

HJ

国家环境保护总局标准

HJ 53—2000

拟开放场址土壤中剩余放射性 可接受水平规定 (暂行)

Interim regulation for acceptable levels of residual
radionuclides in soil of site considered for release

2000-05-22 发布

2000-12-01 实施

国家环境保护总局 发布

目 次

前言

| | |
|--|-----|
| 1 适用范围 | (1) |
| 2 污染场址开放的审管 | (1) |
| 3 土壤中剩余放射性可接受水平 | (2) |
| 4 确认和审批 | (3) |
| 5 关于非辐射危害方面的管理要求 | (3) |
| 附录 A (提示的附录) 土壤中剩余放射性水平推导中用到的计算模式与参数 | (4) |

前 言

鉴于我国目前核设施退役的迫切需要，本标准（暂行）参考国际上推荐的原则、方法和某些实例编制而成的。在计算中，结合国情采用了我国的食谱，以及某些实际参数，同时在内照射剂量转换因子上，采用了国际上最近推荐的数值。为了必要时能查阅到本规定的主要推导中所用到的假定和条件，附录 A 中列出了有关的计算模式和参数。

本标准的附录 A 是提示的附录。

本标准此次为首次发布，于 2000 年 12 月 1 日起实施。

本标准由中国原子能科学研究院负责起草。

本标准由国家环境保护总局负责解释。

国家环境保护总局标准

拟开放场址土壤中剩余放射性 可接受水平规定 (暂行)

HJ 53—2000

Interim regulation for acceptable levels of residual
radionuclides in soil of site considered for release

1 适用范围

本标准给出了土壤中剩余放射性的可接受暂行水平。它适用于核设施（包括铀、钍矿冶设施和放射性同位素生产设施）退役场址的开放利用；对于其他从事导致天然放射性水平增高活动的场址的开放利用，可参照执行。

2 污染场址开放的审管

2.1 核设施退役，或由于其他原因受到污染经去污后的场址拟向公众开放时，除了所有剩余建筑物和设备的污染水平必须满足相关法规要求以外，其土壤中的剩余放射性水平也必须经审管部门审查，确认已满足本标准规定的要求后方可解除控制，开放利用。

2.2 根据我国辐射防护标准中对拟议的和继续进行中的实践对公众中关键居民组员的平均年有效剂量不得超过 1 mSv 的要求，本暂行标准要求所选剂量约束值能保证在场址开放后，由土壤中剩余放射性核素对公众中关键居民组成员所造成的附加年有效剂量不超过上述剂量限值的一小部分，一般为公众年剂量限值的 1/10 到 1/4，即 0.1 ~ 0.25 mSv。

2.3 场址的开放可分为无限制开放和有限制开放两类。前者指不附带限制条件的开放。后者指在某些限制条件下的开放，其剂量约束值可适当放宽。具体剂量约束值的选择，应该基于在开放之后必须保证对现在和将来可能生活或工作在场址内或其附近的任何个人所产生的危险足够小的基本原则，在考虑开放类型、污染原因、污染土壤量，去污代价，以及其它因素的基础上，通过辐射防护最优化的方法来选定。审管部门在最后决策中，还应考虑除辐射防护以外的其它因素，在选定剂量约束值的基础上，再具体确定土壤中剩余放射性的可接受水平。

2.4 关于土壤污染状况的报告

污染场址的营运单位应就拟开放场址的开放问题向环境保护审管部门提交一份关于场址开放的申请报告（或作为其它相关报告的一部分）。在该申请报告（或总报告的相关部分）中，在涉及土壤中剩余放射性的状况方面，至少应包括下列内容：

- a. 场址相关特征要点，包括邻近周围的土地使用和水文地质简况；
- b. 应说明场址是无限制开放还是有限制开放，若是有限制开放还应说明场址开放后的用途和限制使用条件；
- c. 土壤污染的原因、水平、范围、核素种类，污染土壤估计量；
- d. 去污方案要点，费用估计；
- e. 剂量约束值的申报值及其优化分析的依据；

HJ 53—2000

- f. 对土壤中剩余放射性水平的监测方案及其质保要点；
- g. 开放后对公众的可能辐射后果估计；
- h. 去污后的污染水平实测结果；
- i. 其它。

3 土壤中剩余放射性可接受水平

3.1 相应于 0.1 mSv/a 的剂量约束值的土壤中剩余放射性可接受水平的参考值见表 1 和表 2。当采用不同于 0.1 mSv/a 的剂量约束值时，其解控水平可按比例作相应修正。

表 1 基于年剂量约束值为 0.1 mSv 所导出的土壤中若干种放射性核素的剩余活度浓度可接受水平*

| 核 素 | ⁶⁰ Co | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ²³⁸ Pu | ²³⁹ Pu | ²⁴¹ Am | ²⁴⁴ Cm | ²³² Th+D |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 可接受水平 (Bq/g) | 3.0×10^{-2} | 1.0×10^{-1} | 1.2×10^{-1} | 3.8×10^{-1} | 3.4×10^{-1} | 4.1×10^{-1} | 7.3×10^{-1} | 6.3×10^{-2} |

*注：²³²Th+D 包括了与其处于平衡状态的所有子体核素。

表 2 基于年剂量约束值 0.1 mSv 所导出的土壤中²³⁵U 及²³⁸U 剩余活度浓度可接受水平*

| ²³⁸ U | 链 1 | 链 2 | 链 3 | 链 4 | ²³⁵ U | 链 1 | 链 2 | 链 3 |
|------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 可接受水平 (Bq/g) | 1.6 | 9.1×10^{-1} | 3.8×10^{-2} | 2.6×10^{-2} | 可接受水平 (Bq/g) | 5.0×10^{-1} | 1.2×10^{-1} | 3.1×10^{-2} |

*注：(1) ²³⁸U 链 1 为²³⁸U→²³⁴Pa，核素包括：²³⁸U、²³⁴T、^{234m}Pa、²³⁴Pa

(2) ²³⁸U 链 2 为²³⁸U→²³⁴U，核素包括：²³⁸U、²³⁴T、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U

(3) ²³⁸U 链 3 为²³⁸U→²¹⁰Tl，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁸At、²¹⁴Po、²¹⁰Tl

(4) ²³⁸U 链 4 为²³⁸U→²¹⁰Po，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁸At、²¹⁴Po、²¹⁰Tl、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po

(5) ²³⁵U 链 1 为²³⁵U→²³¹Th，核素包括：²³⁵U、²³¹Th

(6) ²³⁵U 链 2 为²³⁵U→²³¹Pu，核素包括：²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu

(7) ²³⁵U 链 3 为²³⁵U→²¹¹Po，核素包括：²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu、²²⁷Ac、²²⁷Th、²²³Fr、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po、²¹¹Pb、²¹¹Bi、²⁰⁷Tl、²¹¹Po

3.2 对于²³⁵U 和²³⁸U 的污染，应根据各单位铀污染物可能包含的铀子体（种类及平衡度）的实际情况来选择表中不同的数值。

3.3 对于同时存在有多种污染核素的情况，可根据下列公式是否得到满足来判断是否可以接受：

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_{ii}} \leq 1$$

式中： c_i ——放射性核素 i 在土壤中的污染浓度 (Bq/g)；

c_{ii} ——放射性核素 i 在土壤中剩余放射性的可接受水平 (Bq/g)；

n ——土壤中存在的污染核素的数目。

3.4 表 1 和表 2 中的数值是指开放时土壤中剩余放射性的可接受活度浓度水平。如果在清污完毕到实施开放之间还有一段监护期 (T)，那么，表 1 和表 2 中的数值可以相应放宽 $e^{\lambda T}$ 倍 (λ 是有关污染核素的放射性衰变常数)。

3.5 土壤中不得含有废放射源或局部强污染的热点，不得采取大面积平均的办法来不适当地满足表 1 或表 2 的要求。表 1 或表 2 的数值是指不小于 100 m² 范围内的浓度均值，且要求其中任何 1 m² 范围内的浓度不得超过上述 100 m² 范围内所有读数平均值的 10 倍。

3.6 关于土壤采样、测量、抽检等方面的具体要求均应按有关质量保证规定要求进行。

4 确认和审批

4.1 审管部门应根据申请的污染场址开放后的实际用途以及其它有关情况首先对申请开放所依据的剂量约束值进行审查，然后再根据剂量约束值来核准相应的剩余放射性可接受水平。

4.2 一般来讲，这种申请和审批可分为可研阶段和清污终态阶段两个阶段进行。审管部门（或委托某有资格单位）还应对申请报告的其它部分（包括工作大纲、监测质量保证计划和测量或验收报告等）进行审查，必要时进行一定的实地监督性监测。

4.3 审管部门可以根据审查结果，视申请开放的场址土壤中剩余放射性的实际水平满足本标准的情况，提出具体审批意见。在未得到审管部门的正式批准之前，该场址应仍然处在监控之中，假若存在监护期的话，只有在监护期之后方可开放。

4.4 假若某一场址的有限制开放在得到审批之后需改变其限制条件（如场址用途或其它条件），则必须经过审管部门的重新审批。

5 关于非辐射危害方面的管理要求

污染厂址的开放，除辐射危害方面的控制要求外，还必须满足其它非辐射危害方面（如有害病菌、病毒、化学毒物等）的管理要求。

附录 A (提示的附录)

土壤中剩余放射性水平推导中用到的计算模式与参数

A.1 照射途径分析

关于受污染土壤对公众所引起的照射的估算,在国内一些退役报告中曾对其进行过分析、计算。在国外,许多国家对此也进行了研究。根据现已收集到的有关文献资料,结合国内退役场址的特点,考虑其照射途径为:(1)食入与污染土壤有关的食物(包括有:蔬菜、谷物、奶、肉类);(2)地表外照射;(3)通过再悬浮引起的吸入内照射;(4)饮用受污场址附近的地下水。

A.2 剂量模式

(1) 总剂量

对于污染土壤的照射剂量的估算,其总有效剂量应等于上述各途径产生的剂量的总和。

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

式中: D_{tot} ——总有效剂量 (Sv/a);

D_{ing} ——通过食入受污产(食)品产生的有效剂量 (Sv/a);

D_{inh} ——吸入再悬浮污染物产生的有效剂量 (Sv/a);

D_{ext} ——地表外照射产生的有效剂量 (Sv/a);

D_{dw} ——通过饮水途径所产生的有效剂量 (Sv/a)。

作为铀系蜕变子体氡及其子体所产生的剂量贡献,显然在对地表外照、微尘再悬浮吸入和食物链内照射途径中已经包括在内(并且假定氡与其子体完全平衡),但作为从土壤中扩散出来的空气中游离氡及其子体的吸入内照射剂量未单独计算。因为有下列三方面原因:

- 上述已考虑的途径中,作完全平衡假定是保守的,其计算结果已大部分覆盖了氡及其子体的贡献。
- 国际上通常也不分开考虑释出氡的贡献。
- 氡的扩散和稀释条件因情况而异,不易假定计算条件。

(2) 通过食入受污产(食)品产生的剂量的估算

对于污染产品的摄入,一般考虑以下几种情形:(a)蔬菜;(b)农产品;(c)奶;(d)肉类。

对于不同食品中放射性核素的浓度分别用下面公式计算:

(a) 蔬菜及谷物中核素的浓度

$$c_g = \frac{B_v \cdot c_v \cdot d}{p}$$

式中: c_g ——核素在农产品中的浓度 (Bq/kg);

B_v ——核素在农产品中的浓集因子 (Bq/kg)/(Bq/kg 干土壤);

c_v ——核素在土壤中的浓度 (Bq/cm³);

d ——根系层深度 (cm);

p ——根系层区土壤“有效”密度(指到根系层底的每平方米表面内干土壤的重量) (kg/cm²)。

(b) 奶中的核素浓度。

$$c_m = c_g \cdot F_m \cdot Q_l$$

式中: c_m ——奶中放射性核素的浓度 (Bq/L);

c_g ——饲料中核素浓度 (Bq/kg);

F_m ——核素在牛奶中的转移因子 d/L (奶牛每天摄入的核素量转移到每升牛奶的平均份额);

Q_t ——奶牛每天摄入饲料量 (kg/d)。

(c) 肉类中放射性核素的浓度

$$c_t = c_g \cdot F_t \cdot Q_t$$

式中： c_t ——肉中的放射性核素的浓度 (Bq/kg)；

c_g ——饲料中放射性核素的浓度 (Bq/kg)；

F_t ——核素在肉类中的浓集因子 d/kg (动物每天摄入的核素量转移到每公斤肉中的平均份额)；

Q_t ——饲料摄入量 (kg/d)。

(d) 通过各种食入途径产生的总有效剂量

$$D_{ing} = (L_p + L_1 + L_m + L_t) \cdot DF_{ing}$$

式中： D_{ing} ——通过食入途径产生的总有效剂量 (Sv/a)；

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

$L_1 = U_1 \cdot c_g$ ——通过蔬菜每年摄入的核素的量 (Bq/a)；

$L_m = U_m \cdot c_m$ ——通过食入牛奶每年摄入的核素的量 (Bq/a)；

$L_t = U_t \cdot c_t$ ——通过肉类每年摄入的核素的量 (Bq/a)；

U_1 、 U_p 、 U_m 、 U_t ——个人每年摄入不同类食品的量 (kg/a)；

DF_{ing} ——食入内照射剂量转换因子 (Sv/Bq)。

(3) 通过吸入再悬浮污染物产生的有效剂量

$$D_{inh} = \frac{C_v \cdot A_1 \cdot U_b \cdot DF_{inh}}{\rho}$$

式中： D_{inh} ——通过吸入途径所产生的有效剂量 (Sv/a)；

C_v ——核素在土壤中的浓度 (Bq/cm³)；

A_1 ——再悬浮造成的空气中尘埃的浓度 (g/m³)；

U_b ——个人呼吸速率 (m³/a)；

DF_{inh} ——吸入内照射剂量转换因子 (Sv/Bq)；

ρ ——土壤密度 (g/cm³)。

在计算中关键的是确定再悬浮空气中尘埃的浓度，但由于不同场址在地域及其自然条件的差异，使得对再悬浮因子的确定比较困难，一些国家，例如美国则采用实测的方法，即先对其国内大部分厂址进行实测，取其平均值直接用于计算。

(4) 通过饮水途径引起的内照射剂量的计算

通过饮水途径所造成的公众的照射剂量可由下式计算

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

式中： D_{dw} ——通过饮水途径产生的个人年有效剂量 (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)。

受污染厂址的放射性核素通过降雨被浸出后入渗到地下水而造成地下水的污染。而且在计算中假定是全场址浸出然后点源瞬时释放，因此是保守的假定。对水中的放射性核素浓度的计算方法有很多，在此采用较为保守的最小稀释倍数法进行计算。该方法是通过求出最小稀释倍数，从而由释放浓度得出下游方向 x 距离处地下水中核素的最大浓度，在计算剩余放射性可接受水平时，假定井位距释放点 100m。

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

式中： $c_{max}(x, t)$ —— t 时刻，下游 x 米处的最大浓度 (Bq/cm³)；

D_{min} —— t 时刻下游 x 米处的最小稀释倍数；

$c_0(0, 0)$ ——在 $t=0, x=0$ 时瞬时释放的核素在水中浓度 (Bq/cm³)。

污染厂址中地下水中放射性核素的初始浓度可以通过下式进行计算：

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

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

式中： $R_i(t)$ ——核素由土壤向地下水的释放速率(Bq/a)；

I ——大气降水年入渗到土壤中的水量(cm/a)，等于(1—径流份额)×年降水量—年蒸发量—年蒸腾量+年灌溉量；

A ——污染场址面积(cm^2)；

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)；

T ——污染土壤层深度(cm)；

c_i ——污染厂区放射性核素 i 在土壤中的浓度(Bq/g)。

在有界含水层表面释放点下游的某个距离上，可以认为浓度在垂直方向已混合均匀了，靠近释放点，或者在无限含水层中，含水层的下边界会影响垂直弥散，在这两个区之间，有一个不能认为浓度是混合均匀的区域，边界（顶和底）影响着弥散。在厚度不变的均匀有界含水层中，垂直的混合程度可表示为：

$$\phi = \frac{b^2}{a_T \cdot x}$$

式中： a_T ——垂（横）向弥散度 (cm)；

b ——含水层厚度 (cm)；

x ——释放点到下游的距离 (cm)。

可以用 ϕ 值近似表达上述三个区域含水层特征：

A: 若 $\phi < 3.3$ ，垂向混合均匀程度大于 90%

B: $3.3 < \phi < 12$ ，释放物既无完全混合，又不受边界影响

C: $\phi > 12$ ，释放物受含水层垂直边界影响不超过 10%

对上述三个区域，在其下游 x 处的最小稀释倍数分别采用下面公式计算：

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

$$D_{\min} = \frac{R_d 4\pi n_e \sqrt{a_L a_T x b}}{V_T F(\phi)} \exp(\lambda x) \quad (3.3 < \phi < 12)$$

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

式中： D_{\min} ——最小稀释倍数；

R_d ——滞后系数

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

n_e ——有效孔隙度；

V_T ——液体源项体积(cm^3)；

a_L, a_T ——纵向及横向弥散度(cm) ($a_L = D_L/U, a_T = D_T/U, D_L, D_T$ 分别为纵(横)向弥散系数, U 为地下水孔隙流速)；

K_d ——放射性核素的分配系数(ml/g)；

ρ_b ——土壤的总体密度(g/cm^3)；

x ——下游的距离(cm)；

b ——含水层厚度(cm)；

t ——迁移时间(a) ($t = \frac{x}{U} R_d, U$ 地下游水孔隙流速, cm/a);

λ ——放射性衰变常数(a⁻¹)。

混合因子 $F(\phi)$ 是 ϕ 的复杂函数, 见下式:

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

ϕ 值小时, $F(\phi)$ 接近 1.0, 为垂向混合的情况; ϕ 值大时, $F(\phi)$ 的斜率为 1/2, 为没有反射混合的情况。

(5) 地表外照射产生的有效剂量 D_{ext} 的估算

本工作中, 对于污染土壤层产生的外照剂量转换因子 DF_{ext} , 我们参考有关文献给出的数据, 和我们自己利用 $M-C$ 方法计算的结果作了比较, 发现他们之间在合理的误差范围内符合, 因此我们采用自己通过 $M-C$ 方法得出的计算值。

a) 污染在土壤中沿深度方向均匀分布, 污染土壤层深 30 cm, 无限大。

b) 土壤密度 1.4 g/cm³。

c) 假定无其它覆盖层。

d) 人员在污染土壤区的占有和屏蔽因子为 0.6 (即假定人员全年有 50% 时间在室内, 而室内的剂量率为室外无限大区域上剂量率的 0.7 倍)。且在室外时, 其中有一半时间在非污染区活动。因此占有和屏蔽因子:

$$F_c = 0.5 \times 0.7 + 0.5 \times 0.5 = 0.6$$

$$D_{\text{ext}} = c_i \cdot F_c \cdot DF_{\text{ext}}$$

上式中: D_{ext} ——由污染土壤层产生的 γ 辐射外照年有效剂量 (Sv/a);

c_i ——土壤中污染核素浓度 (Bq/g);

F_c ——占有屏蔽因子 (0.6);

DF_{ext} —— γ 外照剂量转换因子 (Sv/a) (Bq/g)。

A.3 放射性物质的衰变与损耗

假定自退役后, 经过一段时间以后才开放和允许公众在厂址内进行活动, 包括永久居住。那么核素在这个过程中的损失率常数可以表示为:

$$\lambda_T = \lambda_R + \lambda_E$$

式中: λ_T ——总损失率常数;

λ_R ——核素的衰变率常数;

λ_E ——环境损失率常数, λ_E 即前面 A.2 节(4) 段中给出的核素浸出率 L_i (a⁻¹)。

$$\lambda_E = \frac{R_q}{\theta T \left[1 + \left(\frac{\rho}{\theta} K_d \right) \right]}$$

式中: R_q ——该场址的土壤中水含量的年净增量 cm/a, 为年降雨量+年灌溉量-年蒸发量-年流失量;

θ ——单位体积土壤中含水量 (ml/cm³);

T ——土壤层深度 (cm) (一般取 15 < T < 30, 计算中假定为 30 cm);

ρ ——土壤密度 (g/cm³);

K_d ——核素的分配系数 (ml/g)

A.4 计算参数的选定

在计算关键居民组剂量时, 考虑到对⁶⁰Co、¹³⁷Cs 及²³⁸U 子体主要是外照射贡献, 对钚主要是吸入贡献, 而对吸入剂量而言, 成人的呼吸比幼儿大出的倍数比剂量因子的差别更加重要。⁹⁰Sr 虽然以食入为主, 但并不以奶为主。因此计算中一律以成人的剂量为准, 是偏保守的。

(1) 个人饮水量* (L/a)

| 幼儿(0~7岁) | 少年(8~17岁) | 成人(≥18岁) |
|----------|-----------|----------|
| 400 | 500 | 730 |

* 资料来源于《中国核工业三十年辐射环境质量评价》，潘自强等，1990，原子能出版社。

(2) 食谱*

| 食品 | 谷类 | 蔬菜类 | 肉类 | 乳类 |
|-----------|-------|-------|------|-----|
| 消费量(kg/a) | 160.2 | 117.6 | 21.3 | 5.2 |

* 1) 资料来源于“中国人膳食组成及食入元素和放射性核素摄入量研究(一) 全国性调查结果”，诸洪达等，《辐射防护通讯》，1996. 4, No2.

2) 该数据为1992年29省、市统计结果。

3) 肉类包括猪肉、牛羊肉及禽肉。

(3) 牲畜对饲料及水的消费量*

| 动物 | 饲料消费量(干),kg/a | 水消费量,L/a |
|----|---------------|----------|
| 牛 | 5 110 | 20 075 |
| 羊 | 547.5 | 2 920 |
| 猪 | 1 533 | 3 650 |
| 家禽 | 43.8 | 109.5 |

* 资料来源于《中国核工业三十年辐射环境质量评价》，潘自强等，1990，原子能出版社。

(4) 根系层(耕作层)深度*

15cm

* 资料来自 John E. Till 等“A Pathway Analysis Approach For Determining Acceptable Levels of Contamination of Radionuclides in Soil”. HEALTH PHYSICS Vol. 55, No3, 1988.

(5) 用于计算核素在植物中转移的土壤表观密度*

200 kg/m²

* 资料来源同(4)。

(6) 公众呼吸速率* (m³/a)

| 幼 儿 | 少 年 | 成 人 |
|-------|-------|-------|
| 1 400 | 5 500 | 8 000 |

* 资料来源于《中国核工业三十年辐射环境质量评价》，潘自强等，1990，原子能出版社。

(7) 元素在植物中的浓积因子*

| 元 素 | 干牧草/土壤[(Bq/kg)/(Bq/kg)] | 谷物/土壤[(Bq/kg)/(Bq/kg)] |
|-----|-------------------------|------------------------|
| Am | 5.5×10^{-3} | 1.1×10^{-4} |
| Cm | 8.5×10^{-4} | 6.4×10^{-6} |
| Co | 2.0×10^{-2} | 3.0×10^{-3} |
| Cs | 8.0×10^{-2} | 1.3×10^{-2} |
| Pu | 4.5×10^{-4} | 1.9×10^{-5} |
| Sr | 2.5×10^{-0} | 1.1×10^{-1} |
| Th | 8.5×10^{-4} | 3.6×10^{-5} |
| U | 8.5×10^{-3} | 1.7×10^{-3} |

* 资料来源同(4)。

(8) 再悬浮后空气中粉尘浓度*

0.0003 g/m³

(9) 土壤密度

1.4 g/m³

(10) 元素由根部吸收转入奶及肉类中的转移因子 (F_m, F_r)*

| 元 素 | 奶(d/L) | 肉类(d/kg) |
|-----|----------------------|----------------------|
| Am | 5.0×10^{-6} | 2.0×10^{-4} |
| Cm | 5.0×10^{-6} | 2.0×10^{-4} |
| Co | 1.0×10^{-3} | 1.3×10^{-2} |
| Cs | 1.2×10^{-2} | 4.0×10^{-3} |
| Th | 5.0×10^{-6} | 6.0×10^{-6} |
| Pu | 2.0×10^{-6} | 1.4×10^{-5} |
| Sr | 8.0×10^{-4} | 6.0×10^{-4} |
| U | 6.0×10^{-4} | 2.0×10^{-4} |

* 资料来源同 (4)。

(11) 分配系数* (K_d) ml/g

| 元 素 | K_d (ml/g) |
|-----|-------------------|
| Am | 1.0×10^2 |
| Cm | 3.2×10^2 |
| Co | 1.0×10^1 |
| Cs | 5.0×10^2 |
| Th | 1.0×10^2 |
| Pu | 1.0×10^2 |
| Sr | 7.9×10^0 |
| U | 4.0×10^1 |

* 资料来源同 (4)。

(12) 厂区污染面积

10 000 m²

(13) 厂区污染土壤层深度

30 cm

(14) 污染厂址土壤含水率 θ

0.23 ml/cm³

(15) 污染厂址土壤有效孔隙度 n_e

0.23

(16) 污染厂址含水层厚度 b

500 cm

(17) 污染厂址地下水的纵、横向弥散系数 D_L, D_T

2.20 m²/d

0.09 m²/d

(18) 污染厂址地下水流速 U

1.0 m/d

(19) 污染浸出水进入地下水 (假定在场址的中央) 到第一个饮用井的距离 x :

100 m

(20) 厂区降水年入渗量 I

0.19 m/a

(21) 核素剂量转换因子 (公众)*

| 核素 | 食入(Sv/Bq) | 吸入(Sv/Bq) |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| ⁶⁰ Co | 3.4×10^{-9} | 3.1×10^{-8} |
| ⁹⁰ Sr | 2.8×10^{-8} | 1.6×10^{-7} |
| ¹³⁷ Cs | 1.3×10^{-8} | 3.9×10^{-8} |
| ²³⁹ Pu | 2.5×10^{-7} | 1.2×10^{-4} |
| ²⁴¹ Am | 2.0×10^{-7} | 9.6×10^{-5} |
| ²⁴⁴ Cm | 1.2×10^{-7} | 5.7×10^{-5} |

*注: 1. 数据为国际原子能机构安全丛书NO. 115(1996)提供的最新数据。

2. 对内照射剂量转换因子选用成人的F、M、S三类中最大的一类数据。

(22) ²³⁸U、²³⁵U、²³²Th及他们的子体的剂量转换因子*

| 核素 | 食入(Sv/Bq) | 吸入(Sv/Bq) |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| ²³⁵ U+子体 | 4.7×10^{-8} | 8.5×10^{-6} |
| ²³¹ Pa | 7.1×10^{-7} | 1.4×10^{-4} |
| ²²⁷ Ac+子体 | 1.2×10^{-6} | 5.7×10^{-4} |
| ²³⁸ U+子体 | 4.9×10^{-8} | 8.0×10^{-6} |
| ²³⁴ U | 4.9×10^{-8} | 9.4×10^{-6} |
| ²³⁰ Th | 2.1×10^{-7} | 1.0×10^{-4} |
| ²²⁶ Ra+子体 | 2.2×10^{-7} | 2.0×10^{-5} |
| ²³² Th+子体 | 1.2×10^{-6} | 1.8×10^{-4} |

*注: 1) ²³⁵U+子体包括²³⁵U、²³¹Th

²²⁷Ac+子体包括²²⁷Ac、²²⁷Th、²²³Fr、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po、²¹¹Pb、²¹¹Bi、²⁰⁷Tl、²¹¹Po

²³⁸U+子体包括²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa

²²⁶Ra+子体包括²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁸At、²¹⁴Po、²¹⁰Tl、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po

2) 数据来源同(21)

3) ²³²Th+子体包括: ²³²Th+²²⁸Ra+²²⁸Ac+²²⁸Th+3×²²⁴Ra+²¹²Pb+²¹²Bi

(23) 30cm污染土壤层的 γ 辐射外照射剂量转换因子(DF_{ext})*

| 核素 | DCF(Sv/a)/(Bq/g) | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| | $\rho=1.4\text{g/cm}^3$ | $\rho=1.6\text{g/cm}^3$ |
| ¹³⁷ Cs+子体 | 1.25×10^{-3} | 1.27×10^{-3} |
| ⁶⁰ Co | 5.52×10^{-3} | 5.58×10^{-3} |
| ²³² Th+子体 | 1.85×10^{-3} | 1.88×10^{-3} |
| ²³⁸ U | | |
| ²³⁸ U→ ²³⁴ Pa(链1) | 2.72×10^{-5} | 2.96×10^{-5} |
| ²³⁸ U→ ²³⁴ U(链2) | 2.76×10^{-5} | 3.00×10^{-5} |
| ²³⁸ U→ ²¹⁰ Tl(链3) | 3.63×10^{-5} | 3.77×10^{-5} |
| ²³⁸ U→ ²¹⁰ Po(链4) | 3.64×10^{-5} | 3.77×10^{-5} |

续表

| 核素 | DCF(Sv/a)/(Bq/g) | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| | $\rho=1.4\text{g/cm}^3$ | $\rho=1.6\text{g/cm}^3$ |
| ²³⁵ U | | |
| ²³⁵ U→ ²³¹ Th(链1) | 2.41×10^{-4} | 2.41×10^{-4} |
| ²³⁵ U→ ²³¹ Pu(链2) | 2.98×10^{-4} | 2.98×10^{-4} |
| ²³⁵ U→ ²¹¹ Po(链3) | 1.00×10^{-3} | 1.00×10^{-3} |

- *注:(1)²³⁸U→²³⁴Pa(链1)核素包括:²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa
 (2)²³⁸U→²³⁴Ua(链2)核素包括:²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U
 (3)²³⁸U→²¹⁰Tl(链3)核素包括:²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi、²¹⁴Po、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po
 (4)²³⁸U→²¹⁰Po(链4)核素包括:²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi、²¹⁴Po、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po
 (5)²³⁵U→²³¹Th(链1)核素包括:²³⁵U、²³¹Th
 (6)²³⁵U→²³¹Pu(链2)核素包括:²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu
 (7)²³⁵U→²¹¹Po(链3)核素包括:²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu、²²⁷Ac、²²⁷Th、²²³Fr、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po、²¹¹Pb、²¹¹Bi、²⁰⁷Tl、²¹¹Po
 (8)²³²Th 包括其所有子体核素

A.5 计算结果

所得计算结果见表 A.1 和表 A.2。

表 A.1 土壤污染水平为 1Bq/g 情况下几种放射性核素对个人所产生的年照射剂量和基于年剂量约束值为 0.1mSv 所导出的土壤中剩余放射性可接受水平

| 核素 | 外照射剂量 (Sv/a) | 食入内照射剂量 (Sv/a) | 吸入内照射剂量 (Sv/a) | 饮水产生的内照射剂量 (Sv/a) | 总剂量 (Sv/a) | 可接受水平 (Bq/g) |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Co-60 | 3.3×10^{-3} | 2.9×10^{-6} | 7.4×10^{-8} | 1.3×10^{-5} | 3.3×10^{-3} | 3.0×10^{-2} |
| Sr-90 | 0 | 8.8×10^{-4} | 3.8×10^{-7} | 1.1×10^{-4} | 9.8×10^{-4} | 1.0×10^{-1} |
| Cs-137 | 7.5×10^{-4} | 5.1×10^{-5} | 1.6×10^{-8} | 0 | 8.0×10^{-4} | 1.2×10^{-1} |
| Pu-238 | 0 | 1.2×10^{-6} | 2.6×10^{-4} | 0 | 2.7×10^{-4} | 3.8×10^{-1} |
| Pu-239 | 0 | 1.3×10^{-6} | 2.9×10^{-4} | 8.8×10^{-6} | 3.0×10^{-4} | 3.4×10^{-4} |
| Am-241 | 0 | 6.1×10^{-3} | 2.3×10^{-4} | 5.4×10^{-6} | 2.4×10^{-4} | 4.1×10^{-1} |
| Cm-244 | 0 | 2.1×10^{-7} | 1.4×10^{-4} | 0 | 1.4×10^{-4} | 7.3×10^{-1} |
| Th-232+D | 1.1×10^{-3} | 7.1×10^{-6} | 4.3×10^{-4} | 4.1×10^{-5} | 1.6×10^{-3} | 6.3×10^{-2} |

注: Th-232+D 包括其所有子体核素。

表 A.2 土壤污染水平为 1Bq/g 情况下²³⁵U 及²³⁸U 对个人所产生的年照射剂量和基于年剂量约束值为 0.1mSv 所导出的土壤中剩余放射性可接受水平

| 核素 | 外照射剂量 (Sv/a) | 食入内照射剂量 (Sv/a) | 吸入内照射剂量 (Sv/a) | 饮水产生的内照射剂量 (Sv/a) | 总剂量 (Sv/a) | 可接受水平 (Bq/g) |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| U-238 | | | | | | |
| 链1 | 1.6×10^{-5} | 1.4×10^{-5} | 1.9×10^{-5} | 1.1×10^{-5} | 6.0×10^{-5} | 1.6×10^0 |
| 链2 | 1.7×10^{-5} | 2.8×10^{-5} | 4.2×10^{-5} | 2.2×10^{-5} | 1.1×10^{-4} | 9.1×10^{-1} |
| 链3 | 2.2×10^{-3} | 9.0×10^{-5} | 2.8×10^{-4} | 6.8×10^{-5} | 2.6×10^{-3} | 3.8×10^{-2} |
| 链4 | 2.2×10^{-3} | 7.4×10^{-4} | 3.3×10^{-4} | 5.5×10^{-4} | 3.8×10^{-3} | 2.6×10^{-2} |

续表

| 核素 | 外照射剂量 (Sv/a) | 食入内照射剂量 (Sv/a) | 吸入内照射剂量 (Sv/a) | 饮水产生的内 照射剂量 (Sv/a) | 总剂量 (Sv/a) | 可接受水平 (Bq/g) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| ²³⁵ U | | | | | | |
| 链 1 | 1.4×10^{-4} | 1.4×10^{-5} | 2.0×10^{-5} | 1.0×10^{-5} | 2.0×10^{-4} | 5.0×10^{-1} |
| 链 2 | 1.8×10^{-4} | 2.2×10^{-4} | 3.6×10^{-4} | 1.7×10^{-4} | 9.3×10^{-4} | 1.2×10^{-1} |
| 链 3 | 6.0×10^{-4} | 5.8×10^{-4} | 1.7×10^{-3} | 2.0×10^{-4} | 3.1×10^{-3} | 3.2×10^{-2} |

- 注：(1) ²³⁸U 链 1 为 ²³⁸U→²³⁴Pa，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa
- (2) ²³⁸U 链 2 为 ²³⁸U→²³⁴U，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U
- (3) ²³⁸U 链 3 为 ²³⁸U→²¹⁰Tl，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi、²¹⁴Po、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po
- (4) ²³⁸U 链 4 为 ²³⁸U→²¹⁰Po，核素包括：²³⁸U、²³⁴Th、^{234m}Pa、²³⁴Pa、²³⁴U、²²⁶Ra、²²²Rn、²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi、²¹⁴Po、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po
- (5) ²³⁵U 链 1 为 ²³⁵U→²³¹Th，核素包括：²³⁵U、²³¹Th
- (6) ²³⁵U 链 2 为 ²³⁵U→²³¹Pu，核素包括：²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu
- (7) ²³⁵U 链 3 为 ²³⁵U→²¹¹Po，核素包括：²³⁵U、²³¹Th、²³¹Pu、²²⁷Ac、²²⁷Th、²²³Fr、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po、²¹¹Pb、²¹¹Bi、²⁰⁷Tl、²¹¹Po