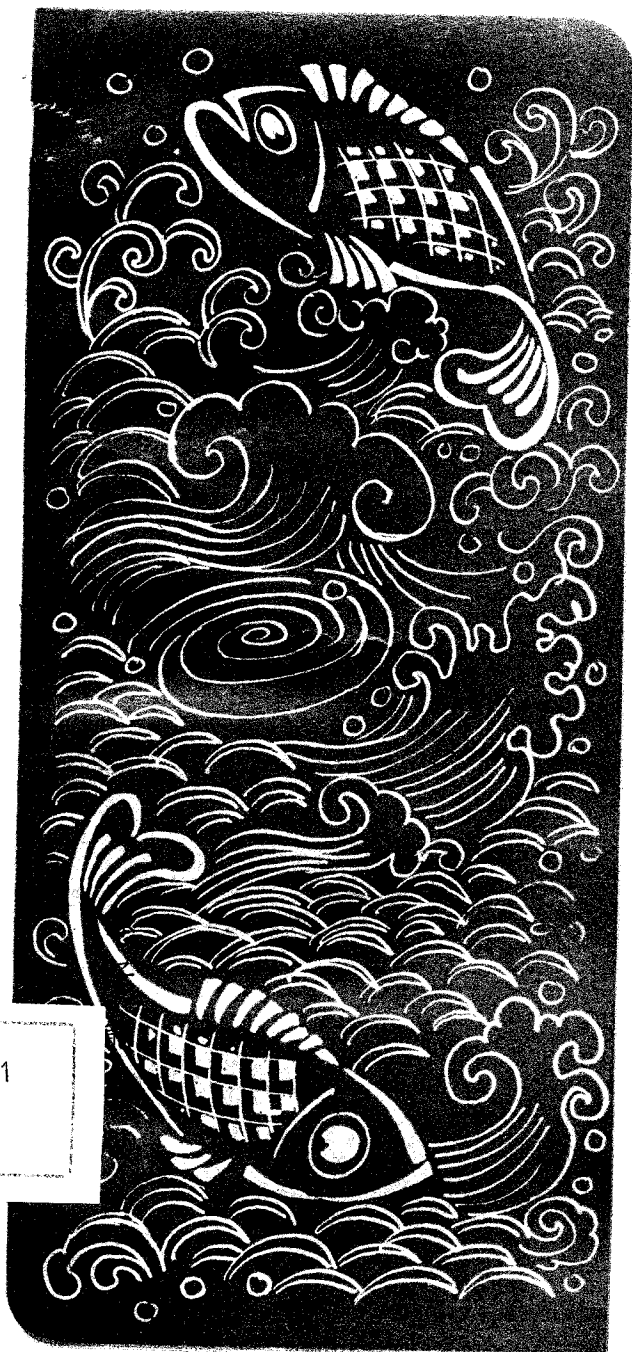


水生生物及水生生态系统的辐射效应



Effects of Ionizing Radiation on Aquatic
Organisms and Ecosystems
IAEA, Vienna, 1976

水生生物及水生态系统的辐射效应

宋妙发 江家贵 译

茅子均 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国大街8号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $5^{3/4}$ ·字数 115千字

1981年7月第一版·1981年7月第一次印刷

印数001—1500·统一书号: 15175·312

定价: 0.75元

内 容 简 介

本书译自国际原子能机构 (IAEA) 技术报告丛书第172号(1976)。全书共分三章, 第一章讨论水环境中放射性核素的浓度和水生生物的受照剂量率; 第二、三章分别讨论水生生物、水生生物种群和水生态系统的辐射效应。书末附有对今后工作的建议、一般结论和词汇注释等。本书可供从事放射生物学、放射生态学、放射卫生学、放射性废物治理及环境保护等有关专业的科技人员以及高等院校有关专业师生参考。

前 言

最近几年，生态学家和环境学家除了十分重视保护人类健康以外，还日益关心对于生态系统，特别是海洋生态系统的保护。这一点于1972年6月在斯德哥尔摩举行的联合国人类环境会议上得到了反映。会议认为，污染控制总的目的是保护和增进人类的福利，而其首要目的之一，应是保护除人以外的生物种群。

作为国际原子能机构(IAEA)环境保护计划的一个组成部分，于1970年11月在维也纳组成了一个专家小组，讨论限制放射性废物排入海洋的原则。该小组成员提出了一个重要的领域，在这个领域里，需要研究的课题是如何评价水生生物的辐射效应，特别是遗传、种群和生态系统水平方面的效应。根据这个意见，国际原子能机构召集了一批水生态学和放射生物学方面的专家，讨论了水环境的辐射效应。1971年11月及1974年4月在维也纳举行了两次专家讨论会，专家们估计了范围广泛的各种核毒物对水生生物的照射量，并提出了为估计天然本底辐射、核试验落下灰及放射性废物处置对水生生物所产生的剂量率的计算模型。此外，该专家小组审阅了现有的关于各种核毒物对水生生物产生的躯体效应及遗传效应的文献资料。作为会议的第三个议题，该小组还审阅和讨论了根据个体所受的剂量来进一步估计水生生物种群及水生生态系统的辐射效应。

本书包括这两次专家讨论会议的审议结果，希望它能引起从事放射生态学研究及放射性废物排放环境评价工作的人们的兴趣。

本书所表达的观点只是反映了与会成员的一般看法，这些科学家都是以个人身份参与其事的，因此，本书未必能反映出他们工作中经常接触到的任何其他团体或研究者的意见。

目 录

本报告的一般范围及概要	(1)
第一章 水环境中放射性核素的浓度及水生生物 的受照剂量率	(4)
1.1. 水环境中天然放射性核素的浓度	(4)
1.1.1. 海水	(4)
1.1.2. 海底	(6)
1.1.3. 海洋生物	(8)
1.1.4. 淡水	(8)
1.1.5. 淡水沉积物	(11)
1.1.6. 淡水生物	(11)
1.2. 水环境中人工放射性核素的浓度	(12)
1.2.1. 水环境中落下灰放射性核素的浓度	(13)
1.2.2. 水环境中因废物处置所产生的人工放射性 核素的浓度	(18)
1.2.3. 对于未来状况的考虑	(19)
1.3. 环境放射性对水生生物产生的剂量率	(27)
1.3.1. 体内结合的放射性核素产生的剂量率	(27)
1.3.2. 水中放射性核素产生的剂量率	(32)
1.3.3. 沉积物中放射性核素产生的剂量率	(32)
1.4. 讨论	(33)
1.5. 水环境中辐射剂量率的测量	(50)
1.6. 摘要	(50)
附录一 小球体内 α 粒子的能量沉积	(52)
附录二 小球体内 β 粒子的吸收剂量率	(54)
附录三 小圆柱体内的 β 粒子吸收剂量率	(55)
附录四 剂量率计算实例	(56)

第二章 水生生物的辐射效应 (61)

2.1. 引言 (61)

2.2. 躯体效应 (62)

2.2.1. 急性照射 (62)

2.2.2. 慢性照射 (66)

2.3. 遗传效应 (86)

2.4. 修复 (92)

2.5. 行为和代谢性刺激 (99)

2.6. 环境因素对辐射效应的影响 (96)

2.7. 摘要 (105)

第三章 水生生物种群和水生态系统的辐射效应 (106)

3.1. 引言 (106)

3.2. 躯体效应 (107)

3.2.1. 辐射对海洋鱼类种群增补的可能影响 (108)

3.2.2. 辐射对鱼类原群捕捞部分的可能影响 (113)

3.2.3. 辐射对其他品种的可能影响 (114)

3.2.4. 对受照射种群的观察 (115)

3.2.5. 生态系统的稳定性 (116)

3.3. 遗传效应 (118)

3.3.1. 种群遗传学 (119)

3.3.2. 增加突变率对种群的影响 (119)

3.3.3. 辐射对鱼类的诱发突变率 (121)

3.3.4. 预测的效应 (122)

对今后研究工作的建议 (124)

一般结论 (127)

参考文献 (129)

词汇注释 (168)

本报告的一般范围及概要

1972年联合国人类环境会议指出，污染控制总的目的是保护和增进人类的福利，然而，其中一个首要的目的应是保护除人以外的生物和种群。近年来的几次国际会议还强调指出，为了保护除人以外的生物种群和保持水生态系统的稳定，需要有评价的标准，对于那些对人至关重要的生物种群和水生态系统来说，制定这种标准尤有必要。

为了防止放射性物质所造成的海洋污染对人及其资源造成不利的影响，1958年联合国海洋法会议建议国际原子能机构对此颁布标准，制订国际上可以接受的法规。此后，国际原子能机构主持召开了若干次会议，内容涉及在海洋、河流、湖泊和海湾处置放射性废物的各种问题。1970年11月国际原子能机构组成了一个专家小组，对限制放射性废物排入海洋的原则进行评价。这个小组的决议中建议对一些综合性研究领域进行研究，其中之一是研究电离辐射对生物及其敏感生命期的影响，特别是遗传、种群和生态系统水平方面的辐射效应。

1971年11月15—19日，国际原子能机构召集了一次专家讨论会，专门讨论水生生物和水生态系统的辐射效应，并为这一领域的研究工作制订了比较详细的计划。这次会议的与会代表还不能有效地评价生态系统中种群动态的辐射效应，因此，1972年10月举行了一次补充讨论会，深入讨论了几个

议题，以期就辐射照射对于生态系统中种群动态可能产生的效应作出估计。两次讨论会得出了这样的结论：放射性废物处置所导致的剂量率很低，根据目前的知识水平，它对于种群和生态系统的影响还不可能加以证实或预测；当前实际的辐射水平与已被证实会对生物产生效应的辐射水平之间的差别很大，因此，一般地说，以人的防护为基础的排放控制对于其它生物和种群也提供了足够的保护。

然而，与会者仍然认为，当考虑将放射性废物处置于环境时，水生生物的辐射效应是必然要涉及到的重要因素。因此，1974年4月22至26日举行了有遗传学家及种群动态专家出席的第二次讨论会。这次会议的目的是更明确地讨论水生生物和水生态系统的辐射效应。

本报告介绍了1971年11月和1974年4月两次讨论会的成果。1972年10月补充会议的文件及阶段性结论在1974年4月的讨论会上进行了研究，并已得到了引用。报告分为如下几部分：

第一章讨论水环境中天然和人工放射性核素的浓度及水生生物的受照剂量率，尤其是为浮游植物、浮游动物、软体动物类、甲壳类和鱼类推荐了简化的剂量计算模型。采用这些模型，可以估算这些水生生物因体内结合的放射性核素和外部环境中的放射性核素而受到的剂量率。

第二章评述水生生物的躯体效应和遗传效应，单独讨论了近致死剂量的短期照射（急性照射）引起的躯体效应，对于较低剂量率的长期照射（慢性照射）给予了很大的注意。讨论了生物受照射后的表现、修复机理和辐射对新陈代谢的刺激作用，还讨论了环境因素对辐射效应的影响。

第三章讨论低水平慢性照射对水生生物种群的潜在效应。其中第一部分讨论躯体效应对卵和幼体的死亡率、原群增补(stock-recruitment)、繁殖力和生态系统稳定性可能产生的后果；第二部分讨论了与种群遗传和突变率增高有关的遗传效应的评价。

第一章 水环境中放射性核素的浓度 及水生生物的受照剂量率

评价水生态系统的辐射效应，一个重要的前提是要知道水生生物的受照剂量率，这个基本资料与相应的实验室辐照实验的结果相结合，才能预计可能发生的效应。资料表明，生活在水环境不同区域里的生物，可能受到的天然辐射源的照射量的差别很大^[1]，而受到环境中的人工放射性核素照射的情况，同样如此。即使在全球性落下灰的情况下，放射性进入水环境后的散布也是不均匀的。放射性元素的化学性质和水环境中的化学、物理和生物学过程复杂的相互作用，造成放射性的不均匀分布。水生态系统不同组分中放射性核素浓度的资料是估算辐射剂量率的根据。生物所受的剂量率变化的其它原因是生物的生活史（例如远洋的卵及幼体，深海中的成体）和时相性行为（例如每日、每年或更长周期的在不同环境之间的移栖）的特点。

1.1. 水环境中天然放射性核素的浓度

1.1.1. 海水

表1所列为不冰封海洋环境表层水中天然放射性核素的浓度，表中引用的数值与以前文献报道的基本一致^[20, 21]。近海水域中，由于地面水的流入，有些放射性核素的浓度可能高于表1所列的数值。由于宇宙辐射与空气中原子核的相互

表1 表层海水中天然放射性核素的浓度

核 素	浓度, 微微居里/升	参 考 文 献
^3H	0.6—3	[2]
^{14}C	0.2	[3]
^{40}K	320	—
^{87}Rb	2.9	—
^{238}U	1.2	[4, 5]
^{234}U	1.3	[4,]
^{230}Th	$(0.6—14) \times 10^{-4}$	[6, 7]
^{226}Ra	$(4—4.5) \times 10^{-2}$	[8, 9, 10]
^{222}Rn	$\approx 2 \times 10^{-2}$	[8]
^{210}Pb	$(1—6.8) \times 10^{-2}$	[11, 12, 13, 14]
^{210}Po	$(0.6—4.2) \times 10^{-2}$	[13, 14, 15, 16, 17]
^{232}Th	$(0.1—7.8) \times 10^{-4}$	[6, 7, 18]
^{228}Ra	$(0.1—10) \times 10^{-2}$	[19]
^{228}Th	$(0.2—3.1) \times 10^{-3}$	[6, 7]
^{235}U	5×10^{-2}	—

作用, 在大气层中产生了氚和碳-14。海水中氚的浓度是变化不定的, 其原因是氚水随降雨而不均匀沉降和氚的半衰期较短 (12.3年, 这与海洋混合过程所需的时间相当)。碳-14的半衰期要长得多 (5760年), 因此, 按其比放射性^①来说, 碳同位素在整个生物圈中是均匀分布的。钾-40, 铷-87, 铀-235, 铀-238和钍-232是寿命很长的核素, 它们是地球原生核的综合物中剩留下来的, 其中最后三个核素是放射性衰变系的母体核素。至今, 对长寿命子体核素在海水中的

①本书中“比放射性”(specific activity)一词, 除1.3; 1.2节内系指单位质量组织内所含 γ 放射性强度外, 其余各处均指单位质量的某一元素内所含某种放射性同位素的强度, 单位为【居里/克·元素】——译者注。

浓度几乎都进行过测量。表1中所列的数值明显地偏离放射性平衡，其原因是衰变系中各个元素所经历的地球化学及地球物理过程不同。 ^{40}K 和 ^{87}Rb 的浓度是根据Goldberg等关于海水中稳定性元素含量的数据^[22]及同位素丰度数据^[23]计算得到的。同样，假设海水中铀同位素丰度与陆地上岩石中的丰度一样，根据海水中 ^{238}U 的含量，就可算出海水中的 ^{235}U 的浓度。

对近海水域中钍的浓度曾作过几次测量，其数值约为表1所列值的10倍^[8, 18, 24]。

1.1.2. 海底

有关海底天然放射性水平的数据很少，主要参考地球化学及深海沉积物研究中得到的铀、钍浓度确定。沉积物中铀、钍的浓度与其中碳酸钙的含量有关，浓度范围一般为：铀0.4—3 ppm (0.13—1.0微微居里/克)，钍0.4—18 ppm (0.04—2.0微微居里/克)，铀、钍的最低含量往往与碳酸钙最高含量联系在一起^[25]。此外，还发现铀-238衰变系的长寿命核素之间不同程度地偏离平衡。沉积物矿物相中 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的放射性比为0.94^[26]，而碳酸盐成分中此比例与海水中的一样，为1.13^[5]，因此，沉积物中 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的放射性比与其中碳酸盐的含量有关。海水中溶解状态的 ^{234}U 所产生的 ^{230}Th 沉淀到海底，造成沉积物中 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 的放射性比明显地超过平衡，并测量比值大于94^[27]。沉积物中 ^{226}Ra 的含量水平相对于 ^{238}U 来说也是超过平衡的，但 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ 的放射性比却小于1，这是由于海水的浸沥造成了镭的损失。Ku研究了四个深海泥芯样品^[27]，结果表明，沉积物表层中镭的平均不足量为40%。据报道，镭-226的含量为1—

表2 海滨砂子、普通岩石及深海沉积物中铀、钍、钾的典型浓度 [26, 30, 31]

材 料	U, ppm	²³⁸ U, ① 微微居里/克	²³⁵ U, ① 微微居里/克	Th, ppm	²³² Th, ① 微微居里/克	K, %	⁴⁰ K. 微微居里/克
海 滨 砂 子	3.0	1.0	0.05	6.4	0.69	0.33	2.7
花 岗 岩	5.0	1.7	0.08	18	2.0	3.8	32
页 岩	3.7	1.2	0.06	12	1.3	1.7	14
石 灰 岩	1.3	0.43	0.02	1.1	0.12	0.2	1.7
砂 岩	0.45	0.15	0.01	1.7	0.18	0.6	5.0
玄 武 岩	0.50	0.17	0.01	2.0	0.22	0.5	4.2
深海沉积物	0.4—3.0	0.13—1.0	0.01—0.05	0.4—18	0.04—2.0	NDA②	NDA②

① 放射性含量计算中，假设最初测到的只是长寿的铀、钍同位素。

② 此表和表3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15和16中，NDA表示没有数据可用，而表18, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30和31中，NDA表示没有数据可以用来计算剂量率，但这些同位素导致的剂量率并不是零。

46微微居里/克^[27-29]。钍衰变系中子体核素的半衰期较短，可以认为它们是处于放射性平衡的。

在近海水域中，可以假设沉积物矿物成分中铀和钍的含量与陆地上岩石的相同，其典型数据见表2^[30, 31]。至于沉积物中钾的含量，虽然某些沉积物由于含大量的长石或云母（含钾量10—15%），或大量的粘土（含钾量相当丰富），但总的说来，近海水域沉积物中的钾含量亦与陆地上岩石的相同^[32]。

1.1.3. 海洋生物

已测定了许多生物体内天然放射性核素的浓度，但是还没有一套对某单一品种适用的完整的数据，即使对某一种类生物适用的数据也没有。然而，可以对几类生物概括地提供一些有用的数据。表3所列为浮游植物、浮游动物、软体动物类、甲壳类及鱼类体内天然放射性核素的浓度。

氟、碳-14和钾-40的浓度是根据 Vinogradov^[33]提供的生物体内稳定性元素成分及其在水中的比放射性计算得到的，这里有一个假设，即在水与生物之间不存在同位素的组分变化。甲壳类动物体内铷-87的含量是根据表1所列水中铷-87的浓度及 Lowman 等人^[34]提供的富集系数计算得到的。鱼类体内的²³⁴U，鱼类、浮游植物和浮游动物体内的²³⁵U是根据它们体内²³⁸U的浓度计算得到的，这里亦有一个假设，即生物体内的同位素丰度与海水的一样。

1.1.4. 淡水

湖泊和河流中大多数天然放射性核素的浓度取决于与水接触的岩石和矿物的沉积，在不同的程度上反映了该流域的地质情况，数据见表4。其中²³⁴U的数值是根据²³⁸U的数值计

表3 海洋生物中天然放射性核素的典型浓度〔单位：微微居里/克（湿重）〕

（第一部分）

核素	浮游植物	参考文献	浮游动物	参考文献	软体动物类	参考文献
^3H	$(0.5-2.7) \times 10^{-3}$	—	$(0.5-2.7) \times 10^{-3}$	—	$(0.5-2.7) \times 10^{-3}$	—
^{14}C	0.3	—	0.3	—	0.5	—
^{40}K	2.5	—	2.5	—	2.9	—
^{87}Rb	NDA	—	NDA	—	5×10^{-2}	[38]
^{238}U	$(4-5) \times 10^{-2}$	[5]	$(1-2) \times 10^{-2}$	[5]	NDA	—
^{234}U	$(4-5) \times 10^{-2}$	[5]	$(1-2) \times 10^{-2}$	[5]	NDA	—
^{226}Ra	2×10^{-2}	[9]	2×10^{-2}	[9]	NDA	—
^{210}Pb	$(1-7) \times 10^{-1}$	[14]	$(1.0-25) \times 10^{-2}$	[14, 15, 37]	$(5-10) \times 10^{-3}$	[13]
^{210}Po	$(4-17) \times 10^{-1}$	[14, 35]	$(5-110) \times 10^{-2}$	[14, 15, 35, 37]	$(4-11) \times 10^{-1}$	[13]
^{232}Th	NDA	—	NDA	—	NDA	—
^{238}Th	$(7-54) \times 10^{-3}$	[36]	$(2-22) \times 10^{-3}$	[36]	NDA	—
^{235}U	2×10^{-3}	—	6×10^{-4}	—	NDA	—

续表3

(第二部分)

核素	甲	壳	类	参考文献	鱼	类	参考文献
^3H		$(0.5-2.7) \times 10^{-3}$		—		$(0.5-2.7) \times 10^{-3}$	—
^{14}C		0.6		—		0.4	—
^{40}K		2.5		—		2.5	—
^{87}Rb		4×10^{-3}		—		2.5×10^{-2}	[40]
^{233}U		NDA		—		$(0.07-30) \times 10^{-3}$	[41, 42]
^{234}U		NDA		—		$(0.08-35) \times 10^{-3}$	[41, 42]
^{226}Ra		NDA		—	软组织	$(2-51) \times 10^{-4}$	[37]
^{210}Pb		$(1-7) \times 10^{-2}$		[13, 15]	肌肉	$(2-23) \times 10^{-4}$	[13, 15, 37]
					胃	$(17-850) \times 10^{-3}$	[15]
					肝	$(11-24) \times 10^{-3}$	[13, 15]
					肾	$(9-130) \times 10^{-3}$	[13, 15]
^{210}Po	动物尸体(4-16) $\times 10^{-1}$ 龙虾肝胰腺12			[13, 15] [39]	肌肉	$(4-1400) \times 10^{-4}$	[13, 15, 17, 37]
					胃	$(2-26) \times 10^{-1}$	[15]
					肝	$(2-9) \times 10^{-1}$	[13, 15, 39]
					肾	$(2-22) \times 10^{-2}$	[13, 15]
^{232}Th		NDA		—	NDA	NDA	—
^{228}Th		NDA		—	NDA	NDA	—
^{235}U		NDA		—	$(0.003-1.4) \times 10^{-3}$		—