

X 射线对小鼠胰腺组织结构及血清胰岛素含量和胰淀粉酶活性的影响

曹力凡^① 李重阳^② 俞诗源^{①*} 王 敏^① 刘小媛^①

① 西北师范大学生命科学学院 兰州 730070; ② 甘肃政法学院 兰州 730070

摘要: 探讨 X 射线辐射对小鼠 (*Mus musculus*) 胰腺组织的损伤效应, 对血清胰岛素含量及胰淀粉酶活性的影响, 分析 X 射线对小鼠胰腺内、外分泌部功能的影响。将成年小鼠随机分为 1 Gy、3 Gy、5 Gy 实验组和 0 Gy 对照组 (每组 20 只), 各组小鼠给予对应剂量 X 射线辐射 (连续 3 d, 每天辐射一次, 每次 3 min)。取胰腺组织制作组织切片, 用生物显微技术观察胰腺组织结构的变化, 取小鼠血液, 制备血清, 用双抗体夹心法测定胰岛素含量, 用比色法检测胰淀粉酶活性的变化。结果显示, X 射线辐射引起小鼠胰腺组织肿胀, 细胞核变大, 细胞变性、坏死; X 射线辐射后 5 ~ 15 d, 1 Gy 辐射组小鼠胰岛素含量与对照组相比有不同程度的升高, 差异显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 第 20 天时略有下降, 差异不显著。3 Gy 辐射组各期小鼠胰岛素含量与对照组相比均下降, 差异显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。5 Gy 辐射组各期小鼠胰岛素含量与对照组相比均下降, 差异显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 第 15 天起全部死亡; 1 Gy 辐射组小鼠胰淀粉酶活性相对对照组变化不显著 ($P > 0.05$), 3 Gy 辐射组小鼠胰淀粉酶活性相对对照组均有不同程度的升高, 差异显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 5 Gy 辐射组小鼠胰淀粉酶活性较对照组降低, 差异极显著 ($P < 0.01$)。结果表明, X 射线辐射能引起小鼠胰腺组织结构损伤, 影响小鼠血清胰岛素含量和血清胰淀粉酶的活性, 引起胰腺功能异常。

关键词: X 射线; 小鼠; 胰腺; 胰岛素; 胰淀粉酶

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2014)06-804-07

Effects of X-ray Irradiation on Pancreas Structure, Serum Insulin and Pancreatic Amylase Activity in Mice

CAO Li-Fan^① LI Chong-Yang^② YU Shi-Yuan^{①*} WANG Min^① LIU Xiao-Yuan^①

① College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070; ② Gansu Political Science and Law Institute, Lanzhou 730070, China

Abstract: To explore the adverse effects of X-ray irradiation on pancreatic tissue structure, serum insulin level and serum pancreatic amylase activity in mice, adult mice were randomly allocated to 0 Gy, 1 Gy, 3 Gy, and 5 Gy groups (20 mice in each), and each group was exposed to 3 min corresponding dose of X-ray irradiation once a day for 3 days. The changes of pancreas tissue structure were observed by optical microscope, and the changes of serum insulin concentration was determined with double antibody clip art method, and pancreatic

基金项目 甘肃省自然科学基金项目 (No. 1107RJZA141), 兰州市社会发展项目 (No. 2013-3-72);

* 通讯作者, E-mail: syyu006@nwnu.edu.cn;

第一作者介绍 曹力凡, 女, 硕士研究生; 研究方向: 细胞与发育生物学; E-mail: lifancao@aliyun.com。

收稿日期: 2013-12-09, 修回日期: 2014-03-17

amylase enzyme activity in serum was detected with colorimetric method. Results showed that the X-ray irradiation caused pancreatic tissue swelling, with bigger cell nucleus and degenerative necrosis (Fig. 1); The insulin level of 1 Gy irradiation group was higher than that of control group after 5 – 10 days ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), but fell slightly by 20 days (Fig. 2). Insulin levels in 3 Gy and 5 Gy irradiation mice decreased compared to control group. 5 Gy mice died by 15 days (Fig. 2). Amylase activity in 1 Gy irradiation group was close to that of control group ($P < 0.05$) (Fig. 3), while amylase activity in 3 Gy irradiation group was higher than that of control group ($P < 0.05$ or $P < 0.01$) (Fig. 3). Amylase activity in 5 Gy irradiation group decreased compared to that of the control group (Fig. 3). These results show that pancreas tissue structure is damaged and serum insulin and pancreatic amylase activity are decreased by X-ray irradiation. X-ray causes abnormal function of the pancreas.

Key words: X-ray; Mice; Pancreas; Insulin; Pancreatic amylase

自 1986 年德国康兹维堡大学伦琴先生发现 X 射线后,人类社会便拉开了对 X 射线应用的帷幕,大到地质勘测小到体内医疗诊断,而应用的同时也不可避免的带来了许多负面影响。有研究报道电磁辐射是大气污染、水质污染、噪音污染之后的第四大公害,对人体组织的伤害更甚于其他污染(许正平等 2004, 刘婷婷 2006),手机辐射可造成小鼠(*Mus musculus*)小肠推进率下降(裴银辉等 2009),电离辐射能引起小鼠海马依赖的认知功能缺陷(张力元等 2012),低剂量 X 射线辐射即能引起小鼠睾丸组织形态及生精细胞 P53 和 bcl-2 蛋白表达发生变化(仵春云等 2013),X 射线辐射会引起小鼠肠、胃、大脑等多种组织器官出现不同程度的病理变化,导致胃肠功能下降和细胞凋亡(左文涛等 2011, 2012),X 射线影响肝超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)活力,引起肝功能异常(邓海平等 2008)。但有关电离辐射对胰腺组织的生物效应却鲜有报道,为了搞清 X 射线对胰腺组织结构和功能的影响,本文以昆明小鼠为模型,用 X 射线辐射小鼠后观察胰腺组织结构的变化,检测血清中胰岛素含量和胰淀粉酶活性的变化,分析 X 射线对小鼠胰腺组织的影响,为 X 射线对健康机体产生的生物效应以及 X 射线防护提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂及仪器 胰淀粉酶活性测定试

剂盒购于南京建成生物工程研究所,胰岛素检测试剂盒购于上海丰翔生物有限公司;UV-VIS spectrophotometer 全自动分光光度计(U-1800 型, Tokyo Japan),高速台式冷冻离心机(TGL-16M 型, Beckman America),生物显微镜(HFX-II A, Nikon China)。

1.2 实验动物处理 选成年昆明小鼠 80 只,体重(20 ± 1)g,兰州大学实验动物中心提供,随机分为 4 组,每组 20 只,包括对照组、1 Gy 辐射组、3 Gy 辐射组和 5 Gy 辐射组,辐射剂量分别为 0 Gy、1 Gy、3 Gy、5 Gy。参考左文涛等(2012)方法,用 X 射线深部治疗机(兰州市肿瘤医院提供)全身辐射,辐射距离 100 cm,剂量率为 300 cGy/min,每天 1 次,连续辐射 3 d,每次 3 min。

1.3 组织结构观察 实验动物分别于辐射 5 d、10 d、15 d、20 d 断头处死,取胰腺组织入 15% 的中性福尔马林液中固定,常规石蜡包埋、切片(厚度 6 μ m),H.E 染色,显微镜下观察并拍照。

1.4 酶活性测定 分别取实验第 5 d、10 d、15 d、20 d 的小鼠血液,3 000 r/min 冷冻离心 10 min,制血清。按试剂盒要求操作,用 UV-VIS spectrophotometer 全自动分光光度计在 660 nm 波长处检测胰淀粉酶吸光度值,计算淀粉酶活性。计算公式:AMS = [(空白管吸光度 - 测定管吸光度)/空白管吸光度] $\times$ 800,式中,AMS 为淀粉酶活性,单位为 U,其定义为

100 ml血清中胰淀粉酶在 37℃ 与底物作用 30 min水解 10 mg 淀粉为一个单位。

1.5 胰岛素含量测定 用上述冷冻离心的小鼠血清,按照小鼠胰岛素(insulin)酶联免疫分析试剂盒操作步骤,用酶标仪在 450 nm 波长下测定吸光度(A 值),以标准物的浓度为横坐标, A 值为纵坐标,在坐标纸上绘出标准曲线,根据样品的 A 值由标准曲线查出相应的浓度;再乘以稀释倍数;或用标准物的浓度与 A 值计算出标准曲线的直线回归方程式,将样品的 A 值代入方程式,计算出样品浓度,再乘以稀释倍数,即为样品的实际浓度。

回归方程为 $Y = -2.354X^2 + 10.94X - 0.669$; 计算公式为 $C = [2.324 + \sqrt{5.40 - \frac{0.669 + A}{2.354}}] \times 10$, C 是胰岛素的实际浓度,单位为 U/ml。

1.6 数据处理 实验数据用 SPSS 17.0 软件进行统计处理,结果以 $\text{Mean} \pm \text{SD}$ 表示,实验组与对照组间比较,采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果

2.1 X 射线辐射后小鼠胰腺组织结构的变化

X 射线辐射影响小鼠胰腺组织的结构。对照组胰腺组织外分泌部与内分泌部胰岛结构清晰完整,细胞排列整齐,细胞间界限分明(图 1: a ~ c); 1 Gy 辐射组小鼠胰腺与对照组相比出现轻微的病理变化,胰腺组织小叶间轻微水肿(图 1: d ~ f); 3 Gy 辐射组与对照组相比胰腺组织外分泌部明显肿胀,胰岛细胞排列散乱(图 1: g ~ i),外分泌部细胞核变大(图 1j); 5 Gy 辐射组小鼠与对照组相比胰腺组织细胞核变大,核质不清、细胞变性,内外分泌部细胞间界限模糊,并出现严重的胰腺自溶现象(图 1k, l)。5 Gy 辐射组小鼠第 15 天时全部死亡。

2.2 X 射线辐射后胰岛素含量的变化 X 射线辐射后 5 ~ 15 d, 1 Gy 辐射组小鼠胰岛素含量与对照组相比较有不同程度的升高,差异显

著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),第 20 天时略有下降,差异不显著(图 2); 3 Gy 辐射组各期小鼠胰岛素含量与对照组相比均下降,差异显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 5 Gy 辐射组小鼠胰岛素含量与对照组相比均下降,差异显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),第 15 天起全部死亡。

2.3 X 射线辐射后胰淀粉酶活性变化 X 射线辐射后, 1 Gy 辐射组各期小鼠胰淀粉酶活性与对照组差异不显著($P > 0.05$) (图 3); 3 Gy 辐射组各期小鼠胰淀粉酶活性比对照组均有不同程度的升高,差异显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 5 Gy 辐射组小鼠胰淀粉酶活性各期均较对照组降低,差异极显著($P < 0.01$),第 15 天起全部死亡。

3 讨论

3.1 X 射线对胰腺组织结构的影响 胰腺是人体最大的消化腺之一,由外分泌部和内分泌部组成,分泌多种消化酶和胰岛素、胰高血糖素等,在机体消化吸收和维持血糖平衡过程中发挥重要作用,胰腺的生理作用和病理变化都与生命息息相关。胰腺导管发育不良会引起遗传性胰腺炎(Noel et al. 2009),急性坏死性胰腺炎具有高致死率(van Santvoort et al. 2010)。研究表明,X 射线辐射能引起小鼠大脑、肝、肠胃等组织结构出现病理变化,破坏机体抗氧化系统(王元春等 2010, 俞诗源等 2011)。X 射线能直接将能量传递给生物大分子,如核酸、蛋白质等,使它们发生电离、激发或化学键的断裂等变化,导致分子结构的改变和生物活性的丧失,从而造成细胞损伤,引发细胞产生多种反应,如细胞周期延迟、DNA 损伤、细胞变性、凋亡等。本实验结果显示,X 射线引起胰腺组织水肿、细胞变性、坏死、细胞间界限模糊,组织出现严重的自溶现象,表明 X 射线影响小鼠胰腺的组织结构。可能是 X 射线在细胞内产生较高的能量衰减,在细胞内产生大量的光电子,这些电子具有局部能量高度沉积等特点,造成胰腺细胞内大分子物质结构的破坏,

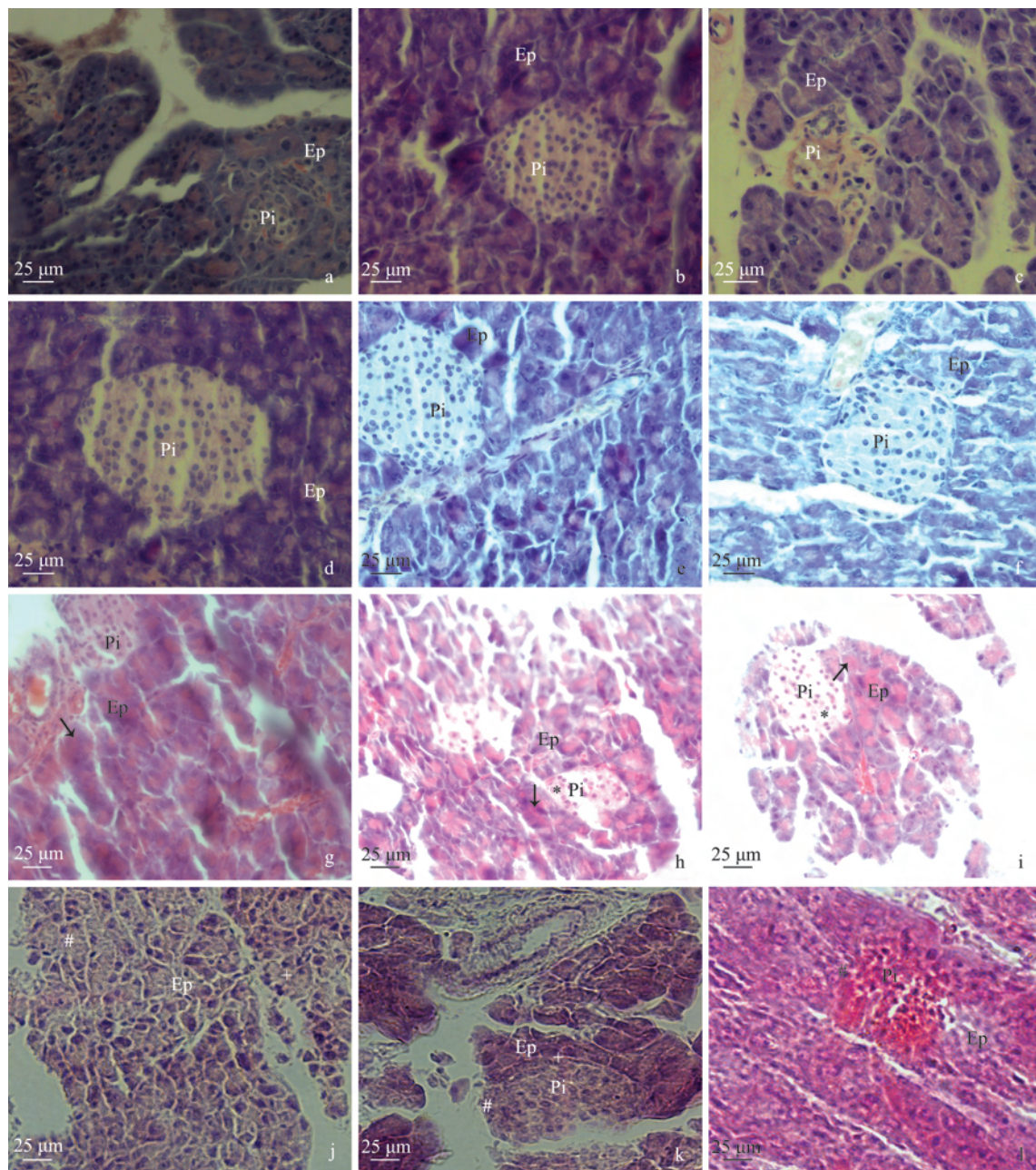


图 1 X 射线辐射对胰腺组织结构的影响

Fig. 1 Effects of X-ray irradiation on pancreas structure

a. 对照组 5 d 胰腺组织结构; b. 对照组 10 d 胰腺组织结构; c. 对照组 20 d 胰腺组织结构; d. 1 Gy 辐射组 5 d 胰腺组织结构; e. 1 Gy 辐射组 10 d 胰腺组织结构; f. 1 Gy 辐射组 20 d 胰腺组织结构; g. 3 Gy 辐射组 5 d 胰腺组织结构, 胰腺外分泌部小叶间质水肿 (↑); h. 3 Gy 辐射组 10 d 胰腺组织结构, 胰腺外分泌部小叶间质水肿 (↑), 胰岛细胞排列散乱 (*); i. 3 Gy 辐射组 15 d 胰腺组织结构, 胰腺外分泌部小叶间质水肿 (↑); j. 3 Gy 辐射组 20 d 胰腺组织结构, 细胞核变大 (+), 核质不清 (#); k. 5 Gy 辐射组 5 d 胰腺组织结构, 细胞核变大 (+), 核质不清 (#); l. 5 Gy 辐射组 10 d 胰腺组织结构, 胰腺自溶, 内外分泌部模糊不清 (#)。

a. The pancreatic tissue of control group 5 d after irradiation; b. The pancreatic tissue of control group 10 d after radiation; c. The pancreatic tissue of control group 20 d after irradiation; d. The pancreatic tissue of 1 Gy group 5 d after radiation; e. The pancreatic tissue of 1 Gy group 10 d after irradiation; f. The pancreatic tissue of 1 Gy group 20 d after irradiation; g. The pancreatic tissue of 3 Gy group 5 d after irradiation, the pancreas exocrine section lobular interstitial edema (↑); h. The pancreatic tissue of 3 Gy group 10 d after irradiation, the pancreas exocrine section lobular interstitial edema (↑); i. The pancreatic tissue of 3 Gy group 15 d after irradiation, the pancreas exocrine section lobular interstitial edema (↑); j. The pancreatic tissue of 3 Gy group 20 d after irradiation, nuclei get bigger (+), nuclear mass is not clear (#); k. The pancreatic tissue of 5 Gy group 5 d after irradiation, nuclei get bigger (+), nuclear mass is not clear (#); l. The pancreatic tissue of 5 Gy group 10 d after irradiation, the pancreas is autolyzed, the islets and exocrine section are blurred (#).

Pi. 胰岛; Ep. 胰腺外分泌部. Pi. Pancreas islet; Ep. Exocrine pancreas.

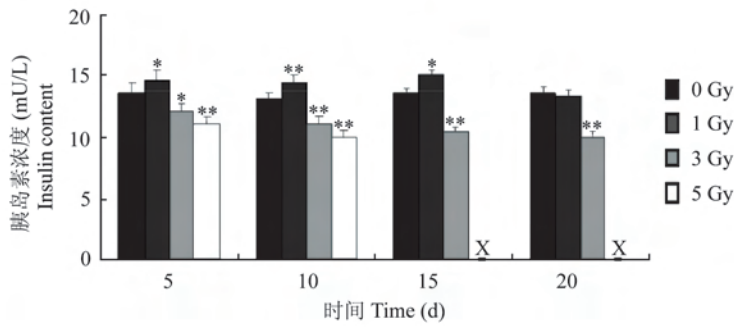


图 2 X 射线辐射后血清中胰岛素含量变化

Fig. 2 Changes of serum insulin after X-ray irradiation

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 与对照组比较; X. 全部死亡。

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, compared with control group; X. All dead.

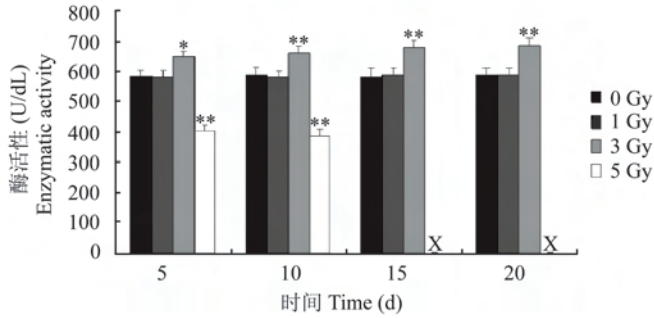


图 3 X 射线辐射后血清中胰淀粉酶活性变化

Fig. 3 Changes of serum pancreatic amylase activity after X-ray irradiation

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 与对照组比较; X. 全部死亡。

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, compared with control group; X. All dead.

进而造成细胞的辐射损伤 (Olive et al. 1990, 张忠新等 2013)。另外, X 射线可以电离机体内广泛存在的水分子产生自由基, 通过这些自由基的间接作用来损伤机体。辐射损伤的发病机理和其他疾病一样, 致病因子作用于机体之后, 既可以引起分子水平、细胞水平的变化, 还可产生一系列的继发作用, 最终导致器官水平的障碍乃至整体水平的变化。本实验也可能是由于 X 射线辐射破坏了机体的抗氧化系统, 大量氧自由基存在于组织中未能及时清除, 攻击细胞膜, 造成细胞脂质过氧化引起氧化应激损伤 (Kakkar et al. 1998, 彭洁等 2012, 左文涛等 2012), 同时胰腺本身分泌消化酶, 病变时极其容易发生自溶, 高剂量 X 射线可诱发胰岛

的炎症反应, 引起胰岛细胞自身的免疫反应, 从而出现严重的胰腺自溶现象 (叶光华等 2008), 进一步造成胰腺组织损伤。

3.2 X 射线对胰岛素含量的影响 胰岛素是由胰腺内分泌部胰岛 β 细胞受内源性或外源性物质如葡萄糖、乳糖、核糖、精氨酸、胰高血糖素等的刺激而分泌的一种蛋白质激素, 胰岛素能促进全身组织细胞对葡萄糖的摄取和利用, 并抑制糖原的分解和糖原异生, 在机体血糖平衡调节过程中发挥着重要作用。胰岛素分泌不足会引起机体发生糖尿病, 有研究发现 II 型糖尿病患者极易引发急性胰腺炎并发症 (Noel et al. 2009, Girman et al. 2010)。本研究显示 1 Gy X 射线辐射引起小鼠血清胰岛素含量持

续升高(前 15 d), 3 Gy 和 5 Gy 辐射组小鼠胰岛素含量比对照组均有下降, 表明 X 射线直接影响血清胰岛素含量, 低剂量电离辐射会激活细胞信号通道, 引起细胞的应激反应(姚斌等 2013), 低剂量微波照射人肥大细胞系 HMC-1 可通过激活蛋白激酶 C 的途径影响基因表达的变化(Harvey et al. 1999), 静电磁场通过调节 Ca^{+} 内流而抑制细胞凋亡, 增加细胞存活率(Fanelli et al. 1999), 低剂量电离辐射能使细胞产生兴奋效应, 引起小鼠肾细胞间黏附分子 1 (intercellular adhesion molecule-1, ICAM-1) mRNA 及蛋白表达上调(张弛等 2010, 张忠新等 2013)。本实验可能由于小鼠机体在受到低剂量(1 Gy) X 射线辐射时细胞发生应激反应, 从而造成血清中胰岛素含量升高。而长期低剂量辐射能诱发应激机制, 使机体产生较多的 SOD 来抵制氧化损伤(赵航等 2012), 因此机体在遭受低剂量 X 射线辐射后进行自我修复, 抵制损伤, 最终使胰岛素含量在 20 天时恢复接近正常水平。高剂量 X 射线照射能引起小鼠胃功能蛋白 Ghrelin 表达下降(左文涛等 2012)。本实验结果显示高剂量 X 射线辐射引起血清胰岛素含量显著降低, 一方面, 可能由于高剂量 X 射线辐射造成胰腺组织结构的损伤, 胰岛 β 细胞变性、坏死、分泌功能下降。另一方面, 胰岛素的合成受神经调节和多种物质的影响(常宝成等 2011), X 射线辐射使小鼠大脑功能异常(王元春等 2010), 这会引起机体对胰岛素分泌的调节功能障碍, 从而导致血清胰岛素含量显著降低。此外高剂量 X 射线辐射既可引起胰岛 β 细胞变性, 又可直接传递能量破坏胰岛素合成过程中的蛋白转化酶等活性物质, 使胰岛素合成的中间过程受阻, 影响胰岛素的合成, 导致血清胰岛素含量降低。

3.3 X 射线对胰淀粉酶活性的影响 胰淀粉酶是胰腺外分泌部分泌的一种水解酶, 在机体消化吸收过程中发挥重要功能。血清淀粉酶活性高低可反映胰腺炎症情况, 是临床诊断胰腺疾病的重要指标之一(Park et al. 2011), 胰腺外分泌部受损或发生炎症时, 血清胰淀粉酶活

性升高(林涛等 2012)。本实验显示 1 Gy X 射线辐射组小鼠血清淀粉酶活性变化不显著, 一方面, 可能是由于 1 Gy X 射线辐射对胰腺组织损伤较轻, 胰腺细胞产生适应性效应(张忠新等 2013), 逐渐自我修复, 未出现明显的炎症反应; 另一方面低剂量电离辐射能促进胰腺组织相关免疫因子释放, 缓解炎症反应(张弛等 2010), 因此未出现明显的炎症反应。3 Gy X 射线辐射小鼠血清胰淀粉酶活性显著高于对照组, 表明胰腺出现较明显的炎症反应, 由于高剂量 X 射线引起胰腺外分泌部细胞发生水解反应, 产生较多的过氧化氢、羟基自由基等活性氧, 细胞内氧化和抗氧化系统失衡(白海娜等 2013), 胰腺组织细胞不能及时清除自由基, 而出现炎症反应, 胰腺胰泡细胞受损释放细胞内的酶物质, 使血清中淀粉酶活性显著升高(Warzecha et al. 2010); 5 Gy X 射线辐射组血清胰淀粉酶活性显著降低, 一方面是因为高剂量 X 射线辐射使细胞抗氧化系统遭到严重破坏, 使胰腺组织结构严重损伤, 胰腺外分泌部分泌功能严重受损, 淀粉酶合成过程受阻, 另一方面, 推测可能是由于 X 射线通过能量衰减直接作用诱导胰腺细胞线粒体膜通透性增加、细胞包素 c 释放和 casPases 激活最终引起细胞凋亡(刘光伟 2003), 使胰腺外分泌部分泌能力减弱, 从而导致血清中淀粉酶活性下降。

综上所述, X 射线影响胰腺组织的结构, 且与剂量相关, 剂量越大, 损伤越明显。低剂量 X 射线辐射引起胰腺出现应激反应, 高剂量 X 射线引起胰腺炎症反应, 造成胰腺组织的严重损伤, 使得胰腺外分泌部分泌能力下降, 胰岛 β 细胞分泌功能下降。

参 考 文 献

- Fanelli C, Coppola S, Barone R, et al. 1999. Magnetic fields increase cell survival by inhibiting apoptosis via modulation of Ca^{2+} influx. Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology, 13(1): 95-102.
- Girman C J, Kou T D, Cai B, et al. 2010. Patients with type 2

- diabetes mellitus have higher risk for acute pancreatitis compared with those without diabetes. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 12(9): 766–771.
- Harvey C, French P W. 1999. Effects on protein kinase C and gene expression in a human mast cell line, HMC-1, following microwave exposure. *Cell Biology International*, 23(11): 739–748.
- Kakkar R, Mantha S. V, Radhi J, et al. 1998. Increased oxidative stress in rat liver and pancreas during progression of streptozotocin-induced diabetes. *Clinical Science*, 94(6): 623–632.
- Noel R A N, Braun D K, Patterson R E, et al. 2009. Increased risk of acute pancreatitis and biliary disease observed in patients with type 2 diabetes: a retrospective cohort study. *Diabetes Care*, 32(5): 834–838.
- Olive P L, Banáth J P, Durand R E. 1990. Heterogeneity in radiation-induced DNA damage and repair in tumor and normal cells measured using the “comet” assay. *Radiation Research*, 122(1): 86–94.
- Park W G, Mascarenhas R, Palaez-Luna M, et al. 2011. Diagnostic performance of cyst fluid carcinoembryonic antigen and amylase in histologically confirmed pancreatic cysts. *Pancreas*, 40(1): 42–45.
- van Santvoort H C, Besselink M G, Bakker O J, et al. 2010. A step-up approach or open necrosectomy for necrotizing pancreatitis. *The New England Journal of Medicine*, 362(16): 1491–1502.
- Warzecha Z, Ceranowicz P, Dembinski A, et al. 2010. Therapeutic effect of ghrelin in the course of cerulein-induced acute pancreatitis in rats. *Journal of Physiology and Pharmacology*, 61(4): 419–427.
- 白海娜, 王振宇, 李辉, 等. 2013. 五种浆果多酚与黑木耳多糖复合物的辐射防护作用. *食品工业科技*, 34(16): 117–120, 124.
- 常宝成, 杨菊红, 任慧珠, 等. 2011. 阿托伐他汀和普伐他汀对大鼠胰岛 β 细胞胰岛素合成的影响及机制. *国际内分泌代谢杂志*, 31(3): 148–151.
- 邓海平, 俞诗源, 陈玉琴, 等. 2008. X 射线辐射对仔鼠体重、皮毛生长及肝、肾脏组织 SOD、CAT 活力及 MDA 含量的影响. *动物学报*, 54(6): 1029–1037.
- 林涛, 周毅, 王钧, 等. 2012. 吡啶美辛预防经内镜逆行胆胰管造影术后胰腺炎和高淀粉酶血症的临床研究. *中华消化内镜杂志*, 29(4): 185–187.
- 刘光伟, 龚守良. 2003. 细胞凋亡的线粒体调控机制与电离辐射. *国外医学: 放射医学核医学分册*, 27(2): 90–93.
- 刘婷婷. 2006. 电磁辐射与电磁污染. *现代物理知识*, 18(1): 30–31.
- 裴银辉, 安新, 李琳, 等. 2009. 手机辐射对实验小鼠胃肠功能的影响. *中国辐射卫生*, 18(2): 170–171.
- 彭洁, 李玉亮, 吴昊, 等. 2012. 川芎嗪对辐射所致小鼠氧化应激损伤的保护作用. *癌变突变畸变检测研究*, 24(3): 231–234.
- 仵春云, 唐开发, 张杜平, 等. 2013. 多次低剂量 X 线照射对小鼠睾丸组织形态及生精细胞 P53 和 bcl-2 蛋白表达的影响. *中国男科学杂志*, 27(1): 17–19.
- 王元春, 俞诗源, 王昱, 等. 2010. X 射线对仔鼠大脑枕叶皮层结构及大脑超氧化物歧化酶, 过氧化氢酶活性及丙二醛含量的影响. *解剖学报*, 41(5): 641–648.
- 许正平, 曾群力. 2004. 电磁辐射的生物学效应及其应用和预防. *国际学术动态*, (3): 20–24.
- 叶光华, 张益鹄, 喻林升, 等. 2008. 急性坏死性胰腺炎与死后胰腺自溶病理形态学变化. *法医学杂志*, 24(2): 94–96, 101.
- 姚斌, 裴海龙, 高笑菲, 等. 2013. PML 功能及其在细胞辐射应激响应中的作用. *原子核物理评论*, 30(2): 190–194.
- 俞诗源, 左文涛, 王元春. 2011. X 射线对仔鼠十二指肠组织结构和抗氧化酶活性的影响. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 47(3): 80–84.
- 赵航, 贺中民, 涂宏海, 等. 2012. 小鼠低剂量辐射损伤模型的初步研究. *现代生物医学进展*, 12(20): 3817–3821.
- 张驰, 龚守良, 刘笑菊, 等. 2010. 低剂量电离辐射对糖尿病小鼠肾脏 ICAM-1 mRNA 和蛋白表达的影响. *吉林大学学报: 医学版*, 36(2): 215–219.
- 张力元, 孙锐, 田野. 2012. 电离辐射导致大脑认知功能损害的实验研究进展. *中华医学杂志*, 92(1): 63–66.
- 张忠新, 刘建功, 刘红艳, 等. 2013. 低剂量电离辐射生物效应研究. *辐射研究与辐射工艺学报*, 31(5): 101–106.
- 左文涛, 刘婷婷, 俞诗源. 2012. X 射线辐射对仔鼠消化酶活性及胃中 Bax 和 Ghrelin 表达的影响. *中国细胞生物学报*, 34(9): 857–864.
- 左文涛, 俞诗源, 王昱, 等. 2011. X 射线对仔鼠胃组织结构及总抗氧化能力、谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶活性的影响. *解剖学报*, 42(4): 521–526.