

浅谈电离辐射生物效应研究过程中模型的建立及其应用

陈天逸

电离辐射的生物效应是当前辐射防护领域的研究热点之一。人们对电离辐射对人类影响的机理、效应、范围、尺度等认识得越明确，在有效避免、防范、减轻电离辐射对人类的损害等方面就可以做到更有力的放矢。那么该如何获得电离辐射生物效应的相关知识呢？单纯地依靠实验是不够的，因为大部分相关实验都是在细胞层面进行的，它们获得的相关结果不一定能够直接应用到实践层面，而且仅仅通过对实验现象的总结，也不足以有力推动人们对电离辐射影响的进一步探究与认识。单纯地从理论上分析又过于复杂，因为这其中涉及到辐射的原理、射线与生物的作用机制、生物的生命活动等诸多方面的理论知识。因此人们选择了一个可行而有效的办法来探究这一问题，那就是建立模型。在相关理论知识的基础上，通过建立与实验结果相符的数学模型，给出电离辐射对生物造成影响的解释，并且利用这些模型预测实验现象，启发研究方向，指导人们实践。

一些理论基础

模型通常是建立在已有知识基础之上的，想要建立合理的关于电离辐射生物效应的模拟模型，需要了解一些电离辐射的相关知识。现分别叙述如下：

首先说说电离辐射与周围物质的作用机制。所谓电离辐射，就是具有使与其作用的介质原子发生电离能力的辐射。常见的电离辐射有 α 射线、 β 射线、 γ 射线、X射线等，当然也可能是质子、中子或一些其他粒子（如裂变产生的粒子、加速器出射的粒子、宇宙射线等）。它们的能量通常比较高，运动速度比较快，与物质的作用通常在原子尺度上。它们遇到物质的电子和原子核，会发生复杂的相互作用并损失能量。不同粒子通过不同途径与媒介发生相互作用并损失能量，使媒介发生电离。

运动的带电粒子，如 α 粒子（即氦核）、质子、电子等，主要通过与其外界的库仑相互作用来损失能量。事实上如果它们的能量足够高，它们也可能与

介质中的原子发生核相互作用，但是发生核相互作用的概率要比发生库仑相互作用的概率小约 10 个数量级，因此往往可以忽略。带电粒子与周围介质中的原子发生的库仑相互作用主要有：带电粒子与核外电子间的弹性和非弹性碰撞以及带电粒子与介质中原子核的弹性和非弹性碰撞。其中带电粒子与核外电子的非弹性碰撞，往往会给核外电子带来足以脱离原子核束缚的能量，发生电离。

与带电粒子不同， γ 射线、X射线等不同能量的光子与物质相互作用主要通过光电效应、康普顿散射和正负电子对产生这三种机制。尽管 γ 辐射不能直接使介质分子电离，但可通过其在介质中产生的自由电子使介质分子电离。

至于中子则主要通过弹性碰撞、非弹性碰撞、中子捕获及引起裂变反应等方式与介质发生能量交换。哪种方式起主要作用则是由中子的能量决定的。

在涉及电离辐射的生物效应层面上，我们主要关注的是粒子的线性能量转移（linear energy transfer, LET），即粒子在单位长度路径上损失的平均能量，它主要由粒子的种类和能量决定。通常像 γ 射线、X射线等不易引起电离的辐射，LET值比较低，这是因为它们与介质发生相互作用几率比较小，损失能量的机会也就比较少，称它们为低LET辐射。而带电粒子则通常能够在它们的路径中产生较强的电离从而释放能量，因此称高LET辐射。LET一方面显示出了粒子把能量传递给别的粒子的能力，一方面LET越大，粒子的穿透能力往往越低。

那么电离辐射又是如何与生物发生相互作用的呢？电离辐射主要通过直接或间接与生物大分子发生作用，使之发生电离和激发，从而引起生物体结构和功能的改变。直接作用指电离辐射直接同生物大分子（如DNA、RNA等）发生相互作用使之电离或激发，导致分子结构改变和生物活性丧失。而间接作用则主要指电离辐射同生物体内的水分子发生作用，产生一些如氢自由基、羟自由基、过氧化

氢等具有高反应活性的物质，它们作用于生物大分子，导致这些分子的结构和功能变化。

两个数学模型

目前在研究电离辐射与细胞作用机制方面主要采用径迹结构模型，该模型应用于电离辐射对 DNA 分子产生影响的尺度。它通过描述电离辐射与水的相互作用和电离辐射与 DNA 分子，基团与 DNA 分子的相互作用来研究入射粒子对 DNA 分子产生的影响。利用这个模型进行的模拟试验可以对入射粒子进行路径跟踪，了解到它与介质发生的每一次相互作用，并且对重要的相互作用产物进行继续跟踪，最终定量获得一定能量、一定剂量的电离辐射对 DNA 产生的影响。

建立一个可靠、有效的径迹结构模型首先需要充分了解粒子与水分子、与 DNA 分子的作用过程。以带电粒子为例，在通常境况下，径迹结构模型从带电粒子使水分子电离并产生次级电子开始，跟踪带电粒子和次级电子与水分子相互作用的一系列过程，包括最初的电离和激发产生的基团离子、亚激发态电子和激发态水分子的过程，随之发生的一系列化学反应产生氢自由基、羟自由基、过氧化氢等具有高反应活性的物质的过程，以及这些高反应活性物质最终与 DNA 相互作用的过程等。对这些过程认识得越清晰、模拟得越准确，越有利于获得贴近真实的模拟试验结果。

另外，试验数据也是不可或缺的。第一，人们通过它们了解到上述的一系列过程；第二，它们为模型的建立提供了相关参数，如各种反应发生的条件和概率、破坏 DNA 结构需要的最小能量等；第三，它们可以用来验证模型的准确性。

径迹结构模型允许人们对事件进行逐步跟踪，在一些合理的近似和假设下（例如带电粒子与介质的作用几乎不受其他粒子影响等）可以通过蒙特卡罗方法利用径迹结构模型进行计算机模拟。很多这方面的相关的研究已取得了巨大成果。比如通过模拟试验，人们了解到了高 LET 辐射和低 LET 辐射在 DNA 尺度上作用的不同：高 LET 粒子更容易产生复杂的在 DNA 双链上的损伤；而低 LET 辐射则容易产生简单的，仅位于单链上的损伤，进而通过 DNA 依照模板进行修复的相关知识，人们很容易认识到高 LET 粒子造成的损伤更难以修复，或者说更容易引起修复过程中的错误。

径迹结构模型提供了可行的方法去研究不同能量、不同性质的电离辐射对细胞的作用，有助于定量地了解各种电离辐射的危险程度，并且可以预见不同电离辐射可能给生物带来的影响，从而在推动相关理论的发展以及提高人们对电离辐射危险性的估计能力等方面发挥了巨大作用。

径迹结构模型是人们在细胞尺度认识、估计电离辐射伤害的手段，靶模型则从细胞集团的尺度上提供给人们研究电离辐射伤害的方法。

靶模型的最初建立是基于对不同剂量下细胞存活曲线的研究。它可以较准确地描述不同剂量照射下细胞存活率等方面的问题。常用的靶模型有单击单靶模型、单击多靶模型、多击多靶模型等。所谓 n 击 m 靶模型是指每个细胞有 m 个辐射敏感区域，称为靶区域。当辐射 n 次穿过某个靶后，这个靶就会失活。当一个细胞内所有靶都失活后，这个细胞便死亡。可以看出这是一个思想比较朴素的模型，它的建立更多的是基于试验研究的结果而不是理论的分析。因为提出的比较早（事实上靶模型的提出早于径迹结构模型，出于从微观到宏观的考虑将关于靶模型的介绍放在后面），它的一些假设并不符合现代生物学的理论。尽管如此，由于靶模型可以较好地预言试验结果，它在帮助人们估计不同剂量的辐射造成的危害等方面，还是有巨大作用的。

从上面对两种数学模型的介绍、分析可以看出，在理论机制方面，径迹结构模型有着巨大的优越性，而在简单易行和细胞集团尺度的计量分析层面，靶模型又是一个很好的选择。靶模型的不足在于它缺乏理论依据，对于不同情况（不同种类的电离辐射、不同的能量、不同细胞）需要选择不同的靶系统。可以想象，如果把径迹结构模型与靶模型结合起来，利用径迹结构模型优越的理论分析能力为靶模型提供理论基础，对于不同粒子、不同细胞，利用径迹结构模型获得合理的系统参数，给靶模型以进行对剂量效应的估计，则有可能获得关于不同电离辐射对不同细胞集团的剂量效应的更科学、更准确的描述。

此外可以想象，人们研究电离辐射生物效应的目标之一是了解电离辐射对人类的伤害情况，而人的复杂程度远在细胞集团层次之上。这就提出了对能够合理描述电离辐射与更复杂的生物结构相互作



浅谈生活中的电磁污染及防护

霍海波

随着人们生活水平的日益提高，电视、电脑、微波炉、

电冰箱、手机等家用电器越来越普及，我们在享受它们带来的快乐和便捷的同时，也在受着它们所产生的电磁波辐射给我们带来的伤害。但由于电磁波看不见，摸不着，感觉不到，且其伤害是缓慢、隐性的，所以尚未引起人们的广泛注意。本文简要介绍了电子产品的辐射分类及各自的辐射值大小，并给出了相应的防护措施。

电子产品的辐射主要分为电离辐射和非电离辐射两种，非电离辐射则主要包括高低频电磁辐射和光辐射，光辐射又包括了紫外线、红外线和可见光三部分。在我们工作和生活的环境中存在着各种辐射，首先了解一下电离辐射，它是一种有足够能量使电子离开原子所产生的辐射， α 粒子、 β 粒子、质子等带电电荷可以直接引起物质电离，X射线、 γ 粒子和中子等不带电荷，但是在与物质作用时产生次级粒子从而使物质电离，所有这些现象统称电离辐射。关于电磁辐射，我们先介绍几个基本概念。凡是有电荷的地方，四周就存在着电场，即任何电荷都在自己周围的空间激发电场，而电场对于处于其中的任何其他电荷都有作用力，电荷之间的相互作用就是通过电场而进行的。磁场也是一种场，是由电荷的运动（电流）产生的，变化的磁场可以在其周围空间激发涡旋电场，变化的电场（位移电流）可以在其周围空间激发变化的磁场，电场和磁场的相互激发在空间的传播就形成了电磁波。

我们日常用的电器和通信设备，如电脑、电视、电磁灶、微波炉和手机等在使用中，电场和磁场的交互变化产生电磁波，电磁波传播过程同时也有电

磁能向外传播，这种能量以电磁波的形式通过空间传播的现象成为电磁辐射。在我们的生活空间不仅存在高频、微波频段的电磁波，同时也存在着低频电磁波，可以说电磁波无处不在、无时不有，目前电磁辐射已成为继水、空气、噪声之后的第四大环境污染，并已被联合国人类环境会议列入必须控制的污染，国际非电离性辐射保护委员会推荐的公众暴露限值为 5kV/m （工频电场）和 $100\mu\text{T}$ （工频磁场）。从世界卫生组织公布的一些家用电器的电场和磁感应强度的参考数据来看，电吹风、吸尘器、电动剃须刀、荧光灯和微波炉的工频磁场辐射较大，还有这几年走进千家万户的电磁炉，利用电磁感应产生磁致涡流从而加热食品，在其工作过程中会产生极低频电场与磁场，除此以外当然不能排除同时使用几种电器时磁场强度的累加效应，在这种情况下有可能会使辐射频带很宽和发生谐振效应（当波长与生物体的尺度成比例时）。

电磁辐射危害人体的机理主要是热效应、非热效应和积累效应等。

热效应：人体内 70% 以上是水，水分子受到电磁波辐射后相互摩擦，引起机体升温，从而影响到身体其他器官的正常工作。

非热效应：人体的器官和组织都存在微弱的电磁场，它们是稳定和有序的，一旦受到外界电磁波的干扰，处于平衡状态的微弱电磁场即遭到破坏，人体正常循环机能会遭受破坏。

累积效应：热效应和非热效应作用于人体后，对人体的伤害尚未来得及自我修复之前再次受到电磁波辐射的话，其伤害程度就会发生累积，久之会成为永久性病态或危及生命。对于长期接触电磁波辐射的群体，即使功率很小，频率很低，也会诱发意想不到的病变，应引起警惕！



用的数学模型的需求。通过这样的模型可以更定量、更具体地了解一些生物受电离辐射影响的知识，比如不同器官在不同时期受到电离辐射的不同危险程度分析，发生躯体损伤及遗传效应的概率的理论计

算，非随机效应与随机效应的定量分析等。了解这些，有利于人类更科学地看待电离辐射，更有效地避免电离辐射可能造成的伤害。

（北京大学物理学院 100871）