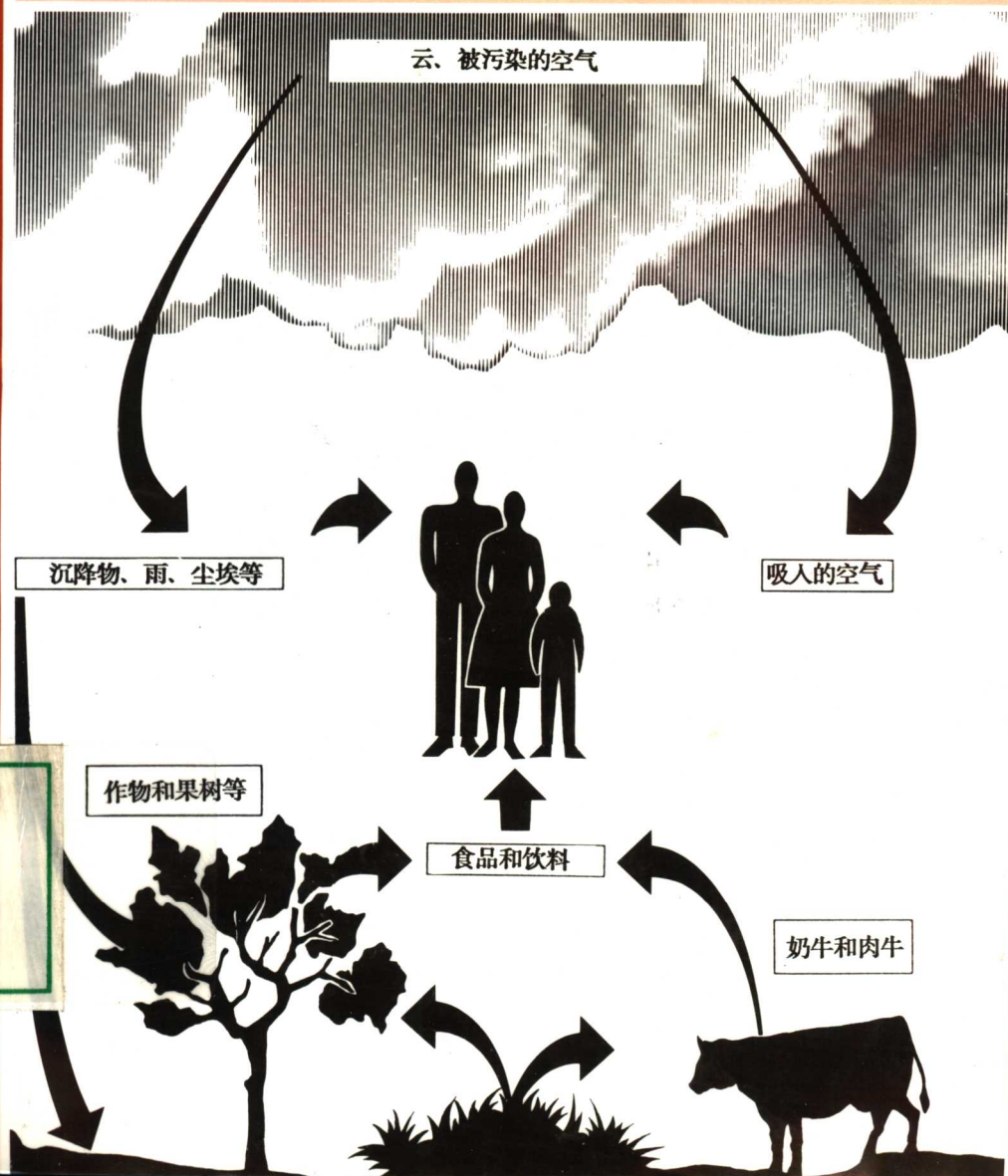


土壤、作物及食品中的 放射性沉降物

中国农业科技出版社

北京



联合国
粮食及农业组织

土壤、作物及食品中的 放射性沉降物

著 者 F.P.W. Winteringham

译 者 裘同才

校 者 王振江

联合国粮食及农业组织和国际原子能机构联合出版

粮 农 组 织
土 壤 文 集

61

中国农业科技
出版社
北 京



联 合 国
粮 食 及 农 业 组 织

(京) 新登字061号

图书在版编目(CIP)数据

土壤、作物及食品中的放射性沉降物/温特林厄姆(Win-
teringham, F.P.W.) 著; 裘同才译.-北京: 中国农业科技
出版社, 1995.10

书名原文: Radioactive fallout in soils, crops
and food

ISBN 7-80119-042-4

I.土… II.①温…②裘…III.①土壤-放射性沉降积
存物-放射性污染-污染防治②作物-放射性沉降积存物-放
射性污染-污染防治③食品-放射性沉降积存物-放射性污
染-污 IV.X591

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第17931号

**土壤、作物及食品中的
放射性沉降物**

中国农业科技出版社出版

北京海淀区白石桥路30号 邮政编码: 100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国农业科学院情报所印刷厂印刷

•

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 4.5 字数: 98千字

1995年10月第1版 1995年10月第1次印刷

印数: 1—3000册 定价: 6.00元

前 言

虽然1986年4月前苏联切尔诺贝利核电站事故给人类带来了灾难性的后果，但是它及时提醒人们要永远保持警惕和作好准备。最重要的是，这次事故说明了与联合国机构保持联系和合作的重要性，同时让人们知道释放到环境中的放射性物质能很快产生对国际甚至全球的影响。这个问题对相关社区的农业和应急食品的供应尤为重要，因此与FAO（联合国粮农组织，下同）的利益和职责有关。

自从1945年后十年“原子能时代”真正开始以来，原设在罗马的FAO的原子能分机构就表示了FAO对放射性污染问题的关注，从而出版了直到现在仍然具有权威性的FAO原子能丛书（见参考文献1—5）。FAO原子能分机构的职责根据1964年两个组织签订的协议，后来转交给设在维也纳的FAO和IAEA（国际原子能机构，下同）联合办事处。

自从1945年第一颗原子弹爆炸以来，防止放射性沉降物影响和污染，对于非专业人员来讲成为一个令人发怵的问题是可以理解的。新的名词和定义不断增加，人们在使用一些新的放射性单位和辐射标准。然而许多国家和国际有关组织出版的一些有关刊物令人费解，更使这一问题复杂化了。

本书第一部分是针对与FAO的利益和职责有关的问题，以科学上准确的但非专业的语言提供一个新的背景，意外核爆炸带来的具有国际影响的问题。再就是其它类型的放射性事故所造成的局部土壤污染问题。例如陆基放射性废物保护层发生故障或者运载放射性物质的军用航空器或航天器的坠毁造成的污染（见1.3.2和2.7.6节）。

书后所列的参考文献（第5部分）主要是为探索技术细节或收集更多资料的人提供的。主要是英文文献，但以有关机构法定语种发行的大多数联合国文献也列在内。

作者对给予过帮助和提出宝贵意见的众多的FAO和IAEA的同事表示感谢。同时感谢国际辐射防护委员会前干事、维也纳的Karl Buchtela教授、M.C.Thorne博士、北威尔士Trawsfynydd核电站主任Donald Doo先生以及北威尔士山地羊放牧场Martin Bunford和Elwyn Evans家族。感谢Elfyn Hughes教授（威尔士自然保护区前主任）、Mansel Davies教授（威尔士大学前化学教授）以及Martin Frissel博士（荷兰R.I.V.M辐射研究实验室主任）慷慨提供大量资料。尽管得到众多人士的帮助，对书中存在的任何不足，作者仍负完全责任。

原编者按

在编写和准备出版时，联合国粮农组织和国际原子能机构的工作人员帮助装订初稿并编排了页码。

该书的某些观点纯属著者个人观点，不一定代表上面提到的国际组织或国家机构的观点。此处还要着重指出，在国际上认为可能需要做的事，需要根据切尔诺贝利事故后的经验作修改，在任何活动中，正象该书指出的那样，应进行适当的成本收益估价。

文中提到的特定公司或其产品或商标名称，并不意味着FAO或IAEA为它们担保或推荐。

目 录

前言

第一部分 释放到农业、林业及渔业等生态系统中的放射性物质的行为及其影响.....	(1)
1.1 环境辐射	(1)
1.1.1 天然辐射源	(1)
1.1.2 人为(人类活动带来的)辐射源	(2)
1.1.3 放射性废物及其放射性释放	(2)
1.1.4 正常条件下的相对辐射量	(2)
1.1.5 事故的可能性及事故现场	(4)
1.2 放射生态学、行为、影响和模型	(5)
1.2.1 影响	(5)
1.2.2 放射生态学	(5)
1.2.3 模型	(8)
1.2.4 提早采取的对策	(10)
1.3 切尔诺贝利核泄漏事故和其它事故	(13)
1.3.1 切尔诺贝利事故	(13)
1.3.2 其它事故	(13)
1.3.3 切尔诺贝利事故后欧洲的国际形势	(14)
1.4 某些国际问题	(15)
1.4.1 世界粮农组织和国际原子能机构的联合计划	(15)
1.4.2 对将来的教训	(15)
1.4.3 资料的收集	(16)
1.4.4 自动监测装置	(16)
1.4.5 实验室工作	(16)
1.4.6 培训和教育	(16)
1.4.7 交流和合作	(17)
1.4.8 国际保险制度	(17)
1.5 摘要	(17)
第二部分 放射性沉降物对土壤和作物的污染.....	(19)
2.1 农业和林业用地是极其重要的综合资源	(19)
2.1.1 土地是一种有限的资源	(19)
2.1.2 放射性沉降物及其污染	(19)
2.2 土壤的营养循环	(19)
2.2.1 土壤组成及其易变性	(19)
2.2.2 农业和林业生态系统	(20)

2.2.3 植物养分循环和施肥	(20)
2.3 放射性污染源及其特征	(21)
2.3.1 天然放射性核素	(21)
2.3.2 人为放射性核素	(22)
2.3.3 1945年以后的趋势	(22)
2.3.4 切尔诺贝利事故后土壤中的沉降物	(24)
2.4 土壤污染的生物学意义	(25)
2.4.1 需要考虑的一般问题	(25)
2.4.2 放射生态毒理学	(25)
2.4.3 职业卫生和公共卫生问题	(28)
2.5 放射性核素在土壤中的行为及进入食物链	(29)
2.5.1 有效“消失”和再分配	(29)
2.5.2 作物吸收	(31)
2.5.3 向食品转移的情况	(35)
2.5.4 在食物链中的转移	(36)
2.5.5 淋溶	(37)
2.5.6 土壤——食物链转移模型的应用	(38)
2.6 测量	(39)
2.6.1 提早通知的重要性	(39)
2.6.2 取样和监测	(40)
2.7 对被污染土壤的对策、改良及利用	(40)
2.7.1 需要考虑的一般问题	(40)
2.7.2 时间因素	(41)
2.7.3 土壤翻耕、灌溉、淋溶和作物收获	(42)
2.7.4 肥料和其它改良剂	(43)
2.7.5 作物选择和安全检查	(43)
2.7.6 非反应堆事故可能带来的问题	(43)
2.8 总结性评述：某些问题和要求	(44)
第三部分：附录1—与食品和农业有关的干预和推定干预水准的说明	(46)
3.1 干预水准	(46)
3.2 对国际食品转移的推定干预水准	(47)
3.3 时间和食品加工对推定干预水准的影响	(47)
第四部分：附录2—术语、定义、单位、缩略语、简称	(50)
第五部分：附录3—参考文献	(53)

第一部分 释放到农业、林业及渔业等生态系统中的 放射性物质的行为及其影响

1.1 环境辐射

1.1.1 天然辐射源

放射性物质是整个生物圈的组成部分，有些放射性物质是来自外层空间的宇宙辐射（6）在大气层中由于连续作用而形成的（尤其是碳-14和超重氢，即氢-3）。

我们这个星球上的一切生命都在进化着，而且在这种放射性环境中蓬勃发展，确定这些天然放射性水平是有用的。这不仅表明在探测人为放射性水平增加时事先必须知道“自然本底水平”，而且也表明应把这种放射性水平看作是“可以接受的”，就象一个人呼吸空气一样，在这个星球上没有选择的余地。

在大气层进行核试验之前，大气中放射性碳-14（以二氧化碳的形式存在）的含量约为 0.25Bqg^{-1} 碳。由于60年代在大气层进行核试验，碳-14的水平达到约为 0.45Bqg^{-1} 碳的高峰，但是后来下降了（7；8；单位和术语见第四部分）。

业已证明，典型的20cm根层土壤内，大约含天然放射性同位素钾-40（2） $3 \times 10^5 \text{Bqm}^{-2}$ ，海水中钾-40的含量大约为 10Bql^{-1} （2，9）。据报道，粮食、牧草、水果及蔬菜中钾-40的含量大约为 $50 \sim 150\text{BqKg}^{-1}$ ，这与已知的天然钾中钾-40的含量为 30Bqg^{-1} 相一致（参见2.3节）。

岩石（以及土壤）和由此获得的建筑材料可能含有某些天然“原生”（不同于“宇宙”放射性核素）放射性核素铀、钍和钍，它们按照复杂的放射性衰变模式，形成放射性“子体”例如镭-226以及惰性放射性气体氡-222，据报道，土壤中（根系深度）镭的放射性水平最高可达 10^4Bqm^{-2} （2）。粮食和水中天然镭-226的水平在下列范围（5）：

谷类	$0.3-5 \text{ BqKg}^{-1}$
水果和蔬菜	$0.04-0.9 \text{ BqKg}^{-1}$
牛奶	$0.04-11 \text{ BqKg}^{-1}$
地下水	$0.04-0.4 \text{ BqKg}^{-1}$
地面水	低于 0.04 BqKg^{-1}

环境中的放射水平、分布模式以及人类活动导致的变化此处不作评论。下面只作简单讨论，本书第二部分进行更加详细的讨论。

1.1.2 人为（人类活动带来的）辐射源

自从1945年以来人为放射性核素的生产大大地增加了，最初使用小镭铍中子源提供中子，使用电动亚原子粒子快速器（例如回旋加速器），但是，主要还是通过研究堆或动力装置核反应堆堆芯的中子辐射使铀裂变。

就事故性排放问题来讲，固定的或移动的（舰艇或潜水艇）核反应堆的燃料无疑是环境中最大潜在的无意识的污染源。此外还有包括核武器在内的事造成的裂变材料和裂变产物的排放（但这超出了本书讨论的范围），由于战争或恐怖主义也可能导致放射性物质的排放。这些问题正说明全面推行和贯彻“禁止核扩散条约”（NPT）的紧迫性和重要性，在这

方面国际原子能机构发挥着重要作用（10）。

由于偶然发生的中子辐射而积累于运行的反应堆堆芯里或结构中，或循环介质里（例如冷却水）的放射性核素的种类和数量水平早已为大家所熟知。裂变产物大致是由质量数为80—160的元素组成。中子活化产物是能够有效地“俘获中子”的那些元素，它们暂时或永久地存留于反应堆的安全结构、管道阀门系统和循环介质等部位。这些活化产物包括碳-14（从二氧化碳冷却堆中含氮杂质获得）、锰-56、钴-60、锌-65以及超铀元素，例如钚同位素238-242（2；6；11；12）。这些超铀元素存在于反应堆燃料中。

当裂变产物和放射性产物是在不变条件下恒速生产时，有些放射性产物呈现“稳态”水平。当这些放射性产物的衰变速度与其生产速度平衡时，就进入这种稳态水平。然而，长半衰期放射性核素随着反应堆燃料元件的运行不断积累。由于这些缘故，反应堆堆芯的放射化学组成随时间而变化，因此，预计事故后排放或放射性沉降中的放射性核素的种类和水平也随时间而变化。

在核反应堆事故后泄漏或爆炸排放到环境中的放射性核素列于表1。这些核素对农业、粮食、牧草、林业以及渔业具有重大的潜在影响。选择这些核素时考虑到了早期研究结果（2；5；11；12；13；46）以及“切尔诺贝利”事故之后正在进行的许多研究（14—18）。

1.1.3 放射性废物及其放射性释放

反应堆放射性核素的生产和积累及其向不同用户供应一直为人们所关注，这意味着人类环境中的天然辐射水平将提高，某些放射性废物或副产品将排放到环境中。然而，由于其潜在的生物学意义（见2.4.1节），对核燃料和核废物的加工和运输，对放射性同位素在医疗、科研及工业上的应用早已进行了研究，而且比威胁人类健康的物理或化学因素控制得更好。此外，在多数情况下，有关人员对核反应堆选址、安全措施以及对放射性废物的运输方法及路线、贮存及处理是很重视的（23—30；31；32；214）。

在考虑废物的时候，重要的是懂得“核燃料循环”和最初的铀矿采矿作业、浓缩、燃料装填、烧过的核燃料的去除、后处理等放射性物质的后勤学。可以用相对非技术语言描述“核燃料的循环”（29；33；34）。

1.1.4 正常条件下的相对辐射量

保护人类健康无疑是辐射保护的主要目的。电离辐射的有害影响肯定是由于接受了外源辐射（即对身体），例如来自环境放射性核素、X-射线机的辐射途径或由皮肤进入，或吸入肺部，或伴随食物和饮料进入身体，或由于医疗谨慎地引入（例如为了治疗恶性肿瘤）等进入人体的放射性核素的辐射。

所有人（无论个人还是集体）目前都受到由于人为辐射源而来的电离辐射的危害，同时他们还受到环境化学物质危害；来自采矿、建筑、爆破的粉尘，农业所用的农药，粮食保存所用的化学药品，机动运输装置、燃烧矿物燃料供暖的排放物，工业废液等（35；36；37）。

对此值得注意的问题是，对总人口平均辐射剂量中天然辐射源和人为辐射源各占多大比例？对这个问题，著名的联合国原子效应科学委员会（UNSCEAR，13；38）曾进行过研究，而且已经获得定量答案，并有几种以非技术语言介绍的优秀出版物（39；40）。这些结果在表2中作简单说明。

表 1 核事故可能泄漏的放射性核素以及核反应堆事故对农业、林业和渔业的潜在影响

放射性核素	放射性半衰期	衰变方式	对农业的重要影响	备 注
钡-140	13天	$\beta + \gamma$		FP
碳-14	5568年	β	+	AP
铯-144	284天	$\beta + \gamma$		FP
铯-134	2年	$\beta + \gamma$	++	FP
铯-137	30年	$\beta + \gamma$	+++	FP
铬-51	28天	$\beta + x$ 射线		AP
钴-60	5.2年	$\beta + \gamma$		AP
碘-131	8.1天	$\beta + \gamma$	+++	FP 排放几周后对农业等的影响呈下降趋势（见脚注）
铁-35	2.6年	x 射线		AP
铁-59	45天	$\beta + \gamma$		AP
氦-85	10.8年	$\beta + \text{弱}\gamma$		FP
钼-99	66小时	$\beta + \gamma$		AP
镱-239	2.35天	$\beta + \gamma$		AP
钚-238	24000年	γ	+	AP
钷-103	39.5天	$\beta + \gamma$	+	FP
钷-106	368天	$\beta + \gamma$	++	FP
银-111	7.5天	$\beta + \gamma$		FP
银-110m	270天	γ		AP
铟-89	52天	$\beta + \text{弱}\gamma$		FP
铟-90	28年	β	+++	FP
钽-182	115天	$\beta + \gamma$		AP
碲-132	78小时	$\beta + \gamma + x$ 射线		FP
氪	12.5年	β		AP
锌-65	245天	$\beta + \gamma$		AP
锆-93	1.5年	$\beta + \gamma$		FP
锆-95	65天	$\beta + \gamma$		FP
氙-133	5.3天	$\beta + \gamma$		FP

——FP表示裂变产物。AP表示活化产物。

——裂变产物的“子体”同位素等不包括在内。

——镱-239和钚-238是超铀活化产物或“锕系元素”。

——放射性半衰期（ T_R ）：仅仅指的是由于放射性衰变，放射性水平减少一半所需的时间（例如处于封闭状态的土壤和水的例子）。

——仅仅通过衰变，任何放射性核素的放射性在10个半衰期之后剩下不到0.1%。对于放射性半衰期为一周或一周以上的任何放射性核素，24小时减少不到10%。

——根据下面公式计算，与在人体内一样，牲畜体内的许多关键性放射性核素的有效半衰期（ T_E ）可能相当短，例如，在母牛体内铯-137的有效半衰期为20天左右，而山羊只2—8天（见参考文献5）。由此可见，假如母牛在被铯-137污染的草地上放牧一段时间（例如1个月，在这段时间内铯-137可能有时间进入正在生长着的作物或牧草的根系所吸收不到的土壤层中去，基于有效半衰期20天，铯-137将逐渐从母牛体内排出。因此，假如放牧3个月（大约4.5个有效半衰期），牛肉或牛奶中的铯-137的含量将下降到峰值时的6%左右，6个月后剩下不到0.5%。然而，如果母牛继续放牧在被铯-137污染的草地上，或者饲喂贮存的被铯-137污染的牧草，当对铯-137的吸收速度与有效排出速度平衡时，母牛体内铯-137的水平趋于平稳状态。

$$T_E = T_R \cdot T_B / (T_R + T_B)$$

式中 T_B 为生物半排期（见参考文献16）

表 2 所有辐射源年平均有效剂量当量近似相对值。总照射量大约为2.5mSv/年

辐射源	占总剂量%
天然地球内照射源（钾-40 + 碳-14 + 氡等）	54
天然宇宙射线和外照射源（地面辐射，建筑结构辐射，氡等）	25
人为辐射源（医疗应用，X-射线等）	19
核试验散落的灰尘	1
航空旅行，电视机，发光漆等	0.5
核工业	<u>0.2</u>
	~100

对天然辐照射量的最近研究的一个有价值的结果是因场所和社会环境而异（例如经常飞行），在通风不良的空间可能积累大量来自地面和建筑材料的氡气（氡-222）（38）。显然，人为放射源的个体照射量也随行为、健康状况、职业、距正常排放和事故排放地点远近而定，而且这可能有很大的个体差异。

在核事故后照射方面的一种重要因素是经常通过被污染的食物和饮料运输远离事故现场内的地方，甚至跨过国界。因此，监测农业、林业和渔业环境，限制可能被污染的产品运输和出口，不管是粮食、饲料、饮料，还是棉花和纸张等纤维产品，将是极其重要的。这种污染也影响土地、有关社区的生活和幸福（正如切尔诺贝利核电站事故那样）。这些重要问题将要进一步讨论（见1.4.2和1.4.8节）。

1.1.5 事故的可能性及事故现场

本节评述的仅涉及和平时核事故对农业、林业和渔业及对所属社区的潜在影响。

所讨论的放射性物质的量很小，而且由于职业危险，一般受到严格控制，这说明来自工业、医疗和科研应用方面的核事故可能仅是局部性的，不可能影响到农业。可能发生影响内河渔业的局部核事故，但不可能发生难于控制规模事故。

迄今所得到的资料和经验（包括切尔诺贝利的资料和经验）表明，对农业等具有任何潜在影响的核事故的重要性按次序排列如下：

- （1） 陆上核动力反应堆
- （2） 移动式船用核动力反应堆和带有核装置的航空或航空飞行器
- （3） 科研、教学以及生产放射性同位素的反应堆
- （4） 核燃料加工厂，废物排放等（特别是放射性核素进入水生生态系统或海洋生态系统）
- （5） 作为核燃料循环一部分的放射性物质的开采、贮存和运输（除了第4条以外）
- （6） 核医疗、工业辐射以及研究装置

显然，任何核事故对农业的影响将取决于排放物的位置、性质和数量以及随后的气象条件。这就非常需要有一张全球地图，在上面正确标出所有反应堆和核装置的位置，同时标出易受影响的农业、林业和渔业区域，比如每个半径为150公里以内的区域。在可能发生具有相对局部影响的事故方面这一需要早已确定（193，）。制备这种全球地图的大量必需的资料和数据现已具备（56；83；84；85）。这种地图也可用于“非核状态”，不过由于与气象有

关的大气运输和沉积结果非核状态也会受来自遥远的边界之外的放射性沉降物的影响。

核动力推动的船或潜艇的位置不可能用固定的图表示出来,这说明预先通知十分重要,“切尔诺贝利”核电站事故以后,特别是最近维也纳国际“早通知”协议,在这个问题上大大前进了一步(41; 42; 43)。

陆地和海洋核事故的重大差异在于放射性排放物的大部分进入海洋或内陆水域,不便于许多国家单独地探测。因为这些国家建立的监督网有一定距离。另一方面,放射性物质大大地受到遏制,以很慢的速度转移。这将会延迟或许能防止对农业的严重污染(71; 210; 1.2节)。

1.2 放射生态学、行为、影响和模型

1.2.1 影响

对于一次事故性释放,至少可提出三个问题:在生态系统内放射性核素行为如何?它对人类健康和环境卫生有什么影响?怎么办?

当生态系统内放射性核素的放射性可以检测到、可以测量、也可以示踪或追寻时,其化学行为将与普通的非放射性元素相同,或者至少与自然界存在的密切相关的化学元素在性质上相似。例如放射性碘-131的行为与普通碘元素一样,放射性铯-137的行为很像钾。有些元素“同位素作用”较小,例如由于放射性衰变而嬗变的那些元素(见1.5.2节)。除了氚之外,放射性核素和稳定核素之间质量数差异不大,只是对化学反应和酶反应速度有很轻微的影响(47)。总而言之,这样微弱的“同位素作用”在此没有什么意义。简单地说,当影响健康完全是由于放射性裂变和发生辐射所致时,放射性核素的生态行为将完全取决于其化学性质(或活体内的生物化学性质)。

至于人类健康,像氚和碳-14等放射性核素可以结合到活体的DNA结构中去,从理论上说这些核素对生态系统中的动物或植物有遗传或体细胞影响(48; 49)。不过,在事故发生后,这些放射性核素及其可能发生的嬗变作用对农业等影响不大。

沉降的裂变产物和锕系元素的化学重量可能如此地少,以至于在化学毒理学上(或生态毒理学)没有什么意义。这在考虑去污问题时具有重要意义(见1.2.4节)。然而,由于在反应堆堆芯产生的分量很高(34),它们可能作为未来快中子增殖反应堆的燃料(33; 50),且由于它们有很高的放射毒性(51),可以想象,铀-239在未来严重事故中可能是个例外(见2.4.2节)。另一方面,它似乎不会迅速通过食物链转移到人体中(52; 53)。

当被污染的生态系统中的辐射处于相当高的水平时,可能直接伤害微生物、植物及动物。对此效应已经进行了许多研究,例如对水生生态系统的生物区系的影响(21)。发现鱼卵是海洋生物区系中最敏感的一种有机体(参考文献21的第二部分, Nishiaki等)。观察表明,水生生态系统逐渐被放射性核素污染,范围大约 $40000-400000\text{Bq l}^{-1}$,但是“鱼卵(红鲱)的死亡率和孵化率与接受的照射剂量不成正相关”。在30天的试验期间剂量从铯-137的 0.07Gy 到钚-106的 0.37Gy 。

这些研究(特别是参考文献77; 183; 213)表明被污染的生态系统中辐射水平是如此之高,以致于各种野生生物、作物及牲畜等都受到很大影响,而对野生生物的直接影响在意外事故中可能被忽视,这将给人类健康带来严重威胁(54; 55; 2.4.2节在这方面有更详细的讨论)。

1.2.2 放射生态学是研究整个生物圈里或某一特定生态系统内放射性核素行为的一门

科学，这里所说的生态系统可能是一个小的试验鱼塘，温室，或10000公顷面积的人造生态系统，例如大型山地牧场或谷物种植区。这些研究中的放射性核素可能是谨慎地加进去的，也可能是大气层核试验放射性的沉降物，或者核事故的释放物。随着核工业的稳步发展（56），放射生态学方面的研究和文献越来越多（参考文献1；2；3—5；18；20；21；22；46；63；57；58—62；63；64；65；66—75；76；77）。对这些范围广泛的研究进行任何较详细的讨论都超出本书的范围或需要，因将对一些重要的研究结果只作简单的介绍。

在图1、2、3中以图解方式说明核事故排放后内照射和外照射的主要途径及来源是明显的。图1、2说明放射性污染物从农业等转移到人体内的过程中，农业和渔业所起的作用。图3说明长时间从事露天劳动的农民的外照射的特殊问题。另外他们还会受到来自收获和贮存产品的外照射。此外，外照射源可能以非食用产品的形式（如羊毛、棉花、纸浆、木材等）转移给城市居民，此内容图上未加说明。同样，放射性核素通过大气再悬浮这一“较次要”途径的转移（124，P44；2.2.2节（4））也未在图1中标出。

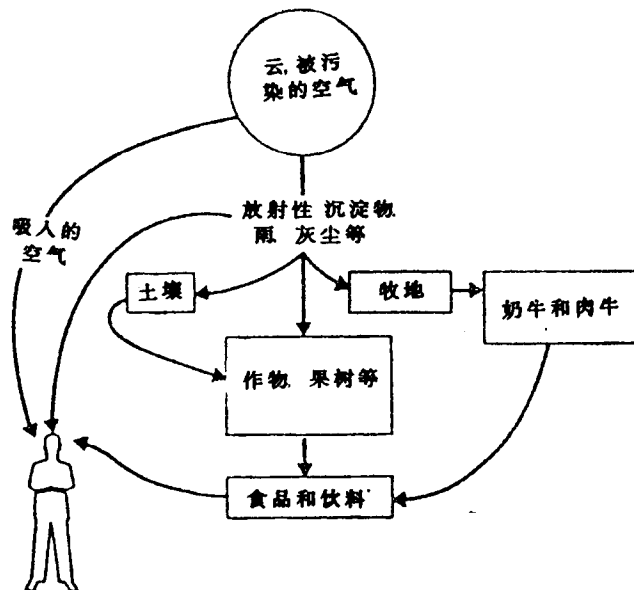


图1 放射性污染从空中到达人体的主要途径

有证据证明针叶林上空沉降的放射性核素能被树叶截获(14)，这些树叶将成为地面落叶层，因此不进入木材或纸浆。不过这个潜在问题还需要查证。

尽管放射性核素的范围可能很宽（见表1），但是沉降研究和事故后的释放证明只有少数放射性核素被认为具有重要的影响，这些核素是：锶-89、锶-90（长期）、钚-106，碘-131（短期）、铯-134、铯-137（长期），以及钚同位素，大多数和30年前预期的一样（参考文献并见表1及其脚注）。

碘-131的意义是由于它能迅速地转移到牛奶中及积累在甲状腺内。另一方面，它的放射性半衰期较短，需采取的农业对策是沉降后大约8周以后才能收获产品。

新沉积的铯-137（或者铯-134）从牧草转移到牲畜体内、肉和奶中的历程很快。沉降后收获的干草不可能马上用作饲料这是导致肉中铯-137水平不能及时反映出来的原因。在食物

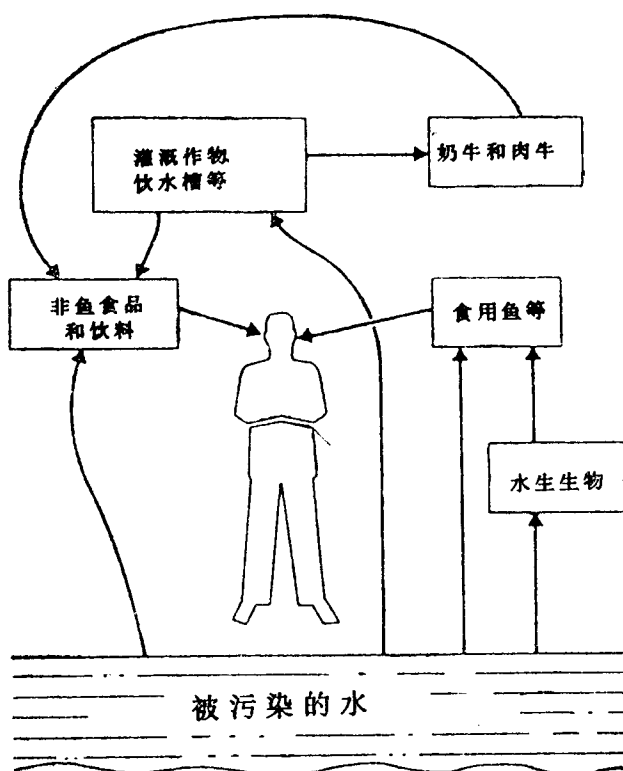


图2 放射性污染物从水到达人体的主要途径

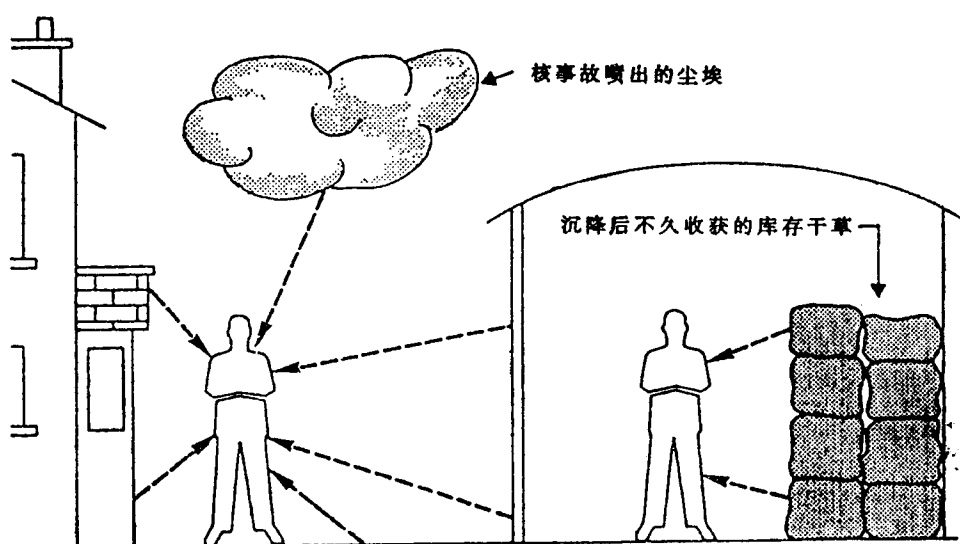


图3 从农场建筑物外面和沉降后收获的库存干草来的外照射

链末尾铯-137广泛地分布于人体的肌肉中。锶-90的行为类似于钙，在人体骨骼里最多。如果沉降到准备采收的成熟水果或蔬菜作物上，并且缺乏适宜的预防措施，这种情况下饮食吸收概率最高（见第3节）。沉积的铯-137和锶-90在自然降雨或灌溉条件下向土壤剖面移动十分慢，几个月只进入一厘米左右。后茬作物的根系对两种放射性核素都可以吸收，但是从土壤中吸收铯-137的量要比锶-90少得多（大约1/10）（见2.5和2.7节）。沉降到农业土地之上后，收获的谷物中两种核素都有。当谷物磨粉时去除麸皮，面包中的两种核素水平有所下降。

土壤中的铕同位素只有很少一部分被作物吸收（作物中的干重浓度不到土壤中的1%）。当沉降的放射性核素化学浓度极低时核素不易从沉积叶片转移到植物体内，至少在早期阶段不能转移。作物从土壤中吸收铯-137比吸收锶-90难，而作物直接从叶沉积物中吸收的情况则相反。

降水是大气携带的放射性核素转移到地面和水面的主要因素。无论是有意（例如废水排放）还是无意地将放射性核素排入海洋或淡水鱼塘，都会形成一个浓度较高的局部区域。然而，鱼、尤其是水生微生物群落可以以1000倍或更高的浓集系数“生物浓集”放射性核素，在寡营养湖中更是如此。幸运的是同样由于放射性核素化学浓度低，它们被强烈地吸附在相应的悬浮物和沉积物的微粒上（见参考文献210），而正是如此才避免了这些物质通过河流从一国流入其它国家（71）。

1.2.3 模型

以数量表示释放到环境中的放射性核素的迁移和行为的许多模型和简单公式已被研究出来（78；79）。这就为确定在生态系统不同部分放射性核素的预期沉积量、停留时间和在整个食物链中向人体的转移之间的关系这一十分重要的任务打下了基础，也为研究和控制放射性物质的常规排放打下了基础（24；80）。显然，“商品篮”和饮食数据对确定这些估值和辐射剂量当量率或随饮食摄入量的最终估值具有十分重要的作用（81；又见2.5节）。由计算机运行的模型为快速贮存、检索和处理日益增多的放射性生态研究数据奠定了基础（59，80；178；187；188）。使用的单位和专门术语，估算辐射剂量的原理，紧急情况下的职业卫生防护及公共卫生防护的极限参数见2.4.3、2.5.3、3.1—3.3及第4节（另见参考文献40、44、81、182、205、211）。

在事故释放后的紧急情况下，模型被越来越多地用来探测可能途径，因而可作监测和取样指南。它们还提供有用的综合性情况，例如“切尔诺贝利”核电站事故之后作的描述（18）。然而，由于自然或农业生态系统的高度复杂性及易变性，变化无常的气候和降雨以及早期阶段对任何核事故的未知因素，显然没有办法代替时常保持警惕及对“关键时刻”进行的应急现场监测（见下文），特别是对空气和降雨的监测，监测放射性核素的水平和组成，外照射水平和对剂量当量率。在此基础上要对农业、林业及渔业进行紧急干预和采取对策，以保护公社卫生。

事故释放或常规释放到水生系统或者以沉降方式降落到农业土地之上后，即可取样监测出生态系统中和食物链中的放射性核素及其复杂性。采用关键措施法“（例如参考文献22和64），根据放射生态研究确定最重要的放射性核素及其导致人体、甚至重要器官”遭受照射的途径。例如“切尔诺贝利”核电站事故进一步证明了早期监测降雨，牧草和收获前的蔬

菜，以及监测牛奶中碘-131的重要性。对于后茬作物灌溉水的测量，相对来说不是太急。总之，“关键措施法”作为最佳监测手段，特别是在紧急情况下更为重要。

农业、林业和渔业生态系统中放射性沉降与下面的问题相比要简单得多。一次较大的核电站事故后，尤其是沉降到耕地上的这些放射性灰尘对公共卫生有着很大的潜在威胁，这些问题将在第二部分讨论。对于权威性的详细对比研究，需要查阅切尔诺贝利事故前Coughtrey、Thone及其同事的综合性论著（77）以及Scott Russell及其同事的经典著作（53）。

人们很早就认识到同是沉降到土壤和水生生态系统中的放射性灰尘，但影响是不同的，（参考文献53）。将要成熟的作物和木本植物的果实采收后可能很快通过食用被吸收，并且沉积的放射性核素的水平较高（见第二部分）。然而，沉降到水中的放射性物质首先必须经历垂直分布，并将吸附在悬浮的或沉淀的颗粒、微生物上等（参考文献71和210），在时间上，沉降物在生物浓集或食用鱼直接吸收之前得经历水生食物链的转移。因此内陆渔业对人们从饮食中摄入放射性物质来说一般较少（参考文献53）。出于这些和其它的原因，人们早就认识到水生食物链是放射性降落灰尘对人体的一个“小照射源”（53）。出于同样的原因，食用鱼的放射生态学的意义可能有时减弱，有时增强（参考文献53）。这就再一次强调事故后现场监测的重要性（同上）。正如上面已经提到过的，在寡营养条件下，放射性核素可能经历很高的生物浓集作用（参考文献21），正如瑞典某些内陆渔业在切尔诺贝利事故后经历所证实的那样（82）。据此我们认为不管以往的观点如何，内陆渔业遭受事故后沉降物污染的问题需要进一步研究和监测（见第二部分）。

图4以图解法说明放射性沉降物在农业、林业或渔业方面的“湿”或“干”沉积作用，并在脚注中加以概述（可参阅第二部分）。

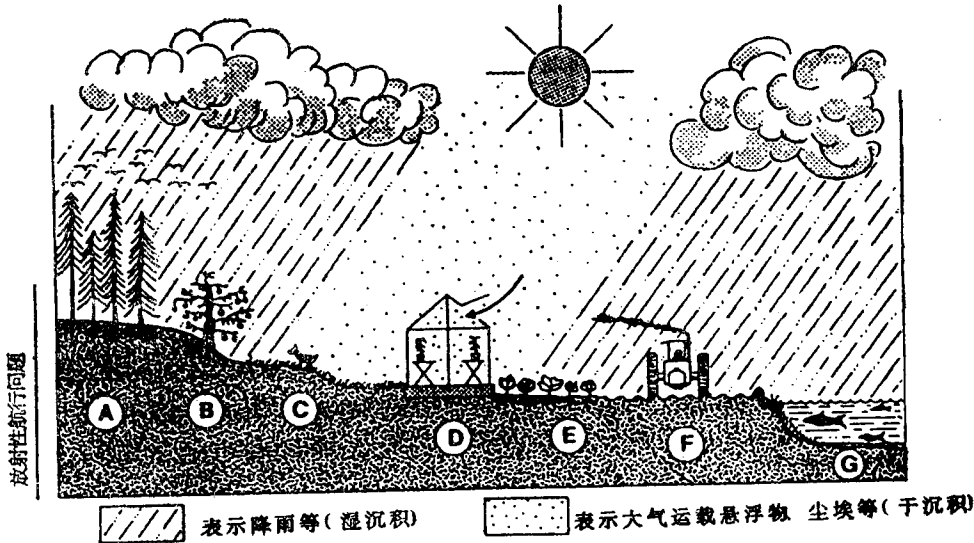


图4 放射性核素对农业、林业和渔业的湿沉积和干沉积示意图

- A 郁闭林，有浓密的树被，树叶截留大量沉降物，借助地面枯枝落叶层保护土壤上暴露的野生动物。
- B 果树，树叶截留沉降物量较高，果实截留沉降物量较少。
- C “峰”沉积之后牧场上的牲畜吸收大量放射性物质。

- D 温室里的盆栽植物只因通风造成一些干沉积污染。
- E 地上成熟的新鲜蔬菜截留大量沉积物，沉积物可能很快进入“菜篮子”。蔬菜可能成为土壤的保护性覆盖物。
- F 当收获后土地翻耕裸露休闲时，土壤接收的沉积物最多。并迅速沿土壤剖面扩散到耕作层。
- G 在营养不足的水体内，除了由于鱼的高度生物浓缩作用而延迟之外，放射性核素因颗粒吸附和颗粒沉淀而被有效地去除，但在水体底层沉积较多。

1.2.4 提早采取的对策

为减少和改变放射性沉降物对农业等的影响而提早制订对策的成功计划，其最基本和最重要的程序是立即将事故发生情况通知有关方面，利用现有的防护网监测在一定距离内可能受到损害的农业、林业、渔业区域辐射水平的显著变化。对于这种情况必须有地图，这在上面已经讲过了（1.1.5节）。

在苏联的有力协助下，“切尔诺贝利”事故已经促使立即通知核事故，这一生效的国际协议（41；42）前进了一大步。

国际原子能机构的传统作用是领导制定和检验辐射和放射性的取样和监测方法。这些计划（根据国际原子能机构奥地利塞伯尔斯多夫和摩纳哥的实验室的研究结果制订的）目前随着包括FAO在内的联合国其它机构间的合作和协调的改善而不断扩大（86）。

“切尔诺贝利”事故的经验说明改善的一种可能性是畜牧场提前采取防护措施。事故后气候和降水对放射性沉降起着关键作用，特别是距事故现场很远的地区（例如奥地利、北威尔士、瑞典的某些地区）。降水对放射性沉降的影响已得到公认（参考文献74）。这说明如果事故后气象条件表明有降水沉降的可能性，可以将奶牛或其它牲畜（羔羊），赶在一起并转移到暂时性或永久性的掩蔽场所（这是欧洲冬季一些寒冷地区常用的方法），并为牲畜提供贮存饲料和饮水。这可能要一个长期的基础设施，以便做到以下几点：

- 一把紧急天气警报通知范围之内的农民；
- 一有长备应急饲料和水源的永久的或临时易于建立的掩蔽场所或隐藏处；
- 一向当地监测部门提出建议，以避免不必要的损失或指出已恢复正常的状况。

最近，天气预报遥感技术和陆地暴雨雷达报警系统已得到发展（如在英国），建议在紧急情况下运用这些新技术通告事故发生情况。

事故后对食物和农业的对策（193）包括下列内容：

- 一事故后农产品、运输和贸易的推断干预水准（DILQ）如指出的那样（见第3节）。
- 一去污、稀释、加工或简单存放（让放射性显著衰变）使污染降低到可接受水平。
- 一对土地和水源的利用，采取约束、隔离或处理或等效限制策略，对严重污染的（例如离事故现场很近的地方，就象发生在切尔诺贝利附近那样）甚至要长期限制使用（14；46）。
- 一改造或恢复使用被污染的土壤和水资源。土壤—作物污染问题在第二部分做了更详细的讨论。

第三种对策对相关社区的影响可能最严重，因为按照这种办法做可能出现家庭或社区对改变居住区或工作没有选择余地。临时变换工作，从事农场维修，围墙修补等也可能受到外照射水平限制。不过，要强调说明的是这些严重制约情况很可能是暂时的，局部的，也许在

事故现场几公里之内。事故本身对环境的影响是严重的，但这种可能性必须予以考虑。这也说明一些保险和赔偿条款的重要性（见1.4.9节）。

有关去污问题的报告很多。用未受污染的产品（例如牛奶、谷物、加工过的肉、鱼）稀释或与被污染的产品或其加工产品混合是“有效”去污的一个重要方法，但是要确保混合物的均匀性，这是为了避免因混合不彻底而使最终产品中仍然存在某些可能只被少数个体通过饮食摄入体内的“热点”。

关于稀释或混合必须认识到这只能减少受到一般辐射人群的个人剂量，不过如果稀释或混合导致用被污染食品种类增加或消费时间延长，那么集体剂量当量总人希沃特（54）；（见第4节）除了放射性衰变受时间影响之外，不会有多大变化。

最近关于刚采收的蔬菜或水果去污问题的报告也建议必须对这个问题进行研究。例如在“切尔诺贝利”事故之后欧洲普遍劝告对新鲜蔬菜和水果“进行冲洗”（87），一些观察结果表明冲洗效率差异很大：“没用”（Hohenemser教授等在1986年7月1日为国际应用系统分析学会——IIASA主办并通知FAO的国际会议上提出）；这种方法对碘-131放射性“大约减少30%”，铯-137放射性“大约减少1/3”（87），“仔细冲洗，放射性只去掉一半……铯-137的放射性只去掉10%”（Buchtela教授，维也纳，个人通讯）。同样，植物叶片直接吸收沉积铯-137的试验叶（低浓集的模拟沉降条件）表明，不同物种只吸收1.2%—3.4%（63）。然而，无论是通常条件下还是“切尔诺贝利”事故后观察的结果都表明，直接沉积于正在生长的植物叶片上的铯-137大部分被吸收了，只有一部分转移到果实和籽粒中（88）。去掉新采收的蔬菜的外层叶片和水果皮就等于去掉了新的沉积物（89），同样，谷粒去糠或皮预计将会降低铯-90的含量（2）。

由“切尔诺贝利”暴露出来的突出问题是从最近沉积的牧草上吸收碘-131和铯-137的问题。这促成了最近的一项研究，即用带有适宜悬浮物的饲料饲喂受辐射的绵羊以减少铯-137的肠道吸收（英国Rowett研究所，Chesters博士，私人通讯）。预计投碘也能减少碘-131在牲畜体内的积累量，但从经济角度上讲这不能证明是合算的，至少在进行调查研究之前不能证明。投放碘预计将减少牲畜甲状腺内总碘-131的含量，但可能使哺乳动物奶中碘的含量增高（77，Vol3 p341）。

投放碘以减少机体的甲状腺吸收碘-131这种直接与公共卫生有关的对策超出了本评价范围（见上段），这方面的对策另有权威性评论（参考文献90和91）。

如上所述，沉积在土壤中的放射性核素沿着土壤剖面向下移动比许多植物营养素的移动要慢，尤其是比硝酸盐形式的氮更慢（92）。这种情况可从其一般阳离子性质及极低的化学浓度预料到（见下面）。这意味着更容易被浅根作物吸收，而且由于土壤表面的侵蚀而进一步扩展。出于这些原因，翻耕深度大约30厘米在农场是一种有益的和实用的对策（2，58，90）。对于严重污染的土地（例如由于离事故现场很近），可以铲去表土倒入预防核战争的防护场（89），就象“切尔诺贝利”周围地区目前做的那样（14，46）。

当土壤pH和含钙量允许时通过施石灰可降低对铯-90的吸收（58）。也建议对盐水和碱土施石膏（硫酸钙）以减少对铯-90的吸收（2）。

海洋和内陆渔业（池塘、湖泊、河流等）受放射性下落灰尘污染后由于限制、稀释和沉积作用不会成为严重问题。然而，“切尔诺贝利”事故后欧洲某些地区的淡水渔业和营养状