

· 经验交流 ·

两种氚化水内照射剂量估算方法比较

周文明, 古晓娜, 郝杰

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

关键词: 氚; 内照射; 国际放射防护委员会 (ICRP); 折线面积; 剂量估算

中图分类号: R144 **文献标识码:** C

文章编号: 1002-221X(2022)03-0282-03

DOI: 10.13631/j.cnki.zgggyx.2022.03.032

氚 (^3H tritium) 是氢的放射性同位素, 衰变过程中可发射出低能 β 射线, 最大能量 18.6 keV, 平均能量 5.68 keV。氚具有易扩散、易氧化、渗透性强、存在同位素交换等性质, 且以气体、水蒸气、氚化尘粒或气溶胶等不同放射性形态存在于工作场所中, 包括工作场所的空气及被污染的液体 (油、水)、设备与材料。氚进入人体的途径主要为吸入、皮肤摄入和食入。氚水进入人体后 2~3 h 内均匀分布全身, 97% 混入体内水分, 生物半排期 10 d; 3% 与有机分子结合, 生物半排期 40 d。氚对人体的外照射危害可以忽略, 内照射是造成辐射危害的主要因素。

氚化水剂量估算是评价氚辐射防护效果的重要因素, 通过尿氚监测结果, 可得出工作人员体内氚化水含量, 进而估算作业人员辐射受照剂量, 评价氚的辐射防护效果。本文根据体内摄入氚的类型, 选用国际放射防护委员会 (ICRP) 推荐方法和折线面积方法对氚化水工作人员进行个人剂量估算和比较。

1 氚化水剂量估算方法

ICRP 推荐方法主要参考 ICRP 第 78 号^[1] 出版物, 我国使用标准为核工业行业推荐标准《氚内照射剂量估算及评价方法》(EJ/T 287—2000); 折线面积法主要参考国际原子能机构 (IAEA) 第 1568 号技术文件^[2], 我国使用标准为《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》(GB/T 16148—2009)。

1.1 有效剂量估算 人体摄入的氚化水可被迅速全部吸收, 且在体内均匀分布, 尿中与水体 (42 L) 氚的活度浓度相等。因此, 监测单次尿样的氚活度浓度

即可得出受检者体内氚化水含量 [$R(t)$, Bq]。

$$R(t) = 42 \times C(t) \quad (1)$$

式中: $C(t)$ —尿中氚的活度浓度, Bq/L。

根据氚进入人体后的分布情况, 人单次急性摄入 1 Bq 氚化水^[3], 摄入后 t 天的体氚含量为

$$R(t) = 0.97 \exp(-0.069 47t) + 0.03 \exp(-0.017 48t) \quad (2)$$

式中: 0.97—向体水氚的转移分数, 0.03—向有机氚的转移分数。0.069 47—体水氚的有效转移速率 ($\lambda_{\text{有}}, \text{d}^{-1}$), $\lambda_{\text{有}} = \lambda_{\text{生}} + \lambda_{\text{物}} = \ln 2/10 + \ln 2/(12.3 \times 365)$; $\lambda_{\text{生}}$ —生物廓清速率, d^{-1} ; $\lambda_{\text{物}}$ —物理衰变常数, d^{-1} ; 10—体水氚的生物半排期, d; 12.3—氚的物理半衰期, 年。0.017 48—有机氚的有效转移速率 ($\lambda_{\text{有}}, \text{d}^{-1}$), $\lambda_{\text{有}} = \lambda_{\text{生}} + \lambda_{\text{物}} = \ln 2/40 + \ln 2/(12.3 \times 365)$; 40—有机氚的生物半排期, d。

由 (2) 式的 50 年积分可得核变化数 [$U_s(50)$] 为

$$\begin{aligned} U_s(50) &= 24 \times 3 600 \int_0^{50 \times 365} R(t) dt \\ &= 24 \times 3 600 \int_0^{18250} [0.97 \exp(-0.069 47t) + \\ &\quad 0.03 \exp(-0.017 48t)] dt \\ &= 1.354 7 \times 10^6 \quad (3) \end{aligned}$$

氚的半衰期为 12.3 年, 为 β 发射体, 产额 (Y) 为 1, 平均能量 (E) 为 $5.683 \times 10^{-3} \text{ MeV}$, 吸收分数 (AF) 为 1, 辐射权重因子 (W_R) 为 1。氚在体内均匀分布, 且靶和源器官相同, 其全身器官或组织总质量 ($M_T = \text{全身质量} - \text{胃肠道、膀胱和胆囊容物质量}$) 为 68.831 kg。由此得出比有效能量 (SEE , Sv/核变化) 为

$$\begin{aligned} SEE &= Y \times E \times AF \times W_R / M_T \\ &= 1 \times 5.683 \times 10^{-3} \times 1 \times 1 / 68.831 (\text{MeV/g}) / \text{核变化} \\ &= 8.256 5 \times 10^{-8} (\text{MeV/g}) / \text{核变化} \\ &= 825 65 \times 10^{-8} \times 1.6 \times 10^{-10} \text{ Sv} / \text{核变化} \\ &= 1.32 \times 10^{-17} \text{ Sv} / \text{核变化} \quad (4) \end{aligned}$$

由式 (3) 和 (4) 可得 50 年待积有效剂量系数 [$e(50)$, Sv/Bq]

$$\begin{aligned} e(50) &= 1.32 \times 10^{-17} \times 1.354 7 \times 10^6 \\ &= 1.782 2 \times 10^{-11} \approx 1.8 \times 10^{-11} \quad (5) \end{aligned}$$

1.2 ICRP (78 号) 推荐方法估算剂量 摄入量换算因子系指单位摄入量所致尿中氚的活度浓度。急性摄

作者简介: 周文明 (1989—), 男, 助理研究员, 主要从事放射防护评价与检测工作。

入量换算因子 $[m_1(t), (Bq/L)/Bq]$,即单次摄入1 Bq 氟化水(蒸汽)后第 t 天尿中氟的活度浓度,可由式(6) 得出,亦可通过EJ/T 287—2000附录A查出。连续均匀摄入量换算因子 $[m_2(t), (Bq/L)/Bq]$,即以 ΔI 速率连续均匀摄入氟化水(蒸汽)后第 t 天尿中氟的活度 浓度,由式(7)得出,亦可通过EJ/T 287—2000附录B 查出。

$$m_1(t) = C(t) = 1/42[0.97\exp(-0.06947t) + 0.03\exp(-0.01748t)] \quad (6)$$

$$m_2(t) = \Delta I \{ 0.3324[1 - \exp(-0.06947t)] + 0.04086[1 - \exp(-0.01748t)] \} \quad (7)$$

对于单次或连续均匀摄入,在摄入后 t 天测得尿 中氟的活度浓度 $[C(t), Bq/L]$,则摄入量 (I, Bq) 和50 年待积有效剂量 $[E(50)]$ 计算公式分别为

$$I = C(t)/m(t) \quad (8)$$

$$E(50) = I \times e(50) = 1.8 \times 10^{-11} I \quad (9)$$

式中: t —尿氟浓度监测周期,d。

1.3 尿氟浓度折线面积法估算剂量 假设1年内工 作人员尿氟浓度监测频率较多,且多年长期监测,或最 后的监测结果足够小,以致其后的剂量可忽略不计,则 可采用尿氟浓度折线面积法估算剂量。按此方法得出 的有效剂量为工作人员当年所受辐射剂量。

若每年监测 n 次,则尿氟浓度的折线面积 $[Ac, (Bq/L)/d]$ 计算公式为

$$Ac(\text{当年}) = \sum_{i=0}^n (C_i + C_{i+1})(t_{i+1} - t_i)/2 \quad (10)$$

式中: C_i — i 尿样的氟浓度测量值, Bq/L ; C_0 —前一 年最后1次测得的尿氟浓度, Bq/L ; t_i — i 尿样的取样 时间,d; t_0 —前一年最后1次取样时间,d; n —一年总尿 样数。

参考人的体水为42 L,1 d为864 00 s,体内核变 化数(U_s)为

$$U_s(\text{当年}) = Ac \times 3.6288 \times 10^6$$

当年的待积有效剂量(E)为

$$E(\text{当年}) = U_s \cdot SEE = Ac \times 3.6288 \times 10^6 \times 1.32 \times 10^{-17} = 4.79 \times 10^{-11} Ac \quad (11)$$

假设当年不再从事氟化水作业,则最后1次测量 后体内滞留氟引起的 E ,可用最后1次尿氟浓度 $[C_n, Bq/L]$,并用继续沉积时的半衰期推导出

$$E(\text{待积}) = \frac{4.79 \times 10^{-11} C_n}{\ln 2/10} = 6.91 \times 10^{-10} C_n \quad (12)$$

由此,计算出工作人员接受的总剂量

$$E = E(\text{当年}) + E(\text{待积}) = 4.79 \times 10^{-11} Ac + 6.91 \times 10^{-10} C_n \quad (13)$$

2 氟辐射个人剂量计算

根据两种不同氟剂量估算方法分别估算6名工 作人员的个人剂量。1年内6人的尿氟浓度监测结果见 表1。

表1 6名工作人员1年内尿氟浓度监测结果

工作人员	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次	第10次	第11次	第12次
1	74.0	91.5	—	1 030	317	1 330	3 350	717	583	2 030	1 680	1 150
2	76.6	140.0	76.7	267	250	200	200	233	217	183	192	289
3	82.6	90.9	317.0	1 870	433	167	150	200	167	117	—	165
4	84.5	84.0	—	1 700	417	333	183	167	200	250	167	526
5	203.0	220.0	56.1	500	250	150	183	167	117	267	505	287
6	408.0	85.3	133.0	967	750	267	200	250	233	317	187	225

注:—,为工作人员在监测周期内未进行尿氟浓度监测。

根据尿氟浓度监测结果,运用公式(8)和 (11),分别计算6名工作人员的个人剂量,见表2。 6名工作人员在监测周期内氟内照射个人剂量处于较 低水平,个人全年最高累积内照射剂量 $<20 \mu Sv$,低 于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)规定的年允许限值(20 mSv)。使用 ICRP推荐方法计算氟内照射需注意:(1)工作人员 在监测周期内未留存尿样,缺乏尿氟浓度数据时,以 前后周期尿氟浓度的平均值进行计算;(2)当月的

尿氟浓度监测结果低于之前氟摄入在该月的累积值, 而工作人员无其他氟化水摄入途径,应按当月未摄入 氟化水进行估算。

表2 两种剂量方法个人剂量估算结果 μSv

估算方法	工作人员					
	1	2	3	4	5	6
ICRP推荐法	18.2	3.01	5.33	6.94	3.46	4.82
折线面积法	17.6	3.00	5.36	6.69	3.67	5.15

3 两种剂量估算方法比较

根据个人剂量计算结果, ICRP 推荐方法计算个人剂量与折线面积法相差范围为-6.4%~3.3%, 两种方法计算结果基本一致。对计算结果存在影响的因素主要有参考人与个体、待积剂量、计算难易及计算误差等。

3.1 参考人与个体 ICRP 推荐方法剂量估算前提为选取参考人模型, 个体重量、含水量、半排期等个体因素的参考值固定; 折线面积法可根据以上个体因素进行适当修正。

3.2 待积剂量 ICRP 推荐方法计算个人剂量为 50 年待积有效剂量; 折线面积法计算个人剂量为当年有效剂量, 工作人员如不再摄入氟化水, 可估算最后 1 次测量尿氟浓度结果后的一段时间内引起的待积有效剂量。

3.3 计算难易 ICRP 推荐方法在计算连续摄入情况时, 需考虑之前摄入氟化水对尿氟监测浓度的影响, 较折线面积法计算复杂。

3.4 计算误差 ICRP 推荐方法计算连续摄入情况时选取参考人作为计算前提, 不考虑个体因素差异,

且计算时需考虑之前摄入的多次迭代, 较折线面积法计算误差大。

4 小结

本研究选用两种氟化水内照射剂量估算方法对个人剂量进行估算比较, 工作人员仅为单次摄入氟化水时, 只能选用 ICRP 推荐方法计算氟致个人剂量。工作人员连续摄入氟化水时, 可选用考虑个体因素、计算简便、误差较小的折线面积法计算; 工作人员如不再摄入氟化水, 也可计算最后 1 次尿氟浓度测量后的待积有效剂量。

参考文献

[1] ICRP. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers [R]. ICRP Publication 78, 1997.

[2] IAEA. Intercomparison Exercise on Internal Dose Assessment [R]. IAEA TECDOC 1568, 2007.

[3] 田正坤, 王孔钊, 徐侃. 秦山第三核电厂氟内照射辐射防护 [J]. 辐射防护通讯, 2007, 27 (4): 34-38.

(收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-09-24)

(上接第 281 页)

参考文献

[1] 《中华人民共和国职业病防治法》[EB/OL]. <http://old.hebeicourt.gov.cn/lawdb/show.php?fid=151630>, 2018-12-29

[2] 《职业健康检查管理办法》[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5401347.htm, 2019-2-28

[3] 李涛. 新时期职业病防治形势分析及对策建议 [J]. 中国职业医学, 2018, 45 (5): 537-542.

[4] 徐孝华, 秦宏冉, 赵镁嘉, 等. 2012 年上海市职业健康检查机构设置现状调查 [J]. 职业卫生与应急救援, 2014, 32 (2): 70-73.

[5] 庄向, 李津, 万燕飞, 等. 福建省职业健康检查机构检查类别状况分析 [J]. 海峡预防医学杂志, 2019, 25 (6): 71-72.

[6] 黄世文, 葛宪民, 江世强, 等. 广西壮族自治区职业健康监护与职业病诊断机构现状调查 [J]. 工业卫生与职业病, 2012, 38 (3): 173-175.

[7] 磨剑, 罗贤俊, 平波. 贵州省龙里县职业卫生工作现状及对策 [J]. 微量元素与健康研究, 2019, 36 (1): 42-43.

[8] 秦榆荣, 沈爱国, 丁红卫. 河北省职业健康检查机构和职业病诊断机构配置情况分析 [J]. 医学动物防制, 2018, 34 (10): 939-941.

[9] 白天, 李玲. 湖北省职业健康检查机构现状分析 [J]. 中国工业医学杂志, 2015, 28 (5): 365-367.

[10] 赵静, 王杰, 张红兵, 等. 江苏省职业健康检查机构现状调查 [J]. 预防医学, 2019, 31 (2): 199-201.

[11] 米克德, 王永东, 吕良, 等. 宁夏职业健康检查机构现状分析 [J]. 宁夏医学杂志, 2017, 39 (6): 560-562.

[12] 林庚, 王磊, 张令硕, 等. 山东省职业健康检查及职业病诊断机构情况分析 [J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (1): 91-94.

[13] 赵英. 山西省职业健康检查机构现状及管理对策 [J]. 山西医药杂志, 2018, 47 (19): 2363-2364.

[14] 郝欣欣, 阮水富, 于信波, 等. 天津市职业健康检查机构现状调查与监管对策 [J]. 工业卫生与职业病, 2018, 44 (1): 75-76.

[15] 祝江伟, 冯彩欣, 佐拉, 等. 新疆职业健康检查机构状况与监管对策 [J]. 中国卫生监督杂志, 2017, 24 (2): 149-153.

[16] 何小凤, 陈秀晖, 蒋雪月, 等. 云南省职业健康检查机构监管状况十年回顾 [J]. 中国卫生监督杂志, 2017, 24 (2): 168-172.

[17] 李怡, 张东华. 重庆市职业健康检查机构服务能力现状调查 [J]. 职业与健康, 2016, 32 (1): 106-108.

[18] 关里, 毛丽君, 李树强. 加强质控管理对持续改进职业健康检查质量作用的探讨 [J]. 中国工业医学杂志, 2020, 33 (3): 273-275.

(收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-12-07)