

# 正确认识核与辐射

周启甫

2011年3月11日14时46分(北京时间13时46分),日本本州东海岸附近海域发生了里氏9.0级地震,并在随后引发强烈的海啸,使日本东北部沿海地区遭受巨大的破坏:大量房屋受损,化工厂起火,等等。3月12日福岛第一核电站一号机组一声爆炸,使全世界的目光几乎都集中在日本核电站的安全,笼罩在核泄漏影响的恐怖之中。一时间,各种媒体长时间聚焦在福岛第一核电站狭小的区域。随着事态的不断发展,人们通过各种途径了解有关核与辐射的应用、辐射危害和辐射防护等方面的知识。本文试图通过对电离辐射的发现和应用、电离辐射的生物效应和辐射防护的基本原理等方面的介绍,使人们能够准确地认识电离辐射。

## 一、电离辐射的发现

电离辐射是广泛存在于宇宙和人类生存环境中的一种物理现象,伴随地球的形成就已经存在。但由于电离辐射看不见、摸不着,长期以来,人们对它缺乏足够的认识。直到1895年,德国物理学家伦琴发现X射线(一种未知的、肉眼看不见的、具有较高能量、能够穿透物质并使胶片感光的电磁波),以及随后的物理学家贝克勒尔和居里夫人相继在矿石中提取出天然存在的放射性核素铀、钋等,使人类打开了认识和应用电离辐射的大门。

## 二、我们生活中的电离辐射

人类每时每刻都在接受来自各种电离辐射源的辐射照射。辐射照射既来源于天然辐射源(宇宙射线和天然存在的放射性核素),也来源于人工辐射源(由核武器试验、核能生产、核技术应用、核事故以及电离辐射在医学诊断、治疗中的应用等人类实践活动)。长期以来,广大公众更为关注的是人工辐射源对人类的照射,但实际上,不论是全世界还是我国公众所接受的辐射照射中,绝大部分来源于天然辐射源。来自天然辐射源的照射不仅是持续的,不可避免的,而且是人类所受辐射照射的主要来源(图1)。

天然辐射源包括宇宙射线、宇生放射性核素和天然存在的放射性核素。宇宙射线是来自外层空间射向地球表面的高能带电粒子(主要是质子和 $\alpha$ 粒

子,以及某些更重的原子核);宇生放射性核素,严格地讲,是指宇宙射线与大气中的原子核相互作用产生的较轻放射性核素(如图2中的 $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 和 $^{14}\text{C}$ 等),但是通常也包括由此产生的次级粒子(例如中子、电子和 $\mu$ 子等)以及电磁辐射;天然放射性核素是地球上原有的、环境(水、大气、土壤等)中到处存在(包括人体内)的放射性核素,主要有铀、钍、镭、钾等。

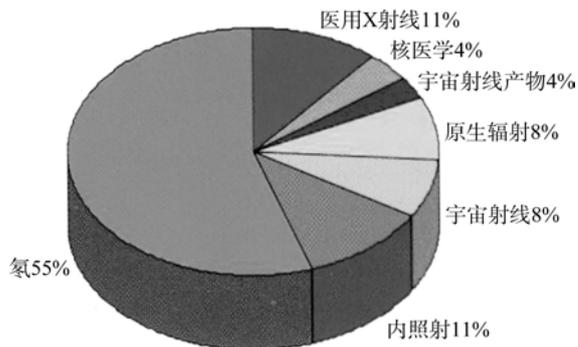


图1 人类接受电离辐射照射的主要来源及所占比例

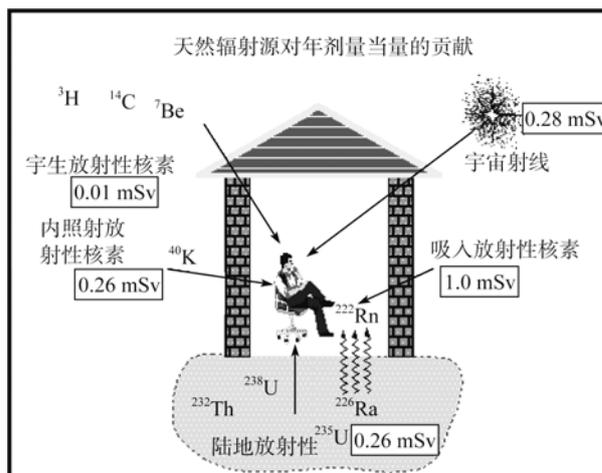


图2 人类接受天然辐射照射的示意图

天然辐射源对人既产生外照射(辐射源在人体外,发出的射线对人体的照射),又产生内照射(放射性核素进入人体内所造成的照射)。全世界人均受照剂量大约为2.4mSv/a(辐射剂量单位),其中,氡的吸入内照射剂量约为人类所接受的天然辐射源照射总剂量的一半。地球上不同地区的天然辐射水平

存在一定的差异，有少数地区明显偏高，这就是所谓的高本底地区。例如巴西的 Guarapari、印度的 Kerala 和 Madras、埃及的尼罗河三角洲等，我国的河北计马店，福建的鬼头山、广东阳江、四川降礼温泉等地区。

人类的实践活动也会改变天然辐射的照射水平。只有少数实践（如水面上盖房子）可能会减少天然辐射的照射，但更多的实践（如化石燃料燃烧、磷肥生产和施用、高空飞行及地下溶洞的旅游等）则增加了天然辐射源对人的辐射照射（图 3）。

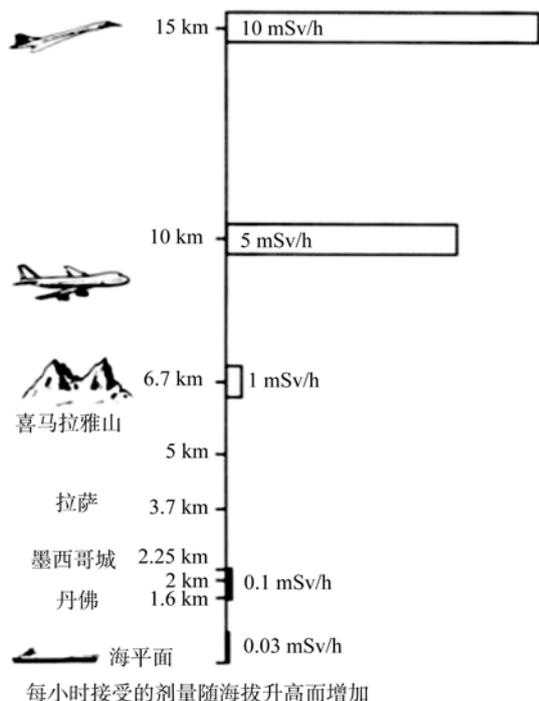


图 3 不同海拔高度的天然辐射水平

自然界中天然存在的放射性核素种类不是很多，远远不能满足实际应用的需要。目前我们实践中应用的放射性核素绝大多数是通过人工的方法（反应堆和加速器）生产出来的，如  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等。随着电离辐射应用的领域不断扩大，人类在生产和生活中或多或少要接受一定的人工辐射源照射，如医疗、工业、科研等领域，以及这些应用活动中向环境释放的少量放射性核素，通过外照射（空气中的放射性核素和放射性核素沉降到地面）和内照射（通过吸入和食物链进入人体）对人体造成照射（图 4）。

### 三、电离辐射的主要应用领域

电离辐射物理现象一经发现之后，便很快得到

实际应用。最早的应用主要在医疗和科研领域，利用 X 射线透视和拍片是临床上的诊断手段。由于天然存在的放射性核素种类较少，同时这些天然放射性核素提取较为困难，因此，早期人们对放射性同位素的应用也不是很多。直到 1934 年，人工生产放射性同位素的技术被发明之后，对放射性同位素的应用才真正走向普及，广泛应用于医疗、科研、工业、农业等众多领域。

1939 年，哈恩和斯特拉斯曼研究发现某些原子核在中子的轰击下可以发生核裂变现象；1942 年，费米在美国芝加哥大学建造了世界上第一座人工核反应堆，实现了核裂变的链式反应；1945 年美国研制成功并爆炸了第一颗原子弹（图 5）。除核裂变外，人们还发现小的原子核也可以发生聚变，并产生更多的能量，1952 年，世界上第一颗氢弹（或中子弹）研制成功。

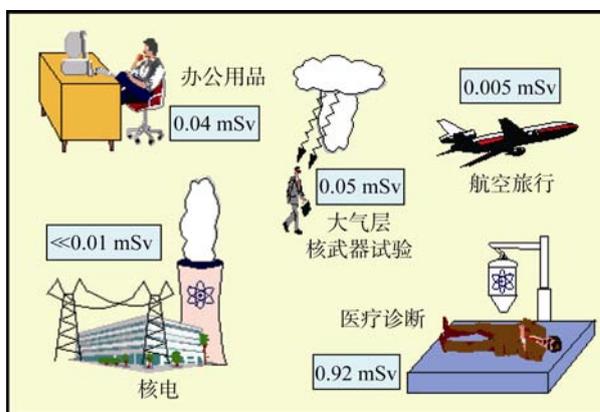


图 4 人类接受人工辐射源照射的示意图



美国第一颗原子弹（胖男孩） 原子弹爆炸形成的蘑菇云

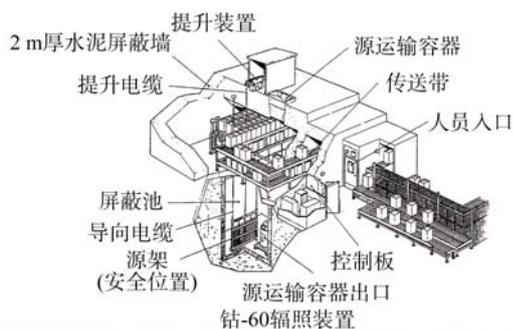
图 5

核裂变除了军事上的核武器应用之外，也广泛用于科研、核能生产等民用领域。1954 年，世界上第一座核电站建成并投产，从此开始了人类利用核能的历史，到目前为止，超过 30 个国家拥有核电站，核电机组总数近 500 个，美国、法国、日本、俄罗斯和英国是拥有核电机组最多的 5 个国家，其中美国超过了 100 个（图 6）。



图6 我国第一座核电站——秦山核电站一期（300MW）于1991年12月15日并网发电

除核能外，电离辐射还广泛应用于工农业生产、医疗、科研等各个领域，为我们的经济发展作出了巨大的贡献。据统计，到2010年底，我国有近2万家单位使用各种放射源，在用放射源总数超过13万枚，同时还有20多万台各种射线装置（图7）。



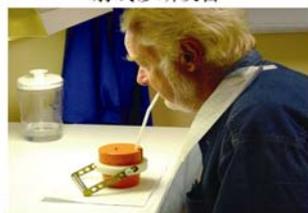
γ射线探测设备



X射线诊断设备



远距离放射治疗设备



病人口服碘-131, 治疗甲状腺疾病

图7

#### 四、辐射损伤的认识过程及辐射损伤机理

在电离辐射被发现和在最初的应用时期，人们只知道它的有益的一面，而对电离辐射有害的一面缺乏相应的了解，为此也付出了沉重的代价。到目前为止，人们对电离辐射的辐射损伤认识经历了三个时期：早期、中期和近期。

辐射损伤的早期认识时期是从1895年X射线发现到20世纪30年代（职业性辐射损伤时期），大量参与X射线诊断设备研制人员，应用X射线设备的技术人员，以及天然放射性核素开采和应用人员，由于对电离辐射的危害一点也不了解，常常利用自己的身体做实验，或在工作中没有采取必要的防护措施，使大量从事X射线研制和应用人员，以及从事放射性物质开发研究的科学家、铀矿工人、用含镭夜光涂料的操作女工遭受较大剂量的射线照射，导致外照射引起急性体表损伤，或吸入氡及氡子体的内照射引起肺癌，或<sup>226</sup>Ra经食道进入人体的内照射引起骨肿瘤等。

辐射损伤的中期认识时期是从20世纪30年代到60年代（有称为放射诊断和治疗损伤时期），一些发达国家的医学界把放射诊断和治疗看作是时髦的诊断和治疗手段，缺乏对电离辐射远期效应的认识，病人由于多次检查和治疗，接受较高累积剂量照射而诱发白血病、骨肿瘤、肝癌等恶性肿瘤。受影响较大的病人有：1935~1954年，英国应用X射线局部照射治疗强直性脊椎炎的病人；1944~1951年，在德国应用<sup>224</sup>Ra注射治疗强直性脊椎炎，关节炎及结核病的病人；1928~1954年，在一些国家中应用钍造影剂作为肝、脾、血管等软组织的X射线造影的病人等。

近期辐射损伤认识时期又称流行病学调查所见的辐射损伤时期。由于人类对辐射危害的认识逐渐深化，防护知识的增长和防护措施的进步，在利用电离辐射的同时，采取了相应的防护措施，从而使早期的职业性辐射损伤，或严重的远期辐射效应等已极为罕见。通过严格地限制辐射工作人员在工作中所接受的辐射照射剂量，不断降低病人在诊断和治疗时的受照剂量等，使辐射照射诱发的恶性肿瘤得以避免。除事故外，只能用大群体的流行病学调查方法，才能发现辐射损伤或危害的极微弱增加。

到目前为止，人们对电离辐射引起机体的损伤原理还不是完全清楚，但被普遍接受和认同的一种

理论是：电离辐射通过直接或间接的作用，导致机体的细胞中生物大分子(主要是 DNA)的结构破坏，机体在修复过程中出现错误修复，从而使细胞死亡或遗传信息的改变导致细胞变异。

人体细胞核中的 DNA 是由两条核苷酸链组成，具有一定功能作用的一段核苷酸序列称为基因，特定的序列构成特定的遗传信息，作为密码指导特定蛋白质的合成，影响机体的结构与功能。进入人体的射线可以直接与 DNA 发生作用，损伤 DNA 链，称为直接作用(或物理作用)，也可以是通过水分子受照后产生的自由基损伤 DNA，称为间接作用(化学作用)(图 8)。

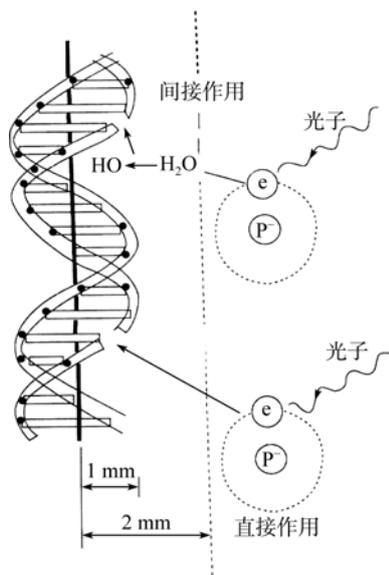


图 8 进入人体的射线与 DNA 发生作用

射线对 DNA 的直接作用和间接作用，可导致 DNA 的单链或双链断裂。如果是单链断裂，则机体在修复过程中按照碱基配对的原则，依据完好的单链作为模板，可以实现完整修复，不会引起功能改变；如果是双链断裂，则在修复过程中失去模板，可能会出现错误修复(图 9，受照后，显微镜下可见的人体淋巴细胞染色体畸变)，从而使细胞的遗传信息发生改变，导致细胞死亡或细胞变异。

射线对 DNA 的直接作用和间接作用，可导致 DNA 的单链或双链断裂。如果是单链断裂，则机体在修复过程中按照碱基配对的原则，依据完好的单链作为模板，可以实现完整修复，不会引起功能改变；如果是双链断裂，则在修复过程中失去模板，可能会出现错误修复(图 9，受照后，显微镜下可见的人体淋巴细胞染色体畸变)，从而使细胞的遗传信息发生改变，导致细胞死亡或细胞变异。

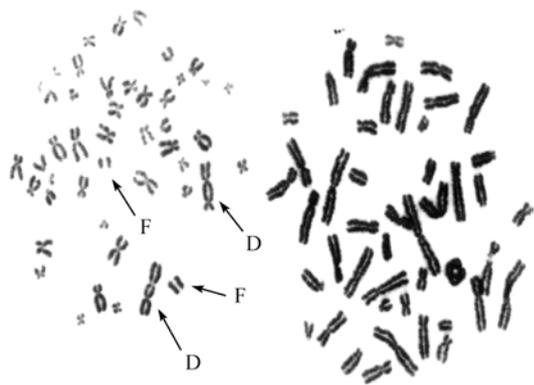


图 9 辐射导致人体淋巴细胞染色体畸变  
左边是畸变的染色体，D 和 F 都是畸变。右边是正常的人体染色体在显微镜下的图像

辐射引起的 DNA 分子变化可以导致细胞死亡。大剂量照射时一些辐射敏感细胞，如淋巴细胞等，可因细胞核遭到破坏在细胞分裂间期很快死亡，称为间期死亡；另外一些受照细胞的死亡是细胞分裂受到抑制和失去增殖能力的结果，称为增殖性死亡，在照射后数天或数月之后出现。如果大量死亡的细胞是发生在体细胞(如上皮细胞等)，则会导致功能障碍(如皮肤的放射性烧伤)；如果大量死亡的细胞发生在遗传细胞(如精子等)，则会导致不孕、不育等。这种由于细胞死亡所导致的机体功能上的障碍，称之为确定性效应；确定性效应的发生需要一定的剂量照射才能发生——我们称之为剂量阈值，小于该剂量阈值的照射，机体通过自我修复功能，不会出现临床症状，超过这一阈值，大量的细胞死亡，超出了机体的自我修复能力，从而导致临床症状的出现，并且，确定性效应的严重程度与受照剂量成正比，剂量越大，症状越重。

假如受照后 DNA 的损害没有使细胞死亡，出现错误修复并保存继续增殖的能力，结果会把错误的信息传给后代细胞，使之发生细胞变异，称为细胞转化。如果变异的细胞是体细胞(如淋巴细胞等)，经过不断演变可以导致恶性转化，最后形成癌症；如果变异的细胞是遗传细胞(如精子等)，则会导致遗传效应(子代的先天性疾病等)。这种细胞变异导致的恶性疾病或遗传疾病的发生，我们称之为随机性效应。随机性效应没有剂量阈值——只要接受电离辐射的照射，就有可能导致随机性效应的发生，并且随机性效应的发生率是与剂量成正比的，受照剂量越大，随机性效应的发生率越高，但其严重程度与剂量无关。

## 五、辐射防护的基本要求和办法

随着电离辐射应用的不断增加和人们对辐射损伤认识的不断深入，20 世纪中叶开始出现了一个新的学科——辐射防护学。辐射防护的目的是在保证不对伴随辐射照射的有益实践造成过度限制的情况下，为人类提供合适的保护。具体来讲，就是要防止有害的确定性效应，并限制随机性效应的发生率，使之达到被认为可以接受的水平。

辐射防护的基本原则包括实践的正当性、防护与安全的最优化、剂量限值与约束。正当性是前提，剂量限值与约束是上限，最优化则是辐射防护的目标，也是辐射防护中需要研究的主要问题。

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的要求,实践的正当性是指:“对于一项实践,只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后,其对受照个人和社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时,该实践才是正当的”。实践的正当性涉及社会、经济和许多其他有关因素,特别是对于一些涉及面很宽的实践,常常难于仅从辐射防护的角度做出判断。例如一个核电站的选址涉及地质、地震、电网和生态等因素,以及社会和经济等各方面的问题,辐射防护仅是诸多因素中的一个,很难仅从辐射防护的正当性做出判断。但对一些与人体健康直接相关的问题,如医疗照射和在日用商品或产品中添加放射性物质等实践,辐射防护正当性的判断可能是决定性因素。对医疗照射正当性的判断可分两个层次。第一层次是指对某一诊断或治疗方法(例如胸部照相),患者所受照射大小的正当性判断,通常称为确定放射方法总的正当性。其目的在于判断放射方法是否合理,并给患者提供必要的知识。第二层次是指对某个患者实施放射方法时的正当性判断,即对具体的患者判断是否好处多于危害。应该定期对放射方法进行审评,使其在达到医学要求下尽可能减小患者所受剂量。在诊断的情况下,这意味减小不必要的照射;在治疗的情况下,要求对治疗的部位达到所需实施的剂量,并避免健康组织受到不必要的照射。

辐射防护最优化是辐射防护体系中的一条重要基本原则。由于辐射健康效应存在随机效应,在辐射防护中假设辐射效应是线性无阈的;尽管现在尚没有证据表明,在低于天然本底辐射水平下辐射存在可察觉的危害,但也没有充分的事实说明不存在危害。现代放射生物效应的结论是:尚没有发现比线性无阈模式描述辐射随机效应更好的模式,尽管已经发现在某些情况下存在阈值。辐射健康效应的这种性质使得在辐射防护中仅采用剂量限值和约束是不充分的,还必须遵循最优化的原则以提高防护水平。

剂量限值是指在正常情况下为了保护个人而制定的防护水平,即与人相关的。剂量约束是针对确定的辐射源项制定的保护个人的剂量水平,即与辐射源相关的。约束代表必须采取行动的剂量水平,它一定是正当的。约束是最优化的上限。在所有情况下均应根据最优化的要求达到最优化的防护水

平。我国现行辐射防护标准与国际标准是一致的。其主要限值和约束值是:对职业照射,连续5年的年平均有效剂量为20 mSv,对公众照射,关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值年有效剂量为1 mSv;对持续照射情况下的行动水平住宅中的 $^{222}\text{Rn}$ (氡222)浓度为200~400 Bq/m<sup>3</sup>(贝克/立方米),工作场所中 $^{222}\text{Rn}$ 浓度为500~1000Bq/m<sup>3</sup>。

## 六、小结

电离辐射是存在于我们身边的一种物理现象,生活在地球上的每个人时刻都在接受天然和人工电离辐射的照射。尽管人类对它的认识始于一百多年前,但一经发现,人们便广泛地将它应用于我们的医疗、科研、国防、能源和工农业生产等各个领域,为我们的经济和生活带来了巨大效益,从某种意义上说,在可遇见的未来,我们人类的生活还离不开电离辐射。

人类在利用电离辐射的同时,也曾经由于对它的危害缺乏了解、盲目使用而带来血的教训,然而,随着人类对它的规律的认识不断加深,电离辐射的危害完全是可控、可防的。通过对辐射防护三原则的严格遵守,可以使我们在充分利用电离辐射、造福人类的同时,将电离辐射的危害减小到最小。

(卫生部工业卫生实验所 100088)



## 科苑快讯

### 酒引发超导电性

在谈论酗酒时,酒常常与物理学有关。但现在酒似乎对某些超导体有直接作用。日本筑波的国家材料科学研究所的 Keita Deguchi 与他的同事表明,热的酒精饮料对硫化碲铁( Iron Tellurium Sulphide)材料能引发超导电性。

啤酒,传统的日本的低度和高度米酒,威士忌酒和白葡萄酒都有效应,但用红葡萄酒加热24小时,获得最好的效果。有关的机制尚不得而知。也许,酒对材料提供了氧原子,但纯的乙醇与水的混合以及普通饮料则不起作用。把材料曝露在空气中几个月,也有效应。这与酒精饮料处理材料十分不同。由于今年是超导电性发现100周年纪念,所以,值得用香槟酒作进一步研究。

(何景棠译自2011年5月《欧洲核子研究中心快报》)