

文章编号: 1000-0615(2005)03-0424-05

• 研究简报 •

$^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对成体长牡蛎生长的影响及致死效应

刘 晓¹, 彭小明^{1,2}, 张国范¹, 赵 敏^{1,2}, 郭希明³

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. Haskin Shellfish Research Lab, Rutgers University, Port Norris, NJ 08349, USA)

关键词: 长牡蛎; $^{60}\text{Co}-\gamma$; 刺激; 致死; 生长; 条件指数

中图分类号: S917 文献标识码: A

Mortality and growth of cobalt-60 gamma-irradiated adult Pacific oyster, *Crassostrea gigas*

LIU Xiao¹, PENG Xiaoming^{1,2}, ZHANG Guofan¹, ZHAO Min^{1,2}, GUO Ximing³

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Haskin Shellfish Research Lab, Rutgers University, Port Norris, NJ 08349, USA)

Abstract: Effects of ionizing irradiation of $^{60}\text{Co}-\gamma$ ray on mortality and growth of one year-old Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) were studied. Irradiation was conducted at 4 °C and without sea water, and the survival, shell length, shell width, whole wet weight and condition index of irradiated oysters were measured. A biphasic dose response effect of $^{60}\text{Co}-\gamma$ irradiation on Pacific oyster with high stimulatory response dose range to 100 Gy, and strong hormesis effects had been observed. Gamma ray induced mortality happened within 90 days after irradiation, and the relation between dosage (D) and mortality at 90 days could be described by the equation of $M_{90} = 0.0041D^2 - 0.1816D$ ($R^2 = 0.9958$) with an $\text{LD}_{50/90}$ of 135 Gy, indicating that the Pacific oyster has strong resistance to $^{60}\text{Co}-\gamma$ irradiation. Growth in shell length, shell width and whole wet weight of Pacific oyster were also enhanced by 60 Gy of $^{60}\text{Co}-\gamma$ ray. The condition index was also enhanced by $^{60}\text{Co}-\gamma$ irradiation in the dosage range from 40 to 100 Gy, with the maximum stimulatory response of 2.5 fold of control value at the 40 Gy dosage, suggesting that the accelerating effects of γ ray on growth of the Pacific oyster led to increase in dry meat. Results of this study showed that ionizing irradiation might be useful in the improvement of production traits in shellfish.

Key words: *Crassostrea gigas*; $^{60}\text{Co}-\gamma$; hormesis; mortality; growth; condition index

电离辐射的生物学效应包括高剂量条件下的致死、致突、致畸效应和低剂量条件下的刺激效应。辐射生物学效应研究在哺乳动物中开展得最多,主要针对肿瘤的放疗和人类的辐射防护^[1];其次在农作物和微生物中也有大量的报道,主要目的在于进行辐射诱变育种^[2];水生生物中,虽在鱼类^[3,4]、甲壳类^[5-8]、贝类^[9-13]、藻类^[14-17]等也有初步的应用,但整体来说辐射生物学研究仍很缺乏,在海洋动物中尤其如此。

在贝类中,国外曾以 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线处理美洲牡蛎的幼虫,在死亡率^[12]、成体阶段性发育^[13]等方面开展了初步研究,试图通过阻断性腺发育而提高其在夏季的食用品质;通过电离辐射处理控制污损贝类^[9]、杀死贝类食品中的病菌和寄生虫^[18]等方面也进行了研究。在国内,则在直接应用小剂量辐射的刺激效应方面进行了一些尝试,如利用小剂量 $^{137}\text{Cs}-\gamma$ 射线照射幼贝^[19]以促进栉孔扇贝生长、快中子辐射处理提高鲍受精卵的孵化率及稚鲍成活率^[20]。

收稿日期: 2004-04-08

资助项目: 中国科学院知识创新领域前沿项目; 国家 863 计划课题(2003AA603023); 国家杰出青年基金(39825121)

作者简介: 刘 晓(1965-), 女, 浙江缙云人, 博士, 研究员, 主要从事贝类遗传和分子生物学研究。E-mail: liuxiao@ms.qdio.ac.cn

此外, 贝类提取物的抗辐射活性研究在国内外都有报道^[21, 22]。虽然, 贝类的辐射生物学研究尚在起步阶段, 前述部分研究结果仅在会议上进行过交流, 但贝类的辐射生物学研究及其在育种(辐射诱变)、引种(辐射导致不育以控制基因扩散)、生物防治、食品加工、保健品开发等方面已取得初步结果, 这其中对贝类生物学效应的系统研究则是重要的第一步。

牡蛎是重要的经济贝类, 在国际贝类贸易中占有重要的地位。因其易饲养、雌雄异体、雌性配子量大、生殖操作容易, 已成为国际间贝类基础生物学研究的重要材料。本研究以长牡蛎(*Crassostrea gigas*)为材料, 报道了 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线外照射处理对不同发育阶段存活、生长、发育及生理学、遗传学等方面的影响。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验所用 1 龄长牡蛎, 系 2001 年夏季从山东日照岚山头海区采集的天然苗, 于浮筏笼养至 2002 年 4 月中旬。选取体型匀称、体长 5 cm 左右的个体, 在中国科学院海洋研究所培育楼暂养 10 d 后进行辐射处理。

1.2 辐射处理

$^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射处理于 2002 年 4 月 28 日在莱阳农学院原子能利用实验站进行, 辐射源强度 1.2×10^4 Ci, 剂量率 $1.5 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$, 源强度经中国计量科学研究院电离辐射处用丙氨酸剂量计进行标定。辐射处理采用外照射方法, 每剂量 40 个个体, 在 4°C 干露条件下进行。

1.3 死亡率 和 生长速率测定

辐射处理前, 将牡蛎随机分组, 每组 10 个个体, 分别测量每个个体的壳长、壳宽、全湿重等参数。辐射处理后, 在中国科学院海洋研究所培育楼内用自然海水暂养, 培育水温 $12\sim 14^\circ\text{C}$, 每日全量换水 1 次, 投喂单细胞硅藻 3 次, 计数死亡个体数。30 d 后挂养到青岛太平角海区的浮筏上, 辐射后 90 d 开始定期测量死亡率和各组所有存活个体的生长相关指标。生长速率以壳长、壳宽及全湿重的增长率表示, 即辐射后一定时间所有存活个体的某项指标平均值与辐射前该剂量组所有个体该指标的平均值之比值, 与辐射前该剂量组所有个体的平均值之比的百分率。

1.4 条件指数测定

牡蛎条件指数的测定 按文献^[23, 24]介绍的方法进行, 在辐射处理后 180 d, 每组测定 6 个个体。测定时长牡蛎的性腺处于休止期, 软体部肥满度较好。

条件指数 = 软体部干重(g) / 壳腔体积(mL) \times 100

壳腔体积测量方法 清除牡蛎壳表面的杂物并将其浸泡于淡水中, 测量前用粗滤纸吸干体表的水分, 在量筒中加入一定体积的淡水并记录水的体积, 然后将牡蛎整个浸没到量筒的水中, 重新读数, 2 次读数之差值即为牡蛎的整体体积, 每个个体重复测量 3 次; 取出长牡蛎软体部

后用同样方法测出牡蛎壳的体积, 每个体重复测量 3 次; 每个牡蛎的整体体积与壳体积之差值即为该个体的壳腔体积。

软体部干重测定方法 将洁净的 $\phi 7$ cm 培养皿于 60°C 烘箱中预处理 1 h 后称取重量, 将牡蛎的全部软体部组织放入培养皿中, 于 60°C 烘 48 h 后再于 90°C 恒温 7d, 然后称取重量, 此时的重量减去培养皿的重量即为软体部干重。

2 结 果

2.1 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线对长牡蛎存活率的影响

辐射处理后不同培育时间长牡蛎的存活率与辐射剂量的关系见图 1。其中各辐射剂量条件下的存活率均经过归一化处理, 即以相同培育时间的对照组存活率为 100%, 其他各处理组与之相比获得相对存活率。

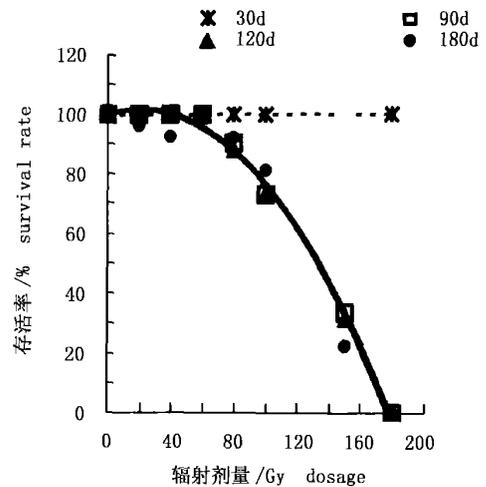


图 1 辐射后不同培育时间长牡蛎的存活率与辐射剂量的关系

Fig. 1 Dose-effect of gamma irradiation on survival rate of Pacific oyster at different repair time

由图 1 可见, 辐射后 30 d, 各剂量组均未发生死亡情况; 辐射后 90 d 统计, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线照射 0~ 60 Gy 的各组存活率均为 100%, 从 80 Gy 处理组开始出现死亡现象, 该组存活率为 90.2%, 此后随辐射剂量升高存活率急剧下降, 至 180 Gy, 所有个体死亡; 120 d 的统计结果与 90 d 时非常接近, 与 90 d 时拟合的剂量-效应曲线几乎完全重合; 180 d 时, 0~ 60 Gy 的各处理组均发生 3%~ 10% 的死亡(数据略), 但归一化处理后的相对存活率随辐射剂量的变化趋势与 90 d 时非常接近(图 1), 剂量-效应曲线与 90 d 时也基本重合。上述结果表明, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线所引发的长牡蛎死亡发生在辐射处理后 30~ 90 d 的时段内。

总体来看,长牡蛎存活率和辐射剂量的关系呈典型的抛物线,在低于 80 Gy 的剂量区内出现了 1 个相当宽的肩区,而在小于 60 Gy 辐射剂量区出现了一个存活率为 100% 的区域。当辐射剂量达到 80 Gy 时,才开始出现死亡事件,在 80~ 180 Gy 的剂量范围内,长牡蛎的存活率出现了接近线性的下降趋势。

2.2 ⁶⁰Co-γ 射线对长牡蛎的半致死剂量

以辐射后 90、120、180 d 的存活率剂量-效应曲线可通过回归法分别拟合获得形如方程(1)的二次方程:

$$S_t = 100 + aD + bD^2 \quad (1)$$

$$S_{90} = 100 + 0.1816D - 0.0041D^2, \quad R^2 = 0.9958 \quad (2)$$

$$S_{120} = 100 + 0.1643D - 0.0041D^2, \quad R^2 = 0.9958 \quad (3)$$

$$S_{180} = 100 + 0.1847D - 0.0042D^2, \quad R^2 = 0.9741 \quad (4)$$

其中 D 代表⁶⁰Co-γ 射线的辐射剂量(Gy), S 代表长牡蛎的存活率(%), t 代表辐射后的培育时间(d)。

上述 3 个拟合方程的二次项系数均为负值,表现为顶点大于零的开口向下的抛物线;且一次项系数 a 、二次项系数 b 在这 3 个方程之间有非常接近的数值,表明在 3 个时间点测定的数据有很好的重复性,其中任一方程均可正确反映辐射的剂量-效应关系。

由方程(2)可初步估算长牡蛎的半致死剂量(LD₅₀)为 135 Gy,表明长牡蛎对⁶⁰Co-γ 射线有很强的耐受性。

2.3 ⁶⁰Co-γ 射线对长牡蛎形态指标的影响

图 2 是辐射处理后 90 d 时统计的长牡蛎壳长、壳宽和全湿重的增长率随辐射剂量的变化曲线。可见,3 项生长指标随辐射剂量的变化有相似的趋势,在 60 Gy 范围内,生长速率随辐射剂量增加而升高,然后随辐射剂量进一步升高而呈现下降的趋势,但 60 Gy 以内的辐射处理组 3 项生长指标均高于对照,其中 20~ 60 Gy 全湿重增长率、60 Gy 壳长增长率、40~ 60 Gy 壳宽增长率等指标与对照的差异均达到显著水平($P < 0.05$),表明 60 Gy 的⁶⁰Co-γ 射线对长牡蛎的生长指标有显著的促进作用。

2.4 ⁶⁰Co-γ 射线对长牡蛎条件指数的影响

图 3 是辐射处理后在海区培育 180 d 时测定的长牡蛎条件指数。由图 3 可见,未辐射对照组的条件指数数值为 4.9,该数值与文献[24]报道的休止期长牡蛎的条件指数基本相符,此外条件指数与全湿重随辐射剂量的变化趋势基本一致,在实验所用的剂量范围内,⁶⁰Co-γ 射线辐射处理均可促进长牡蛎的条件指数增加,其中 40、80、100 Gy 等 3 组与对照组的差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

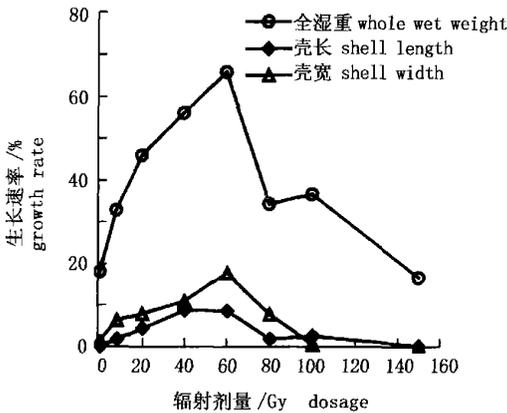


图 2 不同辐射剂量对长牡蛎生长速率的影响

Fig. 2 Influence of gamma irradiation on growth rate of Pacific oyster

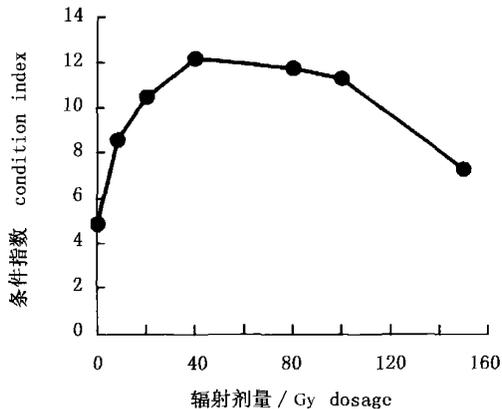


图 3 ⁶⁰Co-γ 射线辐射处理对长牡蛎条件指数的影响

Fig. 3 The condition index of Pacific oyster after gamma irradiation

3 讨论

3.1 长牡蛎辐射效应的完成时间

在辐射生物学效应达到稳定后的最短时间内统计的数据可最真实反映辐射的剂量-效应关系。图 1 的结果表明,在辐射后 90、120、180 d 所统计长牡蛎存活率的剂量-效应曲线几乎完全重合,表明在辐射处理后的 90 d 内长牡蛎的死亡率即已达到稳定,辐射 90 d 后发生的死亡

事件与⁶⁰Co-γ 射线处理没有直接关系。而且,从方程(2)、(3)、(4)的一次及二次项系数的数值看,3 个方程的系数非常接近,表明在 3 个时间点测定的数据有很好的重复性,所以选择 90 d 的存活率曲线计算辐射的半致死剂量。

在本研究中,辐射处理后的早期修复培育是在室内进行的,在该阶段所有处理组均未发生死亡现象;在辐射后 30 d,材料被挂养到海区,至 90 d 时统计,辐射致死的生物学效应已全部完成,该阶段⁶⁰Co-γ 射线对长牡蛎的致死效

应随时间的变化规律尚不清楚。因此,在辐射致死的剂量效应研究中,辐射致死效应发生的时间进程及与辐射剂量之间的关系、培育环境对辐射致死效应的影响等均有待进一步研究。

3.2 长牡蛎的辐射抗性及其应用前景

生物的辐射敏感性在不同物种之间、相同物种的不同组织器官之间差异很大,甚至同一个体在不同发育阶段和生理状态条件下,对辐射的敏感性也会表现出一定的差异。生物的辐射敏感性主要取决于2个因素:射线对机体伤害的程度及生物体对损伤的修复能力。少数生物体内存在一些特殊的理化机制可有效降低辐射造成的损伤,如螺旋藻细胞壁中的多糖类物质可帮助机体减轻辐射损伤,以至有些种类如钝顶螺旋藻的 LD_{50} 可高达 $3000\text{ Gy}^{[16]}$; 而许多种类的昆虫由于其特殊的染色体结构,即整个染色体的每一点都具有着丝粒的活性,这种漫散着丝粒(diffuse centromere)的染色体结构可以保证即便在电离粒子将染色体臂打断的情况下也不会影响有丝分裂中染色体向两极迁移,因此昆虫具有很强的辐射抗性,鳞翅目某些种的亚不育剂量(昆虫可正常迁飞、交配但不育的辐射剂量)可高达 800 Gy 左右^[25]。但多数情况下,自身修复能力对辐射敏感性的影响更大^[1],修复系统缺失的突变体对辐射极其敏感就是证据。

LD_{50} 是衡量生物辐射敏感性的重要参数,也是育种中选用诱变剂量的重要参数。从本研究的结果看,长牡蛎的 LD_{50} 在 135 Gy 左右,表明长牡蛎对 γ 射线具有很强的耐受性。长牡蛎辐射抗性的成因是非常值得关注的一个问题,如果存在特殊的化学防护或损伤修复机制,则在抗辐射及抗衰老药物的开发方面将有很好的应用前景。我们曾经在完全相同的条件下对长牡蛎、栉孔扇贝、海湾扇贝、皱纹盘鲍等4种贝类进行辐射处理,然后统计存活率。结果发现贝类的辐射敏感性在不同种间存在很大的差异,这4种贝类中以栉孔扇贝的抗辐射能力为最强,该结果提示贝类对辐射的抗性主要取决于机体内部的因素。

此外,从机体结构角度说,长牡蛎的外表有强硬的石灰质的壳,可能会阻挡部分的 γ 射线,致使软体部真正的吸收剂量低于预设的照射量。但是,由于 γ 射线有很强的穿透能力,厚达 5 cm 的铅板才能完全阻挡 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 粒子,因此,毫米级厚度的贝壳对射线的阻挡作用不足以对贝类的辐射敏感性产生严重影响。

3.3 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对牡蛎的刺激效应

电离辐射的生物学效应包括低剂量条件下的刺激效应(stimulation)和高剂量条件下的抑制效应(inhibition)。在生物学的不同领域,在低剂量和高剂量条件下存在2种完全相反的剂量效应关系的这种现象广泛存在。辐射的刺激效应也称兴奋效应(hormesis),普遍存在于生命系统的各个过程,可表现为促进生物的生长、发育、生殖并具延长寿命、增强免疫功能等现象,一般情况下最大刺激效应可

达对照值的 $130\% \sim 160\%^{[26]}$ 。在生产中可直接应用这种刺激作用以提高产量和抗逆性^[2];在医学领域,应用低剂量辐射的兴奋效应诱导机体产生抗辐射能力,在肿瘤的放射治疗中有一定的应用前景^[27]。抑制效应则包括引发突变、畸变、死亡等生物学现象^[1]。辐射的三致效应(致突、致畸、致死)主要是由于电离粒子导致DNA等遗传物质损伤引起的,在诱变育种中,一般选用稍高于半致死剂量的辐射以引发一定量的DNA损伤,这些损伤只要得不到完全、无误的修复即可能形成突变体,选留符合需求的突变体并进行进一步的遗传改造直至培育成新品种。

图2的结果表明, 60 Gy 的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对长牡蛎的壳长、壳宽和全湿重等生长指标均有显著的促进作用;图3的结果表明, $40 \sim 100\text{ Gy}$ 的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐射处理均可显著促进长牡蛎的条件指数增加,表明辐射对长牡蛎生长的刺激作用是在促进软体部干物质积累的基础上的,因此在生产上可能具有一定的应用价值。然而,本文仅在2002年春就一龄长牡蛎在辐射后的生长速率变化进行了初步的跟踪,其他发育阶段与季节中的规律尚不清楚,因此 γ 射线对长牡蛎生长的促进作用及其应用前景有待进一步的系统研究才能做出确切的评价。

3.4 影响辐射实验结果的几个重要因素

影响辐射实验结果的因素很多,其中以保证辐射剂量的准确最为重要,为此首先对源强度进行了标定;其次,将供试的每个个体都固定在离源相同距离的位置进行辐射处理,并且使每个个体的相同壳面正对辐射源,以保证同一剂量组的不同个体受到相同剂量的 γ 射线照射;水对 γ 射线有很强的屏蔽作用,并且 γ 射线导致水辐解产生大量的自由基,自由基也可诱发DNA断裂及细胞器损伤,为尽可能提高辐射效应的可重复性,辐射处理在干露条件下进行;保持低温条件可以减轻运输及辐射等过程中干露对存活率的影响;使用遗传及生理背景较一致的供试材料也非常重要,因此使用从同一海区采集的1龄野生牡蛎,从中选取形态、体长、体宽均彼此接近的个体用于本研究。

参考文献:

- [1] 夏寿萱. 放射生物学[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 1998. 1-488.
- [2] 陈子元. 核农学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 475-562.
- [3] Kuwahara Y, Shimada A, Mitani H, et al. Gamma-Ray exposure accelerates spermatogenesis of medaka fish, *Oryzias latipes*[J]. Molecular Reproduction & Development, 2003, 65(2): 204-211.
- [4] Yabu T, Todoriki S, Yamashita M. Stress-induced apoptosis by heat shock, UV and gamma-ray irradiation in zebrafish embryos detected by increased caspase activity and whole mount TUNEL staining[J]. Report of National Food Research Institute, 2003, 67: 101.
- [5] 戴继勋, 包振民, 张全启, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线诱导中国对虾雌核发育的观察[J]. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(4): 151-155.

- [6] Baranova O K. Comparative radioresistance of shrimp *Palaeomonas adspersus* Ratke populations, living in sea and estuary conditions [J]. *Radiatsionnaya Biologiya Radioekologiya*, 1994, 34(2): 172-176.
- [7] Kim G B, Lee R F, Mitchell D L. Damage to grass shrimp (*Palaeomonetes pugio*) embryo DNA by summer sunlight followed by DNA repair in the dark[J]. *Marine Biology*, 2000, 137(4): 675-682.
- [8] Divakaran S, Decamp O, Cody J, et al. Studies on quality changes in shrimp feeds exposed to gamma, E-beam and X-ray irradiation[J]. *Journal of Aquaculture in the Tropics*, 2002, 17(3): 155-167.
- [9] Tilly L J, Corey J C, Bibler N E. Response of the Asiatic clam, *Corbicula fluminea* to gamma radiation[J]. *Health Phys*, 1978, 35(5): 704-708.
- [10] Harewood P, Rippey S, Montesalvo M. Effect of gamma irradiation on shelf life and bacterial and viral loads in hard-shelled clams (*Mercenaria mercenaria*) [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1994, 60(7): 2666-2670.
- [11] Clatworthy A L, Noel F, Gmose E, et al. Ionizing radiation-induced alterations in the electrophysiological properties of *Aplysia* sensory neurons[J]. *Neuroscience Letters*, 1999, 268(1): 45-48.
- [12] Ardjosoeiro I, Lee N, Supan J, et al. Gamma irradiation effects on early life stages of the eastern oyster[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2000, 19(1): 659-659.
- [13] Wagner E, La-Peyre J, Buchanan J, et al. Growth, gonad development and mortality of gamma-irradiated juvenile eastern oysters[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2001, 20(1): 560-560.
- [14] 胡天赐, 杨世杰, 毛炎麟, 等. γ 射线对钝顶螺旋藻 (*Spinulina platensis*) 的生物学效应[J]. *核农学报*, 1990, 4(2): 120-124.
- [15] 匡梅, 许璞, 王素娟. γ 射线对条斑紫菜和坛紫菜诱变作用的初步研究[J]. *上海水产大学学报*, 1997, 6(4): 241-245.
- [16] 汪志平, 徐步进. 螺旋藻的电离辐射抗性及其与多糖含量的关系[J]. *核农学报*, 2001, 15(4): 229-233.
- [17] 古绍彬, 姚建铭, 于洋, 等. 离子束诱变技术在海洋微藻培育中的应用[J]. *中国水产科学*, 2002, 9(3): 247-250.
- [18] Van Calenberg S, Van Cleemput O, Mondelaers W. Comparison of the effect of X-ray and electron beam irradiation on the microbiological quality of foodstuffs [J]. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 1999, 32(6): 372-376.
- [19] 邱树青, 王起超, 梁平, 等. 低剂量核辐射刺激扇贝生长的初步研究[J]. *核农学通报*, 1992, 13(2): 83-84.
- [20] 刘玉彬, 徐秀玮, 柳盛典, 等. 中子辐照技术在鲍育苗中的应用[J]. *水产学报*, 1995, 19(3): 272-275.
- [21] Mazhul V M, Parkhomenko I M, Volykhina V E, et al. Radioprotective efficiency of MGF-K preparation under X- and gamma-irradiation of animals with lethal and sublethal doses[J]. *Radiatsionnaya Biologiya Radioekologiya*, 1995, 35(3): 424-427.
- [22] 李翊, 王海青, 周广清. 扇贝提取物对荷瘤小鼠放射损伤的恢复作用[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2000, 20(6): 400-403.
- [23] Rainer J S, Mann R. A comparison of methods for calculating condition index in eastern oysters, *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791)[J]. *J Shellfish Res*, 1992, 11(1): 55-58.
- [24] 吕豪, 李大成, 宫晓君, 等. 太平洋牡蛎控温条件下的性腺发育、条件指数与积温的关系[J]. *中国水产科学*, 1998, 5(1): 18-24.
- [25] Robinson A S. Mutations and their use in insect control[J]. *Mutation Research*, 2002, 511(2): 113-132.
- [26] Calabrese E J. Hormesis: changing view of the dose-response, a personal account of the history and current status[J]. *Mutation Research*, 2002, 511: 181-189.
- [27] Calabrese E J, Baldwin L A. Radiation hormesis and cancer[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(2): 327-353.