

放射生态学转移参数手册

李建国 商照荣
杨俊城 唐森铭 编著



原子能出版社

本书系国家自然科学基金项目《中国辐射水平与效应研究》
(项目批准号:10375101)成果之一

放射生态学转移参数手册

李建国	商照荣	编著
杨俊城	唐森铭	
潘自强	刘森林	审校
陈晓秋		

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

放射生态学转移参数手册/李建国等编著. —北京:
原子能出版社, 2006. 1

ISBN 7-5022-3565-5

I. 放… II. 李… III. 放射生态学—辐射转移—
参数—手册 IV. Q142.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004070 号

内 容 简 介

本书系统总结了放射性核素在陆地和淡水、近海生态系统转移参数的研究成果,提出了天然放射性核素(U , ^{226}Ra , Th , ^{210}Po , ^{210}Pb 等),人工放射性核素(^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{60}Co 等)在陆地、淡水和海洋生态系统中的转移(浓集)参数推荐值,可供辐射环境影响评价、核或放射事故应急、放射生态学等方面的人员参考。

放射生态学转移参数手册

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 孙凤春

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市印刷厂

开 本 850 mm×1168 mm 1/32

印 张 6.375

字 数 169 千字

版 次 2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3565-5

经 销 全国新华书店

印 数 1—1 500

定 价 25.00 元

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

序

20 世纪 80 年代初期,我国核电开始起步,公众同时也提出了“是否影响环境”的问题。为了回答这一问题,核工业部组织了“中国核工业三十年辐射环境质量评价”。评价的结论是:“我国核设施周围关键居民组所受的剂量均低于国家规定的限值。核设施周围关键居民组所受年剂量,80%都小于天然辐射照射年平均剂量的 $1/10$,最大者也仅等于全国天然辐射照射平均剂量的 $1/2$,因此实际上都在省市平均天然辐射照射年剂量的涨落范围内”。但在评价的过程中发现:评价计算中所需放射生态转移参数基本上没有我们国家的数据,因而不得不采用国外的数据。随后在各核电站和核设施的环境评价报告中,也遇到了同样的问题。放射生态转移参数与具体环境条件是密切相关的,采用国外的参数显然影响结果的可靠性。由于缺少具体环境的数据,有时不得不采用十分保守的数据,从而导致不必要的浪费。

国内从 20 世纪 60 年代初期开始放射生态转移参数的研究。许多单位先后从事这方面的工作,其中主要有:中国辐射防护研究院,中国农业科学院,卫生部工业卫生实验所,海洋局海洋第三研究所和中国科学院海洋研究所等单位。取得了很多成果。发表了不少有价值的论文。但对这些成果没有进行综合和分析,因此也就不可能直接用于环境评价。十分感谢国家自然科学基金委员会的支持,提供了必要的经费,使得有可能对我国大量放射生态转移参数数据进行收集、分析、整理和汇编。

我国在 2003 年先后发布了“放射性污染防治法”和“环境影响评价法”,对环境评价提出了更高的要求。相信《放射生态学转移参数手册》的出版将有助于提高环境评价的水平。《放射生态学转移参数

手册》的作者都是多年从事放射生态参数研究的科学工作者,但编评放射生态参数工作还是第一次,手册中难免有不妥之处,敬望读者批评指正。在编评的过程中,也发现近 50 年来我国在放射生态参数方面虽然做了不少工作,但没有一个整体计划,因此存在不少空白。我国核电已进入积极推进发展的时期,人们自然也就更关心核电发展对环境的可能影响,从环境影响评价的需要出发,制定一个较完整的放射生态参数研究计划是必要的。在制定这一计划时不仅要考虑对人的影响,还应考虑对非人类物种的保护。

中国工程院院士
潘自强
2005 年 12 月

目 录

第 1 章 引言	(1)
主要参考文献	(3)
第 2 章 参数收集与推荐的原则	(4)
2.1 数据来源	(4)
2.2 核素生态转移涉及的主要过程	(7)
2.3 转移参数的类型	(9)
2.4 数理统计方法	(11)
2.5 参数推荐的原则	(12)
2.6 参数推荐值使用说明	(13)
主要参考文献	(14)
第 3 章 陆生生态系统转移参数	(16)
3.1 植物对沉积核素的截获、易位因子	(16)
3.2 核素在土壤中的分配系数	(26)
3.3 核素由土壤到植物的转移参数	(31)
3.4 核素在动物产品的转移	(43)
3.5 食品加工过程中核素的转移	(88)
主要参考文献	(100)
第 4 章 水生生态系统转移参数	(107)
4.1 核素在水生生态系统的转移过程	(107)
4.2 淡水生态系统转移参数	(108)
4.3 海洋生态系统转移参数	(112)
主要参考文献	(127)
第 5 章 结束语	(132)

附录 1	术语	(134)
附录 2	中国土壤与分类	(138)
附录 3	陆地生态系统相关参数	(161)
附录 4	淡水生态系统相关参数	(164)
附录 5	海洋生态系统相关参数	(167)

第1章 引言

中国核工业经过 50 年的发展历程,取得了举世瞩目的成就,成为当今世界的核大国之一。近年来,核电作为一种安全、可靠、清洁的能源,已经成为我国能源工业的一个组成部分,并呈现出快速发展趋势。随着我国核工业的发展和核电规模的逐步扩大,放射性废物管理正在成为制约我国核事业发展的重要因素,对公众和环境安全的影响也日益突出,受到政府有关部门和公众的普遍关注。因此,了解放射性核素在陆地和海洋环境中的分布、转移和浓集规律,应用以往调查研究的资料和成果制定放射性排放标准,加强人类的辐射防护,保护生物种群和群落,是我们和平利用核能,保护环境和人类自身安全的迫切任务。中华人民共和国国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)和《国际电离辐射防护与辐射源安全基本安全标准》(国际原子能机构安全丛书第 115 号,1997)对电离辐射照射伴有危险的防护以及可能产生这种照射的辐射源安全提出了基本要求,其中强调对放射源所致照射的性质、程度和可能的后果要进行评价。在我国,伴随着核能工业和核技术应用的发展,对放射性物质向环境排放的管理越来越重视,环境评价法和放射性污染防治法的制定,促进了这方面工作的开展。对放射性废物排放管理的概念框架,包括源项分析,放射性核素在环境中的转移,照射途径,剂量估算,与排放限值的比较等内容。显然,要对排放到环境中的放射性所致辐照剂量进行评价,应用具有较强实用性的环境评价模式和参数系统是必不可少的。

辐射环境影响评价,是指对源的利用或某项实践可能对环境造成的影响所进行的预测和估计,包括对源或实践的规模与特性的概述,对厂址或场所环境现状的分析,以及对正常条件下和事故情况下可能造成的环境影响或后果的分析。在辐射环境影响评价中,要大

量地应用放射生态学参数。以往,通常是直接套用国际原子能机构安全丛书第 57 号(IAEA, Safety Series No. 57, 1982)和美国核管理委员会管理导则 1.109 (Nuclear Regulatory Commission, RG 1.109, 1977)推荐的生态转移参数值。而这些文献中提供的转移参数在使用中存在着某些局限性。例如,转移参数常常是来自于为特殊目的设计的实验中,其数值与参数的严格定义有些偏差;从一组特定的短期实验获得的参数与稳定的或平衡状态下的长期污染实验获得的观测值有很大区别,在特定场址获得的转移参数值,当其被运用到另一个不同的场址时,可能会导致估算偏差,等等。生态学转移参数的不确定性极大地限制了使用模式估算食物摄入途径的公众剂量的可靠性。为适应我国核设施环境影响评价、核事故应急决策的发展,迫切需要建立我国自己的放射生态转移参数系统。

我国从 20 世纪 60 年代开始,在放射性核素生态转移实验研究、辐射环境监测与调查工作中积累了大量的数据,取得了一些研究成果。通过对国际、国内的成果进行总结和适当的补充、完善,编写《放射生态学转移参数使用手册》,为我国辐射环境影响评价提供科学依据,是很有必要的。本手册总结了我国以往的研究和调查数据,在分析总结我国以及国际上陆地和淡水、近海生态系统放射性核素转移参数研究成果的基础上,根据我国核设施环境影响评价和核事故应急决策系统中采用的放射性核素食物链转移模型,以及 IAEA 推荐的放射性物质排放环境影响评价通用模式(IAEA, Safety Serise No. 19, 2001),以我国现行的土壤分类系统为主线,针对核设施流出物排放到环境后,放射性核素通过陆地和地表水食物链对人类所致辐射剂量的评价,提出天然放射性核素(U , ^{226}Ra , Th , ^{210}Po , ^{210}Pb 等),人工放射性核素(^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{60}Co 等)在陆地、淡水和海洋生态系统中的转移(浓集)参数推荐值,以供我国辐射环境影响评价、事故应急决策等方面的科技人员参考。

主要参考文献

IAEA. Safety Series No. 57. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Trasfer of Radionuclides from Rountine Releases, 1982

IAEA. Safety Reports Series No. 19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environmental, IAEA Vienna, 2001

Nuclear Regulatory Commission. Regulutary Guide 1.109, Rev. 1. Calculation of Annual Doses to Mam from Routain Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50. Appendix1, Octber 1977

国际原子能机构安全丛书第115号. 国际电离辐射防护与辐射源安全基本安全标准. 维也纳, 1997

中华人民共和国国家标准. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准. GB 18871—2002

第2章 参数收集与推荐的原则

2.1 数据来源

本手册收集的参数主要来源于我国的转移系数研究成果以及国际机构 IAEA, IUR(国际放射生态学联合会)等推荐的参数值。

国内的参数来源于已发表的盆栽实验和野外实验研究的成果,以及在核工业系统收集的环境监测数据配对计算的参数值。我国在放射性核素通过各种环境介质转移到动植物的行为、转移系数等方面,开展了大量的研究工作,实验室实验或现场研究了放射性核素 ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs 和 ^{239}Pu , 及天然铀, ^{226}Ra , ^{210}Po , Th 等在生态系统中的转移行为,并提出了相关转移系数值。

国内早期开展的比较系统的核素土壤—植物转移系数研究工作在:在某铀尾矿库周围试验田对 ^{226}Ra 在红壤—农作物转移的现场研究(刘锡岱、黄祖德等,1983),实验作物种类较多,按叶菜类、薯芋类、根菜类、豆类、茄果类、瓜类给出了相应的转移系数值,并提供了土壤中 ^{226}Ra 含量与转移系数间的幂函数关系;利用我国秦山、大亚湾核电站地区土壤,通过盆栽实验,研究农作物(水稻、春麦、油菜、大豆、莴笋、西红柿和菜豆)对 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的浓集因子(赵文虎、侯兰欣等,1991;路子显、徐世明等,1992),探讨了核素在作物不同器官的分布情况,以及土壤中放射性活度水平与农作物浓集因子的关系;在我国西北某核燃料厂废水蒸发池周围环境,现场研究了核素 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu 等在放牧羊群、水生生物、水鸟等中的转移、浓集情况(秦苏云、周彩云等,1992)。

在核素至动物产品的浓集因子研究方面,实验研究了 ^{90}Sr 在京白蛋鸡、黄羽鸡的吸收、积累和分布情况(商照荣、徐世明等,1993.4;商照荣、徐世明等,1993.8)。

在天然核素至水生生物的浓集因子研究方面,早期在核工业矿区利用污染的池塘等场址条件,系统研究了 ^{210}Po 、天然铀、 ^{226}Ra 在淡水—水生生物的浓集因子(李淑琴、张征辉等,1986;李淑琴、周彩云等,1987;李淑琴、戚勇,1991),水生生物种类包括了鱼类(草鱼、鲢鱼、鲤鱼、鲫鱼等)、两栖类(青蛙、虎纹蛙等)、甲壳类(河虾、田螺)、水禽(野鸭等)、水生植物(金鱼藻、浮萍、茭白、藕)等;实验研究了 ^{90}Sr 在鲤鱼吸收与积累,分析了不同器官对 ^{90}Sr 的浓集能力(赵文虎、徐世明等,1992);对 ^{131}I 从水体到鲤鱼的浓集研究(赵文虎、李传昭,1995),提出了鲤鱼不同器官和组织对 ^{131}I 的浓集因子。

在放射生态参数总结方面,通过收集整理核工业厂矿历年现场环境监测数据,进行统计分析和数据配对,根据转移系数的概率分布特征,按我国南方湿润地区和北方干旱地区计算了 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、天然铀、 ^{226}Ra 、 ^{239}Pu 在土壤—农作物和牧草—畜产品的转移系数,并按粮食类、叶菜类、根菜类、薯类、果菜类、牧草类、茎秆类给出了相应的转移系数推荐值(秦苏云、戚勇等,1995),通过收集我国部分淡水水体和水产品中 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、天然铀和 ^{226}Ra 含量的实测数据,与相应的水体核素含量数据配对计算,提出了在天然水体条件下,上述五种核素在淡水生物的浓集因子(秦苏云、李淑琴等,1995)。由于核工业厂矿的环境监测资料时间跨度大,收集困难,虽然在参数配对方面不尽理想,但是通过这些工作获得了大量宝贵的反映场址特征的核素生态转移系数资料。

国外的参数资料主要来源于国际原子能机构(IAEA)的技术报告和安全丛书等。1982年,IAEA发表了一组用于关键居民组辐射剂量估算的参数缺省值(IAEA. Safety Series No. 57, 1982)。1994年IAEA与IUR组织了一个研究项目,从部分欧洲国家的放射性核素在土壤—植物系统转移实验计划中收集数据,包括北美国家20世纪50和60年代核武器试验落下灰的研究,核设施放射性物质的有控释放,在天然和实验室环境的试验研究,稳定同位素转移的观测结果,以及从1986年前苏联切尔诺贝利核事故落下灰研究等获得的结果

果,编写了温带气候区的参数手册(IAEA. Technical Report Serise No. 364, 1994)。

切尔诺贝利核事故后,IAEA 于 1988 年发起了“放射性核素在陆地、城市、水环境中迁移模式有效性的研究”(The Validation of Models for the Transfer of Radionuclides in Terrestrial, Urban and Aquatic Environments),分为四个工作组:陆地工作组、城市工作组、水体工作组和多途径工作组,并以 IAEA 技术报告的形式陆续出版了各个工作组的研究成果(IAEA-TECDOC-647, 1992; IAEA-TECDOC-760, 1994; IAEA-TECDOC-857, 1996),提供了关于核素再悬浮、事故季节性、核素在食品加工过程中损失的模式,气载放射性核素在城市环境中的沉降模式,核素在植物体的截获和损失过程以及在半自然生态系统转移的模式化等研究成果。

近年来随着热带和亚热带国家或地区中核设施的不断增加,IAEA 意识到“温带环境中预测核素转移的参数手册”应用的局限性,为了获得热带和亚热带地区的有关数据,IAEA 和 FAO 合作,于 1999—2003 年联合发起了“基于不同土壤类型的放射性核素从土壤向植物的转移系数”国际合作研究计划。我国有关单位参加了该项目的国际合作研究,IAEA 对第 364 号技术报告丛书(TRS-364)的修订工作正在进行之中。

对我国近海海洋放射性水平的调查,始于 1964 年我国首次核试验后不久,我国沿海各地就开始了沿岸海域中的海水、沉积物和海洋生物进行常规监测。1976 年 12 月至 1979 年 10 月,卫生部组织了对渤海、黄海、东海和南海海产食品的放射性水平调查。1980 年至 1982 年对渤海、黄海沿海放射性污染源和沿岸放射性水平进行了系统调查。通过常规监测及系统调查,基本上掌握了当时我国近海海域的放射性水平,以及放射性物质的动态变化、转移规律和可能的照射剂量。从获得的资料看,我国的生物浓集因子主要通过 20 世纪下半叶现场监测及其后的实验室试验获得,实验生物对象集中在容易培养的或者容易获得的生物材料上,而放射性监测对象多与经济

生物有关。在这种情况下,受到监测的生物只能局限在某个范围内。我国已知的海洋生物有 2 万多种,已经放射性监测的与生物浓集数据有关的种类不足二百分之一,对放射性核素在海洋生态系统的迁移行为开展深入的研究是十分紧迫的。

“九五”计划期间,我国开工建设了浙江秦山二期和三期、江苏田湾、广东岭澳 4 座核电站工程,总装机容量 660 万千瓦,相当于此前投入运营的秦山一期和广东大亚湾两个核电站装机容量的 3 倍。目前已经有 9 座发电机组正在运行,2 座在建,2006 年将有 11 座机组投入运行,总装机容量达 835 万千瓦。“十五”期间,又批准了浙江三门、秦山二期扩建工程、广东阳江和岭澳二期等计划。同时,一批核电厂正在规划筹建之中。但是,我国目前核电占总发电量的比例仅有 1%,远远低于美国 21.9%、日本 33.4%、法国 77.4%的水平。根据中国核电发展“远景规划”,到 2020 年,中国核电装机比重将从目前的 1.6%上升到 4%左右,这相当于还要建设至少 24 座百万千瓦级核机组,核电的装机容量将达到 3 600 万千瓦到 4 000 万千瓦。

中国的核电站多建于滨海,如浙江省海盐县、广东省大亚湾、岭澳,江苏省田湾等,随着核电的快速发展,今后还将在内陆省份建设核电站,开展核电站运行对海洋、淡水生态环境影响的研究工作具有十分重要的意义。

2.2 核素生态转移涉及的主要过程

在个人剂量或集体剂量计算中,通过食物摄入放射性核素对总剂量的贡献可能是重要的。用于描述通过大气沉降或沉积以及水体污染途径到人类食物(农产品、动物产品、水产品等)的通用剂量估算模式(IAEA. Safety Reports Series No. 19, 2001),涉及到以下过程:

- (a) 干、湿沉积过程;
- (b) 植物表面最初的截获或滞留;

- (c) 易位到植物可食部分；
- (d) 沉积后在土壤中的滞留；
- (e) 植物根部摄入；
- (f) 土壤颗粒在植物表面的粘附；
- (g) 人类或放牧动物对表面土壤的直接摄入；
- (h) 放射性核素从土壤、空气、水体转移到植物进而转移到动物的奶和肉；
- (i) 地表水中的放射性核素通过喷灌转移到陆地系统；
- (j) 地表水中的放射性核素向沉积物和水生生物的转移。

通用辐射环境评价模式的框图参见图 2.1、图 2.2。

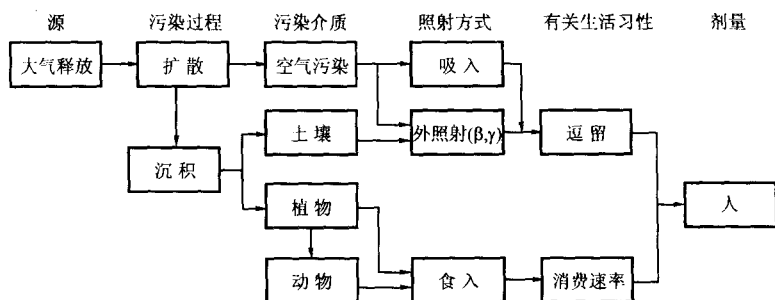


图 2.1 大气排放的环境评价模式概念框图

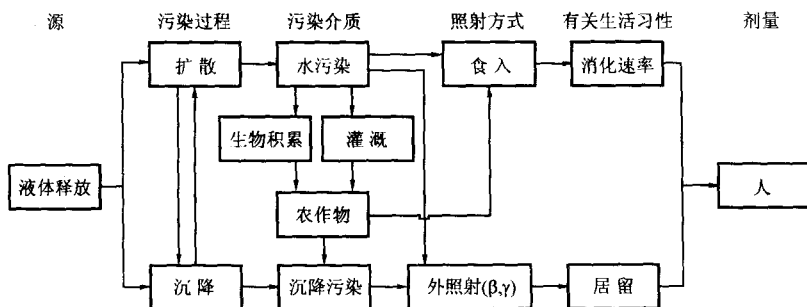


图 2.2 液体排放的环境评价模式概念框图

2.3 转移参数的类型

在辐射环境评价模式中,通常所采用的陆地、淡水生态学转移参数(见表 2.1)主要有放射性核素在土壤—农作物转移系数(TF)、饲料—动物产品转移系数(F_a)、植物对沉积放射性核素的截获因子(R)、易位因子(TLF)、水生生物对放射性核素摄入的浓集系数(B_p)

表 2.1 放射性核素陆地生态学环境转移参数一览表

符号	单 位	参数名称或含义
TF	(Bq/kg 干重植物)/(Bq/kg 干重土壤)	农作物转移系数
R	无量纲	截获因子
TLF	无量纲	易位因子
t_h	a	农产品由收获到消费的时间
Y_v	kg/m ²	农作物单位面积产量
ρ	kg/m ²	土壤有效表面密度
λ_s^*	a ⁻¹	污染物从土壤表面清除的速率常数
F_a	d/kg 或 d/L	畜产品转移系数
Q_f	kg/d	动物饲料消耗量
t_f	a	动物产品由屠宰(或挤奶)到动物产品为人消费的时间
B_p	(Bq/kg)/(Bq/L)	生物浓集系数在平衡条件下,生物器官和组织中的放射性浓度与水中放射性浓度之比
K_d	L/kg	分配系数,平衡状态下,放射性核素在固、液相中浓度的比值
F_c	无量纲	加工后保留在食品中的某种放射性核素活度占加工前总活度的份额
P_c	无量纲	已加工食品的重量与食品原材料重量之比

等。其他参数如农产品从收获到消费的时间(t_h)、农作物产量(Y_v)、动物饲料消耗量(Q_f)、土壤有效表面密度(ρ)等,需要对场址地区的农业等相关情况进行调查而获得。涉及到农产品加工的参数有食品加工保留因子(F_r),食品加工效率因子(P_e)。

转移系数有综合和单一两类。单一参数描述的是由一个环境库室到另一个相邻库室的转移,与具体的生物种类有关。而综合参数描述的是通过一个完整的食物链的转移。两类参数有着它们各自的特定应用。综合转移系数的优点是不需要考虑单个饲料或作物的特定污染,并且在辐射环境影响评价中有实用价值。对于居住在一个特定地区,而且仅仅消费该区域食品的人来说,原则上可以通过综合参数将人体内的核素浓度直接与环境污染相联系。而对于那些食品来自不同地域的人群来说,每种食品的污染不得不单独计算。因此,必须使用单一的转移系数。

对于陆地生态系统核素转移系数,本手册针对具体农作物和动物产品提供核素生态转移系数。

考虑的放射性核素主要有:

人工核素: ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{60}Co 等;

天然核素:天然钍, Th , ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{239}Pu 等。

在考虑水生生物的各项参数时,本手册依据 IAEA 19 号安全报告丛书和我国前期实验数据,推荐了淡水鱼的生物浓集因子(B_p)和分配系数值(K_d)。

在海洋生态系统核素转移系数方面,本手册依据我国近年来的调查结果以及 IAEA 的推荐值,推荐了在我国主要近海域部分重要核素的 K_d 值,以及在 7 个主要海洋生物类型,即大型海藻、浮游植物、浮游动物、甲壳动物、软体动物(头足类另列)、头足类和鱼类中的核素浓集系数推荐值。

国内学者开展的核素浓集系数研究工作,主要涉及的放射性核素有 Sr , Cs , Co , Ag , I 和 U , Ra , Th , Rh 等。其他核素的浓集系数包括 H , C , Na , Si , S , Cl , Ca , Sc , Cr , Mn , Fe , Ni , Zn , Se , Kr , Y , Zr , N ,