

# 辐射的生物学效应及应用

高原 于 玥



广义上讲,辐射是一种由辐射源发出,以电磁波或粒子的形式向外传送能量的方式。按生物学效应的不同,可将辐射分为电离辐射和非电离辐射两大类:量子能量达到  $12\text{eV}$  以上时,辐射会导致生物组织电离,从而使生物体受到较为严重的损伤,这类辐射叫做电离辐射;量子能量不足  $12\text{eV}$ ,不能使生物组织发生电离的辐射则叫做非电离辐射。

## 一、非电离辐射

非电离辐射生物学效应的强弱除取决于量子能量外,还受到功率密度、单色波还是宽频波、相干光还是非相干光、组织对辐射的吸收程度等因素的影响。一般来说,非电离辐射的波谱很宽,其量子能量的大小与发射源的频率有关,频率越高、波长越短,则辐射的量子能量越高。非电离辐射依波长的长短可分为无线电波、微波、红外线、可见光以及紫外线。下面我们将逐一论述。

**无线电波与微波辐射** 无线电波的波长范围在  $1\text{m}\sim 3\text{km}$ ,微波的波长范围在  $1\text{mm}\sim 1\text{m}$ ,其量子能量较低。

高频热处理、焊接、半导体加工、高频介质加热等工业操作中会产生高频电磁场,辐射无线电波。高强度无线电波会引起中枢神经系统和植物神经系统紊乱,使人感到头晕乏力、失眠、记忆力下降、情绪不稳定,以及副交感神经反应导致的心动过缓、低血压或血压波动。大部分人在停止接触后,症状消失。

与无线电波相比,微波波长更短、穿透力较弱、易被生物体吸收。微波从 20 世纪 40 年代开始在雷达和通讯等技术中应用,如今微波在工业、医学、科学研究和日常生活上都有广泛应用。这使环境辐射本底显著增高,环保问题也日益突出。微波生物学作用主要是热效应,生物体中的水分子、蛋白质等大分子作为带电偶极子随交变电场往复极化和取向,当电场变换频率超过其弛豫周期时,偶极子就不能同步转动而是与周围粒子发生碰撞,电磁场能量转化为分子动能使组织升温。微波还有一种不能用热效应解释的现象:如长期接触低剂量微波辐射者,其组织没有明显升温,但仍会患上一系列慢性病,如头晕、脱发、神经衰弱、记忆力减退、心动

过缓、血压降低等。微波辐射还会使血液白细胞数量下降,长期大量接触微波还有损眼睛的晶状体,可加速晶状体的老化甚至导致白内障。

微波作用具有明显的选择性,各组织、器官、细胞和分子吸收微波辐射的水平有着很大差异。例如肿瘤组织和正常组织的热效应不同,临床上用微波聚集技术可破坏肿瘤组织,治疗癌症。微波在医学上还有许多重要应用:使用微波治疗多种炎症和疼痛,加热冷冻的血液、移植用器官,对低温心脏手术的病人进行复苏,诊断上可用微波无创探测心血管和呼吸容量的变化,以及皮下组织的结构状况等。

**红外辐射** 红外辐射即红外线,按其波长可分为  $700\sim 3000\text{nm}$  的近红外线、 $3000\sim 20000\text{nm}$  的中红外线、 $20000\text{nm}\sim 1\text{mm}$  的远红外线。凡温度高于绝对零度的物体都是红外线辐射源,物体温度越高,其辐射波长越短。自然界中太阳是最强的红外线辐射源,工业生产如熔融玻璃、金属和强发光体都可辐射红外线,军事上也使用红外线探照灯、钨灯、弧光灯、红外激光器等多种红外线辐射源。

红外线对机体的作用主要是热效应,作用强弱与其波长有关。人体对红外线辐射比较敏感,红外线照射皮肤时 98% 以上被吸收,表层皮肤主要吸收长波红外线,深层皮肤主要吸收短波红外线,使血液及较深部组织升温。适量照射红外线有益于人体健康,但较大强度的红外线可使皮肤温度升高到  $45^\circ\text{C}$  以上而引起灼伤。红外线照射眼睛也会损害视力,大剂量红外线可破坏角膜细胞,长期接触短波红外线还会引起白内障。所以不要直接观看太阳等强光源,生产操作中也应佩戴防护装置。利用红外线的热效应,临床上应用中远红外线照射来治疗关节炎、风湿、微循环不良引起的肢体冰冷、麻痹等疾病,还可缓解带状疱疹和肿瘤患者的疼痛。红外线治疗还适用于各种关节、肌肉损伤导致的肿胀、炎症和功能障碍。

**可见光** 可见光是波长  $390\sim 760\text{nm}$  的电磁波,主要来自太阳辐射和人工照明。

光合细菌、植物能够利用可见光进行光合作用。

绿色植物叶片中的色素分子主要吸收太阳辐射中的红光和蓝紫光，激发态的色素分子经过一系列电子传递过程，将光能转化为化学能，将  $\text{CO}_2$  等无机物合成为有机物。光合作用是地球上各种生命物质和能量的来源，并维持着地球上的碳氧循环和大气成分稳定。光合作用在生物进化上也有重要意义，早期地球大气中氧气含量极低，很可能是植物光合作用释放的氧气形成了适合动物生存的大气环境。此外，光照对种子萌发、植物开花也起着关键的调节作用。喜光性种子需一定光照才能发芽，而厌光性种子发芽则需减少光照。很多植物存在着光周期现象：对于长日照植物，只有在每天光照时间长于临界值时才能开花；对于短日照植物，每天光照时间短于临界值时才能开花；还有一类限光性植物，只有在光照时间处于某个范围内才能开花。园艺上可以利用这一点调控植物的开花时间，例如适当缩短光照，可令短日照植物提前开花。

动物和人类的皮肤很少吸收直接照射的可见光，一般也没有皮肤效应。可见光通过眼睛的光感受器细胞产生神经传导信号，从而间接调控许多生命活动过程。例如大脑松果体的褪黑激素分泌主要受光照调节，使机体的新陈代谢、呼吸、心跳、体温、睡眠-觉醒周期和激素水平等呈现昼夜交替的节律性变化。很多生物都具有这种感知时间变化的生物节律现象。生物节律紊乱容易引起溃疡、失眠、低血压等疾病。可见光的生物学效应与其波长相关。波长较长的红光照射可引起血液中嗜酸性白细胞的减少，降低血糖并改善生物体的代谢，红光还可刺激垂体分泌促性腺激素，并且能够拮抗（即不同激素对某一生理效应发挥相反作用，从而稳定体内环境）紫外线引发的维生素 D 活化作用。波长较短的蓝紫光则具有与红橙光相反的生理作用，能防止低血糖并抑制垂体分泌促性腺激素。临床上，光照疗法可有效治疗冬季、阴雨引起的抑郁症和睡眠失调。

**紫外辐射** 紫外辐射是波长 200~400nm 的电磁波。自然界中的紫外线主要来自太阳辐射，人工环境中 1200℃ 以上的物体也会辐射紫外线，如电焊、紫外线消毒、水银灯和碳弧灯等。

适当照射紫外线对健康有积极作用，能预防和治疗佝偻病、加强人体免疫力、增强新陈代谢、促进伤口愈合等；但过强的紫外线会伤害机体。皮肤组织吸收过量紫外线能引起红斑、水泡或水肿，严

重时伴随头痛、疲倦等全身症状。已有动物实验证实，长期接触紫外线可诱发皮肤癌。波长 250~320nm 的紫外线还可引起急性角膜炎和结膜炎，称为电光性眼炎。故生活中应注意防止过量曝晒，尤其是在炎热的夏季。接触紫外线的工人也应做好防护，如佩戴吸收紫外线的面罩和眼镜。紫外线的生物学效应也与波长有关。紫外线按其生物学作用分为三类：波长 320~400nm 的紫外线 A (UV-A)，其生物学作用较弱，主要会晒黑皮肤并形成皱纹，大量照射可引起日光性皮炎、眼炎。波长 275~320nm 的紫外线 B (UV-B)，有较强的皮肤效应和抗佝偻病作用，大量照射会引起皮炎、使皮肤老化、形成皱纹和老年斑，并可诱发白内障和皮肤癌。波长 200~275nm 的紫外线 C (UV-C)，其生物学作用较为强烈，能杀灭一般的细菌和病毒，在生物实验和医学中用来消毒。太阳辐射中的 UV-C 和大部分 UV-B 被臭氧层吸收，到达地面的紫外线波长多为大于 290nm 的 UV-A，而人工紫外线辐射源产生的紫外线波长大多小于 290nm。

紫外线生物学效应的机制主要有以下三方面。

① 诱发基因突变。UV-B 能使细胞 DNA 结构中的胸腺嘧啶转变为环丁烷型二聚体，造成 DNA 损伤。DNA 损伤超出机体正常修复范围时，往往会发生基因突变。抑癌基因（如 p53，此基因由于其表达产生的蛋白质分子量为 53kDa 而得名）的突变是癌症的起始信号，50% 以上的皮肤癌患者中存在 p53 基因突变。② 产生自由基。紫外线照射可诱使细胞中产生各种自由基，进一步损伤 DNA、RNA、蛋白质等生物大分子。③ 抑制免疫系统。UV-B 可损伤表皮组织的郎格罕氏细胞 (Langerhans' cells)，这种细胞是一种不成熟的树突状细胞，胞浆中包含大量柱状或球拍状颗粒，称为伯贝克颗粒 (Birbeck granules)。当一块皮肤受到感染时，本地郎格罕氏细胞将识别、捕捉和处理微生物抗原，然后迁移到引流淋巴结皮质的 T 细胞区域，并成熟为专职性抗原提呈细胞。如果郎格罕氏细胞被 UV-B 损伤，就降低了免疫递呈作用、使 T 淋巴细胞减少，从而减弱了机体正常的抗肿瘤免疫反应，增加癌症的发生几率。

另外，除 UV-C 的杀菌作用外，生物学上还利用紫外线的诱变作用进行微生物的诱导突变和植物育种。大部分昆虫对 365nm 的紫外线十分敏感，因此紫外灯被广泛用来诱捕昆虫。

**激光** 激光是一类特殊的人造光源，具有单色性、方向性、相干性、亮度高等特征。激光是由受激辐射产生的，其发射波长包括可见光、红外和紫外波段。目前激光在工业、农业、国防、科研和医学上已有广泛应用。例如硬金属的切割和钻孔、微型机的焊接、地质测量、制造导弹、热核反应的控制、全息技术以及外科手术等。

由于激光的能量高度集中，对眼睛和皮肤的损伤也比普通光源严重。近红外到紫外波段的激光束能在视网膜上聚焦形成非常小的光斑，从而灼伤视网膜，导致黑影、眩光等视力损伤，严重时可致失明；远红外激光易被角膜吸收，从而灼伤角膜。同样，大功率激光还会灼伤皮肤组织。

目前的理论认为，激光生物学效应的机理主要有光效应、热效应、电磁场效应、压力和冲击波效应。光效应是指组织吸收激光能量后可产生光化学反应、光电效应、继发辐射等，进而影响组织的结构和功能。不同组织对光效应的耐受性存在显著差异，主要与组织中的光吸收色素类型有关。科研和医疗中可利用染色改变组织对激光的吸收程度，达到特异性光吸收的效果。热效应是指激光的光能在一定条件下转变为生物体分子的热能，使受照射的组织温度升高。热效应是激光生物学作用的重要因素，红外波段的激光热效应尤为强烈，可在几毫秒的瞬间使照射区域组织升温数百摄氏度，从而破坏该区域的 DNA、蛋白质等分子。激光是一种电磁波，可产生电磁场。高强度激光的电磁场效应比较明显，这种强电磁场可电离组织中的分子和原子、产生自由基、破坏细胞结构等。压力效应是指激光辐射到物体上时对物体产生的辐射压力。激光光压比普通光源强得多， $10^7$  瓦的激光照射机体可产生每平方米 175.8 千克的压力。在光压作用下，组织表面和内部形成压力差，如果激光束达到使组织表面粒子蒸发的能量，蒸发粒子喷出时则会产生与其运动方向相反的冲击波。冲击波可使组织进一步逐层蒸发喷出粒子，最后形成火山口状的凹陷。

激光在生物学上应用十分广泛。①激光具有刺激和调节生命活动的作用，这主要是由光化学反应引起的。光化学反应可影响生物体各种酶类的活力、改变质膜的通透性，进而调节新陈代谢。医用小功率氦氖激光的照射，可加强机体免疫机能、加强甲状腺和肾上腺的功能，具有促进伤口愈合、消炎止

痛、消肿等作用。②利用激光高度集中的能量，在外科手术中切割气化组织，具有精确度高、创伤小、出血少、无直接接触污染等优点，激光与显微技术结合还可实现一些传统方法难以完成的手术。③基础研究上的应用。最典型的例子是激光共聚焦扫描显微镜 (LSM)。LSM 以激光作为光源，在传统光学显微镜的基础上采用共轭聚焦装置，并利用计算机分析、处理图像。LSM 以高分辨率、无损伤的连续断层扫描、实时动态观察活细胞等优越特性，在生物医学领域起到了重要作用。

## 二、电离辐射

电离辐射是能引起物质电离的辐射的总称。它的种类很多，在生物学上意义较大的包括质子射线、中子射线、 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线和 X 射线。作用于生物体的电离辐射有天然辐射和人工辐射两大类。天然辐射主要来自宇宙射线和地球本身的放射性元素。人工辐射来源很多，包括核工业系统和研究部门、需要使用放射性同位素的生产和科研单位、含有放射源的医疗设备和仪器、加速器、电子显微镜等。过量接触电离辐射将严重损伤机体，人体因受各种电离辐射照射而发生的各类疾病，统称放射性疾病，包括全身性放射病、局部放射病（如放射性皮炎和白内障）、辐射所致的远期损伤（如癌症和基因变异）等。

电离辐射对生物体的作用机理有两方面。一是电离辐射直接作用于 DNA、蛋白质等重要生物大分子，使其发生电离、激发或化学键断裂，导致分子结构破坏、功能丧失。二是电离辐射作用于组织中的水分子，产生大量具有强氧化性的  $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{HO}_2\cdot$  自由基，这些自由基能破坏细胞内的重要大分子，继而产生一系列生物学效应。DNA 损伤可致基因突变、移位或缺失，甚至染色体畸变，抑制细胞分裂或发生异常分裂。蛋白质损伤主要见于生物体内的各种酶，酶系统对射线极为敏感，酶分子的损伤失活将导致细胞代谢的一系列病理变化。此外，DNA 和蛋白质的分解代谢在受到辐射后都显著增强，尿液中核酸及氨基酸代谢产物增多，整个机体处于负氮平衡状态（当人体摄入的氨基酸少于消耗的氨基酸时，机体将出现如营养不良、腰酸背痛、头昏目眩、体弱多病、代谢功能衰退等症状，称为负氮平衡）。原因可能是辐射破坏了细胞中的溶酶体，导致溶酶体内释放 DNA 酶、蛋白酶，使 DNA 和蛋白

# 弦论小史 (三)

李 森

我在《超弦史话》一开始就描述了弦论第二次革命开始的情形，多年后的现在回顾起来，也还是充满刺激。弦论第二次革命发端于 1994 年中的两篇文章：威滕和塞伯格 (Nathan Seiberg) 关于超对称规范理论的文章，以及胡尔 (Christopher Hull) 和汤森 (Paul Townsend) 关于弦论中的所谓 U 对偶的文章。在美国，第一篇影响的效应是即时的，甚至纽约时报都在第一时间报道了这个进展。一时之间，网上的物理文库充满了关于超对称场论的文章。与威滕和塞伯格工作的遭遇相反，起初没有太多人重视胡尔和汤森的工作。从某种角度看，西方 (特别是美国) 理论工作基本上为少数几个学术牛人主导，而真正影响深远的原创工作最初往往被忽视。不仅是胡尔和汤森的工作，更早的印度人森 (Ashoke Sen) 等人关于弦论中对偶的工作也是如此，另外还有前面提到的关于膜的工作。

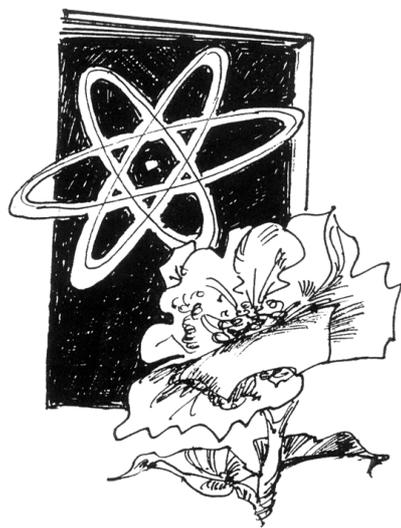
到了次年三月，威滕在弦论大会上做了一个爆炸性的报告，其中总结了他关于弦论中各种对偶的研究。直到此时，人们才如梦方醒，原来弦论的动力学这么美妙、这么丰富。弦论对偶的研究立刻冲破了多年以来的停滞。此后直到 1997 年马德西纳

质分子降解。

电离辐射对生物和医学研究做出了重要贡献。农业上，昆虫辐射不育技术在害虫的防治上应用前景广阔；辐射诱变育种将辐射诱变与基因技术、空间技术相结合，可产生许多优良突变品种。基础研究方面，近年来许多科研手段都与放射性同位素的应用密切相关。例如用放射性同位素作为示踪原子标记 DNA、RNA，可研究基因表达和细胞分裂；放射性磷同位素标记可研究植物对磷肥的吸收、代谢和分布情况等。近年来生物大分子结构和功能的研究也几乎都要借助于放射性同位素。同位素示踪在生态环境监测、污染物与环境的相互作用机制研究上也起到了重要作用。电离辐射在医学领域的应用更是广泛。例如我们熟悉的 X 射线透视、CT 的原理都是利用机体不同组织对 X 射线的吸收差异。近年研发的核磁共振 (MRI) 技术则是利用原子核在

(Juan Maldacena)

关于全息原理的工作，弦论中出现了很多新概念，弦论的发展以月为单位计算，这是一个最为美好的时段。



弦论二次革命的历史以及第一次革命的历史告诉我们，在理论研究中，真理往往不属于当时的研究主流，用一句大家都很熟悉的话来说，就是真理往往掌握在少数人手中。这些少数人在多数时间内被主流忽视，直到某个契机出现，人们才发现过去的主流研究和这些真知灼见比起来完全可以忽略不计。我在博客中经常谈谈我关心的一些时下研究，包括弦论和宇宙学。有人会问我，李老师你怎么只谈宇宙学不谈弦论。我的回答是，你要我谈现在的所谓“主流”，我看不出有什么值得谈的，如果不谈主流，我的眼光还没有好到可以看出被大家忽略的重要工作。

回到二次革命，先谈谈对偶。对偶这个概念在弦论中并不陌生，例如在早期的对偶共振模型中，

磁场内共振而产生影像的一种诊断方法，MRI 具有分辨率高、扫描层面薄、无影像重叠等优点，目前已成为影像医学中颇受欢迎的检查手段之一。医学诊断还经常采用前面讲到的同位素示踪方法，检测脏器的形态、功能，对某些化学元素进行超微量分析等。由于电离辐射对细胞具有较强杀伤力，而肿瘤细胞对辐射的敏感程度比正常细胞高得多，所以放射线治疗癌症已成为一种重要手段。例如  $^{131}\text{I}$  能够集中在甲状腺中，它辐射的  $\beta$  射线可有效破坏甲状腺癌组织； $^{60}\text{Co}$  产生的  $\gamma$  射线、电子加速器产生的高能电子束则用于治疗多种癌症。此外，许多不耐热的药品和试剂、生物材料都采用辐射消毒，大型  $^{60}\text{Co}$  源和电子直线加速器都能有效杀灭微生物。

(高原，中国科学院遗传与发育生物学研究所 100190；于玥，中国科学院高能物理研究所理论物理研究中心 100049)