

中国核工业 辐射流行病学研究

主编 孙世荃
审阅 刘树铮
吴 企

R181.3
SSQ

北京医科大学图书馆

原子能出版社

PDG

DF01/15

中国核工业 辐射流行病学研究

主编 孙世荃
审阅 刘树铮
吴 企



原子能出版社

R181.3
SSQ



A1C01102970

(京)新登字077号

内 容 简 介

本书是我国核工业30年来职业受照人群辐射流行病学调查研究系统的总结。书中介绍了对人群的受照剂量和有关疾病死亡率进行的系统调查。调查结果表明:在长期从事放射性作业人员中没有发现职业性照射引起癌症及遗传性疾病增加的危险。某些铀地质勘探和铀矿开采部门由于早年井下氡子体浓度较高,矿工肺癌发生率有所增加。这为我国核工业辐射安全与辐射健康评价提供了重要证据。

本书按核工业生产流程逐一介绍铀矿地质勘探、铀矿开采、铀扩散浓缩与元件制造、反应堆工程和后处理以及核技术研究共5类部门辐射流行病学调查的个人剂量和人群分析资料,并附有方法学总结。它可供从事辐射防护、放射医学、放射卫生学和流行病学工作人员参考,并提供有关的基础资料。

©

中国核工业辐射流行病学研究

主编 孙世荃

审阅 刘树铮 吴 企

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路43号)

通讯处:北京市2108信箱,100037(邮编)

印 刷 北京地质印刷厂

经 销 新华书店总店^{北京}科技发行所发行·新华书店经销

开本 787×1092mm 1/16 印张 7 字数 180千字

1994年10月北京第1版 1994年10月北京第1次印刷

印数1—300

ISBN 7-5022-1144-6/R·42

定价:7.00元

中国核工业辐射流行病学研究

编 委 会 名 单

主 编 孙世荃

编 委 (按姓氏笔划排列)

王印章 李伟林 李素云 陈绍嘉

周永增 柏惠云 姜 莉 袁丽云

审 阅 刘树铮 吴 企

前 言

核工业在国防与能源建设中具有重要地位。我国的核工业是从50年代末期开始建立和发展起来的。核工业生产过程中一些从事放射性作业的职工长期受到小剂量的职业性照射。小剂量照射有可能引起辐射随机性效应,包括辐射致癌效应和辐射遗传效应。目前认为,辐射诱发随机性效应不存在剂量阈值;随机性效应的发生概率主要取决于所接受的照射剂量;辐射可能诱发的各种癌症及遗传性疾病与一般人群中发生的同类疾病没有可供鉴别的临床、病理学特征;辐射诱发实验动物各种随机效应的敏感性与人类有较大差异。因此,辐射所致人类癌症和遗传学效应的危险需要通过人群流行病学研究,根据受照人群的照射剂量与有关疾病发生率进行评价。

当前,可以获得肯定的流行病学证据的人类,辐射随机性效应是辐射致癌效应。评价辐射致癌效应的重要指标是单位剂量照射引起的癌症危险增加概率,称为辐射致癌概率系数或危险系数。主要根据日本原爆幸存者们的流行病学调查研究结果。国际放射防护委员会(ICRP)提出了针对职业人群和一般人群的辐射致癌危险系数。在把原爆急性照射的结果向小剂量慢性照射外推时需要对所选定的剂量-剂量率效能因子(DDREF)进行校正。由于DDREF的选择有一定任意性,所以利用ICRP为辐射防护目的使用的辐射致癌危险系数在对职业受照人群的致癌危险进行评价和预测时存在一定的技术不确定性。

核工业人群接受的职业性照射是小剂量-低剂量率慢性照射。了解核工业职业受照人员接受这种慢性照射的致癌危险的更合理的途径是对职业人群进行辐射流行病学调查,直接观察职业受照人员的癌症发生率。美、英核工业历史较久,从60和70年代就开始铀矿山和核工厂的辐射流行病学调查,并对若干职业人群的调查资料进行了联合分析,目前已经获得一些有意义的结果。我国核工业迄今已有30多年历史,一些早年受到一定水平职业性照射的人员开始进入发癌高峰年龄。他们是否由于既往接受职业性照射已经出现或将会出现的癌症和子女遗传性疾病的增加正受到有关方面的关注。这个问题应该而且可以通过核工业厂矿职业受照人群的大规模流行病学调查来回答,以便对我国核工业的辐射安全防护和辐射健康危害做出正确的评价。

我国核工业辐射流行病学调查研究是从1984—1986年全面开始的。包括铀矿地质勘探、铀矿开采、铀扩散浓缩和元件制造(以下简称扩散-元件)、反应堆和后处理以及核科学技术研究(以下简称堆工-后处理和科学研究)共5个部门。在核工业总公司安防卫生局的统一组织下成立了4个协作组,有中国辐射防护研究院、苏州医学院和重点厂矿有关技术人员参加,按事先规定的登记项目和调查方法建立统一的流行病学数据库、按历史前瞻性调查(retro-prospective study)方法进行队列研究(cohort study)。调查随访时间为1970—1985年,着重分析从事过放射性工作的放射组人员和无放射性工作历史的同一单位中的对照组人员的各种疾病的死亡率,特别是各种癌症的死亡率。为了研究核工业职业性照射引起受照者子女遗传性疾病的可能性,在核工厂开展了遗传性和先天性疾病的调查。核企业职工在接受职业性照射的同时还接受各种医疗照射,为了对医疗照射的贡献进行评价,在部分厂矿开展了医疗照射剂量的调查研

■

究。

核工业辐射流行病学调查研究工作于1990年告一段落,按铀矿地质勘探、铀矿开采、扩散-元件、堆工-后处理与科学研究以及辐射遗传学调查共5个部分进行总结,由各协作组负责人李素云、袁丽云、李伟林、王印章、柏惠云五位同志分别执笔,作为我国核工业辐射流行病学研究的第一阶段成果在本书中公开发表。考虑到方法学和医疗照射在辐射流行病学研究中的重要性,本书还增加了由李伟林、李素云、周永增、姜莉编写的辐射流行病学研究方法和张仲仁同志执笔总结的核工业职工医疗照射剂量两章。

在核工业系统开展的大规模辐射流行病学调查研究任务重,涉及部门广,工作难度大。几年来,在核工业总公司安防卫生局的领导下,厂矿有关单位和基层广大科技人员的热情支持与积极合作下,使这项任务得以顺利完成,在此谨向他们表示衷心感谢(参加工作人员名单详见104页)。中国辐射防护研究院和苏州医学院辐射流行病学研究协作组的参加人员和计算机操作人员几年来做了大量工作,本书是他们与厂矿参加人员辛勤劳动共同努力的结晶。本书最后列出各协作组参加人员名单。流行病学调查的计算机程序编制由姜莉、汤忠鉴完成,一部分运算由江洪和王栋同志协助完成,尤占云同志协助整理全书资料,在此一并表示感谢。由于受到水平和条件的限制,我们的工作还有不少缺点,敬请读者予以指正。

编 者

1993年12月

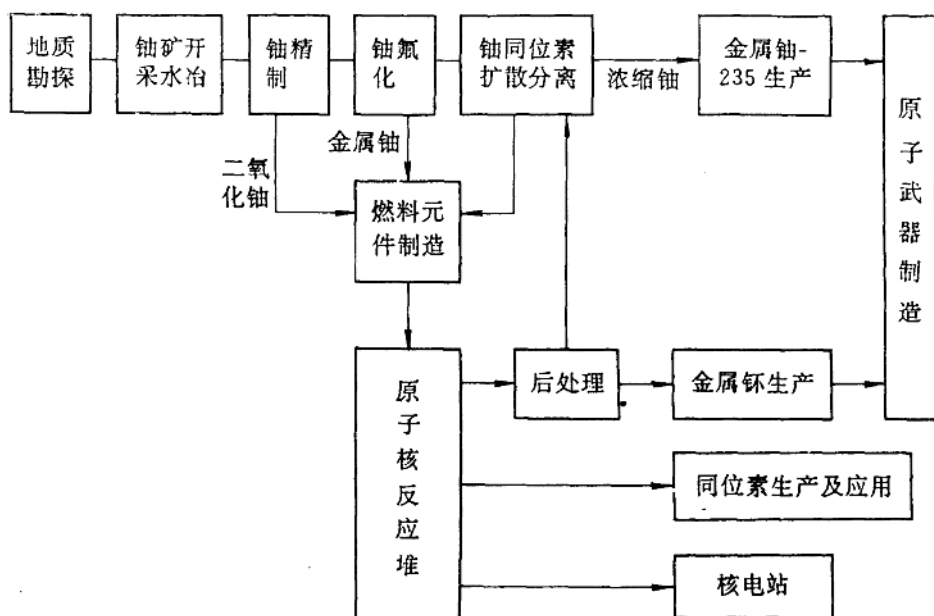
目 录

前 言	(Ⅱ)
第 1 章 中国核工业及其职业性照射	(1)
第 2 章 辐射流行病学研究方法	(4)
2.1 流行病学统计分析方法	(4)
2.2 个人剂量估算方法	(17)
2.3 辐射流行病学数据库系统的建立	(28)
参考文献	(32)
第 3 章 铀地质勘探井下作业人员的职业照射危害	(33)
3.1 调查人群及其作业条件	(33)
3.2 氡子体暴露量	(34)
3.3 辐射流行病学调查结果	(35)
3.4 铀地质勘探井下作业人员辐射危害评价	(38)
参考文献	(40)
第 4 章 铀矿开采人员的职业照射危害	(41)
4.1 调查人群及其作业条件	(41)
4.2 氡子体暴露量	(42)
4.3 辐射流行病学调查结果	(43)
4.4 铀矿井下作业人员的辐射危害评价	(49)
参考文献	(51)
第 5 章 铀扩散浓缩与元件制造厂作业人员的职业照射危害	(52)
5.1 扩散-元件厂作业人员的职业性照射	(52)
5.1.1 扩散-元件厂概况	(52)
5.1.2 扩散-元件厂职业照射剂量	(52)
5.2 辐射流行病学调查的人群	(54)
5.3 辐射流行病学调查结果	(56)
5.4 扩散-元件厂作业人员的职业照射危害评价	(63)
参考文献	(65)
第 6 章 堆工-后处理厂以及核科学技术研究院(所)工作人员的职业照射危害	(67)
6.1 堆工-后处理厂和核科研部门工作人员的职业性照射	(67)
6.1.1 堆工-后处理厂和核科研部门概况	(67)
6.1.2 堆工-后处理厂和核科研部门的职业照射剂量	(67)
6.2 辐射流行病学调查的人群	(68)
6.3 辐射流行病学调查结果	(71)
6.3.1 全因死亡的统计结果	(71)
6.3.2 癌症死亡的统计结果	(74)

6.4 堆工-后处理厂和核科研部门工作人员的 职业照射危害评价	(79)
参考文献	(81)
第7章 核工业人群辐射遗传学危害	(83)
7.1 调查对象和调查方法	(83)
7.2 调查结果及遗传危害评价	(84)
参考文献	(87)
第8章 核工业职工医疗照射剂量估算	(88)
8.1 调查人群	(88)
8.2 调查结果	(88)
8.3 医疗照射剂量评价	(92)
参考文献	(92)
第9章 中国核工业职业照射危害评价	(93)
9.1 中国核工业辐射流行病学研究的主要结论	(93)
9.2 辐射流行病学研究的既往经验	(96)
9.3 中国核工业职业照射危害的综合评价与预测	(98)
参考文献	(99)
附录	(101)
表1 泊松(Poisson)分布 λ 的置信区间	(101)
表2 泊松(Poisson)分布中实际观察值与预期值之比(SMR)的置信区间	(102)
表3 X^2 值表	(103)
表4 r_s 界值表	(103)
参加工作人员名单(按姓氏笔划排列)	(104)

第1章 中国核工业及其职业性照射

核工业也称原子能工业,它包括从事核燃料生产和核能、核技术的开发与利用。为了增强国防力量并使核能和核技术为国民经济建设服务,我国于50年代末创建了核工业,迄今已有30余年的历史。根据核工业的主要工艺流程及其所存在的职业性照射,在中国核工业辐射流行病学调查中按以下5类部门进行:地质勘探、铀矿开采、扩散-元件制造、反应堆-后处理与核科学研究(见下图)。



附图 核工业主要工艺流程图

1.1 铀地质勘探部门

铀是核工业发展最基本的原料。因此,铀矿普查勘探是发展核工业的先行,其中心任务是查明铀资源,勘探铀矿床,提交铀储量。我国铀矿普查勘探工作队伍从1955年开始组建,到1956年末从事铀矿地质工作的职工总数已达2万余人。1984年后核工业部地质局在全国建立5个地区性管理机构,下设51个地质大队。铀矿普查的前期阶段包括铀矿区域地质调查,地表揭露和钻探等,均为地表野外作业。后期阶段为铀矿勘探,通过钻探和井下作业进一步探明

铀矿床的储量,为矿山设计和开采提供可靠数据。全国 51 个地质大队中大约 1/5 只从事地表工作,没有井下作业,其余地质大队中大约 1/10 的工作人员从事井下作业。与铀矿开采相比较,铀地质勘探井下作业的特点是工作地点偏远分散而且经常变换,井下接触围岩机会多而接触铀矿体少,井下作业以独头掘进为主,坑道短,分支少,天井少,通风条件差,经常缺乏形成整体通风系统的坑道条件,因此当掘进坑道深度较大和接触矿体后会有较高浓度氡的积累。氡子体照射是地质勘探系统工作人员所接受的最重要的职业性照射。氡子体吸入的主要危险是其所诱发的矿工肺癌。井下还存在 γ 射线照射,但其剂量按有效剂量当量计算常不足氡子体照射剂量的 1/5。

我国的铀矿床主要为花岗岩型,占 41%,其次是火山岩型和砂岩型。早期铀矿勘探几乎全部在花岗岩体中进行,花岗岩含游离二氧化硅在 80% 以上,加之早年一度实行干式凿岩,井下空气粉尘浓度较高,致使地质勘探工人矽肺发生率增加。粉尘和矽肺是威胁地勘工人的最重要的职业危害,其所产生的健康影响比氡子体照射引起矿工肺癌更为严重。60 年代中期后普遍采用湿式作业,粉尘和矽肺的危险明显缓解。

1.2 铀矿开采部门

在铀地质勘探工作任务完成之后,勘探坑道与附属设施移交给矿山进行铀矿开采,并把采出的铀矿进行提取和精制(铀水冶)。铀矿开采与水冶是核工业的重要组成部分。铀水冶厂通常附设在铀矿山,形成铀采冶联合企业。1958 年我国第一批铀矿山和铀水冶厂相继开工建设和试生产,有几个铀矿于 1962—1965 年正式投产。第二批铀矿冶企业于 1967 年建成投产。铀矿开采与一般有色金属矿开采基本相同。我国铀矿床大都品位低,矿体小而分散,因此在矿山建成之后仍需进一步进行补充勘探以扩大矿区储量,保证矿山正常开采。我国铀矿的开采大约 1/5 为露天开采,其余为井下开采。开采深度一般在 400m 以内,为减少氡气析出,开拓工程和主要运输平巷都布置在矿脉之外。井下作业包括采矿,掘进,运输和其它辅助工种。铀矿开采地点相对集中,剂量监测和防护制度健全,井下整体通风系统完善,接触矿体时间较多。与地质勘探相似,铀矿开采井下作业人员接受的职业性照射主要来自氡及其子体。一些矿山早年氡浓度较高,近年有所下降。早年威胁铀矿工人健康的最主要的职业危害是粉尘吸入引起的矽肺。铀矿露天开采和铀水冶厂工作人员接触的氡子体浓度很低,其所引起的辐射危害可以忽略。比氡子体更重要的是某些工作场所存在的粉尘和铀的化合物。

1.3 扩散-元件制造部门

核燃料元件制造厂和铀同位素扩散分离厂的工作人员都接触铀及铀的化合物,所以在考虑核工业职业性照射危险时将其放在一起,合称扩散-元件制造部门。

核反应堆是核工业的核心环节。反应堆要靠装载的核燃料发生裂变反应,产生中子并提供能量。为了满足反应堆的各种性能要求需要把核燃料制成一定形状的可更换的单元体,这就是核燃料元件。燃料元件由易裂变材料制成,例如天然铀、不同丰度的浓缩铀金属或它们的化合物。

天然铀中所含的 ^{235}U 是易裂变燃料,但在天然铀中它的丰度只有 0.714%。虽然天然铀在

一定条件下可以维持链式反应,用作核燃料,但是由于装料多,体积大,所以一些动力用和研究用的反应堆要求使用丰度较高的浓缩铀 ^{235}U 。供原子弹用的装料则要求 ^{235}U 丰度高达90%以上。为此必需对铀同位素进行分离,使 ^{235}U 富集。我国铀同位素分离工厂于1964年建成投产。由于采用气体扩散法,故又称铀扩散厂。其主要工艺是将 UF_4 生成 UF_6 。 UF_6 是气态,利用 ^{238}U 和 ^{235}U 比重的差别在一系列扩散机中通过分离膜进行分离。分离后的被浓缩的 UF_6 经过还原制成浓缩铀金属。扩散厂工作人员和元件厂一样,主要接触铀及其氟化物。但是由于扩散厂要求工艺设备具有高度密封性和自动化能力,所以工作场所空气铀浓度约为元件厂的1/10或更低。

1.4 堆工-后处理与核科学研究部门

反应堆是受控的自持核裂变链式反应装置,它因最初由天然铀金属块和石墨块堆砌而得名。反应堆工程简称堆工。反应堆被用来生产 ^{239}Pu 、 ^{233}U 、 ^3H 等核燃料和生产人工放射性同位素;用来从事核物理、辐射化学等方面的实验研究;用来提供大量热能进行发电;为潜艇和其它船舶提供动力。1958年,中国原子能科学研究院首先建成重水反应堆用于科学研究。1966年,我国建成军用生产堆,为石墨轻水堆,以天然铀金属元件为燃料在反应堆中辐照生产 ^{239}Pu ,用作核武器装料。目前,我国用于发电的核反应堆已建成两座压水堆。核电在我国能源中的比重将逐渐增大。

核燃料在反应堆内发生裂变反应“燃烧”以后,其物理和化学组成均发生变化,最后成为乏燃料,经过放射性衰变被“冷却”之后通过一系列化学处理从中回收和提取有价值的物质,这被称为反应堆乏燃料后处理。后处理厂接受由反应堆运来的乏燃料元件,经过湿法脱壳,铀芯溶解,铀钚分离和纯化,最后制成合格的铀和钚的产品。堆工后处理厂是核工业中产生和贮存放射性核素种类最多,活度最高的场所。操作人员接受的职业性照射主要是来自反应堆和乏燃料的 γ 射线外照射,另外还有 Pu 、 ^3H 和 $^{125,131}\text{I}$ 等核素引起的内照射。

我国核武器研制从60年代开始。1964年成功地爆炸了第一颗原子弹。核武器研制和装配工厂工作人员主要接受 γ 射线外照射,但其剂量水平通常低于堆工后处理厂。中国原子能科学研究院和反应堆工程研究院这两个核科学技术研究部门从事反应堆和其它核技术研究,放射工作人员接受的职业性照射与堆工后处理厂及核武器研制单位相似,所以在考虑职业性照射危害时把上述三个部门的工作人员合在一起进行分析。

(孙世荃)

第2章 辐射流行病学研究方法

2.1 流行病学统计分析方法

研究核工业厂矿人群因职业性照射引起的远期效应,通常采用流行病学研究方法。流行病学研究方法从调查资料所属的时间上分为两种类型:横断面调查和纵向调查。横断面调查是选择一个“现时”断面(指较短时间,例如几个月),研究接触和不接触某危险因素的两组人群在该时刻的健康效应,并比较它们的差别。假如经过统计学检验这种差别具有显著性意义,则可作出某因素与疾病有联系的结论。但是横断面调查不适用于潜伏期较长的疾病(如癌症)。因为在到达发病潜伏期之前,癌症发生率(或死亡率)的增加不会有所表现。此外一些发生率很低的疾病也不适于使用横断面调查,因为即使调查的人数很多,阳性病例的数目也不易满足统计分析的需要。

纵向调查分病例-对照研究(case-control study)和队列研究(cohort study)。病例-对照研究是选一组某病患者为病例组,另选一组不患该病的其他疾病患者或健康人作为对照组,两组人群在性别、年龄等因素方面应该具有可比性。然后调查这两组人群既往对某危险因素的暴露情况。如果病例组暴露于该因素的人数比例明显大于对照组,则可以认为该因素可能是某病的病因。这种方法从果推因,在时间顺序上属于回顾,所以又称回顾性调查。病例-对照研究的优点是在较短时间内可以得到结果,费用较低;但其主要缺点是不能获得对某因素的暴露人群与非暴露对照人群的发病率(或死亡率)。因此,职业流行病学研究多数采用队列研究的方法。队列研究是把接触某种可疑危险因素的人群作为暴露组,不接触该因素的人群为对照组,然后观测两组人群的健康动向和暴露组对危险因素的接触量。如果这两组人群的健康状况(某病发病率或死亡率)有明显的差别,则可以认为该可疑因素与某病有联系。这种时间上向前看(从因到果)的研究方法又叫做前瞻性调查,这种研究费时长久,代价昂贵。在流行病学调查实践中,经常遇到的情况是在决定开始进行调查时,已经可以获得两组队列(暴露组和非暴露组)既往一段时期对某因素的暴露史和疾病登记资料。这时前瞻性调查可以从既往某一时间点开始,称为历史前瞻性或回顾性队列研究。回顾性队列可以弥补非回顾性队列研究的缺点,用较短时间及较低费用得到研究结果。本书对辐射遗传效应的流行病学研究采用横断面调查,对辐射致癌效应则采用纵向调查(回顾性队列研究)。本章将着重介绍本书队列研究中使用的统计分析方法^[1-3]。

2.1.1 率和比

流行病学研究中接触到的资料多数是计数资料,描述计数资料的统计指标是相对数:率和比。

“率”(rate),又称频率,表示某现象发生的频度和强度(例如发病率)。率有两种算法:一是以观察人年为分母计算的率,这种以各个体被观察的时间的总和为分母的发病率称为发病

密度；另一种是一定随访期间内观察人群中发生的病例数与开始随访时的人数之比，这种发病率称为累积发病率。

“比”(ratio)，分为构成比(proportion)和相对比(relative ratio)。构成比表示事物各组成部分所占的比例或份额大小，如死因构成百分比；相对比表示两个同质的数量或数值的比值，例如相对危险(relative risk, RR)是两个发病率之比，标化死亡比(standardized mortality ratio, SMR)是观察值与预期值之比。

在队列研究中最重要指标是密度发生率。它是发病(或死亡)例数除以观察人数与年数的乘积(称为人·年)，即观察人·年或称为处于危险的人·年(person-year at risk)。例如1000人观察10年将累积10,000人·年。辐射致癌的流行病学研究应该考虑到致癌效应的潜伏期。例如白血病和实体癌的最短潜伏期分别取2年和10年，则计算其发病率(或死亡率)时，应分别扣除观察期最初2年和10年的累积人·年值，并扣除观察期末2年和10年内的累积照射剂量。因为在该期间内受到的照射还来不及表现出致癌的效果。

率的最简单的指标是粗率，例如粗死亡率或粗发病率，由病例数除以观察人·年数得出。粗率的大小特别是癌症的粗率主要受性别、年龄等因素的影响，因此不宜于在性别、年龄构成差别较大的两组人群间直接比较。

2.1.2 率的年龄调整(率的标准化方法)

为了对不同年龄结构人群的癌症死亡率进行比较，需要进行率的年龄调整即率的标准化。一般以调查人群所在县、市、省和全国人口的年龄构成或年龄别发病(死亡)率为标准进行调整。也可以利用相互比较的人群互作“标准”或者合并后作“标准”，用来对两地居民某种疾病的发病率或死亡率进行比较。在职业流行病学调查中往往以同一单位或地区非暴露人群(对照组)为标准，观察暴露人群癌症发病(死亡)率的变化。

设某研究组(即被标化组)人群各年龄组人口数为 n_i ，其构成比为 w_i (即权数)，死亡数为 m_i ，死亡率为 p_i ；对照组(即标准组)与上述对应项目的符号为 N_i 、 W_i 、 M_i 和 P_i ，共用年龄组序号 i (见表2-1)。

表 2-1 率的标准化所使用的计算符号

年龄组 i	被标化组(研究组)				标准组(对照组)			
	人口数 n_i	构成比 w_i	死亡数 m_i	死亡率 p_i	人口数 N_i	构成比 W_i	死亡数 M_i	死亡率 P_i
1	n_1	w_1	m_1	p_1	N_1	W_1	M_1	P_1
2	n_2	w_2	m_2	p_2	N_2	W_2	M_2	P_2
·	·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·	·
k	n_k	w_k	m_k	p_k	N_k	W_k	M_k	P_k
合 计	n	1.00	m	p	N	1.00	M	P

率的标准化常用直接法和间接法,其计算公式如下:

(1)直接法:选一标准人口的年龄构成,按被标化组的年龄别死亡率(age specific mortality rate)计算预期死亡数,然后除以标准人口总数 N :

$$\text{标准化率} \quad p' = \frac{\sum N_i p_i}{N} \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad p' = \sum W_i p_i \quad (2-2)$$

若将式(2-1)中的预期死亡数 $\sum N_i p_i$ 除以标准组的实际死亡数 M , 则称为比较死亡数(comparative mortality Figure, CMF):

$$\text{CMF} = \frac{\sum N_i p_i}{M} \quad (\text{或 } \text{CMF} = \frac{\sum N_i p_i}{\sum N_i P_i}) \quad (2-3)$$

实际上直接标化率 p' 即等于 CMF 乘以标准组的总率 P :

$$p' = \frac{\sum N_i p_i}{N} = \frac{\sum N_i p_i}{M} \times \frac{M}{N} = \text{CMF} \times P \quad (2-4)$$

(2)间接法:以标准人群的年龄别死亡率 P 乘以被标化组人口的实际死亡数与其预期死亡数的比值

$$\text{标准化率} \quad p' = \frac{m}{\sum n_i P_i} \times P \quad (2-5)$$

式中 $\frac{m}{\sum n_i P_i}$ 称为标化死亡比(standardized mortality ratio, SMR), 所以式(2-5)也可以简化为:

$$p' = \text{SMR} \times P \quad (2-6)$$

可见当 $\text{SMR}=1$ 时, $p' = P$, 即研究组死亡率与对照组死亡率相等。

计算实例:

直接法:【例 2-1】 利用 1982 年全国标准人口^[4]计算某厂放射组职工的全死因标化死亡率。

利用表 2-2 数据按式(2-1)计算:

$$p' = \frac{\sum N_i p_i}{N} = \frac{175.79}{49012} \times 10^{-5} = 358.67 \times 10^{-5}$$

按式(2-2)计算:

$$p' = \sum W_i p_i = 358.74 \times 10^{-5}$$

两种算法结果基本相同。

在职业流行病学调查中有时遇到下述情况:被标化组低年龄段尚未到达癌症高发时间,高年龄段又因观察人数过少,年龄别死亡率波动太大,甚至某些年龄组死亡数为零,结果无法计算年龄别死亡率,这时可以考虑不用直接法标化,而用间接法标化。

间接法:【例 2-2】 用 1973—1975 年全国小城市男性全部恶性肿瘤死亡率为标准^[5]对某厂男性放射组职工的癌症死亡率进行间接标化:

表 2-2 放射组职工全死因标化死亡率直接标化计算例

年龄组 (岁)	1982 年全国标准人口		放射组职工		按比例分配 $W_i P_i \times 10^{-5}$
	人口数 N_i	构成比 (%) W_i	死亡率 10^{-5} P	预期死亡数 $N_i P_i$	
20-	7403	15.10	72.78	5.39	10.99
25	9224	18.82	73.14	6.75	13.76
30-	7272	14.84	97.23	7.07	14.43
35	5400	11.02	150.62	8.13	16.60
40-	4820	9.83	214.19	10.32	21.05
45	4718	9.63	214.94	10.14	20.70
50	4069	8.30	585.44	23.82	48.59
55-	3378	6.89	840.34	28.39	57.90
60--64	2728	5.57	2777.78	75.78	154.72
合 计	49012	100.00	193.26	175.79	358.74

表 2-3 放射组男性职工(1971—1985 年)癌症死亡率间接标化计算例

年龄组 (岁)	1973—1975 年全国小 城市恶性肿瘤死亡率 ($\times 10^{-5}$) P_i	放射组职工		
		人年数 n_i	实际死亡数 m_i	预期死亡数 $E_i = n_i P_i$
20	9.91	1086	0	0.11
25	14.61	4622	0	0.68
30	24.01	8694	2	2.09
35	50.43	12056	6	6.08
40	86.53	10168	10	8.80
45	156.30	6632	11	10.36
50	245.27	2465	8	6.05
55	396.46	650	3	2.58
60--64	573.07	172	3	0.98
合 计	P	46545	43	37.73

$$\text{标准化癌亡率 } p' = \frac{m}{\sum n_i P_i} \times P = \frac{43}{37.73} \times P = 1.14P$$

从计算结果可知,间接标化法存在标准率(P)的年龄段选择问题。通常得到的全国(或某地区)居民的死亡率是全年龄段死亡率(0岁组到80岁及其以上组),而职业流行病学的观察人群一般是截缩年龄段(例如20—60岁),所以应该使用相同截缩年龄段的死亡率计算标化率。假如不能提供可供使用的截缩率只能说放射组癌症标化死亡率为标准人群的1.14倍。数值1.14是职业流行病学中最常使用的指标SMR(见式2-5)。

2.1.3 标化死亡比(SMR)

标化死亡比(SMR)是实际死亡数 m 与利用间接标化法计算得到的预期死亡数 E 即 $(\sum n_i P_i)$ 的比值。 $SMR = m / (\sum n_i P_i) = m / E$ 。

2.1.3.1 SMR 的显著性检验(95%置信区间) 可以根据死亡例数的大小采用不同的检验方法。

当 $m \leq 50$ 时,查附表“泊松 Poisson 分布 λ 的置信区间表”,得出 95%的置信区间 $\lambda_L - \lambda_U$,按式(2-7)计算 SMR 置信区间的上下限($SMR_F - SMR_U$)

$$SMR_F = \frac{\lambda_L}{E}; \quad SMR_U = \frac{\lambda_U}{E} \quad (2-7)$$

【例 2-3】 某厂放射组女性职工 1971—1985 年恶性肿瘤实际死亡 6 例 (m),按同期全国女性小城市癌亡率为标准计算得到预期癌死亡 4.47 例 (E),求 SMR 及其 95%置信区间。

解: $SMR = m/E = 6/4.47 = 1.34$

查附表 1,当 $m = 6$ 时,泊松(Poisson)分布的总体均数 λ 的 95%置信区间 $\lambda_L - \lambda_U$ 为 2.2—13.1,所以按式(2-7)

$$SMR_F = \frac{\lambda_L}{E} = \frac{2.2}{4.47} = 0.49; \quad SMR_U = \frac{\lambda_U}{E} = \frac{13.1}{4.47} = 2.93$$

当 $m > 50$ 时,用式(2-8)求 SMR 的 95%可信度:

$$SMR \pm 1.96 \sqrt{(m/E^2)} \quad (2-8)$$

【例 2-4】 某工厂对照组男性职工 1971—1985 年非癌症疾病死亡例数 $m = 140$,按同期全国男性非癌症疾病死亡率为标准算得预期死亡数 $E = 120.54$,求 SMR 及其 95%置信区间。

解: $SMR = m/E = 140/120.54 = 1.16$

按式(2-8)求 95%置信区间 $SMR_L - SMR_U$:

$$1.16 \pm 1.96 \sqrt{140/(120.54)^2} = 0.97 \sim 1.35$$

更方便的方法是不论 m 大小,都可以从附表 2“泊松(Poisson)分布中实际值与预期值之比(SMR)的置信区间(95%)”得到 SMR_L 和 SMR_U ,然后按式(2-9)计算 SMR 的置信区间 SMR_F 和 SMR_U 。

$$SMR_F = SMR/SMR_U, \quad SMR_U = SMR/SMR_L \quad (2-9)$$

【例 2-5】 试用本法计算例 2-3 及 2-4 的 SMR95%置信区间。

解: 例 2-3 中 $m = 6, E = 4.47, SMR = 1.34$ 。查附表 2,当 $m = 6$ 时,SMR95%的可信区间 $SMR_L = 0.459, SMR_U = 2.73$,故按式(2-9) $SMR_F = 1.34/2.73 = 0.49, SMR_U = 1.34/0.459 = 2.92$ 。

例 2-4 中 $m = 140, E = 120.54, SMR = 1.16$ 查附表 2,当 $m = 140$ 时,SMR 95%的置信区间 $SMR_L = 0.847, SMR_U = 1.189$,故按式(2-9) $SMR_F = 1.16/1.189 = 0.98, SMR_U = 1.16/0.847 = 1.37$ 。

上述两例的结果均与用式(2-7)及(2-8)计算的结果基本一致。

样本 SMR 与 1 的差别的显著性检验:

SMR 与 1 的差别显著性检验的原理与计算 SMR 可信区间相同。为方便计不论实际数 m 大小,一律查附表 2,如果算出的样本 SMR 在表中总体 SMR 可信区间的范围内,则样本 SMR 无显著意义,反之则有显著意义。如例 2-3 中 $m = 6, E = 4.47, SMR = 1.34$,由 $m = 6$ 查附表 2 中的 SMR 可信区间为 $0.459 - 2.73$,而 1.34 在此范围内,所以它与 1 的差别无显著意义。同理,例 2-4 中的 $SMR = 1.16$ 也无显著意义($m = 140$ 时的 SMR 置信区间为 $0.847 - 1.189$)。

2.1.3.2 计算 SMR 所用标准率的时间校正问题 中国核工业辐射流行病学调查的起始年份为 1971—1985 年,历时 15 年,该期间我国癌症死亡率不断上升。因此,计算 SMR 的理想方法是用该期间历年死亡率进行标化。在得不到历年死亡率时,可以假定该期间癌症死亡率匀速上升,因此可以用观察期间中点(1978 年)时的率代表 15 年间的平均值,计算 SMR。

我国癌亡率的最早资料是 1973—1975 年全国回顾性调查^[5],可以把它看成是 1974 年的死亡率。此后的资料是 1981 年的代表性调查,提供了全国 16 个城市(多数为大城市)的癌亡率,但是缺乏年龄别死亡专率。为了进行粗略的时间校正,首先对 1974 年全国大城市癌亡率与 1981 年大城市癌亡率(均为男女合计)进行比较,求出该 7 年间的年平均增长速度(v),再以 1974 年死亡率为基数推算 4 年后(1978 年)的增长倍数,得到时间校正系数 T ,用来对利用 1974 年率得到的预期数(E)进行校正。校正后的预期数 $E' = ET$,校正后的 $SMR = m/E' = m/ET$ 。由于 1974—1981 年间大城市的癌症增长速度与农村相似,因此上述时间校正系数是有代表性的。兹以全部癌症死亡为例,演示计算过程如下:

设:1974 年癌亡率为 a_0 ,1975 年为 $a_1 \dots$,1981 年癌亡率为 a_n ,则 n 年(本例 $n = 7$)内的平均增长速度 v 用式(2-10)计算:

$$v = \sqrt[n]{a_n/a_0} - 1 \quad (2-10)$$

本例大城市男女合计全部恶性肿瘤死亡率 1974 年为 79.92×10^{-5} ,1981 年为 114.65×10^{-5} ,则 7 年内平均增长速度为

$$v = \sqrt[7]{114.65/79.92} - 1 = 0.0529 \quad (5.29\%)$$

以 a_0 为基数,经 x 年后的增加倍数用式(2-11)计算:

$$T = (1 + v)^x \quad (2-11)$$

本例从 1974 年到 1978 年,经过 4 年($x = 4$)

$$\therefore T = (1 + 0.0529)^4 = 1.229$$

可以用同样的方法算出胃、肺、肝等 9 种主要癌症的修正系数,结果列于表 2-4。故假如利用 1973—1975 年(即 1974 年)死亡率求得的全部癌症预期死亡数为 1.0,则修正后值为 1.229,或将求得的 SMR 除以 1.229 得到时间修正后的 SMR。

在计算堆工后处理厂和核科学研究单位的 SMR 时考虑到这些单位的生活环境与国内中小城市更相近似,故对全部死亡和癌症死亡都使用 1978 年全国中小城市率进行标化而不做时间修正。

2.1.4 辐射致癌危险系数

辐射流行病学研究希望知道受照人群的癌症危险是否因所受照射而增加,假如增加,则要求知道单位剂量照射引起的危险增加值,即危险系数(旧称危险度),它可以用绝对危险(absolute risk, AR)和相对危险(relative risk, RR)表示。