

某设施净化后含氚废水生态排放环境影响研究

程卫亚¹, 陈连杰², 许慧萍¹, 文富平¹, 潘竞舜¹

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 中国核电工程公司

摘要: **目的** 对某设施净化后的含氚废水采用生态方式排放造成的辐射环境影响进行评估。**方法** 通过生态实验获取氚的排放源项, 采用该设施拟建场址环境特征参数, 对生态排放造成的大气和地下水途径的辐射影响进行评估。**结果** 试验结果表明, 95% 的氚会通过植物叶面的蒸腾作用排入环境, 同时部分含氚废水会通过渗透作用进入下水; 通过内陆某厂址的环境参数进行环境影响评价结果表明, 通过气态途径造成的最大个人剂量为 1.9×10^{-3} mSv (考虑吸入和食入途径); 渗透进入地下水其运移速度较慢, 排放后经过 100 年造成最大个人有效剂量影响为 12.3 μ Sv。**结论** 从辐射环境影响还是经济利益角度, 通过生态方式排放净化后的含氚废水都可行的。对于水资源缺乏的内陆核设施, 生态排放是一个重要的排放途径。

关键词: 含氚废水; 生态排放; 净化; 环境影响

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2020)05-0550-05

Study on environmental impact of ecological discharge of Tritium-containing wastewater after purification in a facility

CHENG Weiya¹, CHEN Lianjie², XU Huiping¹, WEN Fuping¹, PAN Jingshun¹

1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd

Abstract: **Objective** To evaluate the radiation environmental impact caused by the ecological discharge of tritium - containing wastewater after purification in a facility. **Method** The Tritium emission source terms were obtained through ecological experiments, and the environmental characteristic parameters of the proposed site of the facility were used to evaluate the radiation effects of the atmospheric and groundwater pathways caused by ecological discharge. **Result** The results showed that 95% of Tritium would be discharged into the environment through transpiration of plant leaves, and some containing Tritium wastewater would be discharged into the water through osmosis. The results of an environmental impact assessment based on the environmental parameters of an inland site showed that the maximum individual effective dose through the gaseous route was 1.9×10^{-3} mSv (taking into account the inhalation and ingestion pathways). When permeating into groundwater, the migration speed is slow. After discharge, the maximum effective dose of individuals will be 12.3 μ Sv after 100 a. **Conclusion** From the perspective of radiation environmental impact or economic benefits, it is feasible to discharge the purified wastewater containing Tritium by ecological means. Ecological emissions are an important route for inland nuclear facilities that lack water resources.

Key words: Wastewater Containing Tritium; Ecological Discharge; Purified; Environmental Impact

核设施运行产生的含氚废水通过净化处理后, 主要含有放射性核素氚; 向环境排放方式主要包括地表水体稀释排放和大气稀释排放两种途径。地表水体稀释排放主要通过江河湖泊的稀释排放和海洋稀释排放; 大气稀释排放主要通过自然蒸发或蒸腾等将废水变成水汽向环境排放。

氚是氢的同位素, 排放到环境中的氚可与氢交换, 随氢的循环在不同环境介质和生物体内迁移转化; 随着核能的不断发展, 氚向环境中排放量将不断

增加, 因此含氚废水的环境排放及生物学效应越来越引起关注^[1]。我国 GB 6249—2011 对核设施向环境排放氚的总量及稀释水体中氚的浓度均有相关的规定^[2]。

核电厂或核燃料后处理厂在运行过程中, 氚的排放量比较大, 而且氚不能通过常规的三废系统进行处理。内陆核设施液态流出物的受纳水体主要为内陆河流或湖泊、水库等, 这些水体对液态放射性流出物的稀释能力可能较沿海核电厂受纳水体(海洋)要小

得多,其排放方式可选用大气排放途径。将含氚废水通过植物蒸腾作用排入大气环境是一种生态排放方式;将处理后的含氚废水排放到指定的区域,同时利用一定的工程方案(植物修复)控制废水对环境的影响。在缺水的内陆地区,可以将含氚废水充分利用进行植物的绿化,同时也利用植被的蒸腾作用和地表的蒸发作用,达到含氚废水的排放目标。

目前利用生态方式排放含氚废水在我国还没有相关的案例,但国外在利用植物修复技术对含氚废水进行治理方面有过具体的工程实践。美国阿贡国家实验室利用植物修复技术对含氚废水进行了处理。研究显示大量的植物可以将土壤中的溶液通过根部转移到体内,并且将水分通过叶子以水的形式蒸发出去^[3]。氚化水会参与合成生物组织,部分会通过植物蒸发到空气中。另外美国萨凡纳河场址也利用植物修复技术对地下水中氚的污染进行治理。从 2003 年以来,通过两年的灌溉,这个灌溉系统消耗废水 94 635 294.6 L,通过池塘蒸发和森林蒸发蒸腾阻止了大约 4.44×10^{13} Bq 的氚进入河流^[4]。

本文利用某设施产生的净化后含氚废水,通过遴选当地的优势物种进行种植培养试验^[5],获取通过生态排放方式向环境中的氚排放量(通过植物蒸腾作用将含氚废水排放到大气中的量,同时有部分含氚废水会通过渗漏作用下渗到地下水);通过数值模式对该方式排放造成的大气途径和地下水途径的辐射环境影响进行评估。评估结果表明,相对于利用工程设施将含氚废水变成气体通过高架排放相比^[5],其辐射环境影响和工程代价分析均占有明显优势。本文主要对采用生态排放方式的辐射环境影响进行评估。

1 材料与方法

1.1 生态排放的源项

根据某实验厂址含氚废水生态排放实验研究成果^[5],含氚废水中 96% 的氚(以 HTO 的形式存在)通过植物蒸腾作用直接排放到大气中。废水中氚的放射性活度浓度为 1.98×10^{10} Bq/L,年处理废水量为 860 m³。因此每年通过植物蒸腾作用排放到大气中的 HTO 总活度为 1.6×10^{16} Bq。

废水中除了氚以外,其他核素的浓度为 40 Bq/L,根据含氚废水排放方式实验研究成果,约有 2.8% 的含氚废水会通过渗漏作用直接进入地下水,由于没有相关实验数据,本文假定其他核素也直接进入地下水,因此直接进入地下水中的氚及其他核素含量见表 1。

表 1 进入地下水中的氚及其他核素含量

核素	排放量Bq
³ H	4.8×10^{14}
⁹⁹ Tc	1.05×10^3
¹²⁹ I	3.30×10^6

1.2 大气途径的评价参数和方法

1.2.1 评价参数

该设施厂址所在区域属大陆性干旱气候,具有典型的大陆性气候特征,夏季干热而较短,冬季寒冷而较漫长,春季升温迅速。总的气候特点是:气候干燥降水少,蒸发强烈温差大,冬冷夏热日照长,秋凉春旱风沙多,气温日较差大,光照充足,多风沙。

根据厂址的气象观测统计结果,厂址的年均风速为 2.2 m/s。正常运行工况下计算采用的混合层高度值为:A、B 类稳定度为 1512 m, C 类稳定度为 751 m, D 类稳定度为 695 m。

收集该场址连续 5 年逐时气象观测数据并统计三维联合频率^[5]用于大气扩散计算。

设施厂址所在区域人口较少,厂址半径 5 km 范围内无常住人口,半径 15 km 范围内没有万人以上的城镇。最近的常住人口位于厂址 SE 方位 8.6 km 处,总计 20 余人。根据调查,当地的农作物种植较少,因此本文分别计算了考虑食入农产品与吸入内照射两种途径造成距离种植区边界不同距离不同方位的个人有效剂量和仅考虑吸入途径造成距离种植区边界不同距离不同方位的个人有效剂量。

1.2.2 评价方法

根据生态排放工程初步设计方案,种植面积设计为 40 m × 50 m 的矩形面源,总面积约为 2000 m²。

使用中国原子能科学研究院开发的核设施正常运行环境影响评价程序进行计算^[6]。大气扩散采用直线高斯烟羽模式,其基本计算公式如下

$$X(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中:

$X(x,y,z)$ 是点 (x,y,z) 处的空气中放射性核素浓度, Bq · m⁻³; x 为下风向距源的距离, m; y 为横截风向距离, m; z 为距离地面的高度, m; Q 为放射性核素的释放速率, Bq · s⁻¹; σ_y 为横向扩散参数, m; σ_z 为纵向扩散参数, m; u 为有效排放高度处的风速, m · s⁻¹; h 为

有效排放高度, m。

对于年均长期扩散因子计算, 需考虑风摆效应、天气频率分布等的影响。年均长期扩散因子由下式(2)计算:

$$\left(\frac{\bar{X}}{Q}\right)_i = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{n}{2\pi x} \sum_{j=1}^6 \frac{\exp(-h^2/2\sigma_{zj}^2)}{\sigma_{zj}} \left(\frac{cP_{ij}}{0.5} + \sum_{k=2}^m \frac{wP_{ijk}}{u_{jk}} \right) \quad (2)$$

式中: cP_{ij} 是 i 风向 j 稳定度的静风频率; wP_{ijk} 是 i 风向 j 稳定度 k 风速级的天气频率; u_{jk} 是 j 稳定度下 k 风速级的平均风速, m/s。

对于远距离输送, 烟羽将受到混合层顶盖的反射, 需要考虑混合层的影响, 因此通常假定在 $x > 2x_L$ (x_L 是对应于 $(L_{MJ} - h)/2.15$ 时的下风向距离) 时, 烟羽浓度在混合层内垂直方向上达到的均匀分布。此时, 长期扩散因子由下式(3)计算:

$$\left(\frac{\bar{X}}{Q}\right)_i = \frac{8}{\pi x} \sum_{j=1}^6 \frac{1}{L_{MJ}} \left(\frac{cP_{ij}}{0.5} + \sum_{k=2}^m \frac{wP_{ijk}}{u_{jk}} \right) \quad (3)$$

式中, L_{MJ} 是 j 稳定度时的混合层高度, m。

对于 $x_L < x < 2x_L$ 处的 $(X/Q)_i$, 可由 $x = x_L$ 和 $x = 2x_L$ 内插值得到。

对于矩形面源, 采用数值积分的方式进行面源计算^[6]。

对环氟在环境中的迁移转化及剂量计算考虑 HTO 和 OBT 的影响^[7-8]。

1.3 地下水途径的评价参数和方法

1.3.1 评价参数 根据设施厂址区域水文地质参数的调查结果, 具体计算参数见表 2。

表 2 地下水计算参数

有效孔隙度	土壤容重/ (g/cm ³)	平均流 速/(m/s)	含水层平均 厚度/m	纵向弥 散度/m	横向弥 散度/m
0.53	1.44	4.63×10^{-7}	40	50	5

根据场址周围居民利用地下水的实地调查结果, 距厂址中心约 4.7 km 处会少量开采地下水, 供临时居住人员相关生活用水, 不存在大量开采地下水。每人每年饮用地下水量约 2 m³ 进行剂量估算。

1.3.2 评价方法 地下水评价采用二维解析模式, 采用中国原子能科学研究院自主研发的地下水环境辐射影响评价系统计算^[9], 其基本计算方法如下:

下式为定水流、线性吸附的控制方程。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v' \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + \frac{I}{\eta_e R} \quad (4)$$

其中, η_e 是有效孔隙度, R 是滞留系数, λ 是衰变常数(s^{-1}), v' 是该核素在地下水等效流速(m/s)满足

$$v' = \frac{v}{R} \quad (5)$$

其中 v 是地下水流速(m/s), D'_i 是第 i 方向的等效扩散系数(m^2/s)满足

$$D'_i = \frac{D_i}{R} \quad (6)$$

其中 D_i 满足

$$\begin{aligned} D_x &= \alpha_L v + D^* \approx \alpha_L v = D_L \\ D_y &= \alpha_T v + D^* \approx \alpha_T v = D_T \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\alpha_{L,T}$ 是纵向和横向弥散度(m)。

对于均匀面源恒定注入

$$C(x, y) = \frac{\omega_0}{2\pi\eta_e H \sqrt{D_x D_y}} \iint_S \exp\left(\frac{x-x'}{B}\right) K_0\left(\frac{r'}{B}\right) dx' dy' \quad (8)$$

其中, ω_0 为 S 内平均通量($Bq/s \cdot m^2$)

$$r' = \sqrt{\left((x-x')^2 + \frac{D_x}{D_y}(y-y')^2\right) \left(1 + \frac{2B\lambda R}{v}\right)} \quad (9)$$

地下水途径造成的剂量影响, 主要考虑直接饮用地下水造成的剂量, 用下式计算:

$$D_{Ai}^a = g_D^a u_p^a C_p^i \quad (10)$$

式中:

g_D^a : 为放射性核素的食入内照射剂量转换因子,

Sv/Bq;

u_p^a : 每年引用水量, L/a;

C_p^i : 为地下水中放射性核素浓度, Bq/L

2 结果

2.1 大气途径造成的辐射影响 通过计算, 距离种植区边界不同距离处空气中氚的浓度变化见图 1。从

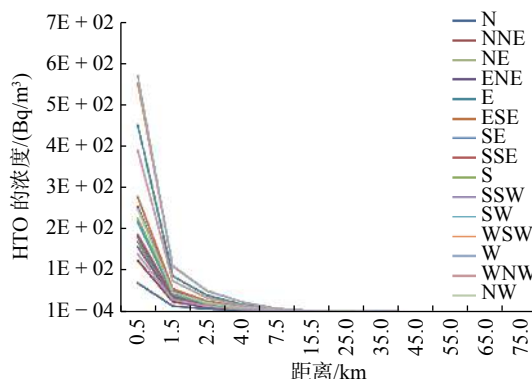


图 1 不同距离不同方位大气中 HTO 的浓度

图 1 可以看出,随着距离的增加,大气中 HTO 的浓度是逐渐降低的。在距离边界 4 km 处,基本接近于环境中的平均本底水平。

根据目前的人口分布情况,厂址半径 10 km 范围内的常驻居民点主要由三处,而且这些居民基本为养护工,很少自己种植农作物,因此,本文也分别计算了(1)考虑食入农产品与吸入内照射两种途径造成的个人有效剂量和(2)仅考虑吸入途径造成的个人有效剂量。

考虑吸入和食入农产品两种途径后,个人剂量为 1.9×10^{-3} mSv。如果仅考虑吸入途径,最大个人剂量为 5.8×10^{-4} mSv。

因此含氚废水通过生态排放 95% 以上的源项都

将通过地面蒸发或植物蒸腾排放到大气中,形成了一个天然的有序的“低架排放设施”,从气态途径辐射剂量影响角度来看,造成的辐射环境影响较小。

2.2 地下水途径造成的辐射影响 根据厂址地下水参数及释放源项,计算年排放后短期(10 年)、中期(100 年)及长期(1000 年)不同年度造成的影响。

表 3 为放射性核素进入地下水后,在不同时间点,不同距离处在地下水中的活度浓度,从表 3 可以看出,不同核素由于其迁移特性不一样,在不同距离处出现的时间也不一样。从表中可以看出,距离排放点 5 km 处,氚在排放第 200 年才开始出现,其初始浓度达到几十 Bq/m³。

表 3 放射性核素在不同时间点不同距离处地下水中的浓度

单位: Bq/m³

距离	1 km			2 km			5 km	
核素	³ H	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	³ H	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	³ H	⁹⁹ Tc
第50年	22.4	1.11×10^{-4}						
第100年	3.42×10^5	4.9×10^{-3}		4.9×10^{-8}	1.5×10^{-5}			
第200年	2.04×10^5	1.3×10^{-2}		5.72	2.3×10^{-2}		24.6	
第300年	1.3×10^3	7.4×10^{-4}		21.3	1.6×10^{-2}		143	
第400年	2.57	1.75×10^{-5}	0.012	1.01	1.5×10^{-3}	6.3×10^{-21}	0.59	5.2×10^{-4}
第500年	3.11×10^{-3}	3.24×10^{-7}	0.3	8.3×10^{-3}	6.3×10^{-5}	4.1×10^{-15}	1.5×10^{-4}	7.7×10^{-3}
第600年	2.93×10^{-6}	5.23×10^{-9}	0.3	2.8×10^{-5}	1.8×10^{-6}	2.8×10^{-11}	1.7×10^{-4}	1.1×10^{-2}
第700年	1.12×10^{-8}	7.8×10^{-11}	0.68	4.4×10^{-6}	3.9×10^{-8}	1.4×10^{-8}	7.9×10^{-4}	3.8×10^{-3}
第800年	1.2×10^{-8}	1.1×10^{-12}	1.89	5.6×10^{-6}	7.5×10^{-10}	1.4×10^{-6}	2.4×10^{-3}	5.8×10^{-4}

表 4 为放射性核素在不同距离处,不同时间点造成的有效剂量。从表 4 可以看出,放射性核素由于渗漏作用对地下水造成的影响是非常小的,即使在距离厂址最近的 1 km 处,假定取用地下水直接饮用,也需要约 50 年的时间才能造成影响,在第 100 年时造成

剂量影响最大为 12.3 μSv,其影响是非常小的。造成影响很小的主要原因是由于该地区气候干燥,厂址区第四系覆盖层较薄,基岩埋深浅,地下水为基岩裂隙水,主要赋存于基岩裂隙中,呈脉状或支脉状分布,互相不连通,无统一地下水位,且水量贫乏。

表 4 放射性核素在不同时间点不同距离造成的有效剂量

单位: μSv/a

距离	1 km			2 km			5 km	
核素	³ H	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	³ H	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	³ H	⁹⁹ Tc
第50年	8.1×10^{-4}	1.4×10^{-7}						
第100年	12.3	6.3×10^{-6}		1.8×10^{-12}	2.0×10^{-8}			
第200年	7.32	1.7×10^{-5}		2.1×10^{-4}	3.0×10^{-5}		8.9×10^{-4}	
第300年	4.7×10^{-2}	9.5×10^{-7}		7.7×10^{-4}	2.0×10^{-5}		5.2×10^{-3}	
第400年	9.3×10^{-5}	2.3×10^{-8}	2.6×10^{-3}	3.7×10^{-5}	2.0×10^{-6}	1.4×10^{-21}	2.1×10^{-5}	6.7×10^{-7}
第500年	1.1×10^{-7}	4.2×10^{-10}	6.8×10^{-2}	3.0×10^{-7}	8.0×10^{-8}	8.9×10^{-16}	5.5×10^{-9}	9.8×10^{-6}
第600年	3.7×10^{-13}	6.7×10^{-12}	6.8×10^{-2}	1.2×10^{-10}	2.3×10^{-9}	6.1×10^{-12}	6.3×10^{-9}	1.4×10^{-5}
第700年	4.0×10^{-13}	8.0×10^{-14}	0.15	1.6×10^{-10}	5.1×10^{-11}	3.1×10^{-9}	2.8×10^{-8}	4.8×10^{-6}
第800年	4.2×10^{-13}	1.5×10^{-15}	0.42	2.0×10^{-10}	9.6×10^{-13}	3.0×10^{-7}	8.6×10^{-8}	7.5×10^{-7}

3 讨论

通过本文研究,将净化后的含氚废水通过植物蒸腾作用排放,形成了一个天然的“低架排放设施”,对环境的影响很小。而且对于内陆的干旱地区,通过培育植物也能改善当地的自然环境,在技术、经济和生态效益方面具有优势^[10]。因此,将含氚废水通过生态方式排放将对水资源环境相对缺乏厂址的一个重要排放方式。

参考文献

- [1] 张蒙,崔凤梅,涂戡,等.氚水的环境排放及生物学效应研究进展[J].中国辐射卫生,2018,27(4):302-305.
- [2] 中华人民共和国环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. GB 6249—2011 核动力厂环境辐射防护规定[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [3] Negri, M. C.; Hinchman, R. R. & Gatliff, E. G., Phytoremediation: Using Green Plants to Clean Up Contaminated Soil, Groundwater

and Wastewater[R], Argonne National Laboratory, 1996.

- [4] Negri M C, Gopalakrishnan G, Hamilton C. 317/319 phytoremediation site monitoring report-2003 growing season.[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. DOI: 10.2172/960345.
- [5] 中国原子能科学研究院.含氚废水排放综合研究报告[R].北京,2016.
- [6] 中国原子能科学研究院.核设施正常运行辐射环境影响评价程序使用手册—大气途径[R].北京,2018.
- [7] IAEA. IAEA TRS NO. 472: Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments[M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.
- [8] Murphy C E Jr. The relationship between tritiated water activities in air, vegetation and soil under steady-state conditions[J]. Health Phys, 1984, 47(4): 635-639.
- [9] 中国原子能科学研究院.核设施正常运行辐射环境影响评价程序使用手册—地下水途径[R].北京,2018.
- [10] 刘华.中国原子能科学研究院含氚废水的最优化处置[J].辐射防护,1989,9(3):162-176.

收稿日期:2020-04-12 责任编辑:李海亮

(上接第 549 页)

线缆走线,就必须合理走线,避免大面积的环路存在。

距离防护:汽车内电磁场最大值都出现在各监测位置的脚部,整体呈现监测高度越高强度越低的趋势,增加人体与汽车地板的距离,将会对汽车内电磁场明显降低。

屏蔽防护:汽车金属壳体对电磁场有明显的屏蔽作用,一些明显的干扰源(电机、电池、线缆等)应避免放置在驾驶舱内,并加强汽车地板屏蔽,优化地板材料的屏蔽效果。

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19596—2004电动汽车术

语[S].北京:中国标准出版社,2004.

- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31466—2015 电动汽车高压系统电压等级[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [3] 何楚琦,王月,龙鼎新.电磁辐射对中枢神经系统的影响及机制[J].中国辐射卫生,2017,26(03):381-384.
- [4] 陈青松,李涛,黄汉林,等.极低频电磁场职业接触限值研究概况[J].中国职业医学,2011,38(1):72-74.
- [5] 武建刚,徐立.电动车辆电磁场辐射骚扰测试方法[J].安全与电磁兼容,2005,17(2):30-33.
- [6] 广东省质量技术监督局. DB 44/T1472—2014电动汽车电磁污染限值与测量方法[S].广州:广东省质量技术监督局,2014,12.
- [7] 李祥明,汪梦田,王蕾.电磁环境监测与评价有关问题的探讨[J].中国辐射卫生,2016,25(5):608-611.
- [8] 常书惠.电磁辐射与防护[J].科技信息,2013,30(25):277.

收稿日期:2020-04-13 责任编辑:李海亮