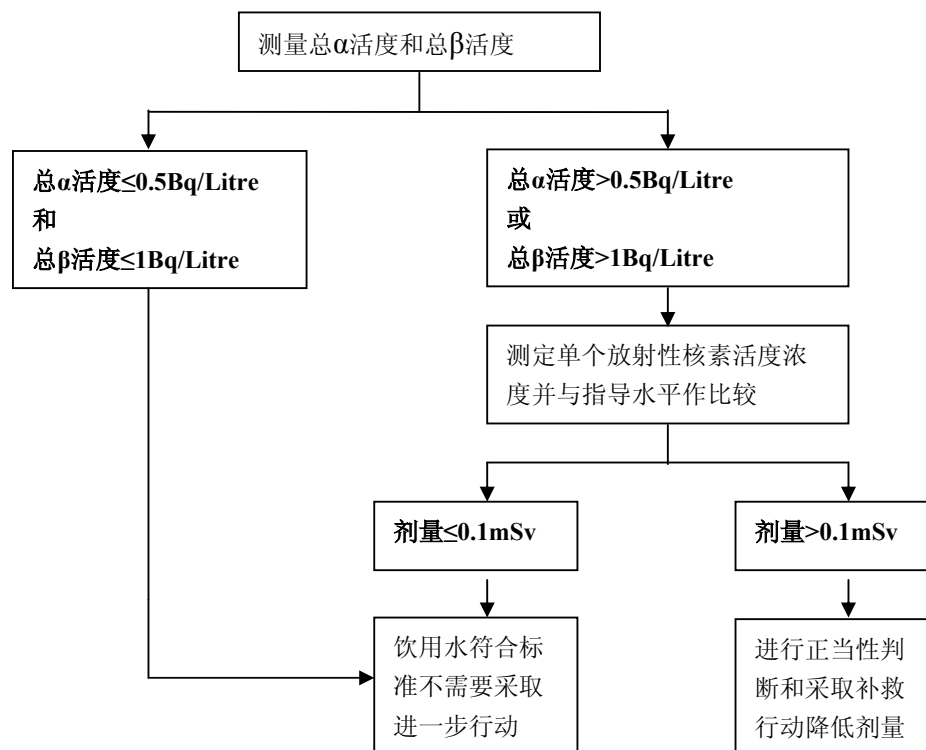


图 9.2 饮用水中的放射性核素的筛查水平和指导水平的应用程序

对总 β 的测量包括钾-40的贡献，天然发生一个 β 的发射体与稳定性的钾有固定的比值。钾是人体中的一种必不可少的元素，主要通过食入的食品中被吸收。钾-40在人体中不累积，而是维持在一个恒定水平，与摄入多少无关。因此，钾-40的 β 放射性活度的贡献从单独测定的总钾后加以扣除。已知钾-40的比活度是钾的30.7Bq/g。然而，并非钾-40所有辐射仅是 β 放射性活度，已知钾-40的 β 放射性活度是稳定钾的27.6Bq/g，因此，应用这个因子计算由于钾-40所产生 β 放射性活度看来是正确的。

9.4.3 补救措施

如果总活度计算超过参考剂量水平（RDL）0.1mSv/year，则应对负责的部门所采取的降低剂量的方案进行审查。如需采取补救措施，应针对所有拟采用的方案进行论证（亦即能达到某种净利益），然后根据ICRP建议书（1989，1991）实施最优化措施，以获得最大的净利益。

9.5 氡

9.5.1 空气和水里的氡

天然辐射照射的最大份额来自于氡。氡是一种放射性气体（见表9.1和图9.1所示）；作为铀系衰变的中间产物，它是岩石和土壤中的镭发生衰变后的产物。氡这一术语一般是指原子序数为86的元素的同位素Rn-222。实际上，氡在地球上无处不在，特别是在地面空气中和建筑物中。

含有天然铀的地下岩石不断地释放出氡气渗入到与其接触的水中（地下水）。氡从地表水中很容易地释放出来。因此，地下水可能比地表水含有更高浓度的氡。来自地表水的自来水中氡的平均浓度低于 0.4Bq/L，而来自地下水源的自来水中氡的浓度约为 20Bq/L。已查明一些水井中含有较高浓度的氡，比之自来水中氡平均浓度可高达 400倍以上；在很少情况下，水井中氡浓度可超过 10kBq/L。

为评价氡的食入所致剂量，重要的一点是在水消费前要考虑对水的排氡处理技术的影响。况且，供普通家庭使用未进行排氡处理（通常用通风的方法）的地下水供应设施时，会增加室内空气中的氡水平，从而增加氡的吸入所致剂量。这种剂量在很大程度上取决于家庭使用地下水的方式和房屋的结构（NCRP1989），因为室内空气氡绝大部分是来自房屋的地基渗入，而非来自地下水。在全世界范围内，人们摄入水的数量和形式、家庭中水的其他用途以及房屋结构都存在较大差异。

UNSCEAR报告书（2000）引用了美国国家科学院（US NAS）的一份报告（1999）指出，“在饮用水中氡所致平均照射剂量很低，吸入所致剂量为0.025mSv/year，食入所致剂量为0.002 mSv/year”，这比之在空气中吸入氡和其衰变产物所致剂量（1.1mSv/year）要小得多。

9.5.2 危险性

该报告同时指出，在美国，肺癌死亡病例中有12%可能与室内空气中的氡（Rn-222及其短寿期衰变产物）有关（US NAS, 1999）。因此，氡导致每年约有19,000人因肺癌死亡（范围为15,000~22,000），而每年死于肺癌的总人数约为160,000，主要是因吸烟所致（US NRC, 1999）。

该US NAS 报告（1999）指出，来自饮用水中氡照射的危险是吸入空气后氡照射的危险的1/100（即，每年仅死亡183人）。室内空气中的氡所致肺癌死亡人数每年约为19,000人，另有约160例肺癌死亡病例是由于室内使用的水所发射出氡被人们吸入所致。相比之下，约700例肺癌死亡病例是人们在室外时因受到天然水平的氡照射所致。

该US NAS 报告（1999）也评价了由于饮用水中低浓度的、已溶解的氡被食入后诱发胃癌的危险，其致死率每年约为20人；相比之下，在美国，因其他原因诱发胃癌而死亡的人数每年约为13,000人。

9.5.3 对饮用水供应设施中的氡的指导

如果公用水供应系统中饮用水的氡活度浓度超过100Bq/L时，应采取控制措施。任何一种采用地下水的新的饮用水供应（尤其是公用供水）设施在投入使用之前都应进行检验。如果氡的活度浓度超过100Bq/L，应对水源进行处理，将氡浓度水平降低至100Bq/L以下。如果在水源周围存在大量能产生氡的矿石，则对较大规模的饮用水供应设施可能需要定期检测含氡量，如每5年一次。

9.6 采样、分析和报告

9.6.1 对总 α 和总 β 活度浓度的测量

为了分析饮用水的总 α 活度和总 β 活度（不包含氡），最通用的一个方法是蒸发已知容积的水样使之干燥后测量残余物的活度。由于 α 辐射在薄层的固态物质中很容易被吸收，因此如果用一个高TDS的样品可能会降低 α 测量方法的可靠性和灵敏度。

应尽可能使用标准化的方法测量总 α 活度和总 β 活度的浓度。在表9.4中列出了开展这种分析的三种程序。

表 9.4 对饮用水中总 α 活度和总 β 活度的分析方法

方法, 参考标准	技术	探测限	应用
国际标准化组织 (ISO): ISO-9695 (总 β) ISO-9696 (总 α) (ISO, 1991a, 1991b)	蒸发法	0.02-0.1 Bq/Litre	TDS>0.1 g/Litre的地下水
美国公共卫生学会 (APHA,1998)	共沉淀法	0.02 Bq/Litre	地表水和地下水 (TDS不是一个因素)

用蒸发法测量总 β 活度包含钾-40的贡献,因此,如果总 β 的筛查值超标,则还需要对总钾进行附加分析。

共沉淀技术 (APHA, 1998) 不包含钾-40的贡献。因此,不需要再作总钾测定。这种方法不适用于对含有一些裂变产物的水样的测定,如铯-137。但是,在正常情况下,饮用水供应设施中的裂变产物的活性浓度是特别低的。

9.6.3 氡的测量

由于在水的处理过程中氡很容易从水中逸出,所以计算饮用水中Rn-222的活度浓度较困难。搅拌水和把水从一个容器倒到另一个容器时将会释放出溶解在水中的氡。根据广泛采用的Pylon 技术 (Pylon, 1989, 2003), 检测饮用水中的氡时使用的是一种水的排气装置和Lucas闪烁室。洒在实验台上的水会减少氡活度的测得值,把水煮沸会完全排掉水中的氡。

9.6.4 采样

为了确定饮用水供应设施是否适合，在其设计和建造之前应对新的公共供水设施的地下水源至少进行一次采样，以判定供水的放射质量，评价放射性核素浓度的季节性变化。其中应包括对氡及其子体的分析。

一旦测量证明该供水的放射性水平在正常范围内，就可以降低采样频率，例如，可以每5年采样一次。然而，如果在供水附近存在潜在的放射性核素污染源（如采矿活动或核反应堆等），则应增加采样频率。对于来自影响较不明显的地表水和地下水的供水，可减少采样频率。

来自地下水源的供水中的氡及其子体的活度水平通常不随时间而改变。因此，对这种水中的氡及其子体的监测频率可以相对低些。为了确定水源中是否存在高浓度的氡及其子体时，应对所在地区的地质状况有所了解。如果在临近地区有矿区存在，就会造成一种额外的危险；在这种情况下，有必要加大采样监测的频率。

在澳大利亚和新西兰的国家标准中（AS，1998），就有关水质评估、采样技术/方案以及样品的保存和处理等提供了指导意见。

9.6.5 结果的报告

对每一个样品的分析结果应包括下述信息：

- 样品的识别编码或者识别信息；
- 报告结果的提交日期和时间（如，样品收集日期）；
- 确定使用了何种标准分析方法，或者对所使用的任一非标准的分析方法作出简要描述；
- 确定是何种放射性核素，或者确定其类型和总放射性活度；
- 对每一种放射性核素使用适当的盲法计算出以测量为基础的浓度值或者活度值；
- 评估计数的不确定度和总预期不确定度；
- 给出每一种放射性核素或被分析的参数的最小可探测浓度。

对报告结果的总预期不确定度的估计值应包括在分析方法中使用的所有参数的贡献（如，计数的不确定度以及其他随机的和系统的不确定度或误差）。