

医学参考报

放射医学与防护专刊

Radiological Medicine and Protection

第五期 NO.05

执行主编简介



拓飞 研究员

博士，博士研究生导师，在中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所工作，任辐射检测与评价研究室主任。主要从事 γ 能谱分析、食品和环

境放射性监测等应用研究。现任食品安全国家标准审评委员会放射性物质专业委员会委员、中央军委装备发展部军控核査技术专业组成员、*Radiation Medicine and Protection* 编委等。以第一作者或通讯作者身份发表研究论文40余篇，获国家发明专利8项，起草颁布国家标准3项。

作为主要完成人，获中华预防医学会科学技术奖二等奖（第五完成人）等奖项；被亚洲辐射研究协会（AARR）授予“辐射研究贡献青年科学家奖”；被评为“第八批中央和国家机关、中央企业优秀援疆干部人才”，记功1次。

导读

食物和环境氡数据库的建立与分布数据分析软件的实现

2版

氡的来源与环境转移

4版

核能发展的现状与未来

5版

氡内照射剂量估算方法的讨论

7版

《氡的健康效应、剂量测定和辐射防护》简介

8版

俄歇电子和 β 发射体放射性核素相关辐射照射风险的评估与管理

表1 不同化学形式氡通过实验给药后在亚细胞分布的示例

化学形式	实验类型	动物物种或细胞类型	器官或组织	主要细胞定位	参考文献
[³ H]-苯乙炔-7,8-氧化物	体外	大白鼠	肝	胞质溶胶 (60%~90%) 细胞核 (15%)	Pacifici et al., 1984
[³ H] (p)-辛酮	体外	胚胎细胞	肌肉 生殖系统	性分化前的细胞核 (兔D21, 大鼠D18) 性分化后的细胞质	Ivanova, 1982
[³ H]金诺芬	体外	巨噬细胞		细胞核 胞质溶胶 细胞膜	Snyder et al., 1986
[³ H]多酚	体内	大白鼠	脑	细胞核	Jankowski and Strosznajder, 1992
[³ H]-地塞米松	体内	大白鼠	睾丸	细胞核 (7%) 细胞质 (9%) 粗面内质网 (53%) 线粒体 (31%)	Stalker et al., 1991
1-[³ H]甲基- β -吡啶	体内	大白鼠, 猴子	脑	线粒体	May et al., 1991
[³ H]庆大霉素	体内	大白鼠	肾	胞质溶胶 微粒体	Nassberger et al., 1990
[³ H]棉酚	体内	大白鼠	睾丸 心肌	细胞膜 微粒体 线粒体	Deng et al., 1989
[³ H]-DNA-胭脂红霉素	体内	小白鼠	肝	细胞核 (DNA)	Vainberg lu et al., 1985
[³ H]核糖体蛋白S6	体内	爪蟾	卵母细胞	细胞核 (100%)	Darmer et al., 1984
[³ H]核糖体蛋白EL12	体内			细胞质 (100%)	
[³ H]-TDR 氟化水	体内	大白鼠	卵巢	细胞核 (DNA) 同源细胞	Schreml and Flidner, 1978

立加权规则。

电子剂量学和毒理学领域的这些知识空白通常会导致俄歇和 β 发射放射性核素的摄入相关风险评估具有不确定性。然而随着这些放射性核素在医疗或工业方面的应用，为了更好地控制照射和相关风险，有必要增加这方面的知识。

本报告总结和介绍了暴露发射俄歇和 β 电子放射性核素的风险评估和管理方面的相关知识和不足。虽然本报告仅讨论了氡的问题，但并非排他性的，因为该元素的剂量学和毒理学特征为大量放射性核素所共有，其目的是向所有俄歇和 β 放射性核素展开讨论，其中氡只是其中一种核素。本报告先后介绍了放射性核素暴露情况下风险评估和管理的一般系统、主要俄歇和 β 放射性核素的剂量学和毒理学知识、某些放射性核素的放射防护系统的应用局限、其他风险管理方法，以及在这些领域的知识空白和有待的深入研究。

一、俄歇和 β 发射器的细胞定位

目前，很少有关于俄歇和 β 发射体细胞定位的数据。大部分信息是涉及医学中使用

的放射性核素（铊-99m、碘-123、碘-125、钨-111等）和工业来源的一些放射性核素，它们可能遵循其稳定同位素的组织分布，例如铊-65或铁-55和铁-59。实验研究表明，俄歇和 β 发射体的组织和细胞命运取决于在给药过程中与之相关的载体，以及放射性核素分离后与之结合的生物分子向量对。

本报告并没有对观察到的各种俄歇和 β 放射性核素的亚细胞分布进行详尽的综述。然而，一些例子可以证明相同的放射性核素如何根据其相关的载体，分布在不同的细胞隔室中。

二、氡案例

氡可以根据其结合的化学形式呈现不同的细胞分布。本报告将区分氡气（HT）、氡化水（HTO）、有机分子（OBT）结合氡或与DNA前体结合的氡。

环境中的大多数氡以氡化水的形式存在，氡化水在摄入体内后的组织分布相对均匀。体内氡的这种分布不是静态的。摄入氡化水后，部分氡可以与有机分子的氢原子发生交换。通过结合到这些分子中，氡的行为变得非常依赖于它建立的键的类型。因此，我们区分了

与氧、氮、硫或磷原子结合的“易交换”氡。这种氡与体内水的氢原子进行交换，因此其代谢遵循氡化水的代谢。氡还可以取代C-H键的氢并形成稳定的键。在这种情况下，氡被称为是“不可交换的”，并跟随宿主有机分子的新陈代谢。正是这种形式主要负责氡在组织中的不均匀分布。

ICRP认为，当氡以氡化水的形式掺入时，97%仍以这种形式存在，而3%则掺入有机物中。当氡以与蛋白质、脂质或碳水化合物结合为有机形式（OBT）通过食物掺入时，ICRP认为一半以氡化水的形式分解代谢，另一半保持有机形式。

除了环境或食物链中遇到的这些形式的氡外，在实验室中主要用于生物学研究。氡可以以多种化学形式使用，与待确定体内行为的分子、氨基酸或DNA前体结合。氡的细胞命运则密切依赖于与其载体形成的复合物的稳定性，以及该载体的自然代谢（表1）。

（中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心 重点实验室 杨宝路 拓飞 秦伟豪 编译）

食物和环境氚数据库的建立与分布数据分析软件的实现

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 李文红

专家介绍



李文红 副研究员

1991年6月毕业于吉林大学环境科学系环境化学专业,并取得理学学士学位。现在就职于中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所,辐射检测与评价研究室,专业方向为辐射检测与评价。2008年取得副高级职称,现职称为副研究员。近年参加的科研项目主要有:科技基础性工作专项,公共卫生领域重要标准物质与应用规范研究。参加国家科技支撑计划课题,灾害应急救援系列装备研制—核事故健康风险评估与卫生应急处置技术研究。参加原卫生部政法司卫生标准制修订项目,核事故应急情况下公众受照剂量估算的模式和参数。公益性行业科研专项,辐射危害控制与核辐射卫生应急处置关键技术研究及其应用。第一作者完成学术论文6篇,SCI文章1篇。参与授权发明专利7项。

一、食物和环境氚数据库的建立

20世纪90年代初期,在我国25个省、自治区和香港特

区等较大范围内开展了一次较为系统的食物和环境氚水平监测及其所致居民剂量研究。本次研究获得的数据可作为我国氚环境的背景值。因此,创建中国食物和环境氚数据库,会对今后深入开展环境和食物中氚的监测及其生物效应的研究起到参考、借鉴的重要作用。

1. 数据库的总体设计

考虑到数据库的实用,未来的使用者范围比较广,因此,除了满足一般数据库的条件外,在总体设计上主要考虑了以下一些因素:①数据库的工具软件应当被具备计算机初级知识的人员所掌握和调用操作。②数据库对运行环境(包括计算机硬件和操作系统)的要求不能太苛刻,一般实验室的设备条件均可满足。③尽量采用通用的数据库管理软件,并能使今后需要时方便进行软件的升级和数据更新、扩展和补充。④数据库的菜单内容应当简洁、清楚和准确,便于理解和操作,并兼具界面清新美观等。由于此次仅收录1684个环境和食物样品的测量数据和居民剂量的估算数据,数据量小,并鉴于Access安装简单,对操作系统没有苛刻要求,因此,我们选择Access软件作为数据库的基本管理软件,如果将来数据量增加,要求数据库的运行速度更快时,只需对现行的数据库软件稍做修改,就可以从Access数据库升级到Sql Server数据库。本数据库是将已有的以Excel数据表形式保存的监测研究数据转化为Access氚数据库TRITIUM,以便于人们查阅参考,因此,数据库的结构

比较简单,主要结构逻辑框图见图1。

原始数据表中记载的有:样品类别、采样地、采样地点、采样年、样品名称、采样月份、分析年、分析月、采样浓度、采样标准差、纬度、经度、预处理方法、样品重量、电解前、电解后、回收率、浓缩比、容器体积、水样体积、仪器本底、仪器效率、样品时间、本底时间、测量浓度、测量标准差,仪器型号及生产厂家等,可以说信息齐全,且数据量大。我们将原EXCEL数据文件如实读入本数据库,用Access作为工具创建氚数据库TRITIUM。使用Access的设计器创建了样品表、采集地表和分析仪器表,表与表之间通过关键字相连数据库数据结构(图2)。其中样品表包括样品编码、采样地点、仪器等24个字段,采集地表包括采集地点唯一标识、采集地点名称等字段,而分析仪器表分为仪器唯一标识、仪器名称、生产厂家等字段。原始数据中采集地分别存储在采集地区、采集地点、纬度、经度4列中,新建的样品表中只存储采集地索引,此4项存在采集地点表中。原始数据中分析仪器分

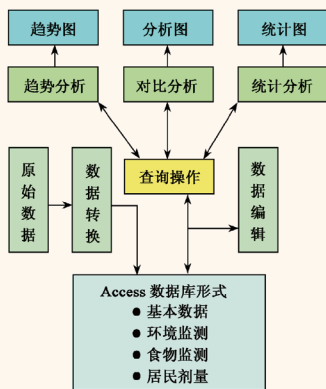


图1 氚分布数据库分析软件逻辑框图

别存储在仪器型号和厂家两列中,新建样品表同样只存储仪器索引,这两项存在仪器表中。原始数据是分采样年和采样月两列描述采样时间,新建数据库合并为采样时间。同样地,分析时间也是由分析年和分析月合并而成的。采样地是根据原始数据中采样地区、采样地点合并相同项转换得到的,同样地,分析仪器表是合并原始数据中分析仪器列而成的。本数据库软件设置了数据转换程序,能自动把原始EXCEL数据文件转换到数据库中,使用时只需要指明原始数据文件的位置,点击开始转换按钮后就完成了转换过程。

2. 数据库内容说明

本数据库已经收录1991—1998年完成的《中国食物数据库数据结构和环境氚水平及其所致居民剂量研究》取得的主要结果,可分为环境水中的氚含量、食物中的氚含量、居民剂量估算、质量保证测量等几个方面的内容。本数据库是截至目前国内第1个有关食物和环境氚水平及其所致居民剂量的数据库,将具有促进信息交流、实现资源共享的重要意义。

3. 分析软件说明

软件采用Visual C++.NET编写,是公认的效率最高、适合科学计算与分析的软件编程语言;浏览与分析数据的界面使用Xtreme代码库,该库采用先进的自动伸缩的抽屉式托盘界面,最大限度让界面清晰、灵活友好、易于操作;程序框架采用MFC中文档视结构,该架构把数据与数据观察分离开来,带来的好处就是能允许对同一数据从不同的角度进行观

察。分析工具采用自由选择数据,通过对比分析,提供了趋势分析、统计分析、全国分布分析等功能,图形可以选择拟合或折线方式,提供给使用人员直观的图形分析结果。

4. 小结

①本数据库是以已有的Excel数据文件为基础,通过程序的自动转换而创建的Access数据库,因此,数据的可靠性与原数据一致。②本数据库共收录了8类(蒸汽水、降水、江河湖泊、水库、自来水、地下水和海水等)水体的1547个样品和12类食物(绿色蔬菜、水果、水产品、禽肉、乳品、粮食、饮料和蛋类)的137个样品中有关氚监测和估算的居民所受剂量的数据,对开展氚地监测和环境水平变化等研究具有参考意义。③数据分析工具采用Visual C++.NET编写,结合使用Xtreme代码库和MFC文档视结构,界面灵活、直观,使用便捷。

二、食物和环境氚分布数据分析软件的实现

随着核能开发技术的发展,氚对人类的健康影响必将引起人们的更大重视和更多关注,对于氚的监测与相关研究将继续深入,新的成果将不断出现。计算机技术的发展,其强大的储存、快速运算和逻辑判断功能,可大大满足人们处理大量数值和非数值信息资料的需要。随着国家经济的发展,计算机作为办公设备得到了极大的普及,使得信息交流和资料共享成为可能。因此,我们研究开发了中国食物和环境氚水平数据分析软件。

下转第3版

医学参考报

放射医学与防护专刊

理事长兼总编辑:巴德年
副理事长兼副总编辑:曹雪涛等
理事会秘书长:周赞
社长:魏海明
副社长:吕春雷
副社长:周赞
社址:北京市西城区红莲南路30号红莲大厦B0403
邮编:100055
总机:010-63265066
网址:www.yxckb.com

主编:刘强
名誉主编:柴之芳
副主编:刘玉龙 刘青杰 刘晓冬 邵春林 周光明 梁莉
常务编委:王治东 左雅慧 冉新泽 邢志伟 吕玉民 朱建国
刘澜涛 李蓉 李爽 李君利 何淑雅 张玉松
张照辉 拓飞 金顺子 周美娟 骆志平 徐畅
曹宝山 崔凤梅
编委:王进 王优优 王佳楠 王春燕 王津哈 王墨培
卞华慧 尹再哲 申延男 朱久法 朱卫国 伍丽君
刘丽波 李丽 李洁清 杨文峰 杨苍珍 肖宇
肖莉 吴启庆 余长林 余祖胤 汪传高 张冰洁
张晓强 张惠生 陈大伟 周艳 赵骅 赵风玲
施晓松 姚波 顾叶青 党旭红 徐孝华 高林峰
郭姗姗 谢萍 蒲汪旸 魏伟奇

企业编委:石长旭 刘继国 李科 周杰 郑劲林 缪应江
名誉专家委员:周湘艳 白光 施仲齐 王文学
专家委员会主任委员:马力文
专家委员会副主任委员:刘芬菊 杨志祥 姜恩海 郭国栋
专家委员会委员:丁振华 吕慧敏 杨业鹏 陈英 尚兵 龚守良
栗永萍 董建
编辑部主任:杜利清
编辑部副主任:王彦
编辑:何宁宁 宋会娟 张曼曼 顾叶青
学术发展部主任:刘玉龙
学术发展部成员:王津哈 纪凯华

◀ 上接第2版

1. 开发氚分布数据分析工具的目的

1991年,即我国开始进行大规模核电站建设前,在25个省、自治区和香港特区的广大范围内开展了一次较为系统的食物和环境氚水平监测及其所致居民剂量调查。共采集了8类水体和12类食物的1684个样品,经氚含量测量和剂量估算,获得了极其重要的调查结果。随着核电站陆续投入运行,特别是聚变反应堆的建设,环境氚水平将明显变化,那么,1991年的调查实际就是我国的氚环境背景值研究结果。随着时间的延伸,必将显示出它背景值的重要性和宝贵性。因此,有必要把这次调查结果以数据库形式整理出来加以保存、交流,并通过开发氚分布数据分析工具来提高数据使用的效率,有利于直观地掌握氚环境背景值的变化情况,保护公众健康,促进核能事业的发展。并通过不断地收录新成果,使数据库的内容更充分和完善,真正发挥信息积累、交流和促进氚相对生物效应研究。

2. 软件总体设计

2.1 数据库要求

根据建立氚数据库设计的目的,我们认为,本数据库应当满足以下主要条件:①本数据库不但具有非常明确的目的和特殊用途,而且需要经常查询运行,为方便使用,它与现行的视窗操作系统、字处理软件和程序编写语言等具有很好的兼容性。②本数据库对运行环境和硬件的要求十分宽松,可在普通的办公室条件下和市场流行的台式或便携式计算机上安装使用。③数据库能够把现有的以EXCEL数据表形式保存的监测数据自动转化成适合Access数据库文件,减少重新录入数据的差错。④数据库要预留添加新数据的功能,并且要保证与已经录入的数据(现有数据是EXCEL数据表形式)兼容,能够进行检索查询和互相对比。⑤数据库管理要具有数据修改的权限限制功能,以实现既要能对数据进行适时更新,又要保证数据的准确和统一。⑥数据库的工具软件应当具备计算机初级知识的人员所掌握和调用操作。⑦尽量采用通用的数据库管理软件,并在今后需要时可以方便地进行数据库软件的升级和数据更新、扩展和补充。⑧数据库的菜单内容应当简洁、清楚和准确,便于理解和操作,

并兼具界面清新美观等。由于现在收录的只有1684个环境和食物样品的测量数据,及其估算的居民剂量数据,相比之下,数据量很小,并考虑到未来数据库升级的可能和Access安装简单,对操作系统没有苛刻要求等,因此,我们选择Access软件作为数据库的基本管理软件。

2.2 软件要求

在选择实现数据分析软件时,主要考虑以下一些因素。①软件应能进行图形、图像处理,输出直观的图形、图像分析结果。②软件应能灵活选择数据,进行氚分布分析。③软件应能在PC机上运行,并与普遍使用的Windows系列操作系统很好兼容和适应各种性能不高的计算机使用。因此,软件采用Visual C++.NET编写,它是公认的效率最高、适合科学计算与分析的软件编程语言。

2.3 软件结构

软件主要由数据装载工具、数据维护工具与数据分析软件三部分构成,其中数据装

载工具和数据维护工具是开发人员使用的数据库数据管理辅助工具,由软件开发者与数据库管理者使用。数据装载工具包括数据审核与校验、数据转换,主要解决原始数据转换成数据库数据问题;数据维护部分包括:身份认证、数据审核、数据校验、数据添加、数据修改,主要解决数据库数据的扩充与校验,提高数据库氚水平数据的权威性;数据分析工具包括:数据查询、数据过滤、分析和图形显示等部分,主要提供直观的比对结果和趋势图。为便于数据的检索查询,数据的转换与编辑采用到ADO数据操作对象直接访问和修改数据库中的数据,数据分析均在数据查询操作的基础上进行,这样就能依据用户选择的过滤规则灵活地进行数据对比、统计和趋势分析,软件结构图见图2。

2.4 原始数据项目及其格式

原始数据表中记载的有:样品类别,采样地,采样地点,样品名称,采样年,采样月,

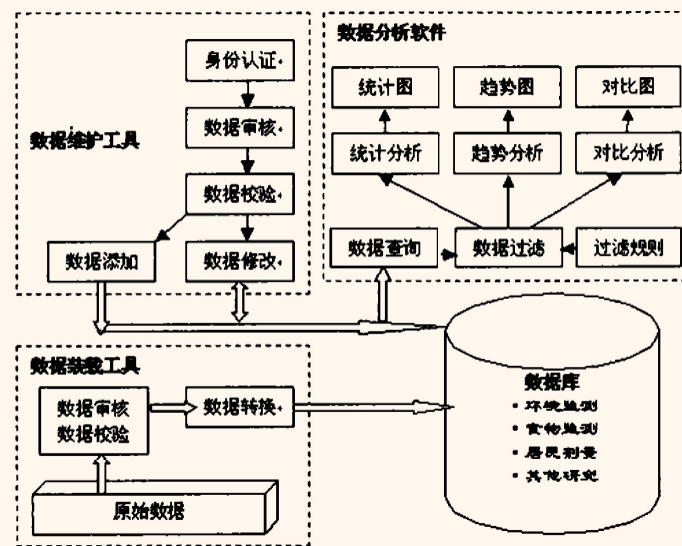


图2 软件结构图

序号	采样地点	纬度	经度	样品编号	样品类别	采样时间	分析时间	样品名称
1	北京朝阳	39.45	116.25	103	自来水	9108	9107	自来水
2	北京朝阳	39.45	116.25	104	自来水	9204	9207	自来水
3	北京朝阳	39.45	116.25	105	自来水	9205	9203	自来水
4	北京朝阳	39.45	116.25	106	自来水	9209	9203	自来水
5	北京朝阳	39.45	116.25	107	自来水	9212	9203	自来水
6	北京朝阳	39.45	116.25	108	自来水	9303	9203	自来水
7	北京朝阳	40.4	116.6	109	自来水	9306	9203	自来水
8	北京朝阳	40.4	116.6	110	自来水	9310	9203	自来水
9	北京朝阳	39.45	116.25	111	自来水	9307	9202	自来水
10	北京朝阳	40.6	117	112	自来水	9204	9207	自来水
11				113	自来水	9206	9203	自来水
12				114	自来水	9208	9203	自来水
13				115	自来水	9212	9203	自来水
14				116	自来水	9303	9203	自来水
15				117	自来水	9306	9203	自来水
16				118	自来水	9310	9203	自来水
17				119	自来水	9109	9202	自来水
18				120	自来水	9204	9207	自来水
19				121	自来水	9206	9203	自来水
20				122	自来水	9208	9203	自来水
21				123	自来水	9303	9203	自来水
22				124	自来水	9306	9203	自来水
23				125	自来水	9310	9203	自来水
24				126	自来水	9107	9202	自来水
25				127	自来水	9204	9207	自来水
26				128	自来水	9206	9203	自来水
27				129	自来水	9208	9203	自来水
28				130	自来水	9303	9203	自来水
29				131	自来水	9306	9203	自来水
30				132	自来水	9310	9203	自来水

图3 数据转换及其结果

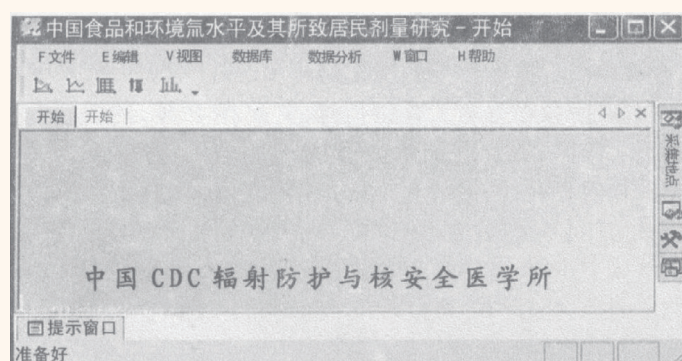


图4 进入方式

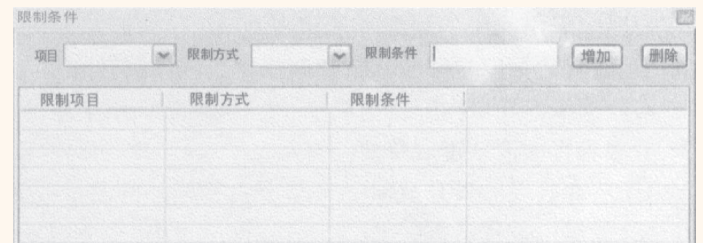


图5 附加限制条件界面

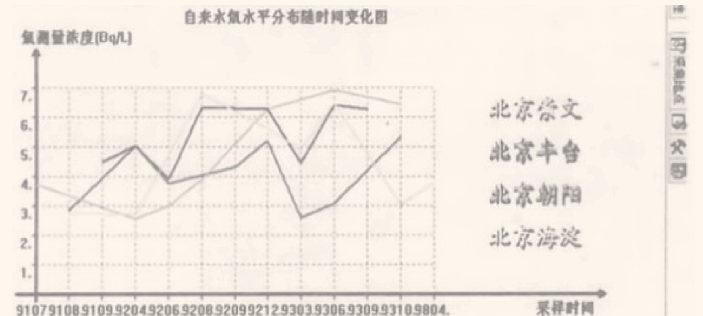


图6 趋势分析

采样浓度,采样标准差,经纬度,预处理方法等20多项数据项目,可以说,信息齐全,且数据量大。为了减少重新录入数据的工作量和避免可能的打字错误,我们将原EXCEL数据文件如实读入本数据库,作为创建Access数据库的数据准备工作。图3是由原始EXCEL数据格式(原始数据界面略)转换后的数据库数据格式。

简单地讲,由于数据库中已经嵌入了原EXCEL数据文件,因此,当数据库启动后只要在“原始数据”栏选定要访问的数据文件,点击“装载”,再点击“转换”,数据就自动地由EXCEL数据文件转换成Access数据库文件,可供访问者查询的Access数据库就创建起来。而新数据的增加、现有数据的维护或者数据库的升级,均由软件开发者执行。

2.5 控制软件(主界面)

为方便用户的访问,软件以托盘架方式列出了与数据查询有关的采样地点列表、氚样品测量浓度列表、测量分析仪器列表三个主要选项,数据分析工具在主菜单中列出了数据库和数据分析的主要功能,以帮助和引导访问者实施数据查询、统计分析等操作(主界面图略)。图4为进入方式。

3. 分析软件说明

软件采用Visual C++.NET编写;浏览与分析数据的界面使用Xtreme代码库,该库采用先进的自动伸缩的抽屉式托盘架方式,最大限度让界面清晰、灵活友好、易于操作;程序框架采用MFC中文档视结构,该架构把数据与数据观察分离开来,带来的好处就是能允许对同一数据从不同的角度进行观察。分析工具采用自由选择数据,通过对比分析,提供了趋势分析。分析工具采用自由选

择数据,通过对比分析,提供了趋势分析、统计分析、全国分布分析等功能。如图5所示,附加限制条件,选择北京朝阳、崇文、丰台和海淀四城区的自来水氚测量浓度的数据,分析工具自动获取数据,依据1991年7月到1998年4月间四个地区的自来水氚测量数据绘制趋势图见图6,图形可以选择拟合或折线方式,图中用不同颜色的线表示不同的采集地,并按折线方式提供给使用人员分析的趋势图形。软件的全国氚分布分析图中进行氚浓度到颜色亮度之间变换,形成颜色色差分布图模拟氚水平分布图。依据球面正弦公式和球面余弦公式进行经纬度到直角坐标之间的坐标变换(忽略高度坐标)。

4. 小结

①本软件的数据库通过程序的自动转换,把已有的EXCEL数据创建为Access数据库文件,因此,数据的可靠性与原数据一致。②本软件的数据库目前共收录了8类水体的1547个样品和12类食物的137个样品中有关氚监测和估算的居民所受剂量的数据,具有氚的环境背景值参考意义。③本软件的数据分析工具采用Visual C++.NET编写,结合使用Xtreme代码库和MFC文档视结构,界面灵活、直观、便捷。④软件实现了数据校验、数据添加功能,为今后继续收录新的监测与研究数据和资料,并进行对比分析提供了可能,将使数据库的内容得到扩展、补充和更新,实用性会更强。⑤本数据库仅仅提供了有关氚监测与生物效应研究资料交流的平台,欢迎从事类似工作的同行向本数据库投送和推荐有关监测、研究的资料,使其不断充实,以达到信息交流和资料共享的作用。

氚的来源与环境转移

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室 李文红 周强

一、氚的来源

1. 天然氚的来源

大气层宇生这部分氚大部分在大气平流层形成，在地球表面和岩石圈中很少。宇宙射线与大气中化学元素氮、氧、氟原子核发生反应产生天然放射性氚，以及自然界岩石圈中锂元素与中子的反应，重氢(n, γ)反应，核裂变反应(伴有氚生成的称为三裂变)，硼与中子的反应。全球氚储量稳定，自然过程产生的氚在50~70 PBq之间。美国辐射防护和测量委员会估计在太阳活动稳定情况下的天然氚产生率为0.16~0.20原子 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均为0.19原子 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ；太阳耀斑活动激烈期间天然氚产生率增加到0.4原子 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ；据UNSCEAR估计，全球天然氚年产量为72 PBq $\cdot \text{a}^{-1}$ ，储量为1.3 EBq(这里P和E是十进位数的SI词头， $P=10^{15}$ ， $E=10^{18}$)，其中99%被转化为氚化水(THO)，并参与正常水循环。天然氚构成了环境氚的“稳定”本底，1954年热核爆炸之前测量的降水天然氚浓度0.6~2.4 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ ，海洋表层水和陆地表层水中的天然氚浓度分别为0.1 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ 和0.2~0.9 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ ，平均0.4 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ 。

天然氚是由宇宙射线在同温层诱发的核反应产物。海洋表层水天然氚浓度背景值范围为0.02~0.10 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ ，陆地表层水天然氚浓度背景值范围0.2~0.9 Bq $\cdot \text{L}^{-1}$ 。

2. 人工氚的来源

2.1 核武器试验

环境中人工氚主要来源于大气层核试验。裂变和聚变核爆炸装置都产生氚。核爆炸和热核爆炸产生的氚取决于裂变和聚变能产的光谱、炸药的类型和爆炸地点的特征。根据Miskel(1971)估计裂变氚产额为700 Ci $\cdot \text{MT}^{-1}$ 。通过各种(n, t)反应可提高这个产量。Terpilak等人(1971)引用了裂变爆炸的0.02 Ci $\cdot \text{MT}^{-1}$ 的氚产额。

热核武器的氚产量比裂变武器的氚产量大得多。Leipunskii(1957)估计，纯“氢弹”释放的氚约为6.7 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 。Eriksson(1965)指出，对于5.5 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 的总产量，直接产量为4 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ ，间接产量为1.5 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 。Miskel(1964)认为，设计、性能和位置的变化可能导致氚产量在(7

~50) MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 之间变动，并认为(Miskel, 1971)使用平均值为20 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 。

Begemann和Libby(1957)估计，在1954年的22 MT的Castle试验后，北半球的沉积量约为250 MCi，这一值表明11 MCi $\cdot \text{MT}^{-1}$ 的产量。

所有国家在大气中进行的核武器试验的裂变和总能量产额概述在联邦辐射委员会第4号报告(FRC, 1963年)中。Begemann-Libby当量表明，1963年核聚变爆炸产生的氚存量约为3100 MCi(Grathwohl, 1972)。来自裂变爆炸的额外输入估计约为300 MCi。其他人估计给出的1963年全球氚库存数在1700 MCi(Eriksson, 1965)到8000 MCi之间(Miskel, 1971; Schell和Sauzay, 1973)。

自1963年《禁止核试验条约》签署以来，主要核大国进行了大规模的地下热核装置试验。这并没有大大增加大气和地表水中的氚存量，但地下试验场存在规模不确定的氚存量。

由于1945年开始的大气层核试验造成了环境氚水平的提高。特别是1953年开始的氢弹试验使大量的人工氚释放到环境中。原子弹无论是用铀-235还是用钚-239，都是使之达到临界状态然后爆炸，此时由于核的三分裂产生氚。氢弹或称之为热核武器的核爆炸，是利用铀-235或钚-239的裂变能量进行氚和重氢的聚变，以提高爆炸的威力。在氢弹中锂生成的氚和被填充的氚中未反应的部分将被释放到环境中。氚释放量最大的是在20世纪60年代前半期，一直持续到1963年美苏签订禁止大气层核试验条约。其结果是大气中氚的盘存量增加到240 EBq，为天然氚盘存量的200倍以上。

裂变装置爆炸时的产氚量估计约为7.2 $\cdot 10^{16}$ Bq/MT当量，其中大部分是由中子活化反应产生的。聚变爆炸的产氚量估计为2.5 $\cdot 10^{17}$ ~1.8 $\cdot 10^{19}$ Bq/MT当量。在大气层爆炸时，大部分氚被氧化，最后通过沉降而从大气中除去。进入同温层的氚也逐渐移入对流层，通过沉降，最后出现在海洋和内陆水中。在地下核爆炸时，HT和HTO的比值取决于爆炸环境中铁和水的浓度。HT的上限值一般取为1%。1952~1963年

间的大气核试验，有大约560 kg的氚(即大约2.4 $\cdot 10^5$ Bq)释放。由于氚的半衰期为12.35年，所以到2008年为止核试验还残留约40 kg的氚分散在陆地水、海洋和大气之间。热核爆炸向大气中放出的氚约为1900 MCi。1963年达到高峰。随后由于全球禁止核试验，大气中的人工氚经过雨水冲刷、自然衰变和海洋吸收，到1990年，降水中氚浓度基本恢复至天然水平。

2.2 核设施运行

2.2.1 各种反应堆

核电运行中排放到环境中的氚的数量与天然氚的年产率相当，随着核电站装机数量的增加，其对环境氚贡献的比重将越来越大。因核动力产生而释放到大气层和水圈的氚的数量，主要取决于反应堆的类型和运行情况。

2.2.2 核燃料后处理厂

核燃料后处理厂释放出的氚是在反应堆中产生的，它随燃料组件进入后处理厂。轻水堆卸料时，燃料中的含氚量取决于裂变核素类型、燃料中锂杂质含量、燃料的化学形式、燃料的消耗、辐照时的线性功率水平和包壳材料。后处理时氚的含量还取决于冷却时间。

3. 核事故的释放

核电厂氚泄漏主要是指所有类型的非常规释放，在释放过程中，电厂运行产生的氚以非计划或非受控方式进入环境。电厂氚泄漏的污染介质主要是与含有放射性废液的各类部件直接接触的土壤和地下水环境，而非低放废水排放的地表水接纳水体。氚泄漏的原因主要有：①废液排放管线阀门的失效；②管道泄漏；③水池或储罐泄漏；④操作人员疏忽造成意外释放。

4. 氚的生产与核聚变研究

压水堆(PWRs)核电站 ^{235}U 的三分裂是冷却剂中氚产生的主要方式，它所产生的氚每年的液态流出物为20 TBq，气态流出物为0.3~3 Bq，一座百万千瓦级核电站通过这种方式产生的氚的放射性活度为560~740 TBq，另外由于反应性补偿控制措施，在冷却剂中加入化学添加剂硼酸和为控制水的pH加入的氢氧化锂，使溶于水中的氚在中子照射下产生氚。

美国萨凡纳河有几座重

水反应堆，它以锂铝合金为靶来专门生产氚。该地还设有一座专为处理辐照过的锂-铝合金而回收氚的生产装置。该装置回收的氚主要为HT气体，而核燃料后处理厂得到的主要是HTO。近年来，氚生产装置发生过两次重大释放事故，1974年5月2日事故放出了1.7 $\cdot 10^{16}$ Bq氚气，1975年12月31日的那次放出了6.73 $\cdot 10^{16}$ Bq氚气。

美国能源部于1977年拨款建造一套模拟聚变堆工艺的氚系统试验装置(TS-TA)，研究目的是为核聚变堆的设计与建造提供广泛数据根据设计，可以处理大约100 g氚，而且工作人员进入大厅不必换工作服和鞋帽。1984年6月开始通氚运行，到1986年5月2年时间内共处理了3.7 $\cdot 10^9$ Bq氚。在这期间释放到环境中的氚气总量低于111 GBq，氚化水总量低于74 GBq，个人所受到的剂量当量低于1 mSv。

日本原子能研究所从1976年开始从事聚变氚工艺研究工作。日本政府批准从1983年开始建造克量级氚处理实验室，1986年投入使用。以LiAl合金作靶材料经过裂变堆照射后提取氚，一次可以生产3.7 $\cdot 10^{12}$ Bq。

1983年安大略水电公司在皮克林建造的一座重水除氚装置，可为加拿大聚变堆研究提供廉价的氚。该装置可满足8个堆的除氚要求，计划在1987年初可提取4 kg的氚，到1992年达到平衡时每年可

提取氚0.8 kg。另外在可可河核实验室建造了一座先进的示范重水除氚装置。可可河核实验室正在积极开展氚储存、输送和氚废物处理研究。可可河核实验室和安大略水电公司联合建造能储存1.85 $\cdot 10^7$ GBq氚的钛海绵储存罐。

5. 氚的商用

美国能源部每年向本国公司和外国公司供应价值几百美元的商业用氚，其中大部分是供应外国公司。在商业方面出售的这些氚是用于生物研究、能源研究、照明、表盘等。

加速器使用氚靶释放的氚，工业中用氚制造发光涂料，生物医学领域氚标记化合物等都有可能对环境造成一定程度的污染。

氚的一个广泛的商业应用是在密封光源上的应用，例如紧急出口和机场跑道灯。氚粒子激发了一种提供光的荧光材料。一些国家使用氚作为热核武器的燃料。20世纪50年代和60年代，当这些武器在大气层中试验时，氚被释放并扩散到世界各地。氚是一些实验性核聚变机器的燃料，以利用核聚变能量，像太阳能一样发电。氚作为一种放射性标记物广泛应用于医学和学术研究。它可以插入化学或生化化合物中，代替非放射性氢，以便追踪它们在化学和生物过程中的行为。

二、氚的环境转移

氚向环境转移途径：见图1。

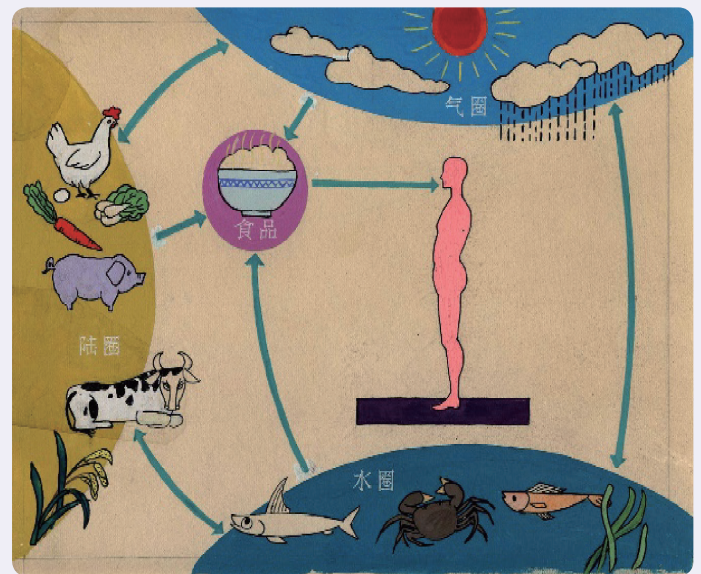


图1 氚向环境转移途径

气圈：大气层核试验产生的氚主要释放到大气同温层→对流层→降雨
水圈：核动力氚→大气层和水圈
陆圈：气圈和水圈中的氚→空气、降雨与陆地和生物圈交换
生物圈：海产品等食物、饮水、呼吸、皮肤等进入有机体

核能发展的现状与未来

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室 孙全富 李文红

核能是21世纪世界经济中最具有决定力的五大技术领域之一，核能是一种高效、清洁的新能源。在新世纪中，许多国家都将核能资源利用作为国家可持续发展战略的重要内容；自发现核裂变能源以来，经过人类的努力，已将核裂变反应堆能源应用于核武器、军用核动力、民用核电站，形形色色研究反应堆，生产用于工业、农业、医学、安保、航天、军事等方面的核素反应堆。随着科技的发展，目前将核裂变反应堆能源转向核聚变氘氚反应堆的开发和应用等。

一、核电发展

1. 世界核电发展

自前苏联奥布宁斯克核电站并网发电，人类进入和平利用核能的时代，揭开核能用于发电的序幕的60多年以来，全球核电发展经历了四个阶段，即：第1阶段的试验起步阶段（1961—1968年）、第2阶段的发展阶段（1969—1988年）、第3阶段的缓慢发展阶段（1989—2000年）和第4阶段的复苏发展阶段（2001年至今）。自1950年以来，建造的第一代核电站属于原型堆核电站，商业化的第二代核电站主要以轻水堆（包括压水堆和沸水堆）和重水堆为主。第三代核电技术以美国西屋公司非能动先进压水堆 AP1000 和欧洲先进压水堆 EPR 为典型代表。目前核能已发展到第四代。

2. 中国核电发展

我国早在20世纪70年代初，就掌握了核能发电技术。1991年，自主设计的30万kW的秦山第一核电站并网发电，实现了商用发电。这些年我国核能发电走过了一段不寻常的发展之路，虽发展起步较晚，但发展速度较快，是在建机组最多、在研在建机型最多的国家。从20世纪70年代至今，我国核电发展大致经历了三个阶段：第1阶段的起步阶段（1970—1993年）、第2阶段的适度发展阶段（1994—2005年）和第3阶段的积极快速发展阶段（2006年至今）。随着我国经济快速发展，能源电力供给日益成为经济、社会发展的瓶颈，核能尤其是核电的重要地位逐渐凸显。2006年3月，国务院常务会议审议通过了《核电中长期发展规划（2005—2020

年）》，明确指出“积极推进核电建设”，确立了核电在我国经济与能源可持续发展中的战略地位。自此，我国核电进入了规模化发展的新阶段。2018年，我国核电机组继续保持安全稳定运行，没有发生1级及以上运行事件，全年核能发电量为2865.01亿千瓦时，比2017年同期上升了15.78%，约占全国累计发电量的4.22%。截至2018年12月底，我国商运核电机组44台，装机容量达到4464.316万千瓦。位于中国东部沿海山东省荣成市的华能石岛湾核电站重新开工建设，这是中国自主研发的世界首座具有第四代核电特征的高温气冷堆核电站。石岛湾核电示范工程一旦取得成功，中国将成为世界上首个拥有高温气冷堆商业核电站的国家。届时，中国将有望从一个核电技术引进大国，变成一个核电技术和设备输出大国。中国在世界核电产业中的地位也将因此而大幅提升。

中国经过40余年的核能发展，从艰难起步到积极快速发展，结出了丰硕的成果，取得了辉煌成就！

3. 核能发展中存在的问题

虽然中国的核能事业发展迅猛，但是目前核能发展中还存在一些问题，如：①资源利用率低。工业应用的是热中子反应堆核电站，虽其发电成本低于煤电，但它以铀-235为燃料，天然铀中占99.3%的铀-238无法利用。②燃烧后的乏燃料中除铀-235及钚-239外，剩余的高放射性废液含大量“少数锕系核素”（MA）及“裂变产物核素”（PP），其中有一些半衰期长达百万年以上，成为危害生物圈的潜在因素，其最终处理技术尚未完全解决。③反应堆是临界系数大于1的无外源自持系统，其安全问题尚需不断监控及改进。④核不扩散要求的约束，即核电站反应堆中生成的钚-239受控制。这4个问题中，以前两者更具实际意义。

4. 世界核聚变运转中，我国将在核聚变部分领域成为“领跑者”

核聚变所产生的巨大能量像太阳一样，因此被形象地叫作“人造太阳”，它也被认为是解决人类未来能源困境的理想能源。实现核聚变虽然尚有难

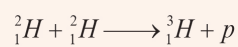
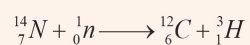
点，但是，我国已成为全球规模最大的核聚变项目——“国际热核聚变实验堆”主机安装工程的施工方之一。我国为“人造太阳”安装“心脏”的全新挑战已正式开启。在核聚变领域已从“追赶者”、“并跑者”，到成为部分领域的“领跑者”。到2025年初，将完成首次等离子体的运营，到2035年实现满功率运行，届时它产出的能量将达到输入能量的10倍以上。中国必须抓住机遇将核聚变的科学技术与科学研究迎头赶上。2021年12月4日14时02分，在中国四川成都实现了新一代“人造太阳”首次等离子体被加热到了1亿度以上的可控核聚变，这将使我国堆芯级等离子体物理研究及相关关键技术达到国际先进水平，成为中国携手世界核聚变能开发的国际合作平台。

二、核聚变的氘-氚反应

1. 氘-氚化学物理特性

随着核能事业的不断发展，核反应堆的建立日益增多，核事故的偶尔发生，氘向环境中的排放量也不断增加，氘对人们的健康影响愈来愈受到人们的关注。氢有3种同位素，即氕、氘、氚。氕（Protium, P）是氢的一种稳定同位素，符号为 ^1H ，质量数1，它的原子由一个质子和一个电子组成，是氢的主要成分，丰度为99.984%；氘（Deuterium, ^2H , D），又称为重氢，丰度为0.016%；氚（Tritium, ^3H , T），又称为超重氢，丰度为0.004%，氚是氢的放射性核素，质量数为3。氢元素的三种原子见表1。

产生氚的核反应有：



其中，在反应堆中用中子辐射 ${}^6\text{Li}$ 是人工氚的主要来源。

氚的物理半衰期为12.43年，发射软 β 粒子后衰变为稳定性元素 ${}^3\text{He}$ 。氚的 β 粒子平均能量是5.7 keV，最大能量为18.6 keV，在空气中平均射程为0.56 μm 。

放射性核素氚易转化为氚水（tritium oxide, HTO, T_2O ）。在空气中氚是通过氧化反应和核素交换反应生成氚水。核素交换反应通常比氧化反应速率快。氚气转化为氚水反应速率随氚浓度增加而加快。在氢弹（hydrogen bomb）爆炸过程中产生的氚，几乎完全转化为氚水。

氚的化学性质与氢相似。但是由于氚的质量数是氢的3倍，因此氚所参与的化学反应的反应常数与氢不同。从化学键能上看，C- ${}^3\text{H}$ 共价键比C- ${}^1\text{H}$ 共价键稳定。因此，与C- ${}^1\text{H}$ 有关的生化反应可因氚取代了氢而发生改变。这称为核素质量效应。但是只有在大部分氢原子被氚取代后，才会出现这种后果。机体内，在达到核素质量效应所需要的比活度之前，就已经出现了辐射损伤效应。

1g氚的活度为360TBq，1g纯氚水的活度为110TBq。当1018个氢同位素混合原子中含有1个氚原子时，称为1个氚单位（tritium unit, TU）。1个单位水的浓度为0.12Bq/L。我国地面水中的氚，沿海地区为几十个氚单位，内地则为几百个氚单位。

在放射性核素中氚的 β 粒子能量是最低的，相当于 ${}^{14}\text{C}$ β 粒子能量的1/8， ${}^{32}\text{P}$ β 粒子能量的1/100。因此在放射自显影方法观察中，物质在细胞或亚细胞水平定位，氚标记的化合物则为最高的分辨率。

具有放射毒理学意义的氚化合物，根据它们的生物学特征，大致可分成5类：①氧化物，其中主要是氚水；②氚气，其中主要是HT或 T_2 ；③难溶性氚化合物，如金属化合物（TiT, ZrT）和含氚的发光涂料等；④可溶性氚的有机化合物，主要是生物物质；⑤氚标记的核酸前身化合物，如 ${}^3\text{H}$ -TdR等。最后一种在机体具有特殊的代谢特性，因而与前4种氚化合物不同。

2. 氘-氚反应堆

除了重原子核铀-235、钚-239等的裂变能释放核能外，

还有另一种核反应，即氘-氚结合，释放出巨大能量。反应式为： $\text{D} + \text{T} = \text{He} + \text{n}$ ；完成此聚变的核反应堆称为氘-氚反应堆。

氢中有0.02%的氘。在大自然的含量约为一般氢的1/7000，用于热核反应，聚变时放出 β 射线后形成质量数为3的氦。氘被称为“未来的天然燃料”。氘为氢的一种稳定形态的核素。

氘具有放射性，会发生 β 衰变，氘的 β 衰变只会放出高速移动的电子，不会穿透人体，因此只有大量吸入氘才会对人体有害。在地球的自然界中，相比一般的氢气，氘的含量极少。氘的产生是当宇宙射线所带的高能量中子撞击氘核，其氘核与中子结合为氚核。氘与氚一样，都是制造氢弹的原料。自然界中存在极微，从核反应制得。氘是产生氢聚变反应（fusion reaction）的重要核素之一，主要用于热核反应。

如果说重原子核在中子打击下分裂放出的“裂变能”是当今原子能电站及原子弹能量的来源，则两个氢原子核聚合反应放出“核聚变能”就是宇宙间所有恒星（包括太阳）释放光和热及氢弹的能量。人类已经能控制和利用核聚变能，但由于很难将两个带正电荷的氢原子核靠近从而产生聚变反应，控制和利用核聚变能则需要历经长期的、非常艰苦的研发历程。在所有的核聚变反应中，氘的同位素——氘和氚的核聚变反应（即氢弹中的聚变反应）是相对比较易于实现的。

氘氚核聚变反应可以释放巨大能量，就等同质量来说，约为铀核裂变反应的3倍多。氘在海水中储量极为丰富，一公升海水里提取出的氘，在完全的聚变反应中可释放相当于燃烧300公升汽油的能量；氘可在反应堆中通过锂再生，而锂在地壳和海水中都大量存在。氘氚反应的产物没有放射性，中子对堆结构材料的活化也只产生少量较容易处理的短寿命放射性物质。聚变反应堆不产生污染环境的硫、氮氧化物，不释放温室效应气体。再考虑到聚变堆的固有安全性，可以说，聚变能是无污染、无

表1 氢元素的三种原子

原子符号	原子数	中子数	丰度	氢原子名称和简称
${}^1_1\text{H}$	1	0	99.984%	氕（P）
${}^2_1\text{H}$	1	1	0.016%	氘（D）
${}^3_1\text{H}$	1	2	0.004%	氚（T）

◀ 上接第5版

长寿命放射性核废料、资源无限的理想能源。受控热核聚变能的大规模实现将从根本上解决人类社会的能源问题。

考虑到氘和氚原子核能产生聚变反应的条件，若要求氘、氚混合气体中能产生大量核聚变反应，则气体温度必须达到1亿度以上。在这样高的温度下，气体原子中带负电的电子和带正电的原子核已完全脱离，各自独立运动。这种完全由自由的带电粒子构成的高温气体被称为“等离子体”。在氘氚自持反应堆中，氘氚等离子体的自持燃烧主要是依靠 α 粒子的加热来维持的。在稳态条件下，等离子体的温度剖面主要与输运过程及冷燃料（即氘氚原子）的补充方式有关，而与原先为启动燃烧所用的加热方法及加热功率的沉积剖面基本无关。目前许多国家都在大力研究受控核聚变反应。

实现“受控热核聚变”首先需要解决的问题是用什么方法及如何加热气体，使得等离子体温度能上升到百万度、千万度、上亿度。但是，超过百万度的气体是不能用任何材料所构成的容器约束，使之不飞散的，必须寻求某种途径，防止高温等离子体逃逸或飞散。由于带电粒子只能沿磁力线运动，因此具有闭合磁力线的磁场是一种最可能的选择。对不同设计出的“磁笼”中等离子体运动行为及防止逃逸的研究（即所谓稳定性研究），成为实现受控热核聚变的第二个难点。如果要使高温等离子体中核聚变反应能持续进行，上亿度的高温必须能长时间维持（不论靠聚变反应产生的部分能量，还是外加部分能量）。或者说，等离子体的能量损失率必须比较小。提高磁笼约束等离子体能量的能力，这是论证实现磁约束核聚变的科学可行性的第三个主要内容。除了验证科学可行性外，建设一个连续运行的聚变反应堆还需要解决加料、排废、避免杂质、中子带出能量到包层、产氚及返送，以及由于聚变反应产生大量带电氦原子核等对等离子体的影响等一系列科学和工程上的难题。

从20世纪40年代末起，各国就开发了多种磁笼途径，并由之出发，对聚变能科学可行性展开了不同规模的理论与实验探索研究。投入科学家及工程师上千人，经费总计每年超过10亿美元。各途径竞争非常激烈，其间纷争不断。在

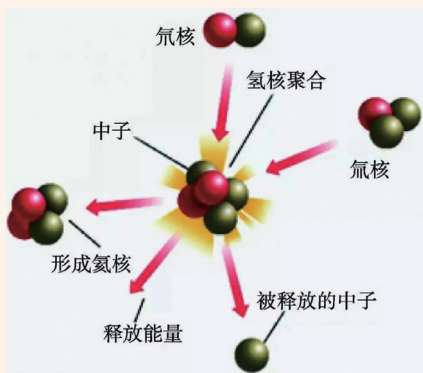


图1 核聚变示意图

这过程中，人们对实现聚变能难度的认识也逐步加深。但从20世纪70年代开始，前苏联科学家发明的“托克马克”途径逐渐显示出了独特的优点，并在20世纪80年代成为聚变能研究的主流途径。托克马克装置又称环流器，是一个由环形封闭磁场组成的“磁笼”。等离子体就被约束在这“磁笼”中，很像一个中空的面包圈，等离子体环中感生一个很大的环电流。随着各国大小不一的托克马克装置的建成、投入运行和实验，托克马克显示了较为光明的前景：等离子体达到了数百万度，等离子体约束也获得了明显效果。科学家们认识到，如果扩大此类装置的规模，有可能获得接近聚变条件的等离子体。

20世纪90年代，在欧洲、日本、美国的几个大型托克马克装置上，聚变能研究取得突破性进展。不论在等离子体温度、在稳定性及在约束方面都已基本达到产生大规模核聚变的条件。初步进行的氘-氚反应实验，得到16 MW的聚变功率。可以说，聚变能的科学可行性已基本得到论证，有可能考虑建造“聚变能实验堆”，创造研究大规模核聚变的条件。许多国家都在大力进行氘氚热核聚变自持反应堆的研究开发，并已取得了重要进展。经反应堆中子辐照过的锂铝合金，用加速的氘核来轰击氚靶可以通过这种核反应产生12~20 MeV的单能中子，对核科学技术的研究非常有用。用氚靶制成的中子管（中子发生器）已有商品出售。

“国际热核聚变实验堆（ITER）计划”是对氘氚热核聚变自持反应堆的研究，也是目前全球规模最大、影响最远的国际科研合作项目之一，建造约需10年，耗资50亿美元（1998年值）。ITER装置是一个能产生大规模核聚变反应的超导托克马克，俗称“人造太阳”。其装置中心是高温氘氚等离子体环，其中存在15 MA

的等离子体电流，核聚变反应功率达50万kW，每秒释放多达1020个高能中子。等离子体环在屏蔽包层的环型包套中，屏蔽包层将吸收50万kW热功率及核聚变反应所产生的所有中子。在包层外是巨大的环形真空室。在下侧有偏滤器与真空室相连，可排出核反应后的废气。真空室穿在16个大型超导环向场线圈（即纵场线圈）中。向超导磁体将产生5.3特斯拉的环向强磁场，是装置的关键部件之一，价值超过12亿美元。穿过环的中心是一个巨大的超导线圈筒（中心螺管），在环向场线圈外侧还布有6个大型环向超导线圈，即极向场线圈。中心螺管和极向场线圈的作用是产生等离子体电流和控制等离子体位形。

上述整个系统被罩于一个大杜瓦中，坐落于底座上，构成实验堆本体。在本体外分布4个10 MW的强流粒子加速器，10 MW的稳态毫米电磁波系统，20 MW的射频波系统及数十种先进的等离子体诊断测量系统。整个体系还包括：大型供电系统、大型氚工厂、大型供水（包括去离子水）系统、大型高真空系统、大型液氮、液氦低温系统等。ITER本体内所有可能的调整和维修都是通过远程控制的机器人或机械手完成。

21世纪，作为聚变能实验堆，ITER要把上亿度、由氘氚组成的高温等离子体约束在体积达837 m³的“磁笼”中，产生50万kW的聚变功率，持续时间达500秒。50万kW热功率已经相当于一个小型水电站的水平。这将是人类第一次在地球上获得持续的、有大量核聚变反应的高温等离子体，产生接近电站规模的受控聚变能。

在ITER上开展的研究工作将揭示这种带有氘氚核聚变反应的高温等离子体的特性，探索它的约束、加热和能量损失机制，等离子体边界的行为以及最佳的控制条件，从而为

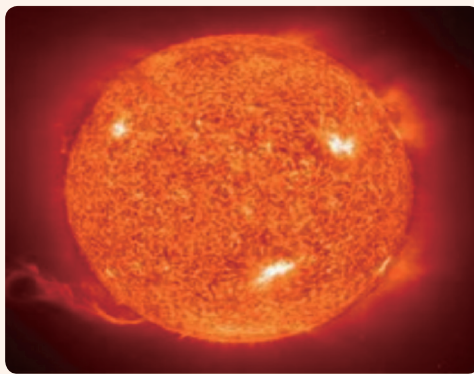


图2 太阳中心核聚变



图3 中国氢弹的成功爆炸

今后建设商用的核聚变反应堆奠定坚实的科学基础。对ITER装置工程整体及各部件在50万千瓦聚变功率长时间持续过程中产生的变化及可能出现问题的研究，不仅将验证受控热核聚变能的工程可行性，而且还将对今后如何设计和建造聚变反应堆提供必不可少的信息。

氘-氚聚变能具有诸多优点。氘-氚聚变能具有资源无限，不污染环境，不产生高放射性核废料等优点，是人类未来能源的主导形式之一，也是目前认识到的可以最终解决人类社会能源问题和环境问题、推动人类社会可持续发展的重要途径之一。2003年1月，国务院批准我国参加ITER计划谈判，2006年5月，经国务院批准，中国ITER谈判联合小组代表我国政府与欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国共同草签了ITER计划协定。这七方包括了全世界主要的核国家和主要的亚洲国家，覆盖的人口接近全球一半。我国参加ITER计划是基于能源长远的基本需求。2013年1月5日中科院合肥物质研究院宣布，“人造太阳”实验装置辅助加热工程的中性束注入系统在综合测试平台上成功实现100秒长脉冲氢中性束引出。ITER计划修改了既定的时间表，理事会近日签署了最新的完整日程计划，确定在2025年12月对反应堆实现首次点火，实现第一束等离子体，以证实核聚变的能源利用可行性，这比原计划推迟了5年。为此，理事会要求这一大型项目的七个成员方额外增加40亿欧元的支出。

三、核聚变

世界上的每一种物质都处于不稳定状态，有时会分裂或合成，变成另外的物质。物质无论是分裂或合成，都会产生能量。核聚变就是小质量的两个原子核合成一个比较大的原子核，在这个变化过程中会释放出巨大的能量（图1），太阳就是依此而释放出巨大的能量（图2）。目前人类已经可以

实现不受控制的核聚变，如氢弹的爆炸（图3）。但是要想能量可被人类有效利用，必须能够合理地控制核聚变的速度和规模，实现持续、平稳的能量输出；而触发核聚变反应必须消耗能量，因此人工核聚变的能量与触发核聚变的能量要到达一定的比例才能有经济效益。科学家正努力研究如何控制核聚变，但是现在看来还有很长的路要走。目前主要的几种可控制核聚变方式：超声波核聚变、激光约束（惯性约束）核聚变、磁约束核聚变（托卡马克）。2005年，部分科学家相信已经成功做出巨型的核聚变，并且得到初步论证。首个实验核聚变发电站将选址中。

大家熟悉的原子弹则是用裂变原理造成的，目前的核电站也是利用核裂变而发电。核裂变虽然能产生巨大的能量，但远远比不上核聚变，裂变堆的核燃料蕴藏极为有限，不仅产生强大的辐射，伤害人体，而且贻害千年的废料也很难处理，核聚变的辐射则少得多，核聚变的燃料可以说是取之不尽，用之不竭。

核聚变要在近亿度高温条件下进行，地球上原子弹爆炸时可以达到这个温度。用核聚变原理造出来的氢弹就是靠先爆发一颗核裂变原子弹而产生的高热，来触发核聚变起燃器，使氢弹得以爆炸。但是，用原子弹引发核聚变只能引发氢弹爆炸，却不适用于核聚变发电，因为电厂不需要一次惊人的爆炸力，而需要缓缓释放的电能。关于核聚变的“点火”问题，激光技术的发展，使可控核聚变的“点火”难题有了解决的可能。目前，世界上最大激光输出功率达100万千瓦，足以“点燃”核聚变。除激光外，利用超高功率微波加热法，也可达到“点火”温度。世界上不少国家都在积极研究受控热核反应的理论和工程技术，美国、俄罗斯、日本和西欧国家的研究已经取得了可喜的进展。

氚内照射剂量估算方法的讨论

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室 高品 杨宝路 周强 拓飞

关键词：氚监测；尿氚；空气氚；内照射剂量

氚是重要的核材料之一，随着核工业的迅速发展，氚对人体和环境的污染越来越引起公众的关注。环境中的氚主要以氚气、氚水（HTO）和有机氚（OBT）3种状态存在，可通过吸入、食入、皮肤渗入等途径进入人体。氚衰变产生低能β粒子，射程短，外照射危害极小，但其内照射危害不容小觑。小剂量氚内照射引起头晕、乏力、食欲减退和女性月经失调等症状；小鼠摄入氚水后外周血白细胞总数和骨髓嗜多染红细胞微核率改变；氚损伤的远期效应可发生恶性肿瘤。

目前评估氚内照射剂量的方法主要是通过测量受照人员尿样中的氚浓度较为精确地估算待积有效剂量。另一种方法是在没有个人监测数据的情况下，通过监测工作场所空气中氚的浓度，估算待积有效剂量，这种方法仅能在一定程度上提供一些辅助的剂量信息。本文主要介绍了对工作人员尿氚浓度监测的2种方法，即参考人氚剂量估算法和尿氚活度浓度积分法，对工作场所空气中氚浓度监测法的局限性和不适宜性进行说明，旨在提示根据不同的工作场景，考虑个体差异，选择适当的氚内照射剂量估算方法。

一、材料与方法

1. 工作人员尿氚浓度监测

尿氚测量方法是目前常用的估算氚摄入量的方法。摄入的氚水约2~3h就能基本上与人体水混合，尿氚的活度浓度与人体水中的氚活度浓度相等。及时、快速开展尿氚监测是准确估算氚摄入量的保证。以下介绍2种估算尿氚摄入量、待积有效剂量的方法。

1.1 参考人氚剂量估算法

国家标准GBZ 129-2016和ICRP 78号系列出版物介绍了参考人剂量估算法。对特殊或任务相关监测而言，只要知道摄入的时间就可以通过个人监测的测量值M和特殊监测时的m(t)估算出摄入量；仅有1次测量值时，可用式(1)计算摄入量I：

$$\text{公式 1: } I = M/m(t) \text{ (Bq)}$$

式中：I——放射性核素摄入量，Bq；

M——摄入后t天时测得的体内或器官内放射性核素的活度，Bq；或日排泄量，Bq·d⁻¹；

m(t)——摄入单位活度后t天时体内或器官内放射性核素的活度，或日排泄量的预期值，Bq/Bq。

对于尿氚，M值为摄入后t天时测得的尿中氚的活度浓度，Bq·L⁻¹；m(t)为摄入单位活度后t天时尿中氚的活度浓度，Bq·L⁻¹/Bq。

内照射剂量用式(2)计算：

$$\text{公式 2: } E(\tau) = I_{jp} \cdot e_{jp}(\tau) = 1.8 \times 10^{-11} \cdot I \text{ (Sv)}$$

式中：E(τ)——待积有效剂量，Sv；

I_{jp}——j类核素通过p类途径摄入的摄入量，Bq；

e(τ)——j类核素通过p类途径的剂量系数（单位摄入量的待积有效剂量），Sv/Bq；参考GBZ 129-2016，摄入氚水的待积有效剂量系数为1.8×10⁻¹¹ Sv/Bq。

在此基础上，ICRP 130号系列出版物介绍了利用摄入后t天时体内、器官内或排泄物中单位活度所致的待积有效剂量z(t)(dose per content function)一步计算待积有效剂量的方法，省略了计算摄入量I的步骤；并更新了m(t)和e(50)等参考值。摄入后t天时，体内、器官内或排泄物中单位活度所致的待积有效剂量z(t)计算公式如公式(3)：

$$\text{公式 3: } z(t) = e(50)/m(t) = 2.0 \times 10^{-11}/m(t) \text{ (Sv/Bq)}$$

式中：z(t)——摄入后t天时，体内、器官内或排泄物中单位活度所致的待积有效剂量，Sv/Bq；

e(50)——待积有效剂量系数（单位摄入量的待积有效剂量），Sv/Bq；参考ICRP 134号出版物，摄入氚水的待积有效剂量系数为2.0×10⁻¹¹ Sv/Bq；

m(t)——摄入单位活度后t天时体内或器官内放射性核素的活度，或日排泄量的预期值，Bq/Bq。

待积有效剂量E₍₅₀₎的结果可由公式(4)得到：

$$\text{公式 4: } E_{(50)} = M \times z(t) \text{ (Sv)}$$

式中：E₍₅₀₎——待积有效剂量，Sv；

M——摄入后t天时测得的体内或器官内放射性核素的活度，Bq；或日排泄量，Bq·d⁻¹；z(t)——摄入后t天时，体内、器官内或排泄物中单位活度所致的待积有效剂量，Sv/Bq。

1.2 尿氚活度浓度积分法

关于氚的内照射剂量估算，IAEA 37号安全报告和GB/T 16148-2009介绍了1种简单的数值积分方法。氚衰变时仅发射微弱的β粒子（平均能量5.7 keV），以E=0.0057 MeV，m=68.8 kg为例，单位活度的比有效剂量率为D可按照下式(5)计算：

$$\text{公式 5: } D = 1.6 \times 10^{-13} \left(\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right) \frac{0.0057(\text{MeV})}{68.8(\text{kg})} 86400 \left(\frac{\text{s}}{\text{d}} \right) \frac{1}{1(\text{Bq}\cdot\text{s})} = 1.15 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{Sv}}{\text{d}\cdot\text{Bq}} \right)$$

注：1 MeV=1.6×10⁻¹³ J

在人体42 L水中，剂量率C=42×1.15×10⁻¹²=4.8×10⁻¹¹ Sv·L/d·Bq。有效剂量E在95%置信度水平下，可用下式(6)计算：

$$\text{公式 6: } E = 4.8 \times 10^{-11} [(C_{i+1} + C_i)/2] (t_{i+1} - t_i) \text{ (Sv)}$$

式中：C_{i+1}——监测期内第t_{i+1}天的尿氚浓度，Bq·L⁻¹；

C_i——监测期内第t_i天的尿氚浓度，Bq·L⁻¹。

可以由最后一次尿氚的浓度C_n简单估计出最后一次测量后一段时间内氚累积负荷导致的待积有效剂量E，在没有其他证据的情况下，半衰期可以用10 d，公式见(7)：

$$\text{公式 7: } E = \frac{4.8 \times 10^{-11} C_n}{\ln 2 / 10} = 6.9 \times 10^{-10} C_n \text{ (Sv)}$$

式中：C_n——最后一次尿样的测量结果，Bq·L⁻¹。

由于摄入的HTO一小部分(1%~3%)会与组织中的碳结合，假设结合氚的平均半衰期为40 d。由于这种结合氚引起的待积剂量仅为循环氚引起的待积剂量的10%，且单独测量结合氚通常是难以实现的，考虑通过增加剂量系数来估算由于结合氚而引起的待积剂量增加了10%。因此，可将每单位(Bq·L⁻¹)束缚氚和总氚的剂量在公式(6)和(7)的基础上增加10%，分别增加到每天5.3×10⁻¹¹ Sv和7.6×10⁻¹⁰ Sv。

2. 工作场所空气中氚浓度监测

氚在空气中主要以氚化水的形式存在，充满整个工作空间，工作人员所接受的氚内照射剂量，主要是经呼吸途径摄入。待积有效剂量当量值的大小与工作场所空气中的HTO浓度高低，以及停留时间长短紧密相关。

依据国家标准GBZ 129-2016，在有吸入途径、没有个人监测数据的情况下，可用固定空气采样器测量的空气浓度，用下式(8)计算工作人员所接受的氚的待积剂量当量E(τ)：

$$\text{公式 8: } E(\tau) \approx \frac{0.02 C_s}{\text{DAC}} = \frac{0.02 C_s}{5 \times 10^5} = 4.0 \times 10^{-8} C_s \text{ (Sv/a)}$$

式中：0.02——个人年剂量限值，Sv/a；

C_s——固定空气采样器测量的HTO的浓度，Bq/m³；

DAC——导出空气浓度，Bq/m³；参考GBZ 129-2016，氚化水蒸气的导出空气浓度DAC=5×10⁵ Bq/m³。

应明确指出的是，利用DAC估算氚的待积有效剂量是在假设仅吸入氚单种放射性核素，无其他核素摄入，且外照射剂量贡献很小的条件下推导而出的，所适用的工作环境有限。且氚在HTO、OBT和气态等不同形态下，其DAC值是有差异的，因此在用该方法时应明确环境中氚存在的形式。总而言之，在实际工作环境下，该估算方法有很大的局限性，直接用公式(8)计算待积有效剂量会引起较大的偏差，不建议使用此方法。

3. 氚内照射剂量估算方法的比较

在适用范围、测量方法、不足和测量时的注意事项4个方面，将氚内照射剂量估算的方法进行对比说明，内容见表1。

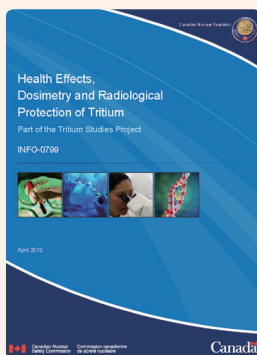
4. 氚内照射剂量估算方法在实例中的应用

参考杨海兰等对放射工作人员尿氚浓度、空气中氚浓度监测的数据，将13名工作

下转第8版 ▶

表1 氚内照射剂量估算方法的比较

	工作人员尿氚浓度监测		工作场所空气中氚浓度监测
	参考人氚剂量估算法	尿氚活度浓度积分法	
适用范围	及时、直观地反馈因突发事故或违规操作而引起的氚内污染，进而及时采取补救措施	不再遵循固定代谢模式，可根据实际调整人体体重、体水体积等参数；不再受限于受照时间不确定的困扰	仅吸入氚单种放射性核素，无其他核素，且外照射剂量贡献很小，没有个人监测数据的情况下可用
测量方法	利用活性炭脱色法、蒸馏法和氧化蒸馏法等方法对尿样进行预处理，用液闪测定的方法进行测量	利用干燥剂法、分子筛法、鼓泡器法和冷冻法等方法收集空气中的氚化水，最常用的是用硅胶作为干燥剂取样，用液闪测定的方法进行测量	
不足	该方法基于固定的生物动力学参数，对于不同的个体，生理、代谢规律和工作环境各有差异，用该方法可能会产生较大的偏差。另外，该方法需要明确摄入氚的时间	需要在监测周期内多次采样测量	ICRP不建议使用DAC，因剂量限值必须考虑内外照射的总剂量。工作环境复杂多变，很难找到反映所有工作人员摄入量的布样点，且因存在个体差异（如肺活量），故该估算结果仅能提供一些辅助信息，仍须监测尿样结果准确估算剂量
注意事项	应及时、快速、完整的获得尿排泄资料。应制定特殊监测计划，对该污染物在事故摄入者体内的分布、滞留和排泄进行追踪监测，并依个例情况估计该摄入者的待积有效剂量		对不同的工作场所进行氚浓度监测时，首先要对场所的结构、运行状况、管理模式，氚的生产量、排放量及产生原因进行深入的了解。布点时不仅要考虑人员流动情况，选择工作人员停留较多的场所，也要考虑换样的安全性、便捷性；监测时间的选取要与工作人员的工作内容紧密联系，紧跟进度，避免错过换样的节点



《氚的健康效应、剂量测定和辐射防护》简介

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室 高品 拓飞

在加拿大，除了生产氚的 CANDU 核电站之外，还有一些核设施在其生产线上使用氚，需要得到加拿大核安全委员会（CNSC）的许可。2007 年 1 月，CNSC 举行了关于一个氚处理设施许可证的公开听证会，在听证会上提出了有关氚的处理、控制和排放，饮用水中含氚的限值，氚在环境中的寿命及接触氚对人体健康的影响等问题。为了更好地理解氚相关的问题，并明确加拿大进一步加强对氚相关活动监管的可能性，委员会法庭指示 CNSC 工作人员进行与氚相关的研究。作为回应，工作人员发起了关于氚的研究项目，该项目包括一些信息收集和研究工作，这些工作持续到 2010 年。

该《氚的健康效应、剂量测定和辐射防护》报告是氚研究项目的一部分，由 CNSC 于 2010 年 4 月出版，共 12 章，193 页。研究目的和范围包括：关于氚的物理、化学和放射性特性的概述；氚辐射危害健康的详细分析，涵盖实验室、流行病学研究的综述；评估氚辐射相对生物学效应（RBE）的实验研究的综述；氚的

生物动力学模型和剂量学的描述；国际放射防护委员会（ICRP）提出的减少氚辐射的方法和可能的修正辐射权重因子的综述。

本报告提供了一部用以评估与氚接触的工人和公众所存在的健康风险的独立审查科学文献。它还评估了加拿大和国际上对氚摄入量的剂量测定方法。此外，在翻阅文献和与 ICRP 成员及其他相关专家的讨论过程中，ICRP 保护工人和公众免受电离辐射侵害建议背后的理由，明显没有得到监管机构、公众成员和科学团体的充分理解。由于加拿大基本上采纳了 ICRP 的建议，本报告还包含了对 ICRP 方法的讨论及可能的替代方案。

该报告最终得出以下结论：①以流行病学和实验室研究为基础的一系列证据表明，在加拿大，以目前的接触水平，氚对健康造成危害的可能性极小。②与测定氚辐射的单一 RBE 值有关的 50 多项实验研究结果证实，氚的 β 辐射的生物学效力约为 250 kVp X 线辐射的 1.4 倍，是 γ 线辐射的 2.2 倍。③当前用于评估氚剂量的剂量测定法和生物动力学模型可用于辐射防护目的。④加拿大目前在控制氚暴露方面的监管框架是令人满意的。

上接第 7 版

人员在工作场所停留的时间及其尿氚浓度列于表 2。

4.1 利用参考人氚剂量估算法计算

工作人员在工作完成之后马上留尿进行尿氚分析，采用 ICRP 130 号系列出版物中 $t=1$ 时的参数， $z(t) = 5.6 \times 10^{-10}$ (Sv/Bq · L⁻¹)，按公式 (4) 计算得出结果 $E(\tau)_1$ 。

4.2 利用尿氚活度浓度积分法计算

假设 13 名检修人员的体重均为 $m=68.8$ kg，半排期为 10 d，体水体积为 42 L，因参考文献仅提供工作完成之后的阶段性一次监测结果，本文视为是最后一次的结果，按照公式 (7) 计算得出结果 $E(\tau)_2$ ，考虑到结合氚对待积剂量的贡献，公式 (7) 中的每单位 (Bq · L⁻¹) 总氚的剂量取每天 7.6×10^{-10} Sv。

4.3 利用工作场所空气中氚浓度监测法计算

工作场所空气中氚浓度为 30.2 kBq/m³，按照公式 (8) 计算得出结果 $E(\tau)_3$ 。

表 2 利用参考人氚剂量估算法、尿氚活度浓度积分法、空气中氚浓度监测法计算氚的待积有效剂量的结果

检修人员	停留时间/h	尿氚浓度 (kBq/L)	氚的待积有效剂量 (μ Sv)		
			参考人氚剂量估算法的结果 $E(\tau)_1$	尿氚活度浓度积分法的结果 $E(\tau)_2$	空气中氚浓度监测法的结果 $E(\tau)_3$
1	5.50	4.37	2.50	3.32	3.32
2	5.50	5.90	3.37	4.48	3.32
3	2.58	5.86	3.35	4.45	1.56
4	6.50	5.35	3.06	4.07	3.93
5	5.37	5.56	3.18	4.23	3.24
6	5.50	5.41	3.09	4.11	3.32
7	5.92	4.56	2.61	3.47	3.58
8	5.50	7.49	4.28	5.69	3.32
9	5.50	7.12	4.07	5.41	3.32
10	5.50	4.23	2.42	3.21	3.32
11	0.58	1.57	0.90	1.19	0.35
12	0.58	1.57	0.90	1.19	0.35
13	0.83	1.01	0.58	0.77	0.5

二、结果

利用参考人氚剂量估算法、尿氚活度浓度积分法、空气中氚浓度监测法得到的结果 $E(\tau)_1$ 、 $E(\tau)_2$ 、 $E(\tau)_3$ 见表 2。

检修人员 3 在工作场所停留的时间短于检修人员 10，按照空气中氚浓度监测法，人员 3 的待积有效剂量的结果低于人员 10；但是人员 3 的尿氚浓度高于人员 10，利用尿氚浓度监测法，待积有效剂量高于人员 10。

空气中氚浓度监测法与参考人氚剂量估算法计算待积有效剂量的公式没有引入关于个体差异的因子，即模型是固定的；尿氚活度浓度积分法的估算结果与检测人员的体重、半排期等个体因素相关，但在本例中均以 $m=68.8$ kg、半排期 10 d 等数据开展计算，也成了“固定模型”。因此，在本例中，13 名检修人员的参考人氚剂量估算法的结果 $E(\tau)_1$ 比尿氚活度浓度积分法的结果 $E(\tau)_2$ 低 24.8%，考虑是由模型差异引起的；在实际情况中，检测人员的体重不同，氚的半排期和体水体积可能存在差异，利用参考人氚剂量估算法和尿氚活度浓度积分法估算的结果不再存在固定的比例关系。

Sinochrome
Solutions for cytogenetics
乐辰生物

上海乐辰生物科技有限公司专业从事细胞遗传学分析相关产品、方法、方案的研究，2020 获批高新技术企业，致力于研发高质量和高效率的染色体制备自动化仪器、试剂和软件，为细胞遗传学分析提供信息化、自动化、智能化和标准化的解决方案。上海乐辰生物科技有限公司首创的细胞遗传学分析系统化解决方案（乐辰方案），成功实现了染色体核型、畸变和细胞微核分析的自动化、信息化和智能化，将复杂的样品制备流程和图像分析过程完全标准化，为传统的细胞遗传学分析带来了革命性的变化，有效提高了细胞遗传学分析的效率，保证了染色体制备的一致性和重复性，降低了细胞遗传学分析的成本。



缪应江

任上海乐辰生物科技有限公司 CEO，研究生学历，毕业于生物化学和分子生物学专业，长期从事细胞遗传学分析的自动化、信息化和智能化研究，首次提出并实现了细胞遗传学分析的系统化解决方案，获得多项发明和实用新型专利。

放射医学与防护专刊长期合作伙伴

