

原子核的利用

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

研究原子核的目的,首先在于了解原子核的性质,扩展人们的认知范围,更重要的是要利用原子核,以及在研究原子核过程中积累的与原子核相关的技术,为人类社会的进步和大众的身体健

康作出贡献。不稳定原子核衰变过程中可以放出能量,两个轻原子核的聚变过程中也会放出能量,据此,发展出了核武器,裂变反应堆和聚变装置,以及小型的核电池。天然放射线和人工射线,包括X射线, γ 射线, β 射线, α 射线,以及人工制造的中子,质子和重离子束流,都可以用来为人们服务,例如分析物质成分,探测物质内部的缺陷,查探密闭空间内的物件。更重要的是这些射线在医疗领域有更广泛的应用,例如成像诊断,肿瘤治疗等。射线束,特别是离子束流还可以在培育植物新品种方面发挥重要作用。离子束在航天领域也有大显身手的空间。

一、原子核的威力

原子核裂变可以放出巨大的能量。一个 ^{235}U 原子核吸收一个中子后裂变成两个碎片并释放2~4个中子,同时放出约200兆电子伏特(MeV)的能量。按此计算,1千克的 ^{235}U 有大约 2.6×10^{24} 个 ^{235}U 原子核,它们全部裂变所释放的能量相当于2万吨TNT炸药爆炸时释放的能量。 ^{235}U 的自发裂变几率约0.72%,因此,当大量的 ^{235}U 聚集在一起时,就能够在瞬间自发地发生连续的裂变反应,如图1,称为链式反应。

轻原子核,如氘和氚原子核,在很高的温度下,可以发生聚变,同时放出巨大的能量。一个氘核和一个氚核在高温下生成一个 ^4He 原子核和一个中

子,同时放射出约17.6MeV的能量。1千克的氘核与1.5千克的氚核全部发生聚变,所放出的能量相当于将近20万吨TNT炸药爆炸时释放的能量。

这样巨大的能量可以用来为国家的国防和经济建设提供重要的支持!

核武器包括利用核裂变(^{235}U 或 ^{239}Pu)作为弹药制造的原子弹,和用氘-氚作燃料的核聚变制造的氢弹等。核武器是一种利用核裂变反应(原子弹)或聚变反应(氢弹),使原子核在瞬间放出巨大能量,包括热能和核辐射,从而造成大规模杀伤的武器。大家都知道,现有核武器的国家有美国、俄罗斯、英国、法国、印度、巴基斯坦、朝鲜和以色列等,我国在1964年就爆炸了第一颗原子弹,1967年又爆炸了第一颗氢弹。从那时起,任何国家再也不敢轻视我国。

裂变核反应堆是核电站的关键设备之一,它利用 ^{235}U 作为燃料,为发电机提供能源,同时也是一个很强的中子源。在反应堆中,将 ^{235}U 的裂变过程控

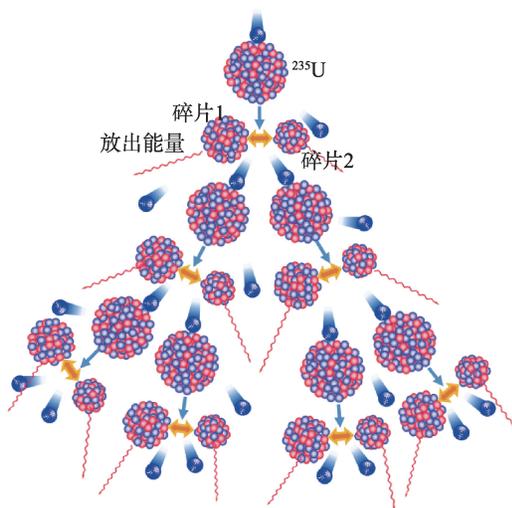


图1 链式反应示意图

制在适当的程度,以获得足够的热能供发电设备使用。经过70多年的努力,现在已经发展到第三代反应堆为主的时期,它具有很高经济性和安全性。第四代核裂变反应堆正在研制。我国具有自主知识产权的第三代核反应堆已经得到应用,如福清核电站华龙一号核反应堆和红沿河核电站二期工程使用的ACPR1000反应堆。2022年,全世界共有437座反应堆在运行,年发电总量约2679 TWh(2.68万亿度)。2022年,我国大陆地区有55台核电机组在运行,核发电量约4200亿度,占全国发电量的约5%。今后几年,我国核电将会有更快的发展。到2035年,核电有望占我国总发电量的10%左右。

受控核聚变 氢弹是利用氘和氚聚变反应瞬间放出的巨大能量,以杀伤敌方的武器。受控核聚变是氘氚核反应在可控制的条件下,缓慢地进行,使其放出巨大能量供发电使用。受控核聚变的研究已经有七八十年的历史。由于其技术上的复杂性和苛刻要求,至今还在进行之中。理论上,实现受控核聚变的方法有磁约束和惯性约束(激光惯性约束和重离子惯性约束)。目前,磁约束装置主要以托克马克型磁约束装置为主。它利用特殊的环形

磁场约束氘氚等离子体,并使其在磁场中循环流动,形成电流环,同时不断被磁场加热(图3)。几个国家都建造了磁约束聚变装置,例如俄罗斯、英国、中国、日本等。多国联合建造的磁约束聚变实验装置ITER正在进行当中。中国科学院等离子体研究所建造了全超导磁约束聚变装置,在2023年4月实现了世界上最长的403s的稳态长脉冲高约束模式运行。

惯性约束是利用外部能量(激光或重离子束)将小弹丸内的氘氚混合气体压缩(加热)到聚变的密度和温度,从而发生核聚变(图3)。

在激光惯性约束研究方面,美国LLNL联合实验室的NIF装置是一个典型代表(图4)。NIF采用间接驱动构型。将含有氘和氚混合物核燃料的毫米级靶丸封闭在黑腔中,用192束激光同时照射黑腔的内壁,产生强烈的X射线,以烧蚀靶丸的外表面,快速喷射出的等离子体反向压缩核燃料,首先使燃料中心的密度和温度达到聚变反应所需,并开始聚变反应。聚变反应会从中心开始向外传播,从而燃烧周围的燃料。经过长期研究,终于在2022年8月,利用192束大功率激光同时照射毫米量级的

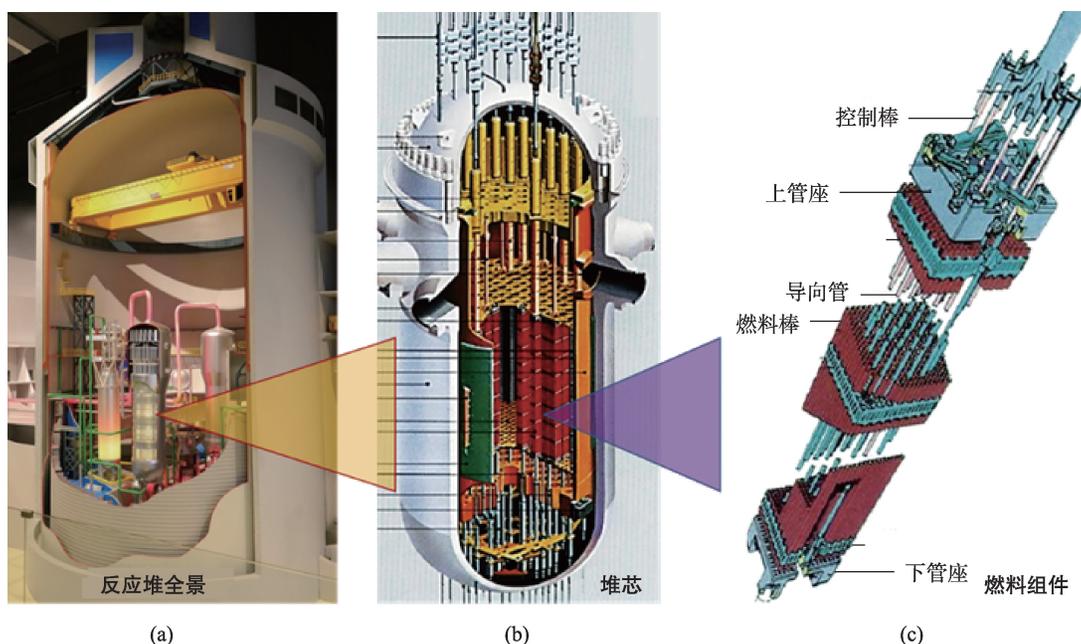


图2 裂变反应堆结构示意图

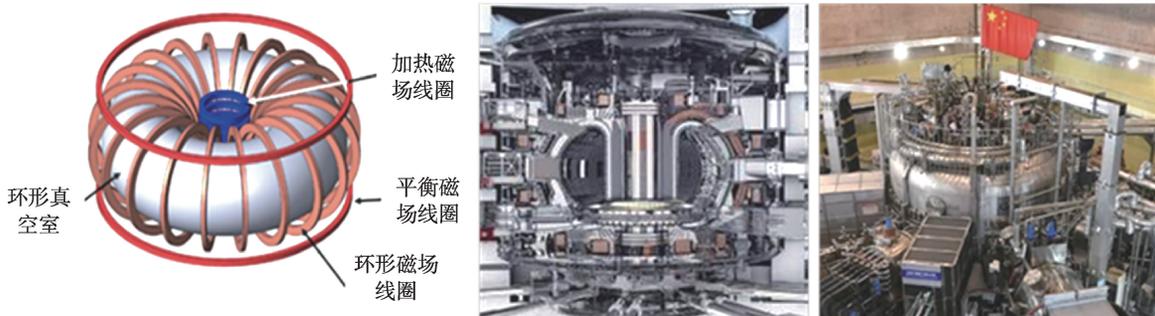


图3 核聚变堆示意图

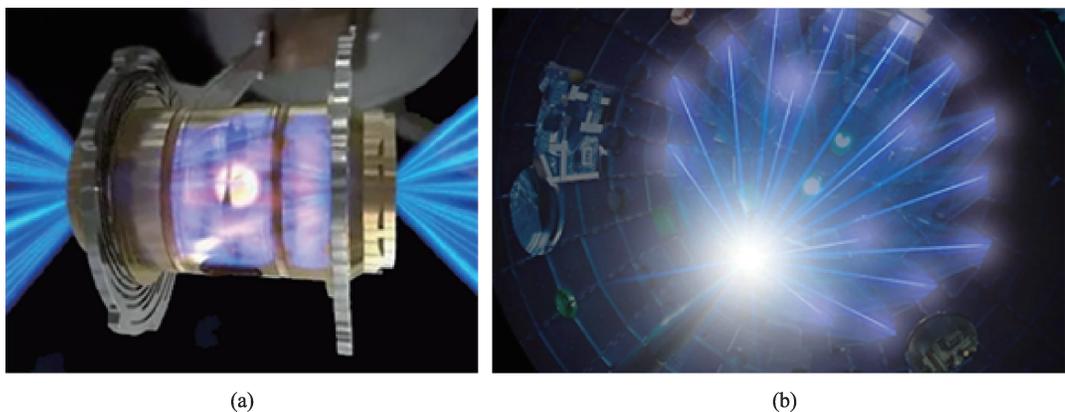


图4 激光聚变的靶丸(a)和NIF装置工作

靶丸,不仅实现了点火,而且也第一次实现了能量输出,但输出的能量只有输入能量的70%。在2022年12月的实验中,将输出能量与输入能量的比值(能量增益)提高到154%。

二、放射线在医疗领域的应用

医疗领域也是放射线发挥重要作用的地方。很早,X射线用来透视人体成像,后来又发展出各种各样的辐射成像设备,如CT、PET、MRI等,这为患者体内伤病的正确诊断提供了重要支撑。在疾病的治疗方面,特别是癌肿的治疗,射线也发挥着重要作用。除了利用各种放射源(β 射线源、 α 射线源)治疗外,X射线和伽马射线是治疗肿瘤常用的射线。质子束流很早就用来治疗癌肿,并取得了很好的效果。

近20多年来,又发展出了重离子束治疗癌肿的放射治疗方法,通过50000多例的治疗,证明了重离

子治疗是目前最先进的放射治疗方法。

为什么重离子治疗会成为最先进的放射治疗方法?

癌症是一种当前多发的疾病,据世界卫生组织2023年报告,2022年中国新增病例482万;新增死亡人数320万。这不仅给患者带来了身体上和精神上的痛苦,也给患者的家庭造成了沉重的经济负担,同时,也给社会带来了很大的损失。因此,对癌症的预防和治疗成为社会上广泛关心的问题。

1. 癌肿治疗方法

人们与恶性肿瘤进行了长期的斗争,积累了多种治疗肿瘤的方法。目前,针对癌症的治疗手段有手术,化学药物治疗,放射治疗,还有靶向治疗,免疫疗法,以及中医治疗。甚至还可利用几种治疗方法进行联合治疗。

放射治疗就是使用高能X射线, γ 射线,中子(这

些都是非带电的粒子),以及带电离子,包括质子和重离子对肿瘤进行治疗。放射治疗的基本原理就是利用上述的射线照射肿瘤,产生许多次级电子和一些自由基(外围拥有不成对电子的原子、分子和基团),这些次级电子和自由基再轰击肿瘤细胞的DNA,使其发生单链和双链断裂,如果这些断裂,特别是双链断裂不能修复,就会导致癌细胞的凋亡或死亡(图5)。目前,在放射治疗中,重离子治疗已成为最先进的治疗方法。下面就着重介绍一下,为什么重离子能够成为最先进的治疗方法。

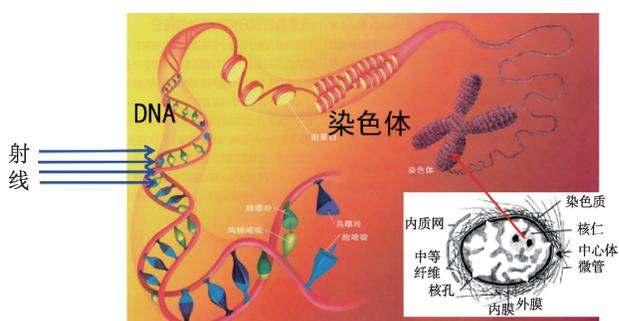


图5 射线杀死癌症细胞的原理

2. 重离子束的优势

什么是重离子呢? 原子都是由原子核和核外电子(其数目等于原子核内的质子数目)组成,不带电。如果原子失去(获得)了一个或多个电子,就成为了带正(负)电荷的离子。重离子是指比氦离子重的离子(图6)。放疗中使用的重离子都是带正电荷的。

重离子的物理特性

那么,与不带电的射线相比,重离子和质子有哪些优点呢?

首先,重离子在物质中穿行时可以撞出很多能量很高的电子(图7),而常规射线(X射线和 γ 射线),只能撞出很少的低能电子。有一定能量的电子与DNA分子碰撞时,会导致其DNA的单、双链断裂。电子与别的分子,如水分子的碰撞会导致其电离,从而产生自由基,这也是导致DNA双链断裂的因素。实验证明,适当能量的重离子照射细胞时不仅能致使许多细胞内的DNA双链断裂,而且还能够在同一个DNA上产生多处双链断裂。X射线或者 γ



图6 原子、离子和重离子示意图

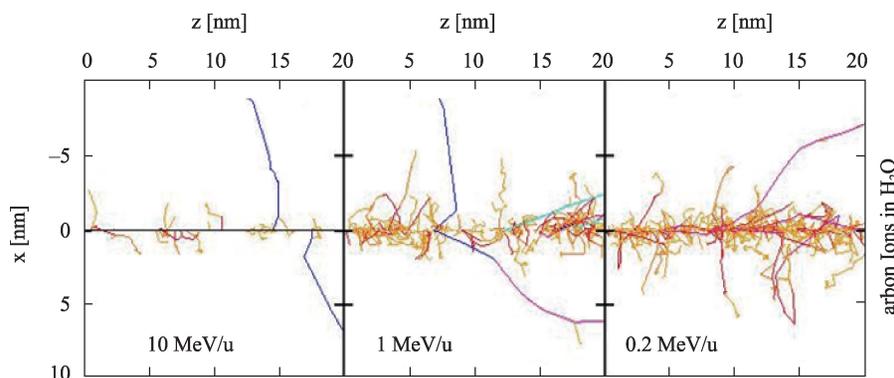


图7 碳离子在水中穿行时产生的次级电子径迹

射线照射时多数是导致DNA的单链断裂,产生双链断裂的几率只是单链断裂的百分之几,且随着X射线能量的升高,这些断裂数还会降低。例如,每个核子能量为2 MeV的碳离子穿过细胞DNA时产生的双链断裂数约是18 MeV的X射线的近百倍。单链断裂几乎都是可以修复的,双链断裂的修复几率则很小,特别是要同时修复多处双链断裂,几乎是不可能的。DNA双链断裂不能修复的结果就是导致细胞的凋亡或死亡。

第二、重离子在物质中的特殊能量沉积分布——布拉格峰。重离子在物质中穿行时,主要是通过电子的碰撞损失其能量,最后停止下来。能量高时与电子碰撞的几率小,单位路程上损失能量少。在能量低时,单位路程上损失能量多,从而会电离出更多的电子。这种性质使得它在其射程末端附近沉积在物质(肿瘤)中的能量要比它高速穿行时大得多,形成了一个明显的能量(剂量)沉积峰——布拉格峰(如图8)。而X射线则相反,其剂量沉

积是以入射粒子数量的减少为代价的,以至于剂量的沉积随入射深度增加而快速降低(图8)。因此,利用X射线照射深部肿瘤时,要使肿瘤接受到足以致死的剂量,那么表层所受剂量早已超过限度,从而使肿瘤前面的部位受到严重损伤。即使是利用伽玛刀技术,也不可能减少肿瘤以外的健康组织所受的总剂量,只是将其分散到不同的部位而已。

第三、一定能量的重离子,包括质子都有确定的射程,且横向离散度很小。例如初始能量每个核子300 MeV的碳离子在人体中的最大射程约为18 cm,不确定度仅为0.5%,横向发散仅为~2 mm。这使得能够根据肿瘤在人体中的深度选择离子的初始能量,以便能够将布拉格峰的位置恰好落在肿瘤部位。而X射线和伽马射线在穿过物质时,随着深度的增加,强度只会以指数形式迅速减少,且离散度很大(图9)。

第四、重离子带电,因此,可以利用磁场和电场很好地控制重离子束的方向和聚焦。这使得重离子束的照射界限非常清晰明确,被照射肿瘤周围的健康组织受到更少的辐照剂量,为精确治疗的实施提供了便利条件。

还有一点,就是较高能量的重离子与其他原子核碰撞时,会产生少量具有正电子放射性的短寿命原子核,而且这些新原子核的射程与原重离子的射程基本相同,它们衰变所放出的正电子与物质中的电子相遇变成两条反向而行的伽马射线。这为实时监测重离子是否准确照射到肿瘤位置提供了便利条件(图10)。

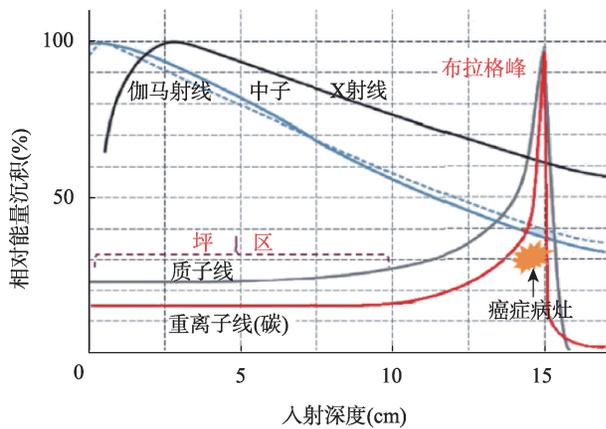


图8 各种射线在物质中穿行路径上的能量沉积分布

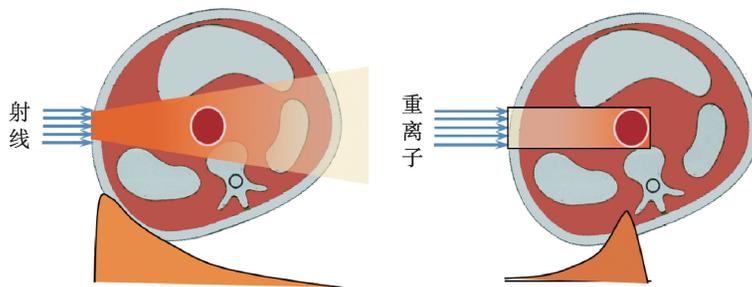


图9 重离子和γ射线在物质中穿行时的发散程度及粒子数量变化的比较

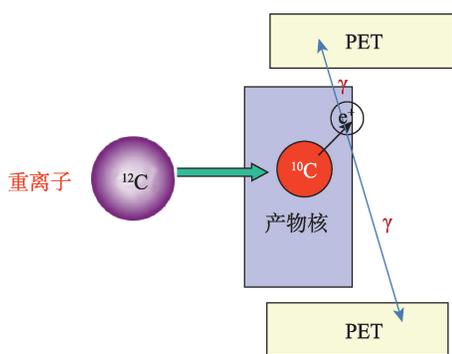


图10 重离子与原子核碰撞产生少量放射性原子核可用于其停止位置监测

重离子辐照时的生物学特性

首先,重离子布拉格峰附近的生物学效应大。所谓生物学效应是指与X射线相比而得到的一个指标:同样杀死50%的细胞,利用X射线照射时所需剂量与利用重离子照射所需剂量之比。生物学效应与其单位路径上沉积的能量(LET)有关。实验证明,生物学效应的峰值在LET在30~200 keV/ μm 的范围内,在其他LET时,则很小。高能碳离子穿过人体时的LET小,而在其接近射程末端时的LET要高得多。因此,碳离子的布拉格峰附近,其生物学效应在2.5~3以上(图11)。这意味着同样杀死50%的细胞,所需重离子的剂量只是X射线剂量的三分之一左右。但是,重离子布拉格峰前的区域(坪区)的生物学效应则接近1。

其次,重离子照射肿瘤细胞时的氧增比小。氧增比是指细胞在有氧情况和无氧情况下达到相同生物学效应所需的剂量之比。有的癌细胞里面含氧量少,即厌氧的,它对X射线不敏感,难以杀死。

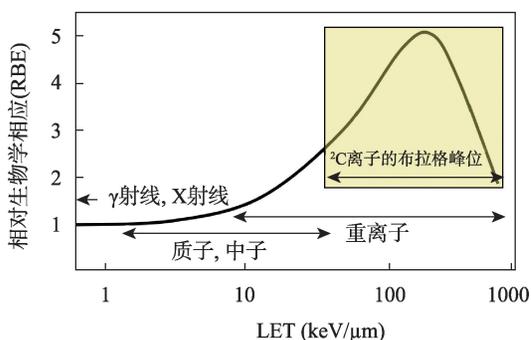


图11 各种粒子的生物学效应的比较

但是重离子对这类癌细胞的致死率相比其他癌细胞,没有明显的差别,即对有氧及缺氧的肿瘤细胞具有相同的杀伤作用。

再者,处于不同发育周期时相的细胞(细胞分裂有四个时相),对重离子照射的敏感性在布拉格峰附近没有多大差别。只是在剂量沉积曲线的坪区稍有差别。

还有一点是也是非常重要的,即实验证明,在布拉格峰位置附近,重离子所造成的DNA双链断裂不容易修复,而X射线所造成的DNA双链断裂,则随X射线路径的增加其修复效应呈现增加趋势。

为什么在诸多重离子中选用碳离子治疗肿瘤呢?原因很简单,碳是人体中大量存在的元素;碳离子的布拉格峰与坪区的沉积能量之比足够高;高能碳离子在人体中穿行时,产生的其他较轻的原子核较少,使得在其射程之外的沉积剂量较少;碳离子产生的极少量正电子放射性核(碳-10,碳-9)可以用来监测其布拉格峰位置。

与X射线治疗相比,除了上述优点外,重离子治疗时,其分次照射的依赖程度低,而且能够抑制肿瘤血管生成,有强的免疫应答,还可以与靶向治疗形成协同作用。

总之,重离子的这些物理特性和生物学特性,使得利用重离子治疗肿瘤比利用X射线有明显的优越性:治疗精确度高,治疗时间短,治疗效果好,副作用小,适用范围广。因此,在世界范围内都受到广泛的重视。表1中列出了世界上现有开展重离

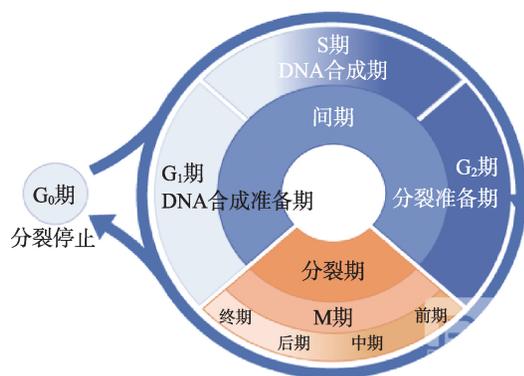


图12 细胞发育的不同阶段

子治疗的医疗机构。

鉴于重离子治疗的众多优势,早在1975年,美国伯克利实验室就开始重离子治疗肿瘤的基础研究,并开创了重离子治疗肿瘤的先例。1994年日本国立放射科学研究所(NIRS)建成了医用重离子加速器(HIMAC),开始正式利用碳离子进行重离子治疗肿瘤。1997年德国GSI也开展了碳离子束治疗肿瘤的基础和新技术研究,并设计实施了点扫描的束流提交系统,进一步提高了重离子治疗肿瘤的精确度。现在世界上已建成投入使用的利用碳离子治疗肿瘤的医疗机构有十多家(见表1)。还有好几家治疗设施正在建设之中。中科院近代物理研究所从1995年起,逐步开展了重离子治癌的基础和技术研究,并在HIRFL上共治疗了213例患有浅层或深层肿瘤的患者。经过20多年的努力,不仅掌握了重离子治疗的基础知识和技术,而且,研制了先进的治疗装置,获得了60多项专利。于2015年在甘肃省武威市建成了我国第一台重离子治疗装置,经过多次改进和完善,2019年国家药监局批准上市,2020年正式投入临床使用(图13)。该装置的同步加速器周长仅为56.17米,是世界上最小的重离子治疗专用同步加速器(日本的63米,德国的72米)。加速器可提供最高能量达每个核子400 MeV的碳离子,它在人体中的最大射程达到27 cm,这可以满足体内任何部位的肿瘤治疗所需。射程步长的调节精度为2 mm,在200 mm*200 mm的照射野内的

剂量均匀度达到95%以上。水平、垂直治疗终端各1个,45°治疗终端1个,水平与垂直联合治疗终端1个。可以实现主动扫描和被动扫描的治疗模式。同期,还编写了中国《离子治疗指南》(已颁布)、《医用质子、重离子加速器质量控制指南》。近期,国内又有多家医院决定建造重离子治疗设备。

根据PTCOG(国际粒子治疗协作委员会)发布的最新数据,截至2021年底,全球共有325000例患者接受了离子治疗,其中接受质子治疗的患者280000例;接受碳离子治疗的患者42000例。目前,我国上海质子重离子医院已经利用碳离子治疗了近6000位肿瘤患者,武威重离子治疗中心也已治疗了上千例肿瘤患者。

3. 如何利用离子束治疗肿瘤

如何利用重离子治疗肿瘤呢?重离子/质子在人体中的射程由其初始能量和它在人体中穿行路径上的组织结构所决定。医生根据肿瘤的部位、大

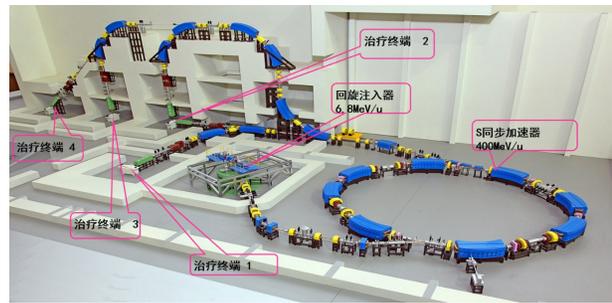


图13 武威重离子治疗肿瘤装置模型

表1 世界上现有开展重离子治疗的医疗机构

国家/地区	中心名称	类型	起时
德国 海德堡	德国海德堡重离子与质子治疗中心	质子、碳离子	2012
德国 马尔堡	马尔堡重离子治疗中心	碳离子	2015
意大利 帕维亚	意大利CNAO质子重离子治疗中心	质子、碳离子	2012
日本 千叶	放射线医学综合研究所	碳离子	1994
日本 兵库县	兵库县县立粒子先治疗中心	质子、碳离子	2002
日本 群马县	群馬大学重粒子线医学中心	碳离子	2010
日本 鸟栖市	九州国际重粒子线治疗中心	碳离子	2013
日本 横滨市	神奈川i-ROCK重离子癌症中心	碳离子	2015
中国 兰州	中国科学院近代物理研究所	碳离子	2006
中国 兰州	武威市重离子治疗医院	碳离子	2019
中国 上海	上海质子重离子医院	质子、碳离子	2015

小形状和肿瘤性质制定治疗计划,即如何实施重离子治疗,包括离子初始能量,照射剂量,照射次数,等等。然后,按计划付诸实施。一般有两种方法对肿瘤进行照射,一是适形照射方法,另一种是精确扫描照射方法。

所谓适形照射方法就是根据肿瘤的大小、形状和位置,将确定能量(根据肿瘤最深处的位置确定)的碳离子束流通过散射系统扩大束流面积,再通过搓板形状的降能器使束流的能量产生分散,以形成一个与肿瘤的前后厚度大致相同的宽布拉格峰。同时,要根据肿瘤的位置和最大面积适当调节碳离子射程和限制束流面积,还要根据肿瘤前后厚度的变化进行必要的剂量补偿(图14)。

要实现精确扫描照射,首先,加速器要提供较好品质的线状束流,束流斑点的直径约1 mm。根据治疗计划将肿瘤由浅至深虚拟地分割成许多片,每一片对应一个束流能量,每片的厚度接近1 cm。利用磁铁控制束流,依次按照每片的形状进行逐点扫描,且保证剂量的均匀性,直到整个肿瘤扫完为

止(图15)。

重离子适于治疗哪些肿瘤

前面讲过,重离子的氧增比小,对各发育时相的细胞都有同样的效果。因此,原则上各种肿瘤都可以利用重离子进行治疗,特别是那些对常规射线具有辐射抗性的肿瘤,例如黑色素瘤和复发性直肠癌等都具有很好的疗效。由于利用重离子可以实现精确治疗,所以,更适合用来对人体关键部位和敏感部位的肿瘤,例如头颈部肿瘤等进行治疗。在已经治疗过的病例中,包括了脑瘤和颅底瘤、头颈部肿瘤、眼瘤、食管癌、肺癌、肝癌、胰腺癌、前列腺癌、直肠癌、骨和软组织肿瘤、乳腺癌和宫颈癌,等等(图16)。

治疗效果:

据不完全统计,目前全世界总共有接近50000多例肿瘤患者接受过碳离子束治疗。那么,治疗效果如何呢?据日本NIRS前几年的报道,前列腺癌治疗后5年生存率在96.7%,脊索瘤的5年生存率接近100%,软组织骨瘤的5年生存率在85%以上,肺

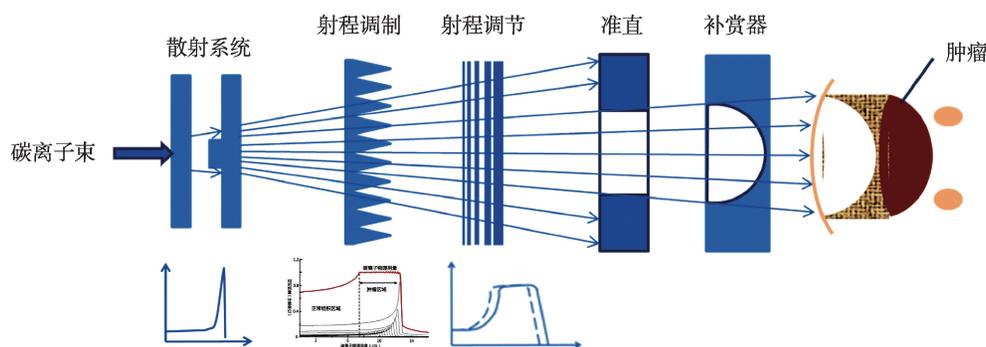


图14 重离子适形照射方法示意图

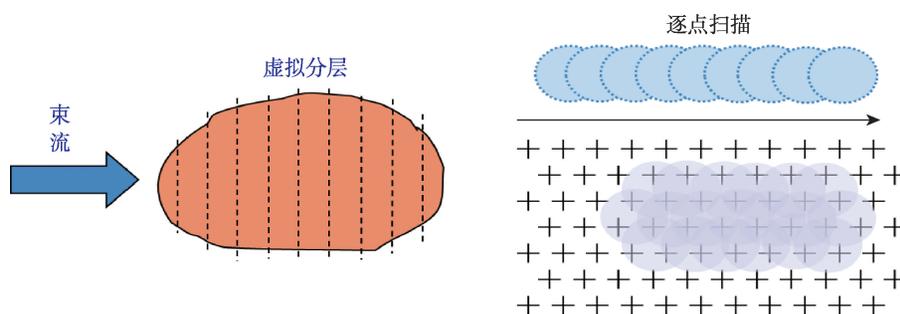


图15 重离子精确照射方法示意图

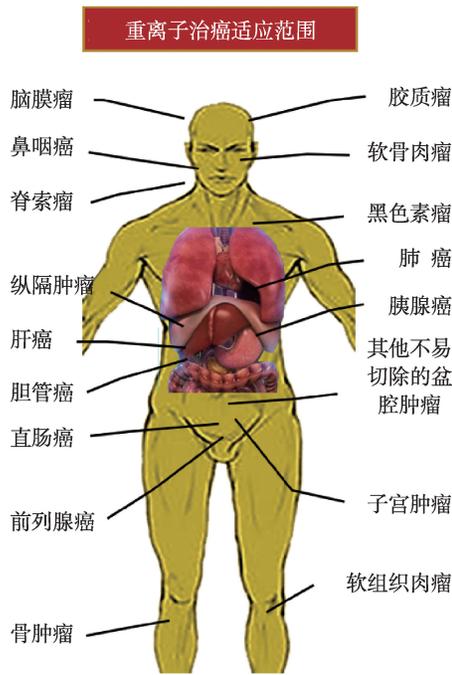


图 16 重离子治疗肿瘤的适应症

癌的5年生存率在56%，肝癌的3年生存率在56%，黑色素瘤的5年生存率在52%，头颈部癌为主的非鳞状细胞癌的5年生存率47%(表2)。相对于X射线或伽马射线治疗而言，重离子治疗不仅具有很好的疗效，还能使患者维持较高的生活质量，帮助患者尽早恢复健康，因而得到了社会的越来越广泛的认可。

4. 重离子治疗的现状及其未来

现在，重离子治疗的结果显示，它是目前最先

进的放射治疗肿瘤的方法。在国内外得到了推广应用，并取得了非常好的疗效。国内上海质子重离子医院也已治疗近6000例患者，武威重离子医院也治疗了近千例患者。他们为了进一步提高重离子治疗的效率，都在多方面进行深入的研究。例如，在临床上，正在进行探索重离子束与质子束照射的联合使用，或者重离子照射与X射线照射的联合使用，以提高疗效。在技术方面也在进行多方面的优化，例如在治疗计划的制定方面，正在引进基于纳剂量学量加权剂量(NQWD)，在治疗过程中希望引进人工智能(AI)技术等。在治疗过程中需要进一步完善和发展的一个问题是，如何减少肿瘤位置随患者呼吸而移动对精确治疗带来的不利影响。

在肿瘤的治疗中，都避免不了体内肿瘤的位置随着患者的呼吸而发生变化的情况，这不仅影响治疗精度，也会对肿瘤近旁的组织或器官造成损伤。为了解决这一问题，可以在治疗中引入门控技术，即对呼吸进行补偿的控制方法。简单地讲，呼吸门控就是根据患者每个呼吸周期中内部肿瘤位置变化的规律，控制在每一次呼吸的相同时相(相同的呼吸时间点和深度点)进行束流照射治疗。问题在于每次呼吸的时间、深浅不同，内部肿瘤位置的变化也不同，这使得门控技术的应用变得比较困难。因此，需要预先对患者进行呼吸训练，使其尽量做到每次呼吸的深度和时间长短都比较均匀，这样有

表 2 日本重离子治疗效果统计

肿瘤名称	治疗数目	占比(%)	5年控制率(%)	5年生存率(%)
前列腺癌	2000	~25	96.9	92.8
非鳞状细胞癌 (头颈部癌为主)	跟踪 240 位	~1000	68	47
	黏膜恶性黑色素瘤		75	35
	腺样囊性癌		73	68
	恶性腺癌		24	36
	恶性毒瘤		61	31
	乳突恶性毒瘤		61	17
黑色素瘤	跟踪 109 位	5	78~82	52
软组织骨瘤	~1000	11	86	85
肺癌	~1000	11	100(<100 cm ³)	56
肝癌	~900	10	80~86	83(3年)
				71(3年)

利于较准确地确定每次呼吸过程中不同时间所对应的肿瘤位置。最近,近代物理研究所开发了生物视听反馈患者呼吸引导技术(机器给出呼吸的口令和图形),这能够使患者的呼吸周期与同步加速器提供脉冲束流的周期同步,同时也使门控窗口内的肿瘤残余运动大幅减小,从而提高了离子束治疗的效率(图17)。

为了进一步减少碳离子治疗对肿瘤周围健康组织和器官的损伤,也可以利用与伽马刀类似的可转动的束流扫描照射方法。德国建造了重达几百吨的旋转机架(Gantry),用来偏转束流,以便从不同角度对肿瘤进行照射,分散正常组织上受到的剂量(图18)。

目前,重离子治疗装置的规模还是比较大,尽管近代物理研究所研制的治疗装置中,加速器周长不到57米,比起德国的76米,日本的63米都小,但是,其占地面积仍有约4600平方米。为了进一步减小装置的体积,降低成本,中国科学院近代物理研究所创新性地设计了新的重离子治疗装置,将加速器的周长缩短到35米,占地面积也降到1200平方米。照射位置也增加到8~15个,同时也不需要大型的旋转机架,就可以对人体进行多方位的照射(图19)。

除了加速器方面的改进外,在治疗技术方面,国内外也都在以下多个方面进行探索:固定束的多角度调强放疗技术(立式、坐姿等);重离子适形剂量分布的调强放疗技术;多种离子联合的调强放疗技术;

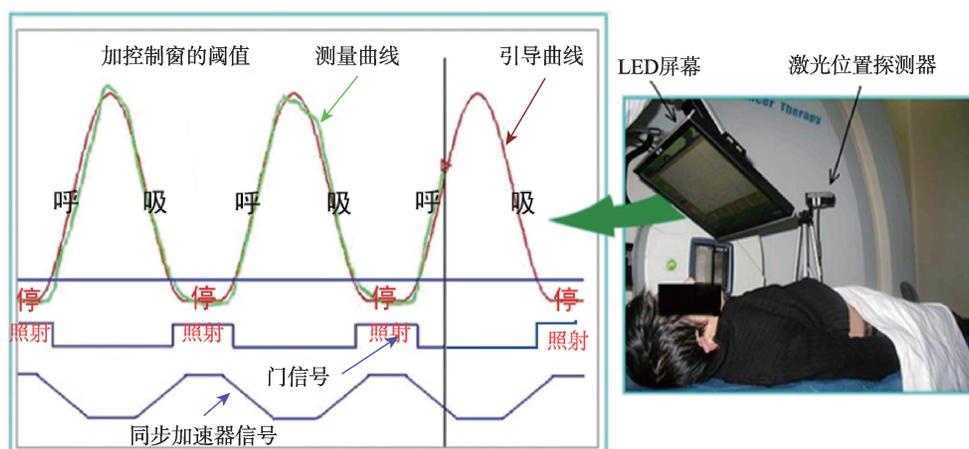


图17 重离子治疗中的呼吸门控方法示意图(引自近代物理所李强研究员报告)



日立公司建造的可转动束流提交系统 (GANTRY)

图18 离子治疗装置的可转动束流扫描系统(Gantry)



图19 近物所设计的新型重离子治疗装置

闪束(Flash)及细束(Minibeam)放疗技术;磁共振图像引导及在线监控技术;新型的治疗计划技术;智能化在重离子放疗中的应用(自适应放疗技术的实现)等。

在临床治疗方面,科学家也在寻找高级别证据证实离子治疗(特别是质子治疗)优于光子放疗;探索重离子与其他治疗手段的联合应用,以提高疗效;进一步优化现有适应症的治疗方式(剂量、分割方式等),以及拓展适应症等。

总之,由于重离子治疗的诸多优势和在生物学方面的特征,使得它(包括质子治疗)已成为最先进的放射治疗技术。随着加速器朝紧凑型、小型化方向发展,治疗技术朝更加精准方向发展,以及AI及生物技术在重离子治疗当中的应用,使得重离子治疗更加具有生命力,同时也提升了重离子治疗的技术竞争力。相信,重离子治疗必能在肿瘤治疗当中发挥重要作用,为人们的健康做出重要贡献。

三、航天电子学器件单粒子效应的地面模拟

离子束也是航天领域的重要帮手。太空存在大量的辐射,包括高能的 γ 射线和各类高能离子,如来自太阳的高能质子、 α 粒子和少量的重离子等。

一个高能离子穿过宇航电子器件时,可能会引起器件材料内原子的电离,如果电离产生过大的电流,就可能导致电子器件局部的不同损伤(单粒子效应)和存储的数据被破坏,从而引起航天器发生事故。这就需要预先评估航天器件发生单粒子效应的几率,并对其进行加固。加速器提供的高能质子束流和重离子束流就是在地面评估航天器件单粒子效应的有力工具。中国科学院近代物理研究所的加速器HIRFL和最近在哈尔滨工业大学建成的空间环境地面模拟装置-SESRI都可用来对宇航电子学器件进行评估(图20)。特别是HIRFL已经用来对我国的航天器件进行过多年的评估,为航天器发射提供了大量可靠的数据。

四、利用辐射培育作物新品种

辐射,包括X射线、 γ 射线、中子、质子和重离子等,用来对植物和动物的细胞进行照射,都可以使其发生变异。辐射诱变育种就是用射线辐照植物组织或种子,通过直接或者间接作用,使其产生突变,从而选育新的品种。

电离辐射对生物体照射时,与细胞的生化组分相互作用,引起原子电离,产生更多具有很高速度的电子,这些电子进一步与细胞的组成单元(原子或分子)碰撞,打断原子或者分子,特别是DNA的化

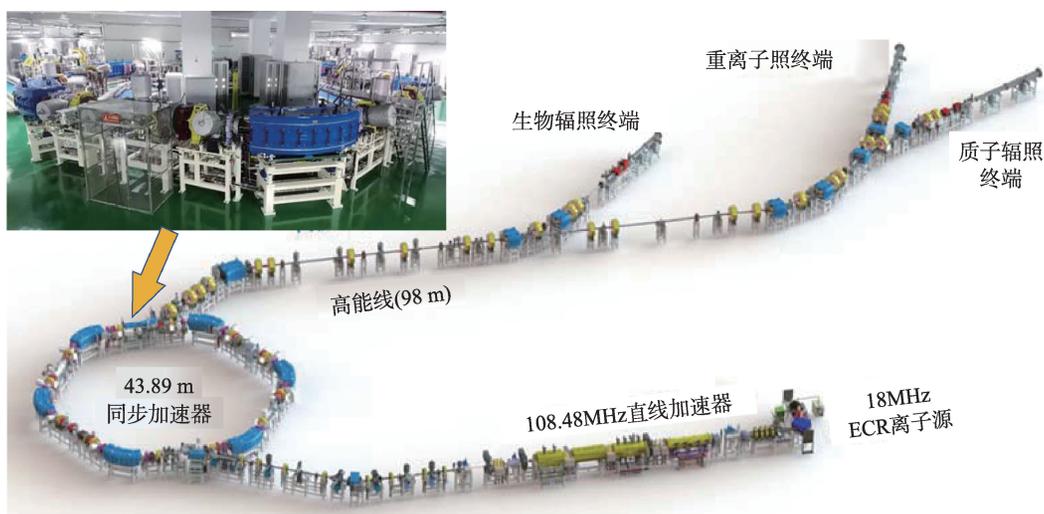


图20 国内首台质子与重离子束空间环境地面模拟专用研究装置

学键,进而让该成分的结构或性质发生改变。这么多生化组分中,为什么说DNA是最重要的靶分子呢?生命体的新陈代谢是动态过程,糖、蛋白、脂类分子受到电离辐射作用后,性质发生改变,一部分会被生物体的免疫系统识别,另一部分可以被自身的各类酶降解掉,一段时间后,被改变的分子在生

物体内会被清除。然而,遗传物质DNA,如果它遭受攻击后无法正常修复,将产生突变,基因的表达受到干扰,蛋白质的表达相应受到影响。因此,生物体将呈现出与正常不一样的表形变化,其中一部分可以遗传到下一代,经过多代稳定遗传,就会诞生新的家族成员(图21)。

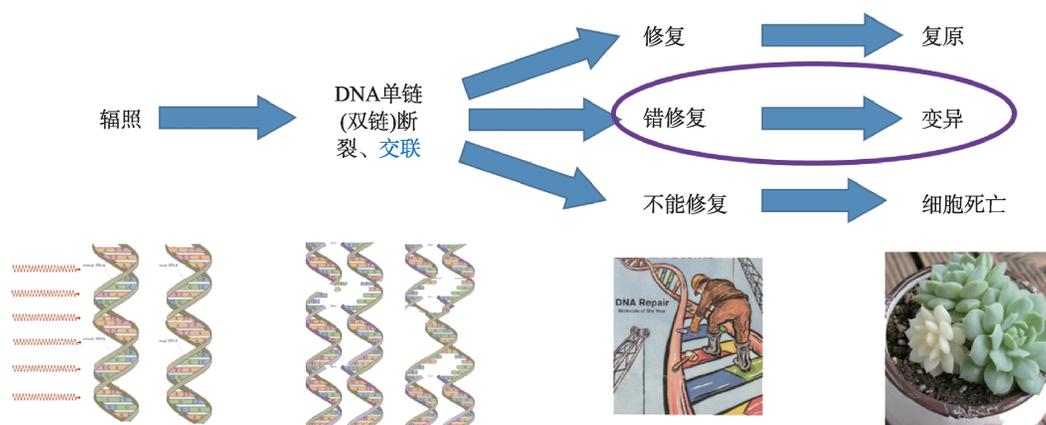


图21 辐照致使DNA的突变的关键环节

常规辐射诱变育种成果

根据国际原子能机构和联合国粮农组织的报告,截至2018年,超过3200种作物新品种(涵盖70个国家的210种作物),已经被官方释放并进行商业化应用。其中88.8%是由辐射诱变育种,尤其是伽马射线(多用 ^{60}Co γ 射线源)诱变育种获得。亚洲国家更喜欢使用诱变育种方法对植物进行品种改良。中国、日本和印度,都释放了数百个优质新品种(图22)。

重离子束诱变育种

重离子束育种原理与其他射线的相同。但是,由于重离子能量沉积有布拉格峰的特征,且能量沉积密度大,所以具有以下特点:**突变效率高**(小剂量照射即可引起更多的突变,形成一个小的诱变育种群体);**突变谱广**(重离子辐照时,由于DNA的双链断裂点多,修复时可以有多样性的错修复,具有更多样的变异,从而获得更多样的新品种及种质资源);**稳定周期较短**(重离子辐照引起的变异更容易在短时间内稳定下来,缩短育种年限)(图23)。



图22 日本辐射育种研究所的伽马辐射育种园,半径100米,是世界上最大的伽马辐射育种园

因此,国际上许多重离子加速器都用于诱变育种的工作。在日本,就有4台重离子加速器(理化所RIKEN-RIBF, QST-TIARA, QST-HIMAC, 若狭湾W-MAST)用来进行辐照育种工作。我国在兰州重离子研究装置(HIRFL)上也建造了专门的生物辐照

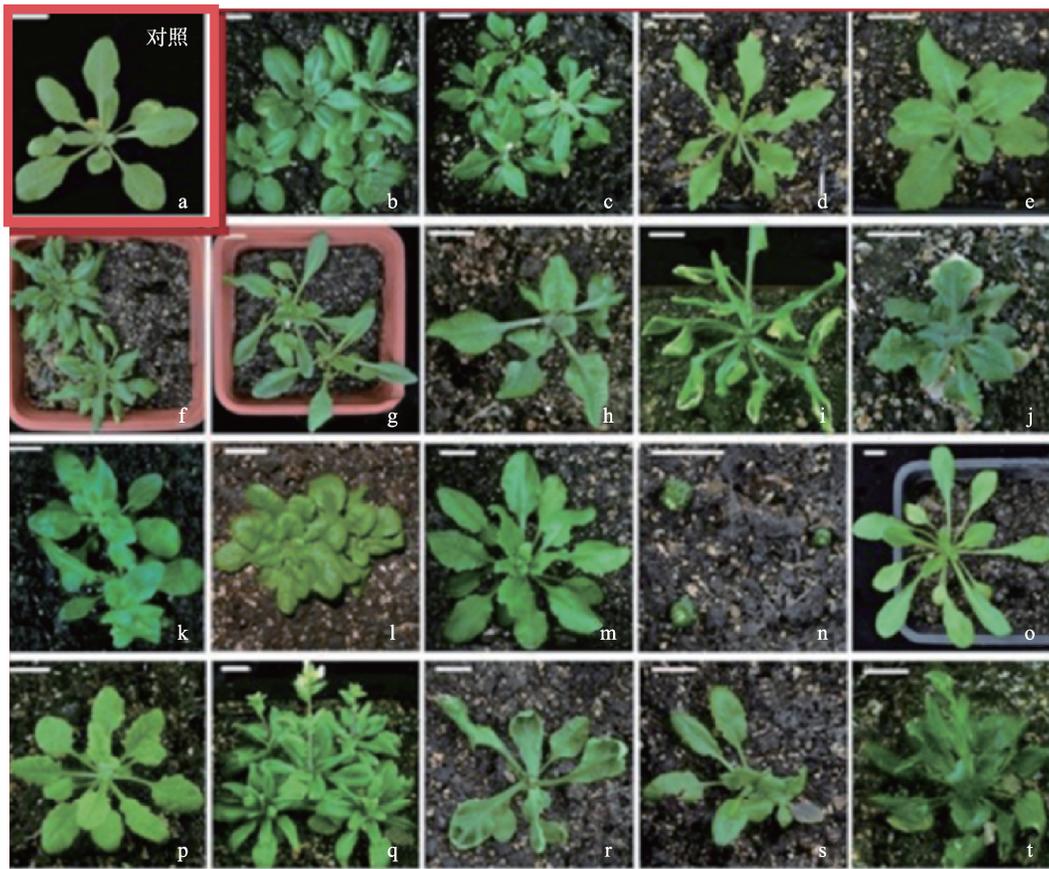


图 23 重离子辐照拟南芥的变异样本

实验终端(图 24)。每年都有数十家科研单位来近代物理研究所开展诱变育种基础及应用研究。通常采用 80 MeV/u 的碳离子束辐射各种植物材料,如种子、枝条、叶片、根、块茎、组织、悬浮细胞等,获得具有优质性状的突变材料,培育出了高产、优质、抗逆的新品种,带来了巨大的经济效益。下面介绍一

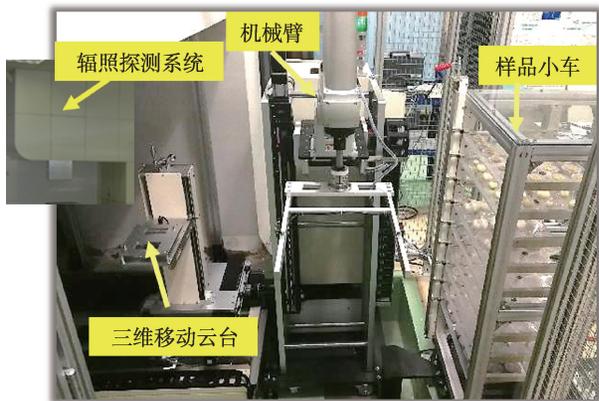


图 24 HIRFL 的生物辐射终端装置

些重离子辐照育种的成果。

粮食作物

中国科学院近代物理研究所早在 2003 年就利用重离子辐照培育了 9 个春小麦稳定突变新品系及“陇辐 2 号”春小麦优良品种(图 25)。该品种适应性强,对条锈病、黄矮病抗性较好。抗倒伏,耐旱、抗干热风。生长期缩短为 98~103 天。平均亩产 485.2 千克。粗蛋白质含量 13.0%~17.3%,湿面筋 28.3%~



图 25 春小麦新品种

39.2%;该品种推广了812万亩。

2021年,国内首个重离子束诱变选育的北方耐盐碱粳稻新品种“东稻122”喜获丰收,平均亩产632千克,比当地主推品种增产10.6%,高产地块产量达到721千克/亩,累计推广面积20多万亩,入选吉林省农业主导品种。随后,又有四个水稻新品种“东稻275”“东稻211”“东稻812”和“东稻862”,获得了农作物品种审定证书(图26)。

近年来,通过重离子束辐射筛选获得的镉低积累水稻材料“莲两优1号”“韶香100”,在长江流域、华南稻区,特别是湖南镉污染田进行了数十个点(土壤总镉3 mg/kg以内)的试验示范,群体整齐一致,综合农艺性状优良,稻谷均表现出稳定镉低积累,稻谷镉含量分别比对照平均水平下降95.7%,86.2%和94.0%,镉低积累效果显著,这为粮食安全



图26 水稻新品种

提供了有效的保障(图27)。

经济作物

早熟甜高粱品种是我国首次利用重离子贯穿处理技术选育出的农艺性状优良(早熟近30天、抗病、高糖)、有产业开发价值的甜高粱品种。

2020年以重离子辐射品系81-355为父本,用有性杂交系谱法选育获得东北大豆新品种“中科毛豆3号”,具有高产、优质,抗病、抗逆性强,适应性广等特点,推广前景广阔。

另外,还利用重离子辐照选育了油葵、蓖麻、中草药(黄芪新品种“陇芪3号”、党参新品种“渭党3号”和“科蒿1号”等)的新品种,与原始品种相比,具有高产、农艺性状好、抗病等优势(图29)。在工业微生物和药用微生物的改良中,重离子辐照也获得了重要的成果,为工业生产提供了主要支持。

园艺植物

白花紫露草,又名吊竹梅,经过重离子辐照后出现了新的突变品种:环境温度高时叶子呈现绿色,



图27 镉低积累水稻新品种“韶香100”



图28 甜高粱新品种(左)和大豆新品种(右)



图29 中药用植物新品种

温度低时则变为粉红色,因此,起名为冬花夏草。

在日本,利用辐照也培育出非常多的花卉新品种(图30)。

总之,原子核不仅是组成可见物质的基础单元,而且还能够通过原子核本身(包括射线)与其他

各种物质的相互作用,广泛应用于国民经济的诸多领域,为科学的进步、社会的发展和人类的生存作出了重要的贡献。今后,随着核物理研究的深入和核技术的发展,我们一定会发现有更多利用原子核的途径和方法,为人们带来更多的福利。

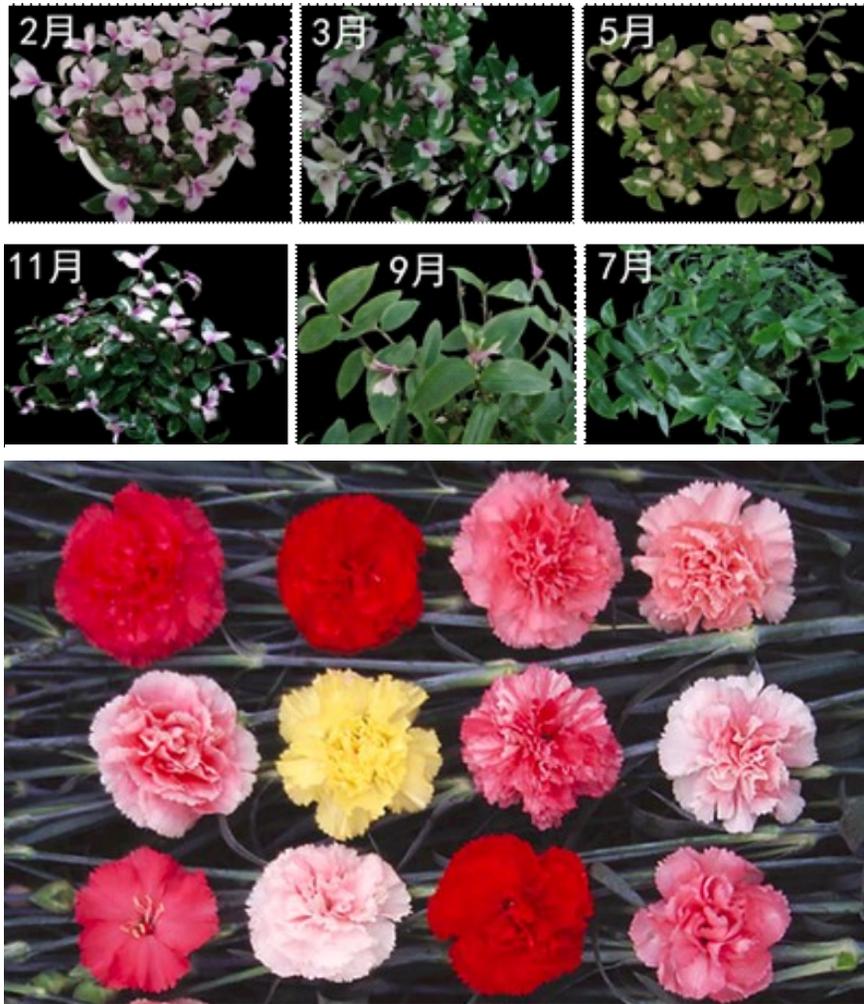


图30 利用重离子束辐照培育的观赏花卉,上图中国科学院近代物理所获得的冬花夏草,下图是日本获得的花卉新品种