

CNIC-01091

CIRP-0014



CN9700772

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

预测核事故辐射后果的动态食物链模式与程序

A DYNAMIC FOOD-CHAIN MODEL AND PROGRAM
FOR PREDICTING THE RADIOLOGICAL
CONSEQUENCES OF NUCLEAR ACCIDENT

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press



胡二邦:研究员,中国辐射防护研究院环境科学研究所所长。享受政府特殊津贴,被授予部级“有突出贡献的中青年专家”称号。1964年毕业于清华大学工程物理系辐射防护专业。

HU Erbang: Research fellow, director of Environment Science Institute, China Institute for Radiation Protection. Enjoy special government allowance and being granted the Ministry-grade outstanding young or middle-aged specialist, CNNC. Graduated from Department of Engineering Physics, Tsinghua University in 1964, majoring in radiation protection.

CNIC-01091

CIRP-0014

预测核事故辐射后果的动态食物链模式与程序

胡二邦 高占荣 张和原 卫为强

(中国辐射防护研究院, 太原)

摘 要

DYFOM-95 是新近建立与开发的能预测核事故后果的动态食物链模式与程序。它既适用于西方饮食谱, 也适用于中国居民的饮食谱。此模式考虑了干、湿沉积截获和初始滞留、易位、入渗、根部吸收、耕作等过程对事故释放导致的植物可食部位中核素浓度的影响。也考虑了动物对核素的摄入、食品加工的影响及人体食入途径对核素的摄入率。在干沉积中考虑了有效叶面积指数对干沉积量的影响, 在湿沉积中考虑了事故期间不同时段不同降雨强度对湿沉积量的贡献的计算方法。程序由一个主程序和五个子程序组成, 分别计算植物与土壤表面的干、湿沉积量、核素在植物中的易位、植物可食部位及动物产品中的核素浓度及人体的摄入量等。

**A Dynamic Food-chain Model and Program
for Predicting the Radiological
Consequences of Nuclear Accident**
(In Chinese)

HU Erbang GAO Zhanrong ZHANG Heyuan WEI Weiqiang
(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan)

ABSTRACT

A dynamic food-chain model and program, DYFOM-95, for predicting the radiological consequences of nuclear accident has been developed, which is not only suitable to the West food-chain but also to Chinese food chain. The following processes, caused by accident release which will make an impact on radionuclide concentration in the edible parts of vegetable are considered: dry and wet deposition interception and initial retention, translocation, percolation, root uptake and tillage. Activity intake rate of animals, effects of processing and activity intake of human through ingestion pathway are also considered in calculations. The effects of leaf area index LAI of vegetable are considered in dry deposition model. A method for calculating the contribution of rain with different period and different intensity to total wet deposition is established. The program contains 1 main code and 5 sub-codes to calculate dry and wet deposition on surface of vegetable and soil, translocation of nuclides in vegetable, nuclide concentration in the edible parts of vegetable and in animal products and activity intake of human and so on.

引言

前苏联切尔诺贝利事故后，西方各国十分关注它对欧洲大陆所造成的后果。IAEA 与 CEC 自 1988 年组织了大型国际协调研究项目“核素在陆地、水体、城市诸环境中迁移模式有效性研究”^[1]（简称 VAMP），有 20 几个国家参加，其中大部分国家采用动态食物链模式^[2]。我们作为中国代表，也参加了此项研究，采用的是准稳态或半动态模式^[3]。在参加国际比对的同时，为了建立我国第一代的动态食物链模式与中国食物链的部分转移参数，我们开展了“动态食物链模式，参数的理论与实验研究”工作，对国外食物链模式也进行了调研^[4~12]，作为初次尝试，开发了既适用于西方各国，也适用于中国的动态食物链模式及其程序。图 1 为此模式的原理框图。

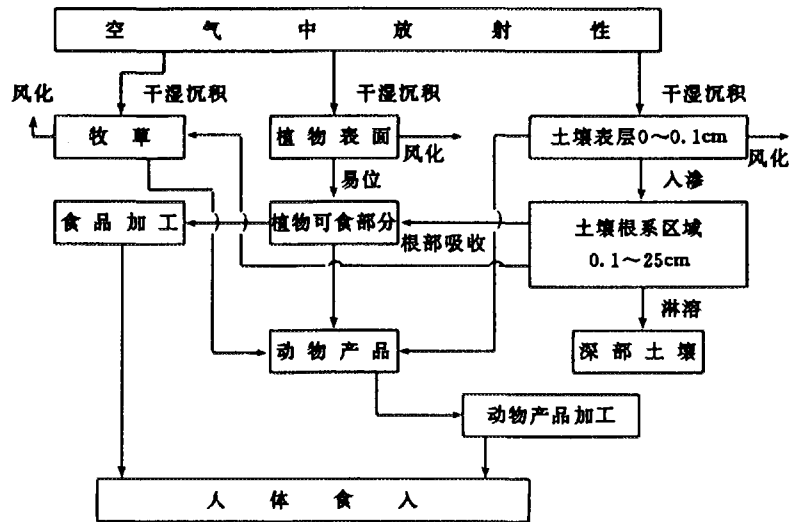


图 1 原理框图

1 干、湿沉积截获与初始滞留^[13,14]

1.1 植物表面的干沉积

当事故持续时间较长，植物受放射云照射期间内的放射性衰减不能忽略时（例设计基准事故、持续时间 t_b 约为 30 d，切尔诺贝利事故， $t_b \approx 15$ d），则放射性烟云经过某处上方所造成的 j 类植物 i 核素的干沉积量 $A_{dij}(t_e)$ ($Bq \cdot m^{-2}$) 由下式给出：

$$A_{dij}(t_e) = V_{dij} \cdot X_i \frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i} \quad (1)$$

式中， X_i 为事故发生后某处地面空气中 i 核素的浓度 ($Bq \cdot m^{-3}$)， V_{dij} 为 i 核素向 j 类植物的干沉积速度 ($m \cdot s^{-1}$)， λ_i 为 i 核素的放射性衰减常数 (s^{-1})， t_e 为沉积事件结束时刻， Δt 为放射性烟羽飘过计算区域的时间长度 (s)。

V_{dij} 与植物叶子表面积有关，在此引入叶面积指数 LAI ， LAI 定义为单位面积土壤上的植物叶子面积。因此，本程序中采用下述公式估算 V_{dij} ^[2]：

$$V_{dij} = V_{dij,max} \frac{LAI_j(t_e)}{LAI_{j,max}} \quad (2)$$

式中, $V_{dij,max}$ 为 i 核素 j 类植物的最大沉积速度 (即 j 类植物叶子生长最多时的沉积速度) ($m \cdot s^{-1}$), $LAI_j(t_e)$ 为沉积结束时刻 (t_e) 的 j 类植物的叶面积指数。

$LAI_{j,max}$ 为 j 类植物叶子生长到最大时的叶面积指数, 表 1 给出 $V_{dij,max}$ 的推荐值^[4], 表 2 给出德国南部的 LAI 值, 以供计算西欧的事故后果时参考, 表 3 给出我们在太原地区进行的实验测量值, 供计算我国核事故后果参照用。

表 1 沉积速度 $V_{d,max}$ ^[4]

表面类型	沉积速度/ $mm \cdot s^{-1}$		
	粒态核素	元素碘	有机碘
土壤	0.5	3	0.05
牧草	1.5	1.5	0.15
树	5	50	0.5
其他植物	2	20	0.2

表 2 德国南部条件下牧草的产量 ($kg \cdot m^{-2}$ 鲜重) 和叶面积指数实测值 ($m^2 \cdot m^{-2}$)^[4]

植 物		产量或叶面积指数 (LAI)				
		日期	1.1	3.15	5.15	10.30
牧 草	日期	1.1	3.15	5.15	10.30	11.1
	产量	0.01	0.05	1.5	1.5	0.05
牧草 (大范围)	日期	1.1	3.15	7.1	10.30	11.1
	产量	0.01	0.05	1.5	1.5	0.05
冬小麦	日期	1.1	4.20	6.10	8.5	8.6
	LAI	0	1	7	1	0
春小麦	日期	4.15	6.20	8.15	8.16	
	LAI	0	6	1	0	
冬大麦	日期	1.1	4.1	5.25	7.15	7.16
	LAI	0	1	6	1	0
春大麦	日期	4.15	6.15	8.5	8.6	
	LAI	0	5	1	0	
燕 麦	日期	4.15	6.20	8.15	8.16	
	LAI	0	5	1	0	
黑 麦	日期	1.1	3.20	5.20	8.1	8.2
	LAI	0	1	6	1	0
玉 米	日期	5.15	6.20	8.1	10.15	10.16
	LAI	0	1	5	4	0
甜 菜	日期	5.10	6.20	8.1	11.1	11.2
	LAI	0	1	4	3	0
土 豆	日期	5.20	7.1	8.1	9.15	
	LAI	0	4	4	0	
根类、果类蔬菜、 水果、草莓	日期	4.15	7.1	10.1	11.1	
	LAI	0	5	5	0	

表3 太原地区各植物叶面积指数/m²·m⁻²

植物	日期	叶面积指数 (LAI)
冬小麦	4.13	1.19
	4.22	2.33
	4.29	2.66
	5.6	2.92
	5.13	3.69
水稻	7.18	1.92
	8.1	3.48
	8.15	4.58
	8.24	4.83
土豆	6.27	0.87
	7.2	1.48
	7.18	1.50
	8.1	2.13
萝卜	9.5	0.48
	9.12	0.52
	9.19	0.81
	9.26	1.30
	10.3	1.77

1.2 植物对干、湿沉积核素的截获与初始滞留^[14~19]

当空气中的核素（或污染物）因干、湿沉积过程向地面沉积时，其中一部分被植物所截获，而其余部分则到达地面。被植物所截获的那部分核素（或污染物），因反弹（Bounce）、滚动、风吹或雨水冲刷等原因，其中一部分会离开植物到达地面，其余的将滞留在植物表面。沉积物质中被植物表面截获并初始滞留（即没有吹走或雨水冲刷走）的份额称为滞留份额 f 。 f 与沉积时植物的生物量 B 有下述关系：

$$f = 1 - e^{-(\mu B)} \quad (3)$$

式中， B 为沉积发生过程单位面积植物的生物量（干重）（ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ）； μ 为吸收系数（ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ）。

因此，沉积核素落入土壤表面的份额 f_s 则为：

$$f_s = 1 - f = e^{-(\mu B)} \quad (4)$$

对于气体与粒度小于几微米的粒子，通常采用的 μ 值为 $\mu = 2.8 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。测得沉积发生时的 B 值，则可求得 f 值，当植物生长最丰满时， B 值最大， f 就趋于 1。

1.3 土壤表面的干沉积

如上所述，沉积物质中部分被植物表面截获并滞留，部分到达土壤表面，各自的份额由 (3)、(4) 式估算。鉴于 B 值比较难以得到，对大多数植物而言，可认为 B 值的大小与 LAI 的大小近似呈正比例关系，即可近似认为 B 值最大时 LAI 也最大，因而可近似认为

LAI 达最大值时 f 就趋近于 1, 即几乎所有沉积物质都被植物所截获而不到达地面。因而建议采用下述公式来近似估算地表干沉积量。

$$A_{dij}(t_c) = X_i V_{dij, \max} \left(1 - f_s \frac{LAI_j}{LAI_{j, \max}} \right) \frac{1 - e^{-\lambda_i t_c}}{\lambda_i} \quad (5)$$

式中, f_s 为一因子, 考虑到 LAI 即使达到 LAI_{\max} 时, 由于种植的密度等原因, 植物叶子不一定都能完全覆盖土壤表面, 总有部分核素到达地面, 因此作为偏保守的考虑, 在计算土壤的干沉积时建议 f_s 取值 0.5 (即不到 2 倍的安全系数)。

1.4 湿沉积与植物对湿沉积核素的截获与初始滞留

湿沉积^[19]包括冲洗 (Washout) 和雨洗 (Rainout) 两个过程。雨洗是指放射性物质从空气中清除并转移到雨云中的雨滴上的过程。若雨云高于放射性烟羽, 当雨滴穿过放射性烟羽时, 粒子则因布朗运动、惯性或冲撞力从空气中清除而与雨滴相并合, 此过程称为冲洗。对于不太高的放射性烟羽, 雨洗过程可以忽略。

目前描述因冲洗造成的核素湿沉积的方法有两类: 冲洗率 (Washout rate) 方法 (也称冲洗系数法或 Λ 方法) 和冲洗比 (Washout ratio) 方法 (也称 ω 方法)。对于中、近距离, 推荐采用冲洗率方法; 对于远距离, 推荐采用冲洗比方法。

1.4.1 对于中、近距离 (例 $x \leq 100$ km)

事故放射性烟羽尾部离开计算区域时刻 (t_c) (见图 2, 图中以放射性烟羽到达计算区域的时刻为 t_0) 因烟羽飘过期间发生的下雨过程 (可以若干次间断下雨) 的湿沉积造成 i 核素的总沉积量 ($Bq \cdot m^{-2}$) $A_{wi}(t_c)$ 由下式给出:

$$A_{wi}(t_c) = \sum_k \frac{8 \Lambda_{ik} \dot{Q}_i}{\pi u x} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t_k}}{\lambda_i} \right) \exp[-\lambda_i (t_c - t_k)] \quad (6)$$

式中, \dot{Q}_i 为 i 核素源强 ($Bq \cdot s^{-1}$); x 为计算区域距事故源项的下风距离 (m), Λ_{ik} 为烟羽飘过期间发生的第 k 次降水过程 (降水强度为 I_k) 所对应的 i 核素的冲洗系数 (s^{-1}); Δt_k 表示烟羽飘过期间发生的第 k 次降水过程的持续时间 (s), t_{k-1} 与 t_k 分别表示第 k 次降雨过程的起始与结束时间, 因此 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ (见图 2)。 k 表示烟羽飘过期间发生降水过程的次数。

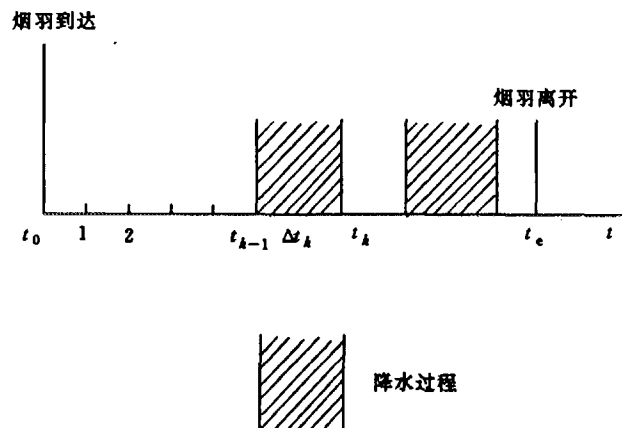


图2 放射性烟云到达计算区域后的时间/s

表4列出碘和其他粒子态核素的冲洗系数 Λ 。

表4 碘和其他粒子态核素的冲洗系数

降水强度/mm·h ⁻¹	冲洗系数 Λ/s^{-1}	
	碘	其他粒子态核素
<1	3.7×10^{-5}	2.9×10^{-5}
1~3	1.1×10^{-4}	1.22×10^{-4}
>3	2.37×10^{-4}	3.4×10^{-4}

1.4.2 对于远距离 ($x > 100$ km)

建议采用下式处理:

$$A_{wi}(t_e) = \sum_k \omega_k I_k \bar{X}_i \left(\frac{1 - e^{-\lambda_k \Delta t_k}}{\lambda_k} \right) e^{-\lambda_i (t_e - t_k)} \quad (7)$$

式中, \bar{X}_i 为计算区域飘过烟羽中 i 核素的平均浓度 ($Bq \cdot m^{-3}$), 此中假定飘过期间的 i 核素浓度不变; I_k 为烟羽飘过期间发生的第 k 次降水过程的平均降水强度 ($mm \cdot h^{-1}$); ω_k 相应于降水强度为 I_k 时的 i 核素的冲洗比. ω 的值推荐为: 对于碘, $\omega = 2 \times 10^5$, 对于其他粒子态核素, $\omega = 3 \times 10^5$.

1.5 植物对湿沉积核素的截获与初始滞留

放射性烟羽飘过期间因湿沉积造成的 j 类植物上 i 核素的沉积量 $A_{wij}(t_e)$ ($Bq \cdot m^{-2}$), 由下式给出

$$A_{wij}(t_e) = f_{wj} A_{wi}(t_e) \quad (8)$$

式中, f_{wj} 为 j 类植物的截获份额, 可由下式估算

$$f_{wj} = \frac{LAI_j S_j}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{3S_j} R\right) \right] \quad (9)$$

式中, S_j 为 j 类植物有效贮水能力 (mm); R 为放射性烟羽飘过期间的降水总量 (mm), $R = I_k \Delta t_k / 3600$ (因为 I_k 量纲为 $mm \cdot h^{-1}$, Δt_k 为 s), LAI_j 为沉积时的 j 类植物叶面积指数. S_j 的值见表5, 若 (9) 式算得的 $f_{wj} > 1$, 则取 $f_{wj} = 1$.

表5 不同植物和元素的有效贮水能力 S_j [4]

植物种类	有效贮水能力		
	I	Cs, Zr, Nb, Ru, Te, Ce, Pa, Mn, Zn	Sr, Ba
牧草, 谷物, 玉米	0.1	0.2	0.4
其他植物	0.15	0.3	0.6

1.6 土壤表面的湿沉积

放射性烟羽飘过期间, 湿沉积造成的土壤表面的 i 核素沉积量 $A_{wijp}(t_e)$ ($Bq \cdot m^{-2}$) 可采用下式估算

$$A_{wijp}(t_e) = A_{wi}(t_e) - f_{wj} A_{wi}(t_e) \quad (10)$$

1.7 土壤表面的总沉积量

当计算区域种植有 j 类植物时, 放射性烟羽飘过期间造成的土壤表面 i 核素的总沉积量 $A_{mij}(t_e)$ ($Bq \cdot m^{-2}$), 则可采用下面所述的公式进行估算.

$$A_{mij}(t_e) = A_{dijp}(t_e) + A_{wijp}(t_e) \quad (11)$$

对中、近距离

$$A_{\text{aj}}(t_e) = X_i V_s \left(1 - f_s \frac{LAI_j}{LAI_{j,\text{max}}} \right) \frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i} + (1 - f_{\text{wj}}) \times \sum_k \left\{ \frac{8\Delta_{ik} Q_k}{\pi u x} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i} \right) \exp[-\lambda_i (t_e - t_k)] \right\} \quad (12)$$

对远距离

$$A_{\text{aj}}(t_e) = X_i V_s \left(1 - f_s \frac{LAI_j}{LAI_{j,\text{max}}} \right) \frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i} + (1 - f_{\text{wj}}) \times \sum_k \left\{ \omega_{ik} I_k X_i \left(\frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i} \right) e^{-\lambda_i (t_e - t_k)} \right\} \quad (13)$$

2 易位^[12]

在植物生长期期间，因事故释入大气中的放射性核素沉积于农田后，农作物通过叶子吸收放射性核素将是导致食物与饲料污染的主要途径。叶子上的许多核素将被吸收并转移至植物的其它部位。前苏联切尔诺贝利事故后，恰是此过程导致某些谷物与蔬菜中较高的铯放射性污染。

谷类、土豆与水果等的污染既取决于沉积于叶面上的总放射性活度（初始滞留量），也取决于叶面上沉积的放射性有多大份额转移至植物的可食部位。在不同的生长期，叶面污染后的核素易位份额是不大相同的。因为易位因子与植物在沉积时的生理状态有关。

易位因子定义为1 m²土壤上在农作物可食部位中发现的放射性活度占同一面积上农作物叶面滞留放射性活度的份额。其表达式如下：

$$Tr(a) = \frac{\text{收获时在 } 1 \text{ m}^2 \text{ 土壤上可食部位中的放射性活度 (Bq} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}}{\text{沉积时在 } 1 \text{ m}^2 \text{ 土壤上叶面滞留的放射性活度 (Bq} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}}$$

基于产量的表示式：

$$Tr(Y) = \frac{\text{收获时可食部份中的放射性活度 (Bq} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}}{\text{沉积时在 } 1 \text{ m}^2 \text{ 叶面滞留的放射性活度 (Bq} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}}$$

研究表明，Cs, I, Mn, Te 和 Zn 属易动元素，Sr, Ba, Zr, Nb, Ru, Ce 和 Pu 属稳定元素。鉴于目前主要是Cs和Sr的易位实测值较丰富与可信，因而，当不能获得更可信的易位实测数据时，Cs与Sr的易位因子值可分别作为易动元素组和稳定元素组的易位因子参考值使用。

关于Cs元素在谷类中的易位因子Tr可以由下述高斯型函数估算

$$Tr(\delta t) = Tr_{\text{max}} \cdot \exp[-b(\delta t - t_{\text{max}})^2] \quad (14)$$

式中，Tr(δt)表示收割前δt时间发生的沉积相应的易位因子(m²·m⁻²或m²·kg⁻¹)；Tr_{max}为易位因子最大值；b为表征实测曲线斜率的参数；δt为距收割的时间(d)；t_{max}表示具有最大易位因子的时刻距收割的时间(d)。

表6给出(14)式中(适用于Cs元素)相应于大麦、小麦、黑麦及土豆等作物的有关参数值；表7则给出其他元素的易位因子值。对于表中未列元素，可参照Cs及Sr的易位因子值。对于叶类蔬菜与牧草，易位因子等于1。

表6 关于 Cs 易位因子的参数值

作物	易位因子 T_r 的量纲	有关参数		
		$T_{r,max}$	t_{max}/d	b/d^{-1}
大麦	m^2/m^2	0.06 ± 0.007	47 ± 2	0.0012 ± 0.0002
	m^2/kg	0.24 ± 0.004	33 ± 3	0.0011 ± 0.0003
小麦	m^2/m^2	0.08 ± 0.001	45 ± 3	0.0021 ± 0.0007
	m^2/kg	0.25 ± 0.002	40 ± 2	0.0012 ± 0.0002
黑麦	m^2/m^2	0.30 ± 0.015	59 ± 1	0.0015 ± 0.0002
	m^2/kg	0.36 ± 0.025	59 ± 1	0.0013 ± 0.0002
土豆	m^2/m^2	0.43 ± 0.122	82 ± 3	0.0022 ± 0.0009
	m^2/kg	0.04 ± 0.008	81 ± 3	0.0013 ± 0.0006

因此, 收割时 j 类植物可食部分中的放射性核素 i 的浓度 $A_{ij}(t_p)$ ($Bq \cdot kg^{-1}$) 由下式给出

$$A_{ij}(t_p) = \frac{[A_{dij}(t_e) + A_{wji}(t_e)]T_r(\delta t)}{Y_j} \quad (15)$$

式中, (t_p) 表示收割日期 (X月X日), δt 为沉积结束至收割的时间间隔 (d), $\delta t = t_p - t_e$.

$T_r(\delta t)$ 由式 (14) 算得或由表7数据内插求得, 式 (15) 中的 $T_r(\delta t)$ 采用 $T_r(a)$ 定义, 其量纲为 $m^2 \cdot m^{-2} \cdot Y_j$ 为 j 类植物的单产 ($kg \cdot m^{-2}$).

表7 若干元素的易位因子 T_r 值/ $m^2 \cdot kg^{-1}$

元素	作物	距收割前的天数					
		0	10	20	40	60	90
Mn	谷物	3×10^{-2}	4×10^{-2}	9×10^{-2}	8×10^{-2}	4×10^{-2}	2×10^{-3}
Co	谷物	3×10^{-2}	3×10^{-2}	5×10^{-2}	1×10^{-2}	5×10^{-2}	7×10^{-3}
Sr	谷物	2×10^{-2}	4×10^{-2}	6×10^{-2}	5×10^{-2}	7×10^{-2}	6×10^{-2}
Ru	谷物		5×10^{-2}	4×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}
Cs	绿色豆科植物		5×10^{-2}	6×10^{-2}	2×10^{-2}		
Ce	谷类	3×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}

3 因干、湿沉积和易位导致的收割时的浓度

收割时 j 类植物可食部分中 i 核素的浓度 ($Bq \cdot kg^{-1}$) 由下式给出:

$$A_{ij}(t_p) = \frac{[A_{dij}(t_e) + A_{wji}(t_e)]T_r(\delta t)\exp[-(\lambda_w + \lambda_r)\delta t]}{Y_j} \quad (16)$$

牧草与一般作物不同, 它是连续收获的, 收割时的浓度 $A_{ig}(t_p)$ ($Bq \cdot kg^{-1}$) 则由下式给出:

对于 I 或 Cs,

$$A_{ig}(t_p) = \frac{A_{dij}(t_e) + A_{wji}(t_e)}{Y_g} \cdot \{ (1-a)\exp[-(\lambda_b + \lambda_w + \lambda_r)(t_p - t_e)] + a \cdot \exp[-(\lambda_i + \lambda_r)(t_p - t_e)] \} \quad (17)$$

对于其他核素

$$A_{ig}(t_p) = \frac{A_{dij}(t_e) + A_{wji}(t_e)}{Y_g} \cdot \exp[-(\lambda_b + \lambda_w + \lambda_r)(t_p - t_e)] \quad (18)$$

式中, $t_p - t_e$ 表示沉积结束至收割的时间 (d); $A_{ig}(t)$ 表示沉积结束后收割的牧草中 i 核素浓度 ($Bq \cdot kg^{-1}$); λ_w 为环境衰减常数^[20] (d^{-1}) (考虑了风的清除, 降水或雾、露水的清洗、

浸出及作物生长稀释等作用); λ_i 为 i 核素的放射性衰减常数(d^{-1}); a 为牧草上核素向牧草根部分转移的份额, $a=0.05$; λ_r 表示牧草根部分中的核素因向根系区土壤转移造成其浓度减少的衰变常数(d^{-1}), $\lambda_r=1.16 \times 10^{-2}(d^{-1})$ (半衰期60 d)。 λ_b 表示因牧草生物量增加导致核素浓度减少的速率(d^{-1}), 其值与生长期有关, 见表8。

表8 牧草生长稀释率 λ_b 及其相应的半衰期

月 份	λ_b/d^{-1}	半衰期/d
1~3月	0.0	—
4月	1.65×10^{-2}	42
5月	3.85×10^{-2}	18
6月	3.47×10^{-2}	20
7月	3.65×10^{-2}	19
8月	2.89×10^{-2}	24
9月	2.57×10^{-2}	27
10月	1.65×10^{-2}	42
11~12月	0.0	—

4 人参与土壤表层的放射性核素浓度

本模式中把土壤分成三部分, 即土壤表层 (0~0.1 cm 土壤层), 土壤根系区域 (0.1~25 cm 土壤层) 与深部土壤。再悬浮只发生在土壤表层, 而植物的根部吸收只发生在根系区域。

4.1 人渗

因干、湿沉过程沉积于土壤表层的放射性核素, 其浓度随污染物向土壤深部的迁移而减少。这种导致核素从0~0.1 cm 土壤表层向下部运动的现象称为入渗。其入渗常数 λ_{per} 取为 $1.98 \times 10^{-2} d^{-1}$, 相应的有效半衰期为35 d。

4.2 土壤表层的放射性核素浓度

对于种植有 j 类植物的土壤表层, t 时刻土壤表层 i 核素的浓度相应地由下式给出:

$$A_{ij}(t) = A_{ij}(t_e) \exp[-(\lambda_{per} + \lambda_i)(t - t_e)] \quad (19)$$

式中, $A_{ij}(t_e)$ 由式 (11), (12), (13) 给出。注意式中 $t-t_e$ 是指距沉积结束时刻 t_e 后相距的时间间隔 (d)。

5 根部吸收

5.1 土壤根系区域的放射性核素浓度

在沉积事件结束后, 沉积于土壤表层的核素通过入渗过程进入土壤根系区域, 假定进入根系区的核素在根系区深度内均匀分布。进入根系区的核素浓度除因放射性衰变减少外, 还因浸出等原因而减少, 其核素浓度由下式给出

$$A_{ij}(t) = \frac{A_{ij}(t_e) [1 - \exp(-\lambda_{per}(t - t_e))]}{L\rho} \exp[-(\lambda_b + \lambda_i + \lambda_r)(t - t_e)] \quad (20)$$

式中: $A_{nij}(t)$ 表示沉积事件结束后经 t 时刻在种植 j 类植物的土壤根系区域的土壤中 i 核素的浓度 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$); L 为根系区土壤深度 (m), 对种植牧草的土壤, L 取为 0.1 m, 对于耕田, L 取 0.25 m; ρ 为土壤密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

本文中假定 $\rho=1.4\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; λ_e 表示核素通过浸出过程迁移出根系区域造成浓度减少的减少常数 (d^{-1}); λ_f 表示被土壤固着的速率常数 (d^{-1}). 固着作用对于核素 Cs 与 Sr 特别重要, 其值可分别取作: $\lambda_f(\text{Cs})=2.2\times 10^{-4}\text{ d}^{-1}$, $\lambda_f(\text{Sr})=9\times 10^{-5}\text{ d}^{-1}$.

λ_e 可采用下式估算,

$$\lambda_e = \frac{V_a}{L\left(1 + \frac{K_d\rho}{\theta}\right)} \quad (21)$$

式中: V_a 为土壤中水的渗透速率 ($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$), 文献表示, 对于温带天气, V_a 值的范围为 0.30 ~ 0.90 $\text{m}\cdot\text{a}$, 作为偏安全的考虑, 取 $V_a=0.9\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$; ρ 为土壤密度; θ 为土壤含水量 ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 作为本模式中的缺省值, 取 $\theta=0.3$; K_d 为分配系数.

5.2 根部吸收

植物对土壤中放射性核素的摄入通常用转移因子 B_v 表示, B_v 定义为植物中放射性核素浓度 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重植物) 与土壤中放射性核素浓度 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重土壤) 之比.

因此, 因根部吸收贡献的植物中 i 核素的浓度 $A_{nij}(t)$ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), 由下式给出:

$$A_{nij}(t) = B_{vij}A_{nij}(t)f_{ij} \quad (22)$$

式中, f_{ij} 是一个时间份额因子, 由下式给出

$$f_{ij} = \frac{\text{沉积结束至 } j \text{ 类植物收割的时间(d)}}{j \text{ 类植物整个生长期(d)}} \quad (23)$$

若不能获得特定的数据, 作为偏保守考虑, 可近似地取 $f_{ij}=1$. 相应地, 收割时 j 类植物中因根部吸收贡献的 i 核素浓度 $A_{nij}(t_p)$ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重植物) 由下式给出:

$$A_{nij}(t_p) = B_{vij}A_{nij}(t_p)f_{ij} \quad (24)$$

鉴于居民饮食谱中的蔬菜水果的消费量往往指新鲜蔬菜与水果, 因而由 (26) 式获得的 $A_{nij}(t_p)$ 还应换算成新鲜状态下的核素浓度, 这可由下式换算:

$$A_{nij}(t_p) = A_{nij}(t_p)/f_{if} \quad (25)$$

式中, $A_{nij}(t_p)$ 表示刚收割下来新鲜状态下 j 类植物中 i 核素的浓度 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$); f_{if} 表示植物的干重与鲜重之比值.

6 耕作对土壤表层与根系区核素浓度的影响

耕作过程会导致土壤中放射性核素垂直分布发生剧烈变化. 假定由于耕作造成的土壤中核素存贮量在表面层与根系区 (0.1~25 cm) 的再分布与这两层土壤的相对质量成正比, 并且表层与次表层的土壤密度分别为 $1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.46\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 则各自滞留的核素份额则为 $f_s=0.0027$ 与 $f_r=0.9973$. 假定 j 类植物每年的耕作时间为 t_{dj} , 此时可分两种情况讨论: ① 沉积事件发生在当年的耕作时间之前, 或上一年的收割时间之后 (见图 3a, 3b). ② 沉积事件发生在当年耕田之后 (见图 3c). 对第 1 种情况, 耕作会对当年的作物 (谷物、蔬菜) 中核素浓度产生影响, 而第 2 种情况, 耕作对当年作物中核素浓度无影响, 下面具体讨论之.



图3a 沉积事件发生在当年耕作之前



图3b 沉积事件发生在上一年收割之后

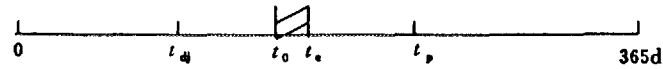


图3c 沉积事件发生在耕作之后、收割之前

图3 耕作与沉积事件的时间关系

6.1 沉积事件发生在当年耕作之前或上年收割之后

(1) 在沉积事件结束后至耕作前的时间间隔内

土壤表层与根系区域内的 i 类核素浓度可分别应用式 (19) 和式 (20) 估算, 然后根据根系区的浓度通过式 (22) 算得根系吸收对 j 类植物的浓度贡献。

(2) 沉积事件发生在耕作时间后

$$A'_{aij}(t) = \{ A_{aij}(t_e) \exp[-(\lambda_{per} + \lambda_i)(t_d - t_e)] + A_{aij}(t_e) [1 - \exp(-\lambda_{per})(t_d - t_e)] \cdot \exp[-(\lambda_a + \lambda_t + \lambda_i)(t_d - t_e)] \} f_a \cdot \exp[-(\lambda_{per} + \lambda_i)(t - t_d)] \quad (26)$$

$$A'_{rij}(t) = \{ A_{aij}(t_e) \exp[-(\lambda_{per} + \lambda_i)(t_d - t_e)] + A_{aij}(t_e) [1 - \exp(-\lambda_{per})(t_d - t_e)] \cdot \exp[-(\lambda_a + \lambda_t + \lambda_i)(t_d - t_e)] \} f_r \cdot \frac{\exp[-(\lambda_a + \lambda_t + \lambda_i)(t - t_d)]}{L\rho} \quad (27)$$

式中, $A'_{aij}(t)$ 与 $A'_{rij}(t)$ 分别表示在种植有 j 类作物土壤中, 耕作后 t 时刻土壤表层与耕作区域内的 i 类核素浓度, ($Bq \cdot m^{-2}$) 与 ($Bq \cdot kg^{-1}$); 大括号 $\{ \}$ 内这一项分别表示在耕作时刻土壤表层与根系区内 i 核素的总贮量 ($Bq \cdot m^{-2}$); 大括号乘以 f_a 与 f_r 分别表示这些总贮量因耕田而在表层与根系区内进行再分配, 然后以各自的减少速率减少; $(t_d - t_e)$ 表示沉积事件结束至耕作之间的时间间隔 (d), 计算时注意 t_e 是发生在当年还是上一年。

(3) 根部吸收对植物可食部分核素浓度的贡献

此时, 可用 $A'_{aij}(t_e)$ 替代 (24) 式中的 $A_{aij}(t_p)$ 来估算, 则

$$A'_{aij}(t_p) = B_{vij} A'_{aij}(t_p) f_{ai} / f_{ri} \quad (28)$$

式中, $A'_{aij}(t_p)$ 表示 j 类植物收割时植物可食部分中因根部吸收贡献的 i 核素浓度 (此中考虑耕田的影响) ($Bq \cdot kg^{-1}$), $A'_{rij}(t_p)$ 表示考虑了沉积事件对根系影响的 j 类作物收割时刻 (t_p) 土壤根系区域中 i 类核素的浓度 ($Bq \cdot kg^{-1}$) (计算公式见式 (27))。

6.2 沉积事件发生在当年耕作之后

此种情况下, 对计算当年的土壤表层、根系区的核素浓度无影响, 当然对当年收割的

植物（各类蔬菜）中的核素浓度也无影响。

7 植物可食部分核素浓度

7.1 收割时(t_p)牧草中的核素浓度

$$A_{iGT}(t_p) = A_{iG}(t_p) + A_{mriG}(t_p) \quad (29)$$

式中 $A_{iGT}(t_p)$ 表示收割时(t_p)牧草中因叶面沉积与根部吸收造成的 i 核素总浓度 ($Bq \cdot kg^{-1}$), $A_{iG}(t_p)$ 与 $A_{mriG}(t_p)$ 分别表示在收割时通过叶面沉积与根部吸收两个途径对牧草中 i 核素浓度的贡献 ($Bq \cdot kg^{-1}$)。

$$A_{iG}(t_p) = \frac{[A_{dij}(t_e) + A_{mij}(t_e)]}{Y_g} \{ (1 - a) \exp[-(\lambda_w + \lambda_r) \delta t] + a \exp[-(\lambda_s + \lambda_r) \delta t] \} \quad (30)$$

式中, δt 表示沉积结束时刻至收割之间的时间间隔 (d)。其他符号意义前面已有叙述; $A_{dij}(t_e)$ 由式 (2) 给出; $A_{mij}(t_e)$ 由式 (8) 给出。

$$A_{mriG}(t_p) = B_{Vig} f_{gi} \frac{A_{mij}(t_e) [1 - \exp(-\lambda_{per} \delta t)]}{L_g \rho f_{ri}} \exp[-(\lambda_s + \lambda_r + \lambda_i) \delta t] \quad (31)$$

式中, L_g 表示牧草的根系区域深度, $L_g = 0.1 m$; $A_{mij}(t_e)$ 由式 (12)、(13) 给出, 其他意义同前。

7.2 收割时农作物与蔬菜（包括水果等）中可食部分中的核素浓度

7.2.1 沉积事件发生在当年耕作前（即考虑耕作的影响）

$$A_{iJT}(t_p) = A_{ij}(t_p) + A'_{mij}(t_p) \quad (32)$$

式中: $A_{iJT}(t_p)$ 表示收割时 j 类植物中因叶面沉积与根部吸收造成的 i 核素总浓度, ($Bq \cdot kg^{-1}$); $A_{ij}(t_p)$ 与 $A'_{mij}(t_p)$ 分别表示叶面沉积与根部吸收两个途径的贡献, $A_{ij}(t_p)$ 由 (16) 式给出, $A'_{mij}(t_p)$ 由下式给出:

$$A'_{mij}(t_p) = B_{vij} A'_{rij}(t_p) f_{gi} / f_{ri} = \frac{B_{vij} f_{gi} f_{ri}}{f_{ri} L \rho} \{ A_{mij}(t_e) \exp[-(\lambda_{per} + \lambda_i)(t_d - t_e)] + A_{mij}(t_e) [1 - \exp(-\lambda_{per}(t_d - t_e))] \cdot \exp[-(\lambda_s + \lambda_r + \lambda_i)(t_d - t_e)] \} \cdot \exp[-(\lambda_s + \lambda_r + \lambda_i)(t_p - t_d)] \quad (33)$$

式中, 各符号意义同前。

7.2.2 沉积发生在耕作之后（不考虑耕作影响）

此时耕作对当年作物核素浓度没有影响

$$A_{iJT}(t_p) = A_{ij}(t_p) + A_{mij}(t_p) \quad (34)$$

$$A_{mij}(t_p) = \frac{B_{vij} f_{gi} A_{mij}(t_e) \{ 1 - \exp[-\lambda_{per}(t_p - t_e)] \}}{L \rho f_{ri}} \exp[-(\lambda_s + \lambda_r + \lambda_i)(t_p - t_e)] \quad (35)$$

式中符号意义同前。

8 动物产品核素浓度^[21~23]

8.1 动物对核素的摄入量

t 时刻 m 类动物对 i 类核素的摄入速度 $A_{ami}(t)$ ($\text{Bq}\cdot\text{d}^{-1}$)由下式给出

$$A_{ami}(t) = \left(\sum_j A_{ijT}(t) I_{jm}(t) \right) + A_{igT}(t) I_{gm}(t) + A_{ih}(t) I_{hm}(t) \quad (36)$$

式中, $A_{ijT}(t)$ 、 $A_{igT}(t)$ 与 $A_{ih}(t)$ 分别表示 t 时刻 j 类植物(除牧草外)、牧草与干草中 i 核素浓度($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) (注意换算成干重); $I_{jm}(t)$ 、 $I_{gm}(t)$ 与 $I_{hm}(t)$ 分别表示 m 类动物 t 时刻对上述三类食物的摄入率干重($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$);表9给出各类动物的食谱.应用中注意,在放牧季节, $I_{hm}(t)$ 可能为0,而在冬季, $I_{gm}(t)$ 为0.对于非新鲜植物饲料(例谷粒、土豆等)与干草,因为是已收割下来的,要考虑收割后至食用之间的放射性衰减修正。

表9 主要动物饮食谱

动物名称	主要饲料	饲料日摄入量干重/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$		饮水量 L/d
		期望值	分布范围	
奶牛	牧草, 玉米等	16.1	10~25	50~100
肉牛 (500 kg)	牧草, 玉米	7.2	5~10	20~60
山羊	牧草	1.3	1.0~3.5	5~10
绵羊	牧草	1.3	1.0~2.5	5~8
猪 (110 kg)	谷类、玉米、土豆等	2.4	2.0~3.0	6~10
下蛋鸡	谷类	0.1	0.07~0.15	0.1~0.3
鸡	谷类	0.07	0.05~0.15	0.1~0.3

8.2 动物产品核素浓度

T 时刻 m 类动物中 k 类产品(奶、肉或蛋)中的 i 核素浓度 $C_{mki}(T)$ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)由下式给出

$$C_{mki}(T) = F_{mki} \sum_{n=1}^2 \left\{ a_{kn} \int_0^T A_{ami}(t) \exp[-(\lambda_{kn} + \lambda_i)](T-t) dt \right\} \quad (37)$$

式中, λ_{kn} 为相应于 k 类动物产品的 n 类生物转移速率的生物衰减常数; a_{kn} 为 k 类动物产品中发生 n 类生物转移的份额, F_{mki} 表示 m 类动物食入含 i 核素的食物后转移到 k 类产品的转移系数($\text{d}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

9 食品加工过程中的核素损失

在食品加工如清洗、去皮、磨研、煮沸等过程中,食品中的放射性核素浓度会有不同程度的减少.通常用食品加工滞留因子 F_r 来描述食品加工过程中放射性核素的转移. F_r 定义为加工后食品中放射性核素的总量与原初粗食品中放射性核素的总量之比,即食品加工后仍滞留在食品中的放射性核素的份额.另一有关参数是“加工效率” P_e , P_e 定义为加工后食品的重量与原初食品的重量之比($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

10 人体食入途径放射性核素摄入率

人体通过食入途径摄入放射性核素的速率可由下式估算:

$$A_{Hi}(t) = \left\{ \sum_j A_{jT}(t_p) \exp[-\lambda_i(t - t_p)] V_j(t) F_{ji} / P_{aj} \right\} + \left\{ \sum_k C_{mkj}(t_s) \exp[-\lambda_i(t - t_s)] V_k(t) F_{ki} / P_{ak} \right\} \quad (38)$$

式中 $A_{Hi}(t)$ 为 t 时刻人体对 i 核素的摄入速率 ($Bq \cdot d^{-1}$)； $A_{jT}(t_p)$ 为收割时 (t_p) 第 j 类植物中 i 核素浓度 ($Bq \cdot kg^{-1}$)； F_{ji} 与 F_{ki} 分别为 j 类植物与 k 类动物制品食品加工滞留因子； P_{aj} 与 P_{ak} 分别为 j 类植物与 k 类动物产品的加工效率； $C_{mkj}(t_s)$ 为 m 类动物宰割时 (t_s) k 类动物产品 (奶或肉) 中 i 核素的浓度 [$(Bq \cdot kg^{-1})$ 或 $(Bq \cdot L^{-1})$]； $V_j(t)$ 与 $V_k(t)$ 为不同年龄组居民对 j 类植物制品与 k 类动物产品的日消费量 ($kg \cdot d^{-1}$)。

表10与表11分别给出秦山二期厂址周围城镇居民与农村居民的饮食谱^[24]，以供计算我国居民核素摄入率参考。

表10 厂址评价范围内城镇居民的平均消费量 / $kg \cdot a^{-1}$

品 种		年 龄 组			
		成 人	青 少 年	儿 童	婴 儿
粮 食		204.71	204.71	102.36	40.94
蔬 菜	叶 类	137.41	137.41	68.70	27.48
	根茎类	5.15	5.15	2.58	1.03
	果实类	22.33	22.33	11.16	4.47
	水生类	6.78	6.78	3.44	1.37
禽 肉 蛋	家 禽	7.75	7.75	3.87	1.55
	猪	23.14	23.14	11.57	4.63
	牛羊肉	1.07	1.04	0.53	0.21
	蛋 类	9.79	9.79	4.90	1.96
牛 奶		5.07	5.07	12.67	15.20
水 产		21.66	21.66	10.83	4.33
水 果		55.78	55.78	27.89	11.16

表11 厂址评价范围内农村城镇居民的平均消费量 / $kg \cdot a^{-1}$

品 种		年 龄 组			
		成 人	青 少 年	儿 童	婴 儿
粮 食		300.88	333.97	231.68	120.35
蔬 菜	叶 类	125.88	139.37	96.93	50.35
	根茎类	4.72	5.24	3.63	1.89
	果实类	20.46	22.71	15.75	8.18
	水生类	6.29	6.99	4.85	2.52
禽 肉 蛋	家 禽	4.16	4.62	3.20	1.66
	猪 肉	20.38	22.62	15.69	8.15
	牛羊肉	0.50	0.56	0.39	0.20
	蛋 类	4.61	5.12	3.55	1.8
牛 奶		0	0	0	0
水 产		9.16	10.17	7.05	3.66
水 果		15.71	17.44	12.09	6.28

11 DYFOM-95程序描述

DYFOM-95程序用标准 FORTRAN-77语言编制而成，在 IBM-PC 及其兼容机下运行。本程序由一个主程序和五个子程序组成，每一个子程序负责计算一个环节，它们分别

计算放射性核素在植物表面与土壤表面的干沉积量、湿沉积量、核素在植物中的易位、动物产品中的核素浓度、人体的摄入量等，主程序负责该计算过程的流程控制，输入参数的读取，输出结果的存盘等。其流程图见图4。

11.1 DRYDEP 子程序

DRYDEP 子程序用于计算放射性核素在植物表面和土壤的干沉积量。此程序包括植物表面的干沉积、土壤表面的干沉积、植物对干沉积核素的截获与初始滞留。图5给出该子程序的流程图。

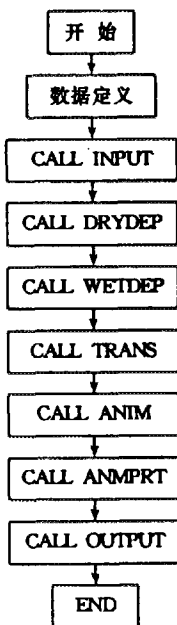


图4 主程序流程图

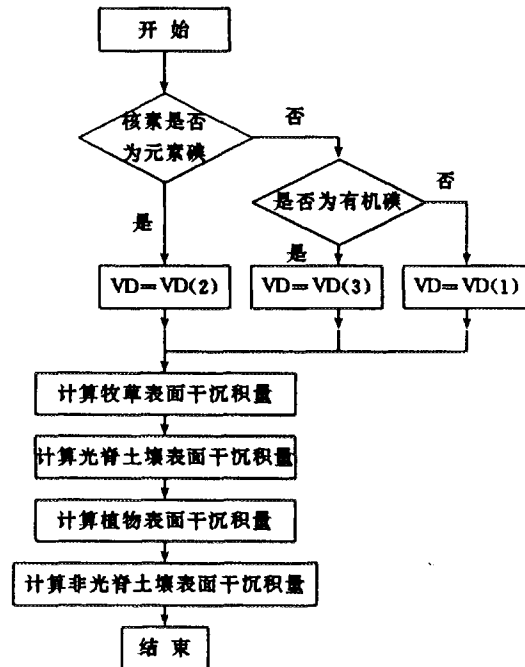


图5 DRYDEP 子程序流程图

11.2 WETDEP 子程序描述

WETDEP 子程序用于计算放射性核素在植物表面、土壤表面的湿沉积量。该程序包括植物对湿沉积核素的截获与初始滞留、土壤表面的湿沉积等，图6给出其流程图。

11.3 TRANS 子程序描述

TRANS 子程序主要用于计算叶面上的核素转移至植物可食部位中的放射性，即易位因子及土壤表面的核素总沉积量入渗到地表再通过根部吸收转移至可食部位中的放射性活度。该子程序考虑了耕作对根部吸收的影响，还考虑了环境半衰期的影响。其流程图示于图7。

11.4 ANIM 子程序描述

本子程序 (ANIM) 先计算动物食入被污染的植物后本身所含的放射性，再计算动物和植物产品经过加工后所含的放射性活度。其流程图示于图8。

11.5 ANIPRT 子程序描述

该子程序的功能是用于计算人体食入加工后的动物、植物产品而摄入的放射性核素的量，其流程图见图9。

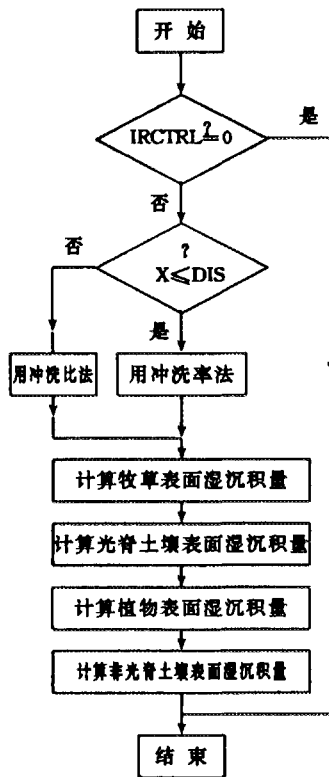


图6 WETDEP 子程序流程图

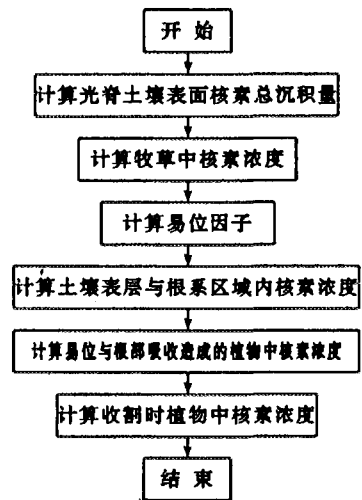


图7 TRANS 子程序流程图

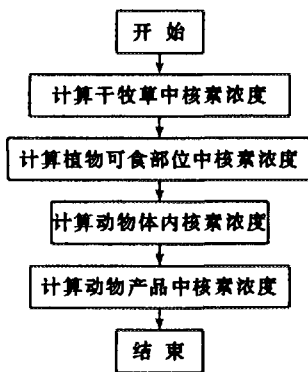


图8 ANIM 子程序流程图

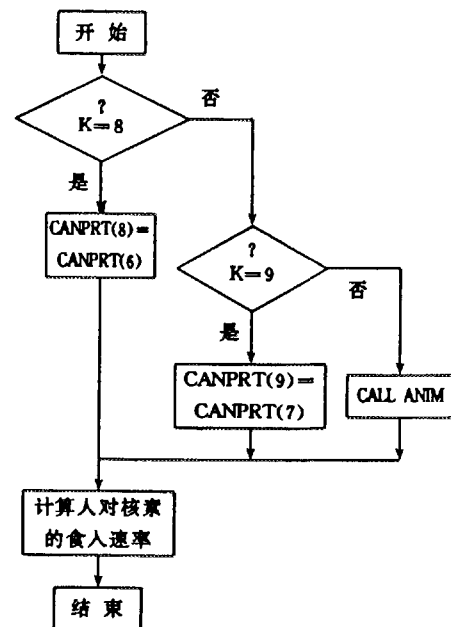


图9 ANIPRT 子程序流程图

参 考 文 献

- 1 胡二邦. “核素环境移模式有效性研究” 国际合作研究计划介绍. 辐射防护, 1993, 13 (2): 152~159
- 2 Galeriu D, Kanyar B, Kliment V, et al. Model Description, Test Scenarid CB, VAMP Multiple Pathways Assessment Working Document. IAEA, Vienna, 1993 (Draft).
- 3 胡二邦, 刘兴增, 张和原. 切尔诺贝利核电站事故模式估算国际比对. 中国环境科学, 1995, 15 (4): 262~265
- 4 Uller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for the Assessment of the Radiological Consequences of Nuclear Accidents, for Personal Use, 1991
- 5 Whicker F W, Kirchner T B. PATHWAY: A Dynamic Food-chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition. Health Physics, 1987, 52 (6): 717~737
- 6 Koch J, Tadmor J. RADFOOD-A Dynamic Model for Radioactivity Tansfer through the Human Food Chain. Health Physics, 1986, 50 (6): 721~737
- 7 Simmonds J R. Review of Foodchain Transfer in Relation to Accident Consequence Assessments, Proceedings in " Workshop on Methods for Assessing the Off-site Radiological Consequences of Nuclear Accidents" Luxembourg, Apr. 1985, 293~313
- 8 Steinhauer C. Influence of Different Foodchain Models on Accident Consequence Assessments, Proceedings in " Workshop on Methods for Assessing the Off-site Radiological Consequences of Nuclear Accidents" Luxembourg, Apr. , 1985, 313~337
- 9 Prohl G, Pardzke H G, Friedland W. An Intercomparison of Teh Foodchain Models Food-MARC (WRPB) and ECOSYS (GSF), Proceedings in " Workshop on Methods for Assessing the Off-site Radiological Consequences of Nuclear Accidents" Luxembourg, Apr. , 1985, 331~347
- 10 Evans S. Radiological Foodchain Models in Scandinavia A Review, Proceedings in " Workshop on Methods for Assessing the Off-site Radiological Consequences of Nuclear Accidents" Luxembourg, Apr. , 1985, 363~391
- 11 IAEA. Validation of Models Using Chernobyl Fallout Data from the Central Bohemia Region of the Czech Republic. Scenario CB, IAEA-TECDOC-795, 1995
- 12 IAEA. Handbook of Parameter Values for Teh Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Draft. Vienna, Jam, 1993
- 13 Brenk H D, Vogt K J. Reassessment of Wet Deposition from Radioactive Plumes with Respect to Practical Application, draft, 1980
- 14 Proehl G, Hoffman F O. The Interception, Initial and Post Deposition-Retention by Vegetation of Dry and Wet Deposited Radionuclides. VAMP Terrestrial Working Group Draft Revies Paper. IAEA, 1993
- 15 Simmonds J R, Linsley G S. Parameters for Modelling Interception and Retention of Deposits from Atmosphere by Grain and Leaty Vegetables. Health Physics, 1982, 5 (43): 679~691
- 16 Withersposu J P, Taylor F G, JR. Interception and Retention of A Simulated Fallout by Agricultural Plants. Health Physics, 1970, 19: 493~499
- 17 Chorles W, Miller. An Analysis of Measured Values for the Fraction of A Rodioactive Aerosol Intercepted by Vegetation. Health Physics, 1980, 38: 705~712
- 18 Pinder J E, Ciravolo T G and Bowling J W. The Inter Relationships Among Plant Biomoas. Health Physics, 1988, 55, 51~58
- 19 Chamberlain A C. Interception and Retention of Radioactive Aerosols by Vegetation. Atm Physics Environment, 1970, 4: 57~78
- 20 Miller C W, Hoffman F O. An Examination of the Environmental Half-time for Radionuclides Deposited on Vegetation. Health Physics, 1983, 45: 731~744
- 21 Johnson J E, Word G M, Emmos Jr M E, et al. Transfer Coefficients of Selected Radionuclides to Animal Products. I Comparison of Milk and Ment from Dairy Cows and Goats. Health Physics, 1988, 54: 161~166
- 22 Howard B J, Mayes R W, Beresford N A, et al. Transfer of Radio Cesium from Different Environmental Sources to Ewes

- and Suckling Lambs. Health Physics, 1989, 57: 579~586
- 23 Volkgt G, Müller H, et al. Experimental Detemination of Transfer Coefficients of ^{137}Cs and ^{131}I from Fooder into Milk of Cows and Sheep after the Chernobyl Accident. Health Physics, 1989, 57: 967~973
- 24 秦山核电二期工程厂址环境调查报告. 核工业第二研究设计院, 1993. 2 (内部报告)

(京) 新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01091, CIRP-0014: 预测核事故辐射后果的动态食物链模式与程序/胡二邦等著. —北京: 原子能出版社, 1996. 12

ISBN 7-5022-1611-1

I. 中… I. 胡… III. ①核技术-研究报告-中国②放射性事故-放射性污染-食物链-辐射监测, 方法 N. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 21236 号

预测核事故辐射后果的动态食物链模式与程序

胡二邦等著

©原子能出版社, 1996

原子能出版社出版发行

责任编辑: 郭向阳

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

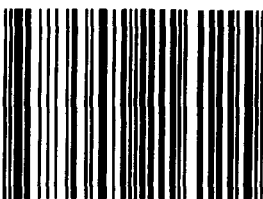
开本 787×1092 1/16·印张 1·字数 27 千字

1996 年 12 月北京第一版·1996 年 12 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1611-1



9 787502 216115 >