

文章编号: 1007-4627(2007)02-0089-05

# 放射性束辐照生物学效应及相关生物物理机理<sup>\*</sup>

李 强<sup>1</sup>, Y. Furusawa<sup>2</sup>, A. Kitagawa<sup>2</sup>, M. Kanazawa<sup>2</sup>, 金晓东<sup>1</sup>, 戴中颖<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 日本国立放射线医学综合研究所, 日本 千叶 263-8555)

**摘 要:** 介绍了  $\beta$  缓发粒子衰变放射性束  $^9\text{C}$  辐照处于不同贯穿深度上人类唾液腺细胞的深度存活效应。与稳定的  $^{12}\text{C}$  束流相比, 放射性  $^9\text{C}$  束流在其 Bragg 峰区附近展示了增强的生物学效应, 即细胞的致死效率明显增强。探讨了放射性束  $^9\text{C}$  在其 Bragg 峰区展示增强生物学效应的生物物理机制, 并介绍了利用另一种放射性束  $^8\text{B}$  进行辐照生物学效应研究的新进展。最后, 提出了一些利用放射性束可进行的辐照生物学效应前沿研究。

**关键词:** 放射性束;  $^9\text{C}$  束流; 增强的生物学效应; 生物物理机制

**中图分类号:** Q691      **文献标识码:** A

## 1 引言

放射性束用于辐照生物学效应的研究与重离子束治癌的进展是分不开的。迄今为止, 碳离子束治癌在多种肿瘤的临床治疗试验中取得了史无前例的成功<sup>[1-3]</sup>, 这主要与重离子束具有良好的剂量局域性(Bragg 峰)和在 Bragg 峰区高的相对生物学效应(RBE)有关<sup>[4]</sup>。但即使如此, 研究人员并没有放弃继续寻找最佳的离子束种类, 从而进一步提高重离子束治癌疗效的努力<sup>[5]</sup>。

放射性束的出现为进一步提高重离子束治癌的疗效提供了可能。正电子发射体放射性束  $^{11}\text{C}$  或  $^{10}\text{C}$  应用于治癌, 利用  $\gamma$  相机或正电子发射断层成像术(PET)对束流在组织中的射程甚至剂量进行监测, 提高了重离子束治疗的适形程度, 但这些放射性束本身导致的生物学效应与稳定的  $^{12}\text{C}$  离子束的效应基本相同<sup>[6]</sup>。当将  $\beta$  缓发粒子衰变放射性束  $^9\text{C}$ ,  $^8\text{B}$  和  $^8\text{Li}$  等应用于治癌时, 这些束流即为一种双重辐射源, 即入射离子束本身的重离子束外辐射和这些离子衰变时发射出低能  $\alpha$  粒子和/或质子的内辐射<sup>[5]</sup>, 它们可对肿瘤实施双重辐照。可以预期, 在不增加入射束流通道上对正常组织损伤的情况下, 利用这些放射性离子衰变时放射出的低能粒子

的内辐射可加大对靶区癌细胞的致死作用。因而, 这些  $\beta$  缓发粒子衰变放射性束  $^9\text{C}$ ,  $^8\text{B}$  和  $^8\text{Li}$  等将会在重离子束治癌中具有重要的应用价值。本文要讨论的就是这些  $\beta$  缓发粒子衰变放射性束的辐照生物学效应及它们产生相关生物学效应的生物物理机制; 同时, 对可利用这些放射性束开展的放射生物学前沿研究进行了讨论。

## 2 放射性束 $^9\text{C}$ 不同贯穿深度上的细胞存活效应

为对放射性束  $^9\text{C}$  的辐照生物学效应有一个基本的理解, 我们在日本国立放射线医学综合研究所(NIRS)专用治癌重离子束加速器 HIMAC<sup>[7]</sup> 的次级束流线<sup>[6]</sup>上, 利用  $^9\text{C}$  束流进行了不同贯穿深度上人类唾液腺细胞(HSG)存活效应的研究<sup>[8]</sup>。在开始这一研究之前, 我们首先利用 HIMAC 提供的能量为 430 MeV/u 的  $^{12}\text{C}$  离子束作为初级束, 通过弹核碎裂机制在铍靶上产生次级束  $^9\text{C}$ , 优化了产生次级束  $^9\text{C}$  的条件<sup>[9]</sup>, 测定了优化条件下  $^9\text{C}$  束流的深度剂量分布<sup>[10]</sup>。由于  $^9\text{C}$  的产额约为  $10^{-5}$ , 并且 HIMAC 装置上初级束  $^{12}\text{C}$  的强度被限制在  $1.8 \times 10^9$  ions/s 之内, 这样  $^9\text{C}$  束流在束流入射位

\* 收稿日期: 2007-02-14

\* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目(O506120BR0); 国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA02Z499)

作者简介: 李 强(1971-), 男(汉族), 陕西宝鸡人, 研究员, 博士生导师, 从事离子束在生命科学中的应用基础研究;

E-mail: liqiang@impcas.ac.cn

点处的剂量率较小, 约 0.5 Gy/h。通过弹核碎裂机制产生的次级束  $^{12}\text{C}$  具有一定的动量展宽, 所以实验用到的  $^{12}\text{C}$  束流的 Bragg 峰被略微地展宽, 并利用次级束流线的束流点扫描装置扫描束流获得大的均匀照射野。这些前期性的物理工作为随后的辐照生物学效应的研究奠定了基础。

HSG 细胞培养在厚度为 100  $\mu\text{m}$  的圆形细胞培养膜上, 辐照前在无菌条件下将每个上面约有  $4 \times 10^5$  个细胞的 10 个培养膜插入一个特制的细胞照射盒中, 调节这 10 个细胞培养膜距束流入射窗的距离, 使得这 10 个细胞培养膜处在  $^{12}\text{C}$  束流 Bragg 峰区附近的贯穿深度上。细胞照射盒注满新鲜培养基后, 用照射盒盖子密封细胞样品。细胞样品照射后, 利用标准的克隆存活形成法测量处于束流不同贯穿深度上的细胞存活率。为了与放射性束  $^{60}\text{Co}$  不同贯

穿深度上细胞存活效应进行比较, 我们在 HIMAC 次级束流线上利用射程调节器和射程调制器调节和调制从 HIMAC 引到次级束流线的  $^{12}\text{C}$  束流, 使得  $^{12}\text{C}$  束流的深度剂量分布与放射性束  $^{60}\text{Co}$  的深度剂量分布基本一致; 通过调节束流的强度使得作为对比的  $^{12}\text{C}$  束流在入射位点处的剂量率与  $^{60}\text{Co}$  束流的相同。利用对比的  $^{12}\text{C}$  束流也测量 10 个与  $^{60}\text{Co}$  束流相同贯穿深度上的 HSG 细胞存活效应。图 1 给出了这 10 个位于束流 Bragg 峰附近贯穿深度上的 HSG 细胞存活效应的实验测量结果, 其中贯穿深度 A 和 B 位于  $^{60}\text{Co}$  和  $^{12}\text{C}$  束流 Bragg 峰的前方上升侧, 贯穿深度 C, D 和 E 位于 Bragg 峰区, 贯穿深度 F, G 和 H 位于 Bragg 峰的下降侧, 贯穿深度 I 和 J 位于 Bragg 曲线的尾部。可清楚地看到: 在 Bragg 峰前及 Bragg 曲线尾部的贯穿深度上,  $^{60}\text{Co}$  和

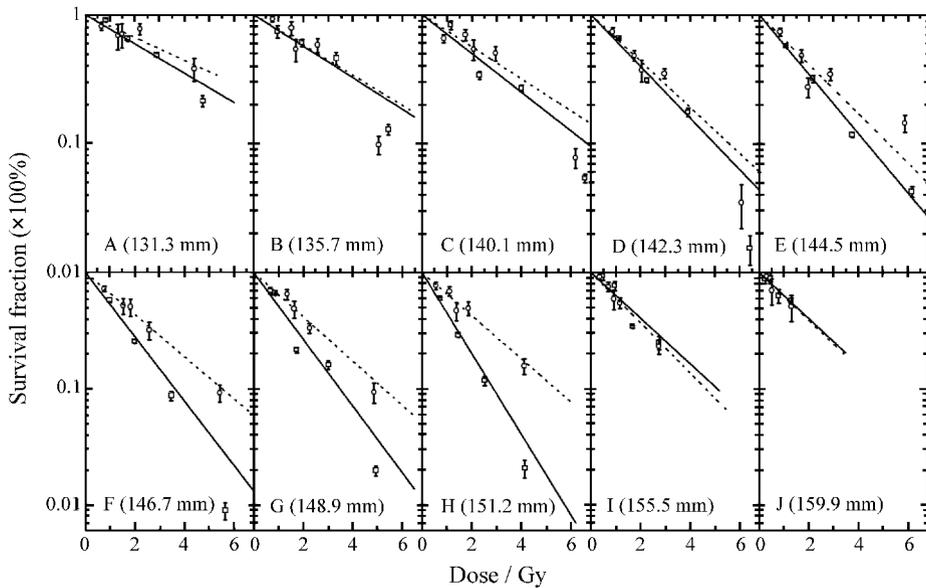


图 1 Bragg 峰区附近  $^{60}\text{Co}$ ( $\square$ )和  $^{12}\text{C}$ ( $\circ$ )束流辐照 HSG 细胞的存活效应

$^{12}\text{C}$  束流对细胞的致死效应基本上没有区别, 在这些贯穿深度上  $^{60}\text{Co}$  和  $^{12}\text{C}$  束流的细胞剂量存活曲线基本一致; 从 Bragg 峰区到 Bragg 峰下降侧的贯穿深度上,  $^{60}\text{Co}$  束流对 HSG 细胞的致死效应要明显强于  $^{12}\text{C}$  束流, 即放射性束  $^{60}\text{Co}$  展示增强的生物学效应, 特别是在 Bragg 峰的下降侧, 这一增强的生物学效应尤为明显。

为进一步定量说明这一增强的生物学效应, 我们以 0.5 Gy/h 低剂量率的  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线作为参考辐射, 实验获得了 HSG 细胞对参考辐射的存活曲线。这样, 在 50% 存活水平下得到了上述 10 个贯穿深

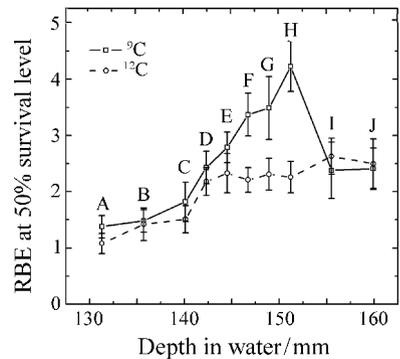


图 2 Bragg 峰区附近  $^{60}\text{Co}$ ( $\square$ )和  $^{12}\text{C}$ ( $\circ$ )束流的 RBE 深度分布深度上  $^{60}\text{Co}$  和  $^{12}\text{C}$  束流的 RBE(见图 2)。在展示增强

生物学效应的范围内(即从贯穿深度 C 到 H),  ${}^9\text{C}$  束流的 RBE 从 1.82 到 4.23 变化, 而  ${}^{12}\text{C}$  束流的 RBE 从 1.51 到 2.26 变化, 在差异最大的贯穿深度 H 上,  ${}^9\text{C}$  束流的 RBE 比  ${}^{12}\text{C}$  束流的大了 1.87 倍。

为了说明  ${}^9\text{C}$  束流增强的生物学效应对放射性束  ${}^9\text{C}$  应用于治癌可能带来的利益, 我们根据上面实验得到的 RBE 深度分布计算了利用  ${}^9\text{C}$  和  ${}^{12}\text{C}$  束流治疗厚度为 6 cm 肿瘤靶区的生物有效剂量深度分布(见图 3)。可以看到: 当靶区的生物有效剂量相同时,  ${}^9\text{C}$  束流给入射通道上正常组织的生物有效剂量要比  ${}^{12}\text{C}$  束流的小 25%; 当入射通道上的生物有效剂量相同时,  ${}^9\text{C}$  束流给靶区肿瘤组织的生物有效剂量要比  ${}^{12}\text{C}$  束流的大 25%。需要指出的是, 在低剂量率条件下, 得到了放射性束  ${}^9\text{C}$  和对照  ${}^{12}\text{C}$  束流的 RBE 深度分布, 并以此为依据预测应用  ${}^9\text{C}$  束流治癌可能带来的利益。当进一步提高实验放射性束  ${}^9\text{C}$  的强度, 得到治癌剂量率(1—5 Gy/min)条件下的 RBE 深度分布后, 才能对应用  ${}^9\text{C}$  束流治癌可能带来的利益做出准确的估计。

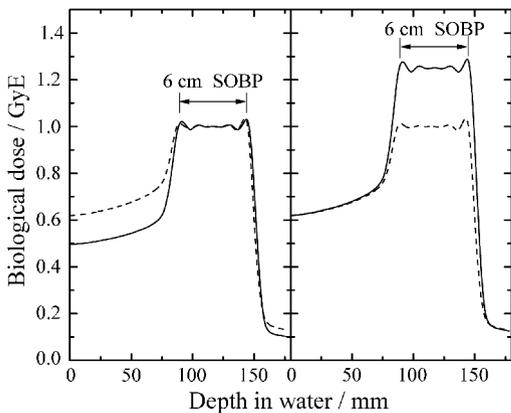


图 3 利用  ${}^9\text{C}$ (—)和  ${}^{12}\text{C}$ (---)束流进行治癌时的生物有效剂量深度分布

### 3 放射性束 ${}^9\text{C}$ 展示增强生物学效应的生物物理机制

可以肯定, 放射性束  ${}^9\text{C}$  相对  ${}^{12}\text{C}$  束流在 Bragg 峰区附近展示的增强的细胞致死效应与  ${}^9\text{C}$  离子衰变发射出的低能粒子有关。由于  ${}^9\text{C}$  衰变的半衰期(126.5 ms)相对  ${}^9\text{C}$  离子贯穿受照射材料而被阻止的时间(约  $10^{-8}$  s)要长很多, 因而由入射  ${}^9\text{C}$  离子衰变形成的内照射绝大多数是在离子停止运动之后发生的。同时,  ${}^9\text{C}$  离子衰变发射的均为低能  $\alpha$  粒子

和低能质子<sup>[11]</sup>, 它们在水中的射程均在几个到几百个  $\mu\text{m}$  之间, 所以内照射仅局限在  ${}^9\text{C}$  离子被阻止区域附近的有限空间, 与入射  ${}^9\text{C}$  离子束在受照射材料中的阻止沉积分布密切相关。我们考虑了入射离子的能量损失歧离效应、入射离子穿越靶物质期间与靶核发生非弹性碰撞而致的通量衰减以及入射离子束的初始能量分布, 建立了束流阻止沉积分布计算模型<sup>[12]</sup>, 并由该模型计算了用于先前辐照生物学效应实验中  ${}^9\text{C}$  束流在实验材料中沿贯穿深度方向上的离子沉积几率密度分布, 结果如图 4 所示。与上节给出的 RBE 深度分布和  ${}^9\text{C}$  与  ${}^{12}\text{C}$  束流深度剂量分布对比, 可以清楚地看到,  ${}^9\text{C}$  束流 RBE 值大于  ${}^{12}\text{C}$  束流的区域, 即显示增强细胞致死效应的区域出现在  ${}^9\text{C}$  离子沉积的区域, 入射  ${}^9\text{C}$  离子沉积几率密度最大处位于贯穿深度 148 mm, 与 RBE 最大处贯穿深度约在 151 mm 相一致。由此初步断定,  ${}^9\text{C}$  束流对细胞最终的致死效应受束流本身及缓发粒子的双重影响, 由沉积  ${}^9\text{C}$  离子衰变发射出的低能  $\alpha$  粒子及质子是导致  ${}^9\text{C}$  束流在其 Bragg 峰附近显示增强的细胞致死效应的原因。

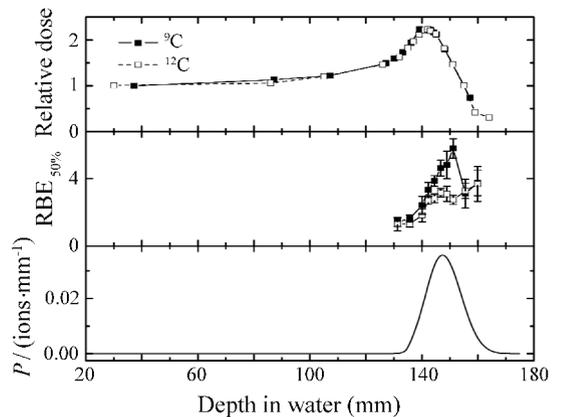


图 4  ${}^9\text{C}$  离子阻止沉积几率密度分布与 RBE 深度分布及深度剂量分布的比较

由于  ${}^9\text{C}$  和  ${}^{12}\text{C}$  离子的核电荷数一样, 从离子径迹结构的观点来看, 若它们的传能线密度(LET)相同, 则由离子辐射本身导致的生物学效应也相同。这样, 若在相同的剂量条件下, 比较在 Bragg 峰区附近相近剂量平均 LET 贯穿深度上的  ${}^9\text{C}$  及  ${}^{12}\text{C}$  束流的细胞存活率实验数据, 及由细胞存活率得到的细胞平均致死事件数, 则对理解  ${}^9\text{C}$  束流增强的细胞致死效应的本质有非常大的帮助。在先前的研究中, 我们已经可以根据实验上得到的细胞存

活率推导出每个细胞中的平均致死事件数,并根据 $^{90}\text{C}$ 离子沉积体密度计算了每个细胞内沉积 $^{90}\text{C}$ 离子平均数目<sup>[12]</sup>。本文以入射位点处剂量为 1 Gy 的实验测量 HSG 细胞存活数据为例,计算了细胞样品所在深度处的 $^{90}\text{C}$ 离子的沉积体密度及 $^{90}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}$ 束流在细胞中造成的平均致死事件数,结果如表 1 所示。需进一步解释的是,表中对应于 $^{90}\text{C}$ 束流的剂量是当 $^{90}\text{C}$ 束流入射剂量为 1 Gy 时对应深度上的照射剂量,而对 $^{12}\text{C}$ 束流,细胞存活率则是与 $^{90}\text{C}$ 束流

上述深度上剂量平均 LET(dose-averaged LET)近似相等深度上与 $^{90}\text{C}$ 照射剂量一样时的实验测量结果。当比较近乎相同剂量平均 LET 深度上的 $^{90}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}$ 束流在细胞中平均致死事件数的差额与每细胞平均沉积 $^{90}\text{C}$ 离子数时,发现两者竟如此一致(见表 1)。对其它入射剂量的结果,有同样的规律。由此可断定,若有一个 $^{90}\text{C}$ 离子在细胞中沉积,则由该沉积离子衰变发射的低能粒子将导致该细胞死亡。

由于 $^{90}\text{C}$ 衰变而发射出的 $\alpha$ 粒子及质子能量都

表 1 具有近似相同剂量平均 LET 的 $^{90}\text{C}$ 及 $^{12}\text{C}$ 束流对 HSG 细胞作用不同数据的比较\*

辐射离子	剂量平均的 LET / (keV · $\mu\text{m}$ )	细胞样品所处的深度/mm	照射剂量 /Gy	实验得到的 HSG 细胞存活率(%)	$^{90}\text{C}$ 离子沉积密度 / (ions · $\text{cm}^{-3}$ )	每细胞平均致死事件数	每细胞平均沉积的 $^{90}\text{C}$ 离子数	$^{90}\text{C}$ 与 $^{12}\text{C}$ 束流每细胞平均致死事件数的差值
$^{90}\text{C}$	74.1	146.7	2.00	28.12±1.79	$1.87 \times 10^7$	1.269±0.081	0.748	0.766±0.126
$^{12}\text{C}$	74.7	140.1	2.00	60.46±11.49	—	0.503±0.096		
$^{90}\text{C}$	76.8	148.9	1.79	30.85±4.62	$1.84 \times 10^7$	1.176±0.176	0.736	0.726±0.195
$^{12}\text{C}$	74.7	140.1	1.79	63.74±12.11	—	0.450±0.085		
$^{90}\text{C}$	77.5	151.2	1.52	29.80±1.89	$1.56 \times 10^7$	1.211±0.077	0.624	0.643±0.081
$^{12}\text{C}$	86.1	142.3	1.52	56.65±2.62	—	0.568±0.026		

\* 以 $^{90}\text{C}$ 束流 1 Gy 的入射处剂量为起点。

很低且射程也很短,在亚细胞尺度,由一个 $^{90}\text{C}$ 衰变导致 3 个低能粒子发射必定导致细胞内辐射敏感靶的团簇损伤,而团簇损伤通常被认为是最严重的辐射损伤且不能被细胞自身的修复机制所修复<sup>[13]</sup>。至此,本文从生物物理学的观点出发,认为我们发现了 $^{90}\text{C}$ 束流较 $^{12}\text{C}$ 束流在它们 Bragg 峰区附近表现出增强的细胞致死效应的本质,即沉积 $^{90}\text{C}$ 离子衰变发射低能粒子导致细胞的团簇损伤是 $^{90}\text{C}$ 束流较 $^{12}\text{C}$ 束流在 Bragg 峰附近表现出增强细胞致死效应的根本原因。同时,本文的结果也可作为团簇损伤难于修复更为高效细胞致死的一种间接证据。

#### 4 利用放射性束 $^{8}\text{B}$ 研究的新进展

为了确认我们在利用放射性束 $^{90}\text{C}$ 辐照生物学效应研究中发现的增强的生物学效应这一实验现象,我们利用 HIMAC 提供的 430 MeV/u $^{10}\text{B}$ 初级束流,在次级束流线上进行了另外一种 $\beta$ 缓发粒子衰变放射性束 $^{8}\text{B}$ 和其对照 $^{10}\text{B}$ 束流辐照生物学效应的初步实验研究。在开始辐照生物学效应研究之前,在次级束流线上优化了由初级束 $^{10}\text{B}$ 产生次级束 $^{8}\text{B}$ 的条件,得到了较高产额和纯度的放射性束

$^{8}\text{B}$ ,并且利用次级束流线上的束流点扫描装置扫描 $^{8}\text{B}$ 束流获得了均匀性好于 90%的照射野。由于产生 $^{8}\text{B}$ 的产额较 $^{90}\text{C}$ 的高,这样 $^{8}\text{B}$ 束流在细胞照射盒入射位点处的剂量率达到 0.8 Gy/h,高于 $^{90}\text{C}$ 情况下的 0.5 Gy/h。同样,为在基本相同条件下比较 $^{8}\text{B}$ 和 $^{10}\text{B}$ 束流的辐照生物学效应,对用作对照的 $^{10}\text{B}$ 束流的物理参数也进行了调节与调制,得到了与 $^{8}\text{B}$ 束流深度剂量分布基本相同的调制 $^{10}\text{B}$ 束流,且该调制束流在入射位点处的剂量率与 $^{8}\text{B}$ 束流的相同。

有上面的基础,利用放射性束 $^{8}\text{B}$ 及其对照 $^{10}\text{B}$ 束流辐照了处于它们 Bragg 峰区附近 10 个相同贯穿深度上的 HSG 细胞样品。初步的实验数据分析显示,较 $^{10}\text{B}$ 束流,放射性束 $^{8}\text{B}$ 同样在 Bragg 峰区附近展示增强的细胞致死效应。进一步的 $^{8}\text{B}$ 和 $^{10}\text{B}$ 束流实验将会提高实验数据的统计学意义,得到明确的结论。

#### 5 结束语

到目前为止, $\beta$ 缓发粒子衰变放射性束在其 Bragg 峰区引起增强的生物学效应是可以确定的,

尽管如此,我们还计划利用放射性束  $^8\text{Li}$  和稳定束流  $^7\text{Li}$  进行进一步的对比实验。从放射性束  $^8\text{B}$  的初步实验结果看, $^8\text{B}$  束流同样展示出增强的生物学效应,但  $^8\text{B}$  和  $^8\text{Li}$  衰变时只发射出两个低能的  $\alpha$  粒子,因而利用放射性束  $^8\text{B}$  和  $^8\text{Li}$  进行研究并与放射性束  $^9\text{C}$  的结果对比,可阐明  $^9\text{C}$  衰变时发射的低能质子在增强的生物学效应中起到的作用。由于  $\beta$  缓发粒子衰变放射性束发射出的低能粒子会在细胞中造成的多个位点的损伤形成空间和时间尺度上的关联,因而可形成放射生物学研究领域中最关心的团簇损伤,这对研究细胞中团簇损伤的生物学功能具有重要作用。特别是放射性束对研究放射生物学中最基本的一个问题,即多少个不可修复的DNA双链断裂会导致细胞死亡,具有其它射线不可比拟的优势。

总之,放射性束作为一种新的辐射源,拓宽了辐射种类,为与辐射相关的研究开辟了一个新的领域,能帮助解决许多生命科学中的基本问题,并具有重要的应用价值,因而利用放射性束在辐照生物学效应方面值得做进一步的研究。

## 参考文献 (References):

- [1] Castro J R. *Radiat Environ Biophys*, 1995, **34**: 45.
- [2] Schulz-Ertner D, Haberer T, Jaekel O, *et al.* *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2002, **53**: 36.
- [3] Miyamoto T, Baba M, Sugawara T, *et al.* *Radiother Oncol*, 2003, **66**: 127.
- [4] Kraft G. *Strahlenther Onkol*, 1999, **175**(Suppl 2): 44.
- [5] Li Q, Kanai T, Kitagawa A. *Phys Med Biol*, 2003, **48**: 2 971.
- [6] Kanazawa M, Kitagawa A, Kouda S, *et al.* *Nucl Phys*, 2002, **A701**: 244c.
- [7] Hirao Y, Ogawa H, Yamada S, *et al.* *Nucl Phys*, 1992, **A538**: 541c.
- [8] Li Q, Furusawa Y, Kanazawa M, *et al.* *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, **63**: 1 237.
- [9] Li Q, Kitagawa A, Kanai T, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2004, **B222**: 270.
- [10] Li Q, Komori M, Kanai T, *et al.* *Phys Med Biol*, 2004, **49**: 5 119.
- [11] Gete E, Buchmann L, Azuma R E, *et al.* *Phys Rev*, 2000, **C61**: 064 310.
- [12] Li Q, Furusawa Y, Kanazawa M, *et al.* *Chin Sci Bull*, 2005, **50**: 2 546.
- [13] Barendsen G W. *Int J Radiat Biol*, 1997, **71**: 649.

## Biological Effect Induced by Radioactive Ion Beam and Corresponding Biophysical Mechanisms<sup>\*</sup>

LI Qiang<sup>1,1)</sup>, Y. Furusawa<sup>2</sup>, A. Kitagawa<sup>2</sup>, M. Kanazawa<sup>2</sup>, JIN Xiao-dong<sup>1</sup>, DAI Zhong-ying<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*;

2 *National Institute of Radiological Sciences, Chiba 263-8555, Japan*)

**Abstract:** The depth-survival effect of a  $\beta$ -delayed particle decay  $^9\text{C}$  beam on human salivary gland (HSG) cells is presented in this paper. Compared with a stable  $^{12}\text{C}$ -ion beam, the radioactive  $^9\text{C}$ -ion beam showed an enhanced biological effect, i. e., remarkably enhanced efficiency in cell killing, at the penetration depths around its Bragg peak. The biophysical mechanisms underlying the enhanced biological effect are discussed herein, and the latest progress in biological effect induced by another radioactive  $^8\text{B}$ -ion beam is introduced. In the end of this paper, several topics concerning the frontier of the radiation-induced biological effects using radioactive ion beams are proposed.

**Key words:** radioactive ion beam;  $^9\text{C}$  ion beam; enhanced biological effect; biophysical mechanism

\* Received date: 14 Feb. 2007

\* Foundation item: Century Program of Chinese Academy of Sciences (O506120BR0); National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA02Z499)

1) E-mail: liqiang@impcas.ac.cn