

用于导出核设施退役场址土壤中 残留放射性水平的照射景象、计算模式与参数

国家核安全局

前 言

国家核安全局历来高度重视并大力推进核与辐射安全法规的制修订工作。核与辐射安全法规包括法律、行政法规、部门规章、导则和技术文件。技术文件作为国家核安全局核与辐射安全监管的指导性文件，一般是借鉴国外经验和我国核设施工程实践而编制。

为配合国家标准《核设施退役场址土壤中残留放射性可接受水平》（GB 45437-2025）的制定、发布及实施，编制本技术文件，用以说明导出土壤中残留放射性水平的工作流程。

借鉴国内外相关资料，如《推导退役后场址土壤中放射性残存物可接受活度浓度的照射情景、计算模式和参数》（EJ/T 1191-2005）、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2018）、美国阿贡实验室《RESRAD 用户手册第 6 版》（User's Manual for RESRAD Version 6），并结合我国核设施退役工程和管理实践，本技术文件给出了核设施退役场址土壤中残留放射性水平导出的技术路线。根据《中华人民共和国土壤污染防治法》，确定了核设施退役后不同的土地利用类型和开放景象，给出了主要照射途径和参数选取，并以附录的形式给出剂量模式和示例计算。同时，本技术文件强调特征参数对于导出土壤中残留放射性水平具有较大的不确定性，在剂量估算时应予以关注。

本技术文件可供我国核设施退役营运单位、设计单位及环境影响报告书编制单位有关人员导出具体开放景象的土壤中残留放射性水平参考使用。

本技术文件编制单位是生态环境部核与辐射安全中心。

目 录

一、 概述	5
二、 开放景象	6
三、 照射途径	6
四、 参数选取	7
附录 1 剂量模式	8
1.1 总剂量和残留放射性水平	8
1.2 食入食物产生的有效剂量	8
1.3 吸入再悬浮污染物产生的有效剂量	10
1.4 饮水途径产生的有效剂量	11
1.5 地表外照射产生的有效剂量	13
1.6 摄入土壤产生的有效剂量	13
1.7 特殊核素的途径模式	14
1.7.1 H-3 途径模式	14
1.7.2 C-14 途径模式	16
附录 2 示例计算	21
2.1 照射途径分析	21
2.2 剂量准则	21
2.3 计算参数的选取	21
2.4 示例计算	22
2.4.1 示例计算——Co-60	22
2.4.2 示例计算——H-3	25
2.4.3 示例计算——C-14	29

一、概述

本技术文件作为《核设施退役场址土壤中残留放射性可接受水平》（GB45437-2025）的配套文件，主要说明了退役场址土壤中残留放射性水平的一般工作程序（见图1），该程序明确了退役场址在单一核素污染情况下土壤中残留放射性水平的推导过程，包括开放景象、照射途径和参数选择，并以附录形式给出了剂量模式和示例计算。

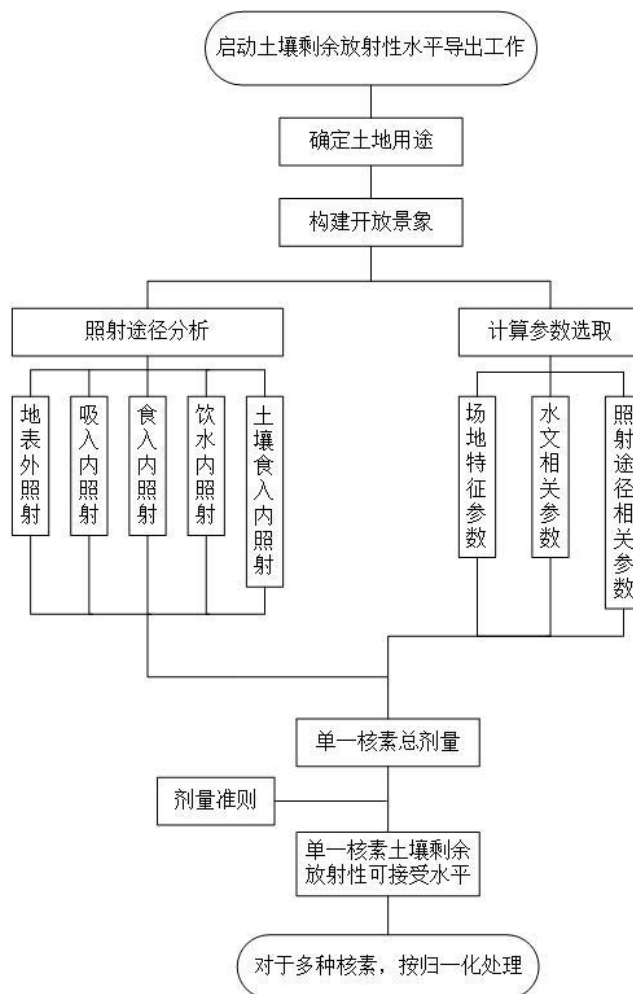


图1 导出退役场址土壤中残留放射性水平的工作流程

2019年颁布的《中华人民共和国土壤污染防治法》规定，按照土地用途，制定国家土壤污染风险管控标准，加强土壤污染防治标准体系建设。因此，根据土地用途构建退役终态场址开放景象是分析照射途径的前提。在分析照射途径时，要考虑该场址区域的自然条件和社会环境特征以及当地政府的经济发展规划，分析每种可能的照射途径，并选取合理的计算参数，以及尽可能选取实测数据。这些参数既包括场址土壤特征参数（污染面积、污染层厚度等），也包括公众相关

参数（个人呼吸率、饮水量、居民食谱、土壤摄入量等）。

根据已构建的退役场址开放景象，分析得出需要考虑的照射途径，选取适当的计算参数，计算得出单一核素的总有效剂量。再由退役终态剂量准则除以单一核素的总有效剂量，得出单一核素的土壤残留放射性水平。对于多种放射性核素的情况，应按照归一化处理。核素筛选不属于本技术文件的内容。

二、 开放景象

核设施退役终态土地用途的确定，是构建退役后场址开放景象的前提。退役终态具体的场址开放景象与土地用途紧密相关。对于不同的土地用途，其场址的开放景象也各有不同。核设施退役后的土地用途可分为农用地和建设用地两大类。

对于农用地，可分为耕地、林地、草地、农田水利用地、养殖水面等。

对于建设用地，可分为城乡住宅和公共设施用地、工矿用地、交通水利设施用地、旅游用地、军事设施用地等。

三、 照射途径

核设施退役终态总有效剂量等于退役终态土地利用情景下的各种照射途径产生的剂量的总和。对于具体的核设施退役项目，其退役终态土地开放景象一般是确定的，通过分析开放景象，可以得出所有相关的照射途径。

不同的退役终态土地开放景象，其照射途径虽然各有不同，但大多不会超出以下几种照射途径，一般是其中一种或几种的组合：1）地表沉积外照射；2）吸入再悬浮土壤颗粒物的内照射；3）食入与污染土壤有关食物的（包括蔬菜、谷物、奶类、肉类等）内照射；4）饮用退役场址附近地下水的内照射；5）摄入污染土壤内照射。各种照射途径的计算模式见附录 1。公式（1.1.1）是考虑各种照射途径的总有效剂量。公式（1.1.2）是导出单一核素的残留放射性水平。

对于不同类型的土地用途，其人类活动类型和受照时间也有所不同。构建具体的开放景象时，需考虑人类的具体活动类型和在退役场址上的居留时间，进而分析可能的照射途径。根据土地利用类型和人类活动，将开放景象分为以下几种：

对于直接涉及农业耕种的人类长期活动的农用地开放景象，如水田、果园、茶园、种植园地等。在分析照射途径时，需要考虑农业灌溉所用水源是否来自当地的井水或场址区域的地下水。场址附近公众食入的食物（谷类、蔬菜、牛奶、肉类等）以及饮水是否来自退役场址范围内。照射途径至少包括地表沉积外照射、

吸入再悬浮土壤颗粒物的内照射、食入与污染土壤有关食物的内照射、饮用退役场址范围地下水的内照射、摄入土壤内照射。

对于仅涉及人类短期活动的农用地开放景象，如乔木林地、竹林地、人工牧草地等。需要考虑特定的受照人群组，如护林员、草地养护员。照射途径至少包括地表沉积外照射、吸入再悬浮土壤颗粒物的内照射、摄入土壤内照射。这种仅涉及人类短期活动的场址开放景象与农业耕种开放景象还是有区别的，例如人类活动的居留时间。

对于涉及建造建筑物的建设用地开放景象，如农村宅基地、中小学用地、医疗卫生用地、社会福利设施用地、社区公园等。在分析照射途径时，需要考虑成人和儿童存在长期的照射风险。照射途径至少包括地表沉积外照射、吸入再悬浮土壤颗粒物的内照射、摄入土壤内照射。

对于涉及工业用地的建设用地开放景象，如物流仓储用地、商业服务业设施用地、道路与交通设施用地、公共设施用地、绿地与广场用地等。在分析照射途径时，主要考虑成人存在长期照射风险。照射途径至少包括地表沉积外照射和吸入再悬浮土壤颗粒物的内照射。

四、 参数选取

根据核设施退役后的土地用途，构建退役场址的开放景象，确定退役终态的剂量准则，尽可能采用场址相关参数的实测值（即场址特征参数）导出具体场址的土壤中残留放射性水平。导出土壤中残留放射性水平的相关特征参数见附录 1 的表 1。表 1 中所列参数应尽可能采用实际测量数据。

附录 2 中分别给出了 Co-60、H-3、C-14 的示例计算过程和结果，这是在假设的开放景象和相关参数基础上的简化计算。示例计算的目的是为了演示公式及参数的选取和应用方法，不针对退役实际场址。

附录 1 剂量模式

1.1 总剂量和残留放射性水平

对于单一核素照射剂量估算, 总有效剂量等于在土壤污染水平为 1Bq/g 情况下该种核素对个人所产生的各种照射途径的剂量的总和。

$$D_{\text{tot}} = D_{\text{ing}} + D_{\text{inh}} + D_{\text{dw}} + D_{\text{ext}} + D_{\text{soil}} \dots \dots \dots (1.1.1)$$

式中: D_{tot} ——土壤中单一核素的总有效剂量, Sv/a;

D_{ing} ——通过食入受污染食物途径产生的有效剂量, Sv/a;

D_{inh} ——吸入再悬浮污染物产生的有效剂量, Sv/a;

D_{dw} ——通过饮水途径产生的有效剂量, Sv/a;

D_{ext} ——地表外照射产生的有效剂量, Sv/a;

D_{soil} ——通过摄入受污染土壤产生的有效剂量, Sv/a。

对于单一放射性核素, 其残留放射性水平如下所示:

$$G_i = G_0 \times H_e / D_{\text{tot}} \dots \dots \dots (1.1.2)$$

式中: G_i ——土壤中单一核素的残留放射性水平, Bq/g;

G_0 ——土壤中单一核素的土壤污染水平, Bq/g;

H_e ——核设施退役场址的剂量准则, Sv/a;

D_{tot} ——土壤中单一核素的总有效剂量, Sv/a。

1.2 食入食物产生的有效剂量

对于污染食物的食入, 一般考虑以下四种情形: 谷物、蔬菜、肉类、奶类。

$$D_{\text{ing}} = (L_p + L_g + L_m + L_f) \times DF_{\text{ing}} \dots \dots \dots (1.2.1)$$

式中: D_{ing} ——食入受污染食物产生的有效剂量, Sv/a;

$L_p = U_p \cdot c_p$ ——通过谷物途径每年摄入的核素的量, Bq/a;

$L_g = U_g \cdot c_g$ ——通过蔬菜途径每年摄入的核素的量, Bq/a;

$L_f = U_f \cdot c_f$ ——通过肉类途径每年摄入的核素的量, Bq/a;

$L_m = U_m \cdot c_m$ ——通过奶类途径每年摄入的核素的量, Bq/a;

U_p 、 U_g 、 U_f 、 U_m ——个人每年摄入的不同类别食物的量, g/a;

c_p 、 c_g 、 c_f 、 c_m ——不同类型食物中的放射性核素浓度, Bq/g;

DF_{ing} ——食入内照射剂量转换因子, Sv/Bq。

公众摄入陆生动植物所致有效剂量与所摄入当地谷物、蔬菜、肉类和牛奶的消费量、食用当地动植物的份额、食物内放射性核素的含量及公众个人摄入放射性核素 i 的有效剂量转换因子 DF_{ing} 有关。该值一般可取自我国电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB18871-2002）中的表 6。

对于具体的退役项目来说，谷物、蔬菜、牛奶、肉类等居民食谱相关数据与核设施退役场址所在地域及其自然社会条件关系紧密。因此，对于核设施退役终态场址涉及食入途径的开放景象，居民食谱一般考虑采用场址周边实际调查数据。对于不同类型食物中的放射性核素浓度，分别计算如下：

（1）谷物中的核素浓度

$$c_p = (B_p \times c_v \times d) / \rho \dots \dots \dots (1.2.2)$$

式中： c_p ——核素在谷物的浓度，Bq/g；

B_p ——核素在谷物中的浓集因子，(Bq/kg) / (Bq/kg_{干土壤})；

c_v ——核素在土壤中的体积浓度，Bq/cm³；

d ——根系层厚度，cm；

ρ ——根系层区干性土壤“有效”密度，g/cm²。

其中，核素在受污染谷物的浓集因子 B_p 和核素在受污染蔬菜的浓集因子 B_g 都是需要试验得出的数据。如缺少现场试验，可参考美国橡树岭研究所 1984 年出版的《关于放射性核素环境释放农业迁移评价参数的综述与分析》技术报告（ORNL-5786, A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture），查找相关核素的浓集因子。

根系层区干性土壤“有效”密度是指到根带深度的每平方厘米的土壤质量。我国土壤类型较多，主要土壤类型可概括为红壤、棕壤、褐土、黑土、栗钙土、漠土、潮土、灌淤土、水稻土、湿土、盐碱土、岩性土及高山土等， ρ 的取值主要由现场试验计算得出。如缺少现场试验，可取 2.25E+01~2.65E+01g/cm²。

（2）蔬菜中的核素浓度

$$c_g = (B_g \times c_v \times d) / \rho \dots \dots \dots (1.2.3)$$

式中： c_g ——核素在蔬菜的浓度，Bq/g；

B_g ——核素在蔬菜中的浓集因子，(Bq/kg) / (Bq/kg_{干土壤})；

c_v ——核素在土壤中的体积浓度, Bq/cm³;
 d ——根系层厚度, cm;
 ρ ——根系层区干性土壤“有效”密度, g/cm²。

(3) 肉中的核素浓度

$$c_f = c_{fd} \times F_f \times Q_f \dots \dots \dots (1.2.4)$$

式中: c_f ——肉中的放射性核素浓度, Bq/g;

c_{fd} ——饲料中的放射性核素浓度, Bq/g;

F_f ——核素在肉中的浓集因子, d/kg;

Q_f ——饲料摄入量, kg/d。

核素在肉中的浓集因子和核素在奶中的转移因子都需要试验得出的数据。如缺少现场试验, 可参考相关的文献值, 如美国萨凡纳河实验室关于评估萨凡纳河废物处理设施对人类健康影响的方法和参数的研究报告 (Methodology and Parameters for Assessing Human Health Effects for Waste Sites at the Savannah River Plant, DPST-86298)。

饲料中的放射性核素浓度 c_{fd} 也是需要试验得出的数据。如缺少现场试验, 可参考相关的技术报告 (ORNL-5786) 中的蔬菜浓集因子 B_g , 采用公式 (1.2.3) 计算得出。

(4) 奶中的核素浓度

$$c_m = c_{fd} \times F_m \times Q_t / \rho_m \dots \dots \dots (1.2.5)$$

式中: c_m ——奶中放射性核素浓度, Bq/g;

c_{fd} ——饲料中的放射性核素浓度, Bq/g;

F_m ——核素在奶中的转移因子, d/L;

Q_t ——奶牛每天摄入饲料量, kg/d;

ρ_m ——奶的密度, kg/L。

其中, 牛奶的密度一般取 1.015~1.040kg/L。

1.3 吸入再悬浮污染物产生的有效剂量

$$D_{inh} = C_v \times A_i \times U_b \times DF_{inh} \dots \dots \dots (1.3.1)$$

式中: D_{inh} ——吸入再悬浮途径产生的有效剂量, Sv/a;

c_v ——核素在土壤中的活度浓度, Bq/g;

A_i ——再悬浮的空气中尘埃的浓度， g/m^3 ；

U_b ——个人呼吸率， m^3/a ；

DF_{inh} ——吸入内照射剂量转换因子， Sv/Bq 。

在吸入再悬浮途径的剂量估算中，主要是确定再悬浮的空气中尘埃的浓度（ A_i ）、个人呼吸率（ U_b ）、吸入剂量转换因子（ DF_{inh} ）。其中， DF_{inh} 直接影响计算结果的大小，一般有两种取值方法。一是比较 F、M、S 三个类别和年龄组的数值。为了保守起见，选取大者；二是该值一般取自我国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的表 5。

由于不同场址所在地区及自然条件的差异， A_i 的取值也差异较大，建议采用场址实测数据。 U_b 取值差别较大，建议采用当地特定的受照人群组的实测数据。

1.4 饮水途径产生的有效剂量

$$D_{dw} = c_{dw} \times U_{dw} \times DF_{ing} \dots \dots \dots (1.4.1)$$

式中： D_{dw} ——饮水途径产生的有效剂量， Sv/a ；

c_{dw} ——核素在水中的浓度， Bq/L ；

U_{dw} ——个人饮水量， L/a ；

DF_{ing} ——食入内照射剂量转换因子， Sv/Bq 。

在饮水途径的剂量估算中，核素在水中的浓度有多种计算方法。这里 c_{dw} 的计算采用较为保守的最小稀释倍数法。该方法先求出最小稀释倍数，再由初始浓度计算得出下游方向 x 距离处地下水核素的最大浓度。假定井位距释放点 100m。

$$c_{\max}(x, t) = c_0(0, 0) / D_{\min} \dots \dots \dots (1.4.2)$$

式中： $c_{\max}(x, t)$ ——t 时刻，下游 x 米处的最大浓度， Bq/cm^3 ；

$c_0(0, 0)$ ——在 $t=0$ ， $x=0$ 时，核素在水中的初始浓度， Bq/cm^3 ；

D_{\min} ——t 时刻，下游 x 米处的最小稀释倍数。

其中，污染场址地下水中放射性核素的初始浓度可通过下式进行计算：

$$c_0(0, 0) = \frac{R_i(t)}{I \times A} \dots \dots \dots (1.4.3)$$

$$R_i(t) = c_i \times L_i \times \rho \times A \times T \dots \dots \dots (1.4.4)$$

式中： $R_i(t)$ ——核素由土壤向地下水的释放速率， Bq/a ；

I ——入渗量， cm/a ；

c_i ——核素在土壤中的活度浓度， Bq/g ；

L_i ——核素 i 的浸出率, a^{-1} ;
 ρ ——污染土壤层的总体土壤密度, g/cm^3 ;
 A ——污染场址面积, cm^2 ;
 T ——污染土壤层深度, cm 。

垂直混合程度 φ 可表示为:

$$\varphi = \frac{b^2}{\alpha_T \times x} \dots\dots\dots (1.4.5)$$

式中: b ——含水层厚度, cm ;
 α_T ——横向弥散度, cm ;
 x ——释放点到下游的距离, cm 。

对于 D_{min} 的计算, 需要考虑三种区域含水层, 具体如下:

$$D_{min} = R_d 4\pi n_e \frac{\sqrt{a_L a_T x b}}{V_T} \exp(\lambda t) \quad (\varphi < 3.3) \dots\dots\dots (1.4.6)$$

$$D_{min} = R_d 4\pi n_e \frac{\sqrt{a_L a_T x b}}{V_T F(\varphi)} \exp(\lambda t) \quad (3.3 \leq \varphi \leq 12) \dots\dots\dots (1.4.7)$$

$$D_{min} = \frac{R_d (4\pi x)^{3/2} n_e \sqrt{a_L a_T^2}}{V_T F(\varphi)} \exp(\lambda t) \quad (\varphi > 12) \dots\dots\dots (1.4.8)$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b}{n_e} \times K_d \dots\dots\dots (1.4.9)$$

式中: R_d ——滞后系数;
 ρ_b ——土壤的总体土壤密度, g/cm^3 ;
 n_e ——有效孔隙度;
 V_T ——液体源项体积, cm^3 ;
 α_L ——纵向弥散度, cm ;
 α_T ——横向弥散度, cm ;
 x ——释放点到下游的距离, cm 。
 b ——含水层厚度, cm ;
 π ——圆周率;
 K_d ——核素的分配系数, ml/g ;
 t ——迁移时间, a ;
 λ ——放射性核素衰变常数, a^{-1} 。

其中, $\alpha_L = D_L/U$, $\alpha_T = D_T/U$, $t = \frac{x}{U} \cdot K_d$

式中： D_L ——纵向弥散系数， cm^2/s ；

D_T ——横向弥散系数， cm^2/a ；

U ——地下水孔隙流速， cm/a 。

混合因子 $F(\varphi)$ 是关于 φ 的函数，见下式：

$$F(\varphi) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{\varphi}\right) \dots\dots\dots (1.4.10)$$

式中： n ——无穷级数；

π ——圆周率；

φ ——垂直混合程度；

1.5 地表外照射产生的有效剂量

在地表外照射途径的剂量估算中，假设放射性核素在退役场址土壤中沿深度方向均匀分布。

$$D_{\text{ext}} = c_i \times F_c \times DF_{\text{ext}} \dots\dots\dots (1.5.1)$$

式中： D_{ext} ——地表外照射产生的有效剂量， Sv/a ；

c_i ——核素在土壤中的活度浓度， Bq/g ；

F_c ——占有屏蔽因子；

DF_{ext} ——外照射剂量转换因子， $(\text{Sv}/\text{a}) / (\text{Bq}/\text{g})$ 。

其中，外照射剂量转换因子 (DF_{ext}) 和占有屏蔽因子 (F_c) 都是需要关注的计算参数。 DF_{ext} 可参考美国联邦导则 12 号报告的数据，也可利用 M-C 方法计算得出。占有屏蔽因子是指公众人员在退役场址的室外停留时间和室内停留时间的比例。例如公众全年有 50% 的时间在室内，室内的剂量率为室外无限大区域上剂量率的 0.7 倍。同时假设室外污染区的停留时间为 25%，室外非污染区的停留时间为 25%。因此， $F_c = 0.5 \times 0.7 + 0.25 = 0.6$ 。

1.6 摄入土壤产生的有效剂量

$$D_{\text{soil}} = FSI \times FO \times FA \times c_i \times DF_{\text{ing}} \dots\dots\dots (1.6.1)$$

式中： D_{soil} ——摄入土壤产生的有效剂量， Sv/a ；

FSI ——土壤年摄入量， g/a ；

FO ——居留系数；

FA ——面积修正系数；

c_i ——核素在土壤中的活度浓度， Bq/g ；

DF_{ing}——食入内照射剂量转换因子，Sv/Bq。

面积修正系数 FA 可由下式计算：

$$FA = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{A+DL}} \dots\dots\dots (1.6.2)$$

式中：A——污染区域的面积，m²；

DL——被清洁空气稀释的空间长度，m。

其中，DL 与风速、混合层高度、再悬浮率和可悬浮的微尘层厚度有关，其几何平均值缺省值可取 3m。

对于居留系数 FO，根据场址开放景象计算得出。例如假设室内停留时间 50%，此时室内微尘浓度是室外浓度的 40%。同时假设，室外污染区的停留时间为 25%，室外非污染区的停留时间为 25%。因此，FO=0.5×0.4+0.25=0.45。

1.7 特殊核素的途径模式

1.7.1 H-3 途径模式

(1) 土壤水中的 H-3

平衡条件下，土壤水中 H-3 的浓度公式如下：

$$W_{H-3}^{cz} = \frac{\rho_b^{cz} \times S_{H-3}}{\theta^{cz} \times R_d^{cz}} \dots\dots\dots (1.7.1)$$

式中：W_{H-3}^{cz}——污染土壤水中 H-3 浓度，Bq/m³；

ρ_b^{cz}——污染土壤层总体土壤密度，g/m³；

S_{H-3}——污染土壤中 H-3 浓度，Bq/g；

θ^{cz}——污染带容积水含量；

R_d^{cz}——H-3 在污染带内的阻滞系数。

(2) 空气中的 H-3

被 H-3 污染的土壤上方空气的 H-3 浓度，受到来自地表的 H-3 释放率、环境和气象因素以及位置等的影响。

对于有限大的污染场址（面积 A），空气中平衡 H-3 浓度采用近似公式来估算。相对于由土壤释放的水气，忽略了保存在植物中的少量水气，计算公式如下：

$$C_{H-3, a} = \frac{3.17E-08 \times 0.5 \times EVSN \times \sqrt{A}}{H_{mix} \times U} \dots\dots\dots (1.7.2)$$

式中：C_{H-3, a}——有限大场址空气中 H-3 的平均平衡浓度，Bq/m³；

3.17E-08——单位换算系数，a/s；

0.5——风向吹向接受者的时间份额，无量纲；

EVS_N——来自污染地面的 H-3 通量（溢出率），Bq/m²·a；

A——污染区面积，m²；

H_{mix}——H-3 蒸气均匀混合的高度，m；

U——年平均风速，m/s。

对 HTO，EVS_N 根据水平衡方程的计算公式如下：

$$EVS_N = W_{H-3}^{CZ} \times E_t \dots \dots \dots (1.7.3)$$

式中：W_{H-3}^{CZ}——污染土壤水中 H-3 浓度，Bq/m³；

E_t——蒸发率，m/a；

（3）食物中的 H-3

对于生长在污染区的植物中的 H-3 浓度的估算，是基于假定土壤中的 H-3 向植物的转移遵循土壤中的氢向植物的转移模式：

$$C_{H-3} = \frac{W_{H-3}^{CZ} \times C_H}{W_H} \dots \dots \dots (1.7.4)$$

式中：C_{H-3}——植物中 H-3 浓度，Bq/g；

W_{H-3}^{CZ}——污染土壤水中 H-3 浓度，Bq/m³；

W_H——水中稳定氢的所占份额，g/m³；

C_H——植物中稳定氢的所占份额。

土壤中 H-3 向肉和奶类食物的转移，通过动物饲料中稳定氢的摄入率以及饲料中稳定氢向肉和奶类的转移而得出，具体如下：

$$C_{H-3} = \frac{FI_{H-3} \times C_H}{FI_H} \dots \dots \dots (1.7.5)$$

式中：C_{H-3}——肉或奶中 H-3 浓度，Bq/g；

FI_{H-3}——动物饲料中 H-3 的日摄入率，Bq/d；

C_H——肉或奶中氢的所占份额；

FI_H——动物饲料中氢的日摄入率，g/d。

$$FI_{H-3} = W_{H-3} \times FI_{水} + C_{H-3, 饲} \times FI_{饲} + S_{H-3} \times FI_{土} \dots \dots \dots (1.7.6)$$

$$FI_H = W_{饮水 H} \times FI_{水} + FDR_{H, 饲} \times FI_{饲} + S_H \times FI_{土} \dots \dots \dots (1.7.7)$$

式中：W_{H-3}——动物饮水中 H-3 活度浓度，Bq/g；

FI_水——动物饮水的日摄入率，g/d；

$C_{H-3, \text{饲}}$ ——动物饲料中 H-3 活度浓度, Bq/g;

$FI_{\text{饲}}$ ——动物饲料的日摄入量, g/d;

S_{H-3} ——土壤中 H-3 活度浓度, Bq/g;

$FI_{\text{土}}$ ——动物对土壤的日摄入量, g/d;

$W_{\text{饮水 H}}$ ——动物饮水中氢的所占份额;

$FDR_{H, \text{饲}}$ ——动物饲料中氢的所占份额;

S_H ——土壤中稳定氢的所占份额。

其中, S_H 的计算如下:

$$S_H = (\rho_b^{CZ} \times K_d^{CZ} + \rho_t^{CZ} \times R_s^{CZ}) W_{\text{饮水 H}} \times \rho_w \div \rho_b^{CZ} \dots\dots\dots (1.7.8)$$

式中: ρ_b^{CZ} ——污染土壤层总体土壤密度, g/m³;

$W_{\text{饮水 H}}$ ——动物饮水中氢的所占份额;

K_d^{CZ} ——核素的分配系数, ml/g;

$\rho_t^{CZ} \times R_s^{CZ} = \theta^{CZ}$ ——污染带容积水含量;

ρ_w ——水的密度, g/m³。

1.7.2 C-14 途径模式

(1) 空气中的 C-14

对于面积为 A 的局部污染源, 空气中 C-14 浓度计算公式如下:

$$C_{C-14, a} = \frac{3.17E-08 \times 0.5 \times EVSN \times \sqrt{A}}{H_{\text{mix}} \times U} \dots\dots\dots (1.7.9)$$

式中: $C_{C-14, a}$ ——在有限大的污染场址上方空气中 C-14 的平均浓度, Bq/m³;

3.17E-08——单位换算系数, a/s;

0.5——风向吹向接受者的时间份额, 无量纲;

EVSN——来自污染地面的 C-14 逃逸通量 (逃逸速率), Bq/m²·a;

A——污染地域面积, m²;

H_{mix} ——C-14 均匀混合的空气层高度, m;

U——年平均风速, m/s。

C-14 注入大气的通量 EVSN 与其它量的关系可表述如下:

$$EVS_N = 10^6 \times S_{C-14} \times E_{C-14} \times \rho^{CZ} \times d_{ref} \dots \dots \dots (1.7.10)$$

式中：10⁶——单位换算系数，cm³/m³；

S_{C-14}——污染土壤中 C-14 浓度，Bq/g；

E_{C-14}——C 的逃逸损失常数，a⁻¹；

ρ^{CZ}——污染土壤层总体土壤密度，g/cm³；

d_{ref}——污染土壤深度，m。

(2) 食物中的 C-14

土壤到植物的 C-14 转移存在两种途径，一是直接根部吸收；二是由土壤挥发至大气，再被叶片吸收。对于具体场址条件，需要分别对两种途径进行考虑：

$$C_{C-14, \pm} = S_{C-14} \times \frac{C_{c, \pm植}}{S_c} \dots \dots \dots (1.7.11)$$

$$C_{C-14, 空植} = C_{C-14, 空} \times \frac{C_{c, 空植}}{C_{c, 空}} \dots \dots \dots (1.7.12)$$

式中：C_{C-14, ±}——基于土壤中 C-14 导出的植物中 C-14 浓度，Bq/g；

S_{C-14}——土壤中 C-14 活度浓度，Bq/g；

C_{c, ±植}——基于土壤中 C 导出的植物中 C 的份额；

S_c——土壤中稳定 C 的份额；

C_{C-14, 空植}——基于空气中 C-14 导出的植物中 C-14 浓度，Bq/g；

C_{C-14, 空}——空气中 C-14 浓度，Bq/m³；

C_{c, 空植}——基于空气中光合作用导出的植物中 C 的份额；

C_{c, 空}——空气中稳定 C 的浓度，g/m³。

把上述两种途径合并，可导出植物中 C-14 的总浓度，见下式：

$$C_{C-14, 植} = C_{c, 植} \times \left[\left(F_{空} \times \frac{C_{C-14, 空}}{C_{c, 空}} \right) + \left(F_{\pm} \times \frac{S_{C-14}}{S_c} \right) \right] \dots \dots \dots (1.7.13)$$

式中：C_{C-14, 植}——植物中 C-14 浓度，Bq/g；

C_{c, 植}——植物中稳定 C 的份额；

C_{C-14, 空}——空气中 C-14 浓度，Bq/m³；

C_{c, 空}——空气中稳定 C 的浓度，g/m³。

S_{C-14} ——土壤中 C-14 活度浓度, Bq/g;

S_C ——土壤中稳定 C 的份额;

$F_{空} = \frac{C_{c, 空植}}{C_{C, 植}}$ ——基于空气中 C 导出植物中 C 的份额;

$F_{土} = \frac{C_{c, 土植}}{C_{C, 植}}$ ——基于土壤中 C 导出植物中 C 的份额。

$C_{c, 空植}$ ——基于空气中光合作用导出的植物中 C 的份额;

$C_{c, 土植}$ ——基于土壤中 C 导出的植物中 C 的份额;

肉类和奶类中 C-14 含量取决于动物通过饲料对稳定 C 和 C-14 的摄入率, 见下式:

$$\frac{C_{C-14, 肉奶}}{FI_{C-14, 牛}} = \frac{C_{c, 肉奶}}{FI_{C, 牛}} \dots\dots\dots (1.7.14)$$

$$FI_{C, 牛} = W_C \times FI_{水} + C_c \times FI \dots\dots\dots (1.7.15)$$

$$FI_{C-14, 牛} = W_{C-14} \times FI_{水} + C_{C-14} \times FI / \rho \dots\dots\dots (1.7.16)$$

式中: $C_{C-14, 肉奶}$ ——肉或奶中 C-14 浓度, Bq/g;

$FI_{C-14, 牛}$ ——肉牛或奶牛中通过饲料对 C-14 的摄入率, Bq/d;

$C_{c, 肉奶}$ ——稳定 C 在肉或奶中的份额, kg/kg;

$FI_{C, 牛}$ ——肉牛或奶牛饲料中稳定 C 的摄入率, kg/d;

W_C ——动物饮水中稳定 C 的浓度, kg/L;

$FI_{水}$ ——动物对水的摄入率, L/d;

C_C ——动物饲料中稳定 C 的份额, kg/kg;

FI ——动物饲料摄入率, kg/d;

W_{C-14} ——动物饮水中 C-14 的浓度, Bq/L;

C_{C-14} ——动物饲料中 C-14 的浓度, Bq/L;

ρ ——动物饲料的密度, kg/L。

表 1 导出土壤中残留放射性水平的相关特征参数

参数类型	参数	单位
场址特征参数	退役场址面积	m^2
	土壤密度 ρ	g/cm^3
	放射性核素污染层厚度	m
	覆盖层厚度	m
	土壤有效孔隙度	—
	根系层区土壤“有效”密度 ρ	g/cm^2
	根系层厚度 d	cm
水文相关参数	场区降水年入渗量	m/a
	土壤含水率	—
	含水层厚度	m
	地下水纵、横弥散系数	m^2/d
	地下水流速	m/d
	放射性核素浸出液进入地下水（假定在场址的中央）到第一个饮用井的距离	m
食入食物途径	食入内照射剂量转换因子 DF_{ing}	Sv/Bq
	核素在谷物中的浓集因子 B_p 核素在蔬菜中的浓集因子 B_g	$(\text{Bq}/\text{kg})/(\text{Bq}/\text{kg}_{\text{干土壤}})$
	核素在肉中的浓集因子 F_f	d/kg
	每年食用的谷物量 U_p	g/a
	每年食用的蔬菜量 U_g	g/a
	每年食用的肉量 U_f	g/a
	每年食用的奶量 U_m	g/a
	饲料摄入量 Q_f	kg/d
	饲料中核素浓度 c_g	Bq/L
	核素在奶中转移因子 F_m	d/L
吸入再悬浮途径	再悬浮的空气中尘埃的浓度 A_i	g/m^3
	个人呼吸率 U_b	m^3/a
	吸入内照射剂量转换因子 DF_{inh}	Sv/Bq

参数类型	参数	单位
饮水途径	核素在水中的浓度 c_{dw}	Bq/L
	个人饮水量 U_{dw}	L/a
地表外照射途径	外照射剂量转换因子 DF_{ext}	(Sv/a) / (Bq/g)
	占有屏蔽因子 F_c	—
摄入土壤途径	土壤年摄入量 FSI	g/a
	居留系数 FO	—
H-3 剂量模式	空气的平均绝对湿度 H_a	g/m ³
	H-3 蒸气均匀混合的高度 H_{mix}	m
	年平均风速 U	m/s
	蒸发率 E_t	m/a
	植物中 H 的质量份额 C_H	g/m ³
C-14 剂量模式	C-14 均匀混合的空气层高度 H_{mix}	m
	土壤中稳定 C 的份额 S_c	—
	空气中稳定 C 的浓度 $C_{c, 空}$	g/m ³
	基于空气中 C 导出植物中 C 的份额 $F_{空}$	—
	基于土壤中 C 导出植物中 C 的份额 $F_{土}$	—
	稳定 C 在肉或奶中的份额 $C_{c, 肉奶}$	—
	动物饮水中稳定 C 的浓度 W_c	kg/L
	动物对水的摄入率 $FI_{水}$	L/d
	动物饲料摄入率 FI	kg/d

附录 2 示例计算

2.1 照射途径分析

假定核设施场址退役后，直接开放和允许公众在退役场址内活动，故不考虑放射性物质的衰变与损耗。示例计算考虑的退役场址具体开放景象为耕地，成人在田地耕作劳动，并食用该田地产出的谷物。

假设成人在该景象的停留时间为 12h/d，均为室外。考虑的照射途径包括地表沉积外照射、吸入内照射、食入与污染土壤有关食物的内照射、饮水内照射、土壤食入内照射。

2.2 剂量准则

对于示例计算退役场址开放景象，公众剂量准则定为 0.01mSv/a。

2.3 计算参数的选取

（1）场址相关参数

- 1) 污染面积 1600 m²，40×40 m，无其他覆盖层；
- 2) 土壤密度为 1.5 g/cm³；
- 3) 污染深度 b 为 30 cm；
- 4) 耕作层深度为 15 cm；
- 5) 用于计算核素在植物中转移的土壤表观密度为 2650 kg/m³；
- 6) 污染土壤有效孔隙度 n_e 为 0.23；
- 7) 土壤含水率 θ 为 0.23；
- 8) 污染场址的含水层厚度 T 为 5m；
- 9) 污染场址的地下水纵、横弥散系数 D_L 取 2.20 m²/d， D_T 取 0.09 m²/d；
- 10) 污染场址的地下水流速 U 取 1.0 m/d；
- 11) 场区降水年入渗量 I 取 0.19 m/a；
- 12) 污染浸出水进入地下水到第一个饮用井的距离 x 为 100 m。

（2）公众相关参数

- 1) 个人饮水量 成人 730 L/a。
- 2) 个人呼吸量 成人 8400 m³/a。
- 3) 土壤摄入量 成人 36.5 g/a。
- 4) 吸入、居留及外照射参数

再悬浮的空气中粉尘浓度 A_i 0.0003 g/m³;

居留因子取 0.5。

5) 居民食谱

表 2-1 成人组的居民食谱

居民组	谷物	蔬菜	肉类	奶类
成人组	150 kg/a	100 kg/a	50 kg/a	30 L/a

(3) 核素相关参数

1) 元素在植物中的浓集因子

表 2-2 元素在植物中的浓集因子

元素	植物中的浓集因子 (Bq/kg) / (Bq/kg 干土壤)	
	干牧草/土壤	谷物/土壤
Co	2.0E-02	3.0E-03

2) 元素由植物根部吸收转入奶及肉类中的转移因子

表 2-3 元素由植物根部吸收转入奶及肉类中的转移因子

元素	由植物根部吸收转入奶及肉类中的转移因子	
	奶类 (d/L)	肉类 (d/kg)
Co	1.0E-03	1.3E-02

3) 分配系数

Co 的分配系数 1.0E+01 mL/g

4) 核素的剂量转换因子

表 2-4 核素的剂量转换因子

核素	吸入 (Sv/Bq)	食入 (Sv/Bq)	外照因子 (Sv/a)(Bq/g)
Co-60	3.10E-08	3.40E-09	5.55E-03

2.4 示例计算

2.4.1 示例计算——Co-60

(1) 食入途径

1) 谷物中的核素浓度

$$c_p = (B_p \times c_v \times d) / \rho$$

其中, B_p 取 3.00E-03 (Bq/kg) / (Bq/kg 干土壤); c_v 取 1.5 Bq/cm³;

d 取 15 cm; ρ 取 $2.65E+01 \text{ g/cm}^2$ 。

计算得出 $c_p = 2.55E-03 \text{ Bq/g}$

2) 蔬菜中的核素浓度

$$c_g = (B_g \times c_v \times d) / \rho$$

其中, B_g 取 $3.00E-03 \text{ (Bq/kg)} / \text{(Bq/kg 干土壤)}$; c_v 取 1.5 Bq/cm^3 ;

d 取 15cm; ρ 取 $2.65E+01 \text{ g/cm}^2$ 。

计算得出 $c_g = 2.55E-03 \text{ Bq/g}$

3) 肉中的核素浓度

$$c_f = c_{fd} \times F_f \times Q_f$$

其中, c_{fd} 取 $2.00E-02 \text{ Bq/g}$; F_f 取 $1.30E-02 \text{ d/kg}$; Q_f 取 14 kg/d 。

计算得出 $c_f = 3.64E-03 \text{ Bq/g}$;

4) 奶中的核素浓度

$$c_m = c_{fd} \times F_m \times Q_t / \rho_m$$

其中, c_{fd} 取 $2.00E-02 \text{ Bq/g}$; F_m 取 $1.00E-03 \text{ d/L}$;

Q_t 取 14 kg/d ; ρ_m 取 1.0 kg/L 。

计算得出 $c_m = 2.80E-04 \text{ Bq/g}$ 。

综上, 可计算得出食入途径的有效剂量, 具体如下:

$$D_{ing} = (L_p + L_g + L_m + L_f) \times DF_{ing}$$

其中, $L_p = U_p \cdot c_p = 150 \text{ kg/a} \times 1000 \text{ g/kg} \times 2.55E-03 \text{ Bq/g}$;

$L_g = U_g \cdot c_g = 100 \text{ kg/a} \times 1000 \text{ g/kg} \times 2.55E-03 \text{ Bq/g}$;

$L_m = U_m \cdot c_m = 30 \text{ kg/a} \times 1000 \text{ g/kg} \times 2.80E-04 \text{ Bq/g}$;

$L_f = U_f \cdot c_f = 50 \text{ kg/a} \times 1000 \text{ g/kg} \times 3.64E-03 \text{ Bq/g}$;

$DF_{ing} = 3.40E-09 \text{ Sv/Bq}$ 。

在食入途径时, 假设 10% 的食物来自污染场址。

计算得出 $D_{ing} = 2.81E-06 \times 0.1 = 2.81E-07 \text{ Sv/a}$ 。

(2) 吸入途径

$$D_{inh} = C_v \times A_i \times U_b \times DF_{inh}$$

其中: c_v 取 1.0 Bq/g ; A_i 取 $3.00E-04 \text{ g/m}^3$;

U_b 取 $8400 \times 0.5 = 4200 \text{ m}^3/\text{a}$; DF_{inh} 取 $3.10 \text{ E-}08 \text{ Sv/Bq}$ 。

计算得出 $D_{inh} = 3.91 \text{ E-}08 \text{ Sv/a}$ 。

(3) 饮水途径

$$D_{dw} = c_{dw} \times U_{dw} \times DF_{ing}$$

其中: U_{dw} 取 $730 \times 0.5 = 365 \text{ L/a}$; DF_{ing} 取 $3.40 \text{ E-}09 \text{ Sv/Bq}$ 。

这里 c_{dw} 采用较为保守的最小稀释倍数法。假定井位距释放点 100m。

$$c_{max}(x, t) = c_0(0, 0) / D_{min}$$

其中, 污染场址地下水中放射性核素的初始浓度可通过下式进行计算:

$$c_0(0, 0) = \frac{R_i(t)}{I \times A}$$

$$R_i(t) = c_i \times L_i \times \rho \times A \times T$$

其中: I 取 30 cm/a ; c_i 取 1.0 Bq/g ; L_i 取 $4.17 \text{ E-}02 \text{ a}^{-1}$;

ρ 取 1.5 g/cm^3 ; A 取 $1600 \text{ m}^2 = 1.6 \text{ E+}07 \text{ cm}^2$;

T ——污染土壤层深度, 30cm。

垂直混合程度 φ 可表示为:

$$\varphi = \frac{b^2}{\alpha_T \times x}$$

其中: b 取 500 cm ; α_T 取 9 cm ; X 取 $100 \text{ m} = 1.0 \text{ E+}04 \text{ cm}$ 。

计算得出 $\varphi = 0.0055$ 。

对于 D_{min} 的计算, 具体如下:

$$D_{min} = R_d 4\pi n_e \frac{\sqrt{a_L a_T x b}}{V_T} \exp(\lambda t) \quad (\varphi < 3.3)$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b}{n_e} \times K_d$$

其中: ρ_b 取 1.5 g/cm^3 ; n_e 取 0.23 ; V_T 取 $2.80 \text{ E+}06 \text{ cm}^3$;

α_L 取 220 cm ; α_T 取 9 cm ; K_d 取 $1.00 \text{ E+}01 \text{ ml/g}$;

t 取 $7.17 \text{ E+}01 \text{ a}$; λ 取 $0.693/5.27 = 1.31 \text{ E-}01 \text{ a}^{-1}$ 。

计算得出 $R_d = 6.62 \text{ E+}01$; $D_{min} = 7.39 \text{ E+}01$; $R_i(t) = 1.20 \text{ E+}07 \text{ Bq/a}$;

$c_0(0, 0) = 6.25 \text{ E-}02 \text{ Bq/cm}^3$; $c_{dw} = 8.46 \text{ E-}04 \text{ Bq/cm}^3 = 8.46 \text{ E-}01 \text{ Bq/L}$ 。

在饮水途径, 假设 10% 的饮水来自污染场址。

因此，计算得出 $D_{dw}=1.05E-06 \times 0.1=1.05E-07Sv/a$ 。

(4) 外照射途径

$$D_{ext} = c_i \times F_c \times DF_{ext}$$

其中： c_i 取 $1.0Bq/g$ ； F_c 取 0.5 ； DF_{ext} 取 $5.55E-03 (Sv/a) / (Bq/g)$ 。

计算得出 $D_{ext}=2.78E-03Sv/a$ 。

(5) 摄入土壤途径

$$D_{soil} = FSI \times FO \times FA \times c_i \times DF_{ing}$$

其中： FSI 取 $36.5g/a$ ； FO 取 0.5 ； FA 取 1.0 ；

c_i 取 $1.0Bq/g$ ； DF_{ing} 取 $3.40E-09Sv/Bq$ 。

计算得出 $D_{soil}=6.21E-08Sv/a$ 。

(6) 总剂量

$$D_{tot} = D_{ing} + D_{inh} + D_{dw} + D_{ext} + D_{soil}$$

$D_{tot}=2.81E-07+3.91E-08+1.05E-07+2.78E-03+6.21E-08=2.78E+00 (mSv/a)$ 。

(7) 计算结果

$$1Bq/g \times 0.01mSv/a \div 2.78E+00mSv/a = 3.60E-03Bq/g$$

因此，基于 $0.01mSv/a$ 剂量准则导出的 Co-60 的土壤残留水平为 $3.60E-03Bq/g$ 。

2.4.2 示例计算——H-3

2.4.2.1 H-3 在不同介质的浓度

(1) 土壤水中的 H-3

平衡条件下，土壤水中 H-3 的浓度计算如下：

$$W_{H-3}^{cz} = \frac{\rho_b^{cz} \times S_{H-3}}{\theta^{cz} \times R_d^{cz}}$$

其中， ρ_b^{cz} ——污染土壤层总体土壤密度， $1.50E+06g/m^3$ ；

S_{H-3} ——污染土壤中 H-3 浓度， $1.0Bq/g$ ；

θ^{cz} ——污染带容积水含量， 0.23 ；

R_d^{cz} ——H-3 在污染带内的阻滞系数， 1 。

计算得出 $W_{H-3}^{cz}=6.52E+06Bq/m^3$ 。

(2) 空气中的 H-3

对于有限的污染场址（面积 A），空气中平衡 H-3 浓度近似计算如下：

$$C_{H-3, a} = \frac{3.17E-08 \times 0.5 \times EVSN \times \sqrt{A}}{H_{mix} \times U}$$

式中：EVSN——来自污染地面的 H-3 通量（溢出率），Bq/m²·a；

A——污染区面积，1600m²；

H_{mix}——H-3 蒸气均匀混合的高度，对人呼吸带取 2m；

U——年平均风速，2m/s。

其中，EVSN 根据水平平衡方程的计算如下：

$$EVSN = W_{H-3}^{CZ} \times E_t$$

式中：W_{H-3}^{CZ}——污染土壤水中 H-3 浓度，6.52E+06Bq/m³；

E_t——蒸发率，1m/a；

计算得出 EVSN = 6.52E+06 Bq/m²·a，C_{H-3, a} = 1.03E+00Bq/m³。

（3）食物中的 H-3

食物中的 H-3 浓度的计算如下：

$$C_{H-3} = \frac{W_{H-3}^{CZ} \times C_H}{W_H}$$

式中：W_H——水中 H 的质量份额，g/m³；

C_H——食物中 H 的所占份额。

其中，W_H取 1/9g/cm³=1.1E+05g/m³。

由于不同食物中的水含量有所不同。对于蔬菜和谷类，H 的所占份额取 0.089；对于肉类，H 的所占份额取 0.067；对于奶类，H 的所占份额取 0.098。

1) 蔬菜

$$C_{H-3, \text{蔬菜}} = 6.52E+06Bq/m^3 \times 0.089 \div 1.1E+05g/m^3 = 5.27E+00Bq/g。$$

2) 谷物

$$C_{H-3, \text{谷物}} = 6.52E+06Bq/m^3 \times 0.089 \div 1.1E+05g/m^3 = 5.27E+00Bq/g。$$

3) 肉类和奶类

$$S_H = (\rho_b^{CZ} \times K_d^{CZ} + \rho_t^{CZ} \times R_s^{CZ}) W_{\text{饮水H}} \times \rho_w \div \rho_b^{CZ}$$

其中，ρ_b^{CZ}——污染土壤层总体土壤密度，1.50g/cm³；

K_d^{CZ}——H 的分布系数，0cm³/g；

θ^{CZ}=ρ_t^{CZ} × R_s^{CZ}——污染带容积水含量，0.23；

$W_{\text{饮水 H}}$ ——动物饮水中稳定氢的所占份额，0.11；

ρ_w ——水的密度，1.00g/cm³。

计算得出 $S_H=0.01687$ 。

$$FI_{H-3} = W_{H-3} \times FI_{\text{水}} + C_{H-3, \text{饲}} \times FI_{\text{饲}} + S_{H-3} \times FI_{\text{土}}$$

$$FI_H = W_{\text{饮水 H}} \times FI_{\text{水}} + FDR_{H, \text{饲}} \times FI_{\text{饲}} + S_H \times FI_{\text{土}}$$

式中： W_{H-3} ——动物饮水中 H-3 浓度， $6.52E+06\text{Bq/m}^3 \div 1.0E+06\text{g/m}^3=6.52E+00\text{Bq/g}$ ；

$FI_{\text{水}}$ ——动物饮水的日摄入量，食肉途径 50kg/d，食奶途径 160kg/d；

$C_{H-3, \text{饲}}$ ——动物饲料中 H-3 浓度，取谷物中 H-3 的浓度 $5.27E+00\text{Bq/g}$ ；

$FI_{\text{饲}}$ ——动物饲料的日摄入量，食肉途径 68kg/d，食奶途径 55kg/d；

S_{H-3} ——土壤中 H-3 浓度，1.0Bq/g；

$FI_{\text{土}}$ ——动物对土壤的日摄入量，0.5kg/d；

$W_{\text{饮水 H}}$ ——动物饮水中稳定氢的所占份额，0.11；

$FDR_{H, \text{饲}}$ ——动物饲料中稳定氢的所占份额，0.1；

S_H ——土壤中为稳定氢的份额，0.01687。

计算得出 $FI_{H-3 \text{ 肉类}}=6.85E+05\text{Bq/d}$ ， $FI_{H-3 \text{ 奶类}}=1.33E+06\text{Bq/d}$ ；

$FI_{H \text{ 肉类}}=1.23E+04\text{g/d}$ ， $FI_{H \text{ 奶类}}=2.31E+04\text{g/d}$ 。

$$C_{H-3} = \frac{FI_{H-3} \times C_H}{FI_H}$$

式中： C_{H-3} ——肉或奶中 H-3 浓度，Bq/g；

FI_{H-3} ——动物饲料中 H-3 的日摄入量，Bq/d；

C_H ——肉或奶中氢的所占份额，食肉取 0.067，食奶取 0.098；

FI_H ——动物饲料中氢的日摄入量，g/d。

计算得出 $C_{H-3, \text{肉类}}=6.85E+05\text{Bq/d} \times 0.067 \div 1.23E+04\text{g/d}=3.73E+00\text{Bq/g}$ ；

$C_{H-3, \text{奶类}}=1.33E+06\text{Bq/d} \times 0.098 \div 2.31E+04\text{g/d}=5.66E+00\text{Bq/g}$ 。

2.4.2.2 H-3 的剂量估算

在农用地开放景象下，由于 H-3 的外照射转换因子为 0，因此需要计算食入途径、吸入途径、饮水途径和摄入土壤途径的个人有效剂量。

(1) 食入途径

$$D_{\text{ing}} = (L_p + L_g + L_m + L_f) \times DF_{\text{ing}}$$

通过查询 GB18871-2002 的表 6 成人组， DF_{ing} 取 $1.80\text{E-}11\text{Sv/Bq}$ 。

这里假设场址附近居民摄入食物的 10% 来自污染场址。

蔬菜， $L_g = U_g \cdot C_{\text{H-3, 蔬菜}} = 5.27\text{E}+03\text{Bq/kg} \times 100\text{kg/a} \times 10\% = 5.27\text{E}+04\text{Bq/a}$ ；

谷物， $L_p = U_p \cdot C_{\text{H-3, 谷物}} = 5.27\text{E}+03\text{Bq/kg} \times 150\text{kg/a} \times 10\% = 7.91\text{E}+04\text{Bq/a}$ ；

肉类， $L_f = U_f \cdot C_{\text{H-3, 肉类}} = 3.73\text{E}+03\text{Bq/kg} \times 50\text{kg/a} \times 10\% = 1.86\text{E}+04\text{Bq/a}$ ；

奶类， $L_m = U_m \cdot C_{\text{H-3, 奶类}} = 5.66\text{E}+03\text{Bq/kg} \times 1.040\text{kg/L} \times 30\text{L/a} \times 10\% = 1.76\text{E}+04\text{Bq/a}$ 。

综上，计算得出 $D_{\text{ing}} = 3.02\text{E-}03\text{mSv/a}$ 。

(2) 吸入途径

$$D_{\text{inh}} = C_v \times U_b \times DF_{\text{inh}}$$

其中， C_v 取 $1.03\text{E}+00\text{Bq/m}^3$ ； U_b 取 $8400 \times 0.5 = 4200\text{m}^3/\text{a}$ ； DF_{inh} 取 $2.60\text{E-}10\text{Sv/Bq}$ 。

计算得出 $D_{\text{inh}} = 1.13\text{E-}03\text{mSv/a}$ 。

(3) 饮水途径

这里假设场址附近居民饮水的 10% 来自污染场址。

$$D_{\text{dw}} = c_{\text{dw}} \times U_{\text{dw}} \times DF_{\text{ing}}$$

其中： c_{dw} 取 $6.52\text{E}+06\text{Bq/m}^3$ ； U_{dw} 取 $730 \times 10\% \times 0.5 = 36.5\text{L/a} = 0.0365\text{m}^3/\text{a}$ ；

DF_{ing} 取 $1.80\text{E-}11\text{Sv/Bq}$ 。

计算得出 $D_{\text{dw}} = 4.28\text{E-}03\text{mSv/a}$ 。

(4) 摄入土壤途径

$$D_{\text{soil}} = FSI \times FO \times FA \times c_i \times DF_{\text{ing}}$$

其中： FSI 取 36.5g/a ； FO 取 0.5； FA 取 1.0；

c_i 取 1.0Bq/g ； DF_{ing} 取 $1.80\text{E-}11\text{Sv/Bq}$ 。

计算得出 $D_{\text{soil}} = 3.29\text{E-}07\text{mSv/a}$ 。

(5) 总剂量及土壤残留水平

$$D_{\text{tot}} = D_{\text{ing}} + D_{\text{inh}} + D_{\text{dw}} + D_{\text{ext}} + D_{\text{soil}}$$

计算得出 $D_{\text{tot}} = 8.44\text{E-}03\text{mSv/a}$ 。

$$1\text{Bq/g} \times 0.01\text{mSv/a} \div 8.44\text{E-}03\text{mSv/a} = 1.19\text{E+}00\text{Bq/g}$$

因此,基于 0.01mSv/a 剂量准则导出的 H-3 的土壤残留水平为 $1.19\text{E+}00\text{Bq/g}$ 。

2.4.3 示例计算——C-14

2.4.3.1 C-14 在不同介质的浓度

(1) 空气中的 C-14

对于面积为 A 的局部污染源,空气中 C-14 浓度计算公式如下:

$$C_{\text{C-14, a}} = \frac{3.17\text{E-}08 \times 0.5 \times \text{EVS} \times \sqrt{A}}{H_{\text{mix}} \times U}$$

其中: EVS——来自污染地面的 C-14 逃逸通量 (逃逸速率), $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{a}$;

A——污染地域面积, 1600m^2 ;

H_{mix} ——C-14 均匀混合的空气层高度, 2m ;

U——年平均风速, 2m/s 。

EVS 的计算过程如下:

$$\text{EVS} = 10^6 \times S_{\text{C-14}} \times E_{\text{C-14}} \times \rho^{\text{CZ}} \times d_{\text{ref}}$$

其中: $S_{\text{C-14}}$ ——污染土壤中 C-14 浓度, 1.0Bq/g ;

$E_{\text{C-14}}$ ——C 的逃逸损失常数, 22a^{-1} ;

ρ^{CZ} ——污染土壤层总体土壤密度, 1.5g/cm^3 ;

d_{ref} ——污染土壤深度, 0.3m 。

计算得出, $\text{EVS} = 9.90\text{E+}06\text{Bq/m}^2 \cdot \text{a}$, $C_{\text{C-14, a}} = 1.57\text{E+}00\text{Bq/m}^3$ 。

(2) 食物中的 C-14

假设不考虑鱼类或其它水生生物的摄入,因此对于居民食谱的四种食物类别,分别进行考虑如下:

对于蔬菜和谷物,需要考虑根部吸收和叶片吸收两种途径,计算得出植物中 C-14 的总浓度,见下式:

$$C_{C-14, \text{植}} = C_{C, \text{植}} \times \left[\left(F_{\text{空}} \times \frac{C_{C-14, \text{空}}}{C_{C, \text{空}}} \right) + \left(F_{\text{土}} \times \frac{S_{C-14}}{S_C} \right) \right]$$

其中：\$C_{C-14, \text{植}}\$——植物中 C-14 浓度，Bq/g；

\$C_{C, \text{植}}\$——植物中稳定 C 的份额，蔬菜取 0.09，谷物取 0.40；

\$C_{C-14, \text{空}}\$——空气中 C-14 浓度，取 1.57E+00Bq/m³；

\$C_{C, \text{空}}\$——空气中稳定 C 的份额，取 1.60E-04kg/m³；

\$F_{\text{空}}\$——基于空气中 C 导出植物中 C 的份额，取 0.98；

\$F_{\text{土}}\$——基于土壤中 C 导出植物中 C 的份额，取 0.02；

\$S_{C-14}\$——土壤中 C-14 浓度，取 1.0Bq/g；

\$S_C\$——土壤中稳定 C 的份额，取 0.03。

综上，\$C_{C-14, \text{蔬菜}}=9.25\text{E}+02\text{Bq/kg}\$，\$C_{C-14, \text{谷物}}=4.11\text{E}+03\text{Bq/kg}\$。

对于肉类和奶类，C-14 含量取决于动物通过饲料对稳定 C 和 C-14 的摄入量，见下式：

$$\frac{C_{C-14, \text{肉奶}}}{FI_{C-14, \text{牛}}} = \frac{C_{C, \text{肉奶}}}{FI_{C, \text{牛}}}$$

$$FI_{C, \text{牛}} = W_C \times FI_{\text{水}} + C_C \times FI$$

$$FI_{C-14, \text{牛}} = W_{C-14} \times FI_{\text{水}} + C_{C-14} \times FI/\rho$$

其中：\$C_{C-14, \text{肉奶}}\$——肉或奶中 C-14 浓度，Bq/kg；

\$FI_{C-14, \text{牛}}\$——肉牛或奶牛中通过饲料对 C-14 的摄入量，Bq/d；

\$C_{C, \text{肉奶}}\$——稳定 C 在肉或奶中的份额，肉类取 0.24，奶类取 0.07；

\$FI_{C, \text{牛}}\$——肉牛或奶牛饲料中稳定 C 的摄入量，kg/d；

\$W_C\$——动物饮水中稳定 C 的浓度，取 2.00E-05kg/L；

\$FI_{\text{水}}\$——动物对水的摄入量，肉牛取 50L/d，奶牛取 160 L/d；

\$C_C\$——动物饲料中稳定 C 的份额，肉中取 0.24，奶中取 0.07；

\$FI\$——动物饲料摄入量，肉牛取 68kg/d，奶牛取 55kg/d；

W_{C-14} ——动物饮水中 C-14 的浓度，取 $2.00E-03Bq/L$ ；

C_{C-14} ——动物饲料中 C-14 的浓度，肉牛取 $1.85E-02Bq/L$ ，奶牛取 $8.22E-02Bq/L$ ；

ρ ——动物饲料的密度，取 $0.5kg/L$ 。

计算得出， $FI_{C-14, 肉牛}=2.62E+00Bq/d$ ， $FI_{C, 肉牛}=1.63E+01kg/d$ ；

$FI_{C-14, 奶牛}=9.36E+00Bq/d$ ， $FI_{C, 奶牛}=3.85E+00kg/d$ ；

进而得出， $C_{C-14, 肉类}=3.85E-02Bq/kg$ ， $C_{C-14, 奶类}=1.70E-01Bq/kg$ 。

2.4.3.2 C-14 的剂量估算

在农用地开放景象下，要计算食入途径、吸入途径、饮水途径、外照射途径和摄入土壤途径的个人有效剂量。

(1) 食入途径

$$D_{ing} = (L_p + L_g + L_m + L_f) \times DF_{ing}$$

通过查询 GB18871-2002 的表 6 成人组， DF_{ing} 取 $5.80E-10Sv/Bq$ 。

这里假设场址附近居民摄入食物的 10%来自污染场址。

蔬菜， $L_g=U_g \cdot C_{C-14, 蔬菜}=9.25E+02Bq/kg \times 100kg/a \times 10\% = 9.25E+03Bq/a$ ；

谷物， $L_p=U_p \cdot C_{C-14, 谷物}=4.11E+03Bq/kg \times 150kg/a \times 10\% = 6.17E+04Bq/a$ ；

肉类， $L_f=U_f \cdot C_{C-14, 肉类}=3.85E-02Bq/kg \times 50kg/a \times 10\% = 1.92E-01Bq/a$ ；

奶类， $L_m=U_m \cdot C_{C-14, 奶类}=1.70E-01Bq/kg \times 1.040kg/L \times 30L/a \times 10\% = 5.31E-01Bq/a$ 。

综上，计算得出 $D_{ing}=4.11E-02mSv/a$ 。

(2) 吸入途径

$$D_{inh} = C_v \times U_b \times DF_{inh}$$

其中， C_v 取 $1.57E+00Bq/m^3$ ； U_b 取 $8400 \times 0.5=4200m^3/a$ ； DF_{inh} 取 $5.80E-09Sv/Bq$ 。

计算得出 $D_{inh}=3.82E-02mSv/a$ 。

(3) 饮水途径

这里假设场址附近居民饮水的 10%来自污染场址。

$$D_{dw} = c_{dw} \times U_{dw} \times DF_{ing}$$

其中： c_{dw} 取 $2.00E-03Bq/L$ ； U_{dw} 取 $730 \times 0.5 \times 0.1 = 36.5L/a$ ；

DF_{ing} 取 $5.80E-10Sv/Bq$ 。

计算得出 $D_{dw} = 4.23E-08mSv/a$ 。

(4) 外照射途径

$$D_{ext} = c_i \times F_c \times DF_{ext}$$

式中： c_i ——土壤中污染核素浓度，取 $1.0Bq/g$ ；

F_c ——占有屏蔽因子，取 1；

DF_{ext} ——外照射剂量转换因子，取 $3.60E-06 (mSv/a) / (Bq/g)$ 。

计算得出 $D_{ext} = 3.60E-06mSv/a$ ；

(5) 摄入土壤途径

$$D_{soil} = FSI \times FO \times FA \times c_i \times DF_{ing}$$

其中： FSI 取 $36.5g/a$ ； FO 取 0.5； FA 取 1.0；

c_i 取 $1.0Bq/g$ ； DF_{ing} 取 $5.80E-10Sv/Bq$ 。

计算得出 $D_{soil} = 1.06E-05mSv/a$ 。

(6) 总剂量及土壤残留水平

$$D_{tot} = D_{ing} + D_{inh} + D_{dw} + D_{ext} + D_{soil}$$

计算得出 $D_{tot} = 7.94E-02mSv/a$ 。

$$1Bq/g \times 0.01mSv/a \div 7.94E-02mSv/a = 1.26E-01Bq/g$$

因此，基于 $0.01mSv/a$ 剂量准则导出的 C-14 的土壤残留水平为 $1.26E-01Bq/g$ 。