

电离辐射在农业和食品方面的应用概况
国外文献调查报告

上海原子核研究所图书情报资料室

情 报 组

一九七六年六月

电离辐射在农业和食品方面的应用概况
国外文献调查报告

目 录

- 一、前言
- 二、特点
- 三、设备
- 四、剂量
- 五、材料
- 六、方法
- 七、规律
- 八、成果
- 九、结尾

附 录

表 1. 联合国粮农组, 国际原子能机构与世界卫生组织联合举办的农业, 食品辐射会议。

表 2. 一些国家的大型钴— 60γ 辐射源。

表 3. 美国辐射保藏食品的辐照装置。

表 4. 低剂量 (2 千拉特以下) 辐照刺激生长的一些成果 (较有参考价值者)

表 5. 辐射育成的一些作物品种。

表 6. 几种慢辐照育种的成果。

表 7. 几种辐射育成的无名品种。

表 8. 辐射保藏食品的成果。

一粮食类 二肉类禽类 三水产类 四蔬菜类 五水果类 六蛋乳类

表 9. 一些国家已行批准的辐照食品及包装材料。

我国国内已进行的辐射试验研究工作成果资料目录。

文献资料。

电离辐射在农业和食品方面的应用概况

国外文献调查报告

一、前言

自原子能工业发展以来，应用射线于农业生产和食品工业方面，亦随之日益发展，今已成为和平利用原子能的一个重要领域。这一技术，虽在二十年代即已开始，但是由于最初对此并不重视；对辐照作物和食品的卫生条件抱有顾虑；对辐照费用是否经济有所怀疑；或则限于设备条件，缺乏人员，因此在很长一段时期内，发展较为迟缓；而且仅停留在实验室阶段。

随着工农业的不断发展，对新技术新方法的要求，日趋迫切，由于辐射技术具有一定优点，实验结果亦取得一些成效，因而近十余年来，受到越来越大的重视，获得了愈来愈迅速的发展。现在世界各国已大力开展了这方面的工作，有些且已推广于生产；甚至一些资本主义国家已行之于商业化了。

放射技术之用于农业，除用放射性同位素或其标记化合物于^作农作物和土壤肥料以作生物生理，生理代谢，光合作用等等示踪研究而改进农业生产技术外，直接用射线照射作物种子，作辐射诱变育种，以达抗病虫，促早熟，适应气候，提高产量；另一方面，辐照谷物食品，以达杀虫害，灭细菌，抑制发芽，保质储藏，这都对“备战、备荒、为人民”具有极大政治意义；对防止浪费，减少损失，保持营养，增产节约具有极大经济意义的。

现在世界各国极大多数已组织有原子能委员会，在其统一计划下，各原子能，农业，食品等研究单位，和卫生部门；甚至生物，植物生理，昆虫，遗传学，以及一切有关的研究机构，都根据其本单位的业务范围和目的要求开展了辐射试验研究工作。其中很多国家，建立有辐射中心，或辐照站，为邻近农场、食品工厂、仓库、和研究单位服务。有些国家

不独设置了专门研究机构，拥有自己的辐射源，而且已建设了大型辐照装置，专供照射育种，杀虫灭菌，保藏食品之用。

联合国粮食与农业组织 (FAO)，国际原子能机构 (IAEA) 与世界卫生组织 (WHO) 联合组成专业委员会，曾对国际辐射技术应用于农业食品，制订了一系列“协作”研究计划和实施方案，如“诱发突变改良水稻”、“诱发突变进行作物育种”、“中子照射种子”、“利用核技术改进种子蛋白质”，以及对谷物、蔬菜、水果、肉类、水产、乳品、蛋类等等食品的辐射保藏试验规划，都有不少国家参加。选育的优良品种和试验研究的成果，都在各国各地区推广试用，大多已正式投产生产。为了加强这一领域的工作，该组织于 1964 年在奥地利维也纳附近西伯尔道夫特建一联合国辐射研究室，直接进行该组织的研究计划任务。与此同时，该联合组织自 1965 年以来，除了参加已在日内瓦举行的四次“国际原子能和平利用会议”，每届都有关于农业食品辐射方面的专题组织报告外，几乎每年都召开了国际性的或地区性的专业会议。在每次会议上，各国都发表了国内发展情况的报告，报道了不少试验研究的成果，亦提出了一些计划、展望、和要求。因此出版的论文汇编、会议录、和图书等，也是比较多的。兹统计附录于后，以备查考。此外该组织曾在 70 年至 72 年三年中，每年接连组织成员国举行参观学习，向一些同位素和辐射在农业方面研究工作发展较快的国家研究单位，作为期一月的旅行访问活动，每次都邀请有 30 个左右国家的核科学和有关农业方面的科学工作者代表参加，以助吸取经验，俾便推动计划工作。参观访问后，亦编著有专辑。另一方面，该组织在一些成员国中，每年轮流举办有关此项专业技术 2—3 月的短期训练班，聘请专家，开办讲座，以培养技术人员，扩大国际辐射队伍，以上这些情况，都在会议录出版物中反映出来。

二、特点

根据国外试验研究结果，归纳有下列诸特点：

(一)、植物育种 应用射线辐照作物诱变育种，或刺激生长、而(1). 缩短生长周期，俾可一年多熟、(2). 不受农时和地区的局限性，使可随时随地种植，(3). 不受风、雨、旱、虫等自然灾害的影响而保丰收，藉以达到增加产量，提高质量、为了满足以上各项目的，采取下列途径：

1. 获得有直接育种价值的突变体，可直接用作优良品种。
2. 获得对光、热和冻不敏感的品种，从而可使全年各地都能生长。
3. 获得抗倒伏，抗病、虫、害，抗不利环境，和对肥料反应强的品种。

4. 获得在杂交计划中可用作培育高产品种的突变体。

5. 获得便利且经济用于杂交过程的雄性不育而克服去雄问题。

(二)、食品保藏 采用射线照射食品以(1)消灭腐败微生物，(2)消毒除净病原细菌，(3). 杀灭一切深入于食品中的寄生虫和昆虫。

- (4). 导致昆虫雄性不育以达消灭目的，(5). 延迟生理过程抑制出芽，抑制过熟，俾可 1. 远洋长途运输增进外贸，2. 延长供应期调剂旺淡季节性，3. 长期保藏谷物，避免损失，备战备荒，4. 保质保鲜，改进营养，5. 不伤外形，不带药物残余，合乎卫生。

三、设备

辐照所用主要设备—辐射源及其装置，依其发展次序为 X—射线机， γ —射线源，电子加速器和中子发生器等四种，所需能量乃随目的要求和业务规模而定。

(一)、X—射线机 这实际是由加速电子被阻止于靶上而产生的韧致辐射，用于作物育种或食品保藏是在 50 年代前，在研究试验方面较为普遍的一种。因其穿透力较强，故可用于辐照包装厚实食品，

但在辐照大批食品谷物则效率较低且不经济。常用的高电压高功率 X—射线机只限于 500 千伏。市场供应者可产生低能量 50 千电子伏电子束，其电子射程极短，除用于抑制发芽外，对其他不尽适用。例如西德联邦研究中心于 1950 年首先采用 X—射线机辐照马铃薯以抑制发芽，一用 60 千伏，一用 120 千伏，前者仅辐照表面，后者穿透较深，但效果相同，根据其所报道的马铃薯品种，辐照剂量在 4 至 16 拉特范围，现在该单位已在直线加速器上用一靶以产生 X—射线进行辐照，并可储藏在 9 个月以上不致发芽，且克服了腐烂和变色问题，估计每小时可辐照一吨左右。

(二) γ —射线源 自反应堆发展后， γ —射线源辐照装置，亦随着发展。现已极为普遍，其穿透力与 X—射线相似，对体积大，包装厚的作物食品辐照较为适合。尤其在大批量辐照更为经济。现在世界各国几乎已代替了 X—射线机，目前所用 γ —射线源有下列四种：

1. 铯-137，半衰期为 30 年，穿透力稍小于钴-60，因此不能直接完全代替。如爱尔兰用 600 居 Cs^{137} 作植物遗传试验，系用 6 根 Cs^{137} 棒排列于 6 个圆筒中，可提供 100 千拉特/小时的剂量率。美国亦建有 170 千居 Cs^{137} 的轻便式辐照器，可供每小时辐照 100 磅食物，剂量可达 200 千拉特，专为各地示范之用，其他国家亦都有强度大小不同的 Cs^{137} 源，这种设备很适用于农场、仓库和实验室，苏联普希金生物物理研究所的“Kolos”辐射源，即属于此，为 1312 克镅当量。

2. 利用反应堆废燃料元件。出堆 2 至 3 天后，以作 γ —射线辐射源。至少可用 100 天。以后则经化学分离而回收未用尽的铀，进而可分离得 Cs^{137} 和 Sr^{90} ，如英国“迪多 (DIDO)”重水反应堆和材料试验反应“冥王星 (PLUTO)”；澳大利亚实验高中子通量反应堆 (HIFAR)，都是利用其反应堆出堆之废燃料为 γ —射线源的。

3.利用高温气冷反应堆中排出的气体和挥发性裂变产物，收集以作 γ -辐射源，但因其寿命一般都较短，辐照场地须紧密设在堆附近，这对两方管理似乎不甚方便。

4.钴-60辐射源

Co^{60} 源为现代世界各国最普遍的一种辐射源，可固定安装在室内地窖内或水池中，亦可装置在卡车、火车或轮船上驶至农场，仓库或海港就地辐照。辐射源的结构形状有多种多样，可根据需要将 Co^{60} 棒或管排列成单层园筒形、双层园桶形，平板格子形或漏斗形，其强度由数千居里至上百万居里不等。例如西班牙马德里原子能所的园桶形 Co^{60} 源装置，系由12支 Co^{60} 棒组成，排列成一园桶。其总强度为7700居里，园桶直径可伸缩调节，使园桶距园心有6、13、和28厘米三种几何位置，园桶中心辐射场所受照射剂量分别为3、7、1.1、和0.35百万伦/小时，不用时降入水井底，井深4.2米，边长1.2米，井壁以20厘米厚的加强混凝土筑成，里面涂以不透水的沥青，再砌砖作内壁。水上照明用2盏300瓦灯，装载 Co^{60} 源的铅容器重1500公斤，用起重装置升降移动。井水纯洁度要求最低电阻系数为 4×10^5 欧姆/厘米，酸碱度在PH5至7之间，故采用净水装置和离子交换树脂以滤去悬浮物质和清除溶解性矿物质。

中间试验所需 Co^{60} 源较大，例如美国萨芬那的平板形谷物辐照器装置(GPI)，系由13支 Co^{60} 棒平行排成一平面，为了可使平板上下通过的谷物得以均匀辐照，边缘 Co^{60} 棒放射性较中间 Co^{60} 棒为强，两端较中段为强，四角的 Co^{60} 放射性最强。(边缘为12.7居/克，中间为5.5居/克，两端为23.1居/克，四角为35居/克)。总强度为25千居。辐照器位置可变换。散装谷物经漏斗送入，每小时可辐照5000磅。包装食品经传送带送入，每小时可辐照2800磅。剂量水平达2.5千拉特。

又如美国达威斯市所建流动式辐照器(MGI)，系用19支 Co^{60} 棒排成一个15×18英寸的平板。为了缩小体积， Co^{60} 放射性强度达

70—80居/克，辐照的食品通过时，最大和最小剂量比率保持在1.28，每小时可辐照水果1000磅，剂量为200千拉特。

商业化辐照厂，除有强大的辐射源及其装置外，并建有一些仓库和包装车间等附属建筑。

例如加拿大于1966年在纽菲尔特市建立了一座多种业务的辐照厂，建有600千居的 Co^{60} 辐照室、实验室和可贮藏1500万磅马铃薯的仓库，辐照室面积为 21×36 平方英尺，高16英尺，室壁厚5英尺，用加强混凝土筑成， Co^{60} 源起用时，室外放射性强度在0.25微伦/小时以下，辐射器中心剂量率为200千拉特/小时。 Co^{60} 源不用时降入水井中，辐照食品由传送带传送，一切都自动化。苏联莫斯科近郊捷尔任斯基亦建有12万吨马铃薯仓库和40千居钴源，每天辐照80吨。

又如土耳其于1967年在伊斯康德伦港埠建造了一座谷物辐照厂，建有一高100英尺的谷塔。辐照器上方设有两个大漏斗形容器，每个可容125吨谷物，谷物自仓库输入漏斗，经 Co^{60} 源辐照。其流动速度由机械控制，藉以达到所需辐照剂量， Co^{60} 源系由12支 Co^{60} 棒组成，每支直径为0.45英寸，长6.26英寸，含 Co^{60} 100克，共1.2公斤。 Co^{60} 棒安装在特制的12英寸长的管中。启用时将 Co^{60} 管升起，运送于金属平板上，不用时则藏在地窖中。地窖为软钢结构，里面为不锈钢。窖面放射性小于0.75微伦/小时。辐射源强度为360千居里，每年补充20千居，该厂现用于辐照小麦、大麦、黑麦、玉米等谷物，可连续辐照。

荷兰在瓦格尼金建立一座实验食品辐照厂，于1968年投产。系用 Co^{60} 辐射源和电子加速器辐照各种食品，每次可辐照3000公斤以上，目前用于辐照保藏肉类、水产、蘑菇及动物饲料等。

表2列举一些国家的大型钴—60 γ —辐射源；表3列有美国辐射

保藏食品的辐照装置，摘录以供参考。（附录部份）。

(三)电子加速器 对辐照体积小，包装薄的作物。采用加速器较为方便，现在可用的加速器，其能量范围在 1.5 至 10 百万电子伏 (Mev) 间，有 1. 高压倍加器电子能量 3 Mev 输出功率 15 千瓦 (KW)。
2. 共振变压器，电子能量 4 Mev，输出功率 20 KW，3. 静电加速器电子能量 1—3 Mev，输出功率 3 KW，4. 电子直线加速器，电子能量 15 Mev 输出功率可高达 30 KW，此外还有高频高压倍加器、绝缘心型变压器等，现在英国在冈推奇辐射实验室建有 4 Mev 直线加速器，法国电离辐射应用中心实验室则有 CIRCE 10CSF 型 7 Mev 直线电子加速器，每小时辐照 10—40 厘米厚的包装食品 3.6 吨，剂量达 1000 千拉，美国麻省纳笛克实验室亦建有一台 24 Mev 的电子加速器。一般认为高能电子约在 12 Mev 以上易于引起辐照食物的放射性，因此把电子能量控制在 5 Mev 以下较为安全。

(四) 中子发生器或中子源 随着原子能工业的迅速发展，各种反应堆、各种加速器、以及各种放射性核素亦如雨后春笋涌现，为各种科学研究工作和工农业生产提供丰富条件。采用中子辐照作物、食品亦正在蓬勃兴起，但不能作大批辐照之用。现在国外应用中子作为辐照工具者，主要为热中子或快中子，因此只要能产生适当能量的热中子或快中子之反应堆，加速器或中子源均可利用。

1. 反应堆 最广泛应用者为 100 瓦至 10 百万瓦 (MW) 的普通水慢化池式反应堆，热功率为 1 MW，最大热中子通量为 10^{13} 中子/厘米²/秒，或具有同样或稍高的快中子通量。其次常用者为普通水和重水慢化的水箱式反应堆，具有热功率大于 100 MW 和最大热中子和快中子通量为 5×10^{15} 中子/厘米²/秒，这种反应堆，据不完全统计，现在世界上约有 70 座以上。

此外有用铀—氢化锆为核燃料，具有大的瞬发负温度系数反应性，堆芯系由对流冷却至 2 MW 热功率，可以脉动的，固相均匀，研究性反

反应堆 TRIGA (培训, 研究和同位素生产反应堆) 为最安全可靠, 现在世界上约有 14 个国家, 建有这种堆 50 座以上。

美国橡树岭建有一台未慢化的保健物理快中子研究堆 (HPBR) 亦属于此。

为了辐照生物试验, 在这些反应堆中, 都建有特殊设计的专用辐照室。例如标准中子辐照设备 SNIF, 有的就设在堆活性区附近, 有的建在水池中, 有的在热塔内, 有的在束流孔道处。关于这方面的设计, 国际原子能机构编有专著。

2. 低能离子加速器 在最常用的高压倍加器或静电加速器中, 以 500—600 千伏加速电压, 用氘为靶, 由 $T(d, n)^4He$ 核反应而产生中子, 用作辐射源。这反应具有 17.6 Mev 高的 Q 值; 在氘能量为 110 Kev 时, 具有 5 靶恩的最大截面, 中子能量在零氘能时为 14 Mev, 在 400 Kev 时为 15.6 Mev。

3. 高能离子加速器 可分直线的和回旋的两类, 前者如高压倍加器, 静电加速器 (单级和串联运行的) 和具有振荡高压电极的并激式高频高压加速器。采用氘和氘气靶或用 TiT 和 TiD 金属靶, 兹将所用轰击能量, 所产生的核反应, 及其中子能量 Mev 列表于下:

靶	轰击能量 (Mev)	离子束	核反应	中子能量 (Mev)
氘	3.71	氘	$T(d, n)^4He$	12 — 20
氘	4.45	氘	$D(d, n)^3He$	1.7—7.7
氘	3.4	质子	$T(p, n)^3He$	1.7—7.7
^{12}C	3.09	氘	$^{12}C(d, n)^{13}N$	1.7—2.8
锂	3.4	质子	$Li(p, n)^7Be$	0.2—0.6

后者即为普通回旋加速器, 1.27 米, 1.62 米甚至小型的皆可。通常采用铍靶, 以氘核、或质子或 α 粒子轰击, 藉以产生快中子。其

核反应为： $1. {}^9\text{Be}(\text{d}, \text{n}) {}^{10}\text{B}$, $2. {}^9\text{Be}(\text{p}, \text{n}) {}^9\text{B}$, $3. {}^9\text{Be}(\text{d}, \text{n}) {}^{12}\text{C}$
亦可用氘气靶。用氘核轰击，核反应为 ${}^2\text{H}(\text{d}, \text{n}) {}^3\text{He}$ 。例如波兰克拉科夫核物理研究所利用其U-120回旋加速器（氘核能量可达14MeV， α 粒子可达28MeV，离子流约为10 μA ），以12.5MeV氘核轰击铍靶，由 ${}^9\text{Be}(\text{d}, \text{n}) {}^{10}\text{B}$ 反应产生0—16MeV，平均为6MeV的快中子辐照种子。其他如罗马尼亚，捷克斯洛伐克，东德和匈牙利等国家，也都建有这种回旋加速器。采用这种中子辐照种子进行育种。

四. 剂量

自国外文献所报道的辐射育种，辐射保藏，以及辐射雄性不育等试验研究记录，不论采用何种射线，以其所用辐照剂量统计，可粗略分为下列三档：

(一). 低剂量—60千拉特以下；2千拉以下辐照作物种子等，低剂量刺激生长。

1. 6—10千拉 辐照块根食物，抑制发芽；辐照单食性昆虫，导致雄性不育。

2. 10—20千拉 辐照谷物蔬菜种子，诱变育种；辐照大批粮食，包装食品，杀灭群居害虫。

3. 20—60千拉 辐照蔬菜，水果，肉类，消灭寄生虫和微生物，抑制过熟。

(二). 中剂量—60—1000千拉特 辐照肉类，水产，蛋，乳及其加工食品，消灭一切细菌，再行冷藏。

(三). 高剂量—1000千拉特以上 辐照肉类及包装材料，消灭一切细菌，但对食品的色、香、味，以及组织成份等往往易于变质，特别是对水果和蔬菜的组织成分，最易损失；对肉类和水产的色味亦易变坏，不可轻易采用。

五、材料

由于植物为一种生物，其种子、植株、叶片、花粉、胚芽体、子房和结合子，以及无性繁殖器官如块根、球根、块茎、匍伏枝和接枝等都是植物发育、生长开花、结果的机体组织部分。在辐射育种方面，选用那种组织部分作为辐照对象，为育种成败的关键问题之一。一般原则是挑选优良品种为对象，以改进其若干缺点为目标。关于这方面的文献报道也不少，也获得有不同程度的成果，不过照射的方法与条件各有差异，亦各有其特点。

(一)、种子 选用种子为辐照材料，这是最主要的对象，发展历史亦最悠久，育成的品种亦最多，这主要原因是因为种子对育种遗传效应影响最大，品种之优劣，取决于种子，同时，大批量辐照种子，在设备上和处理上亦最方便。但是由于种子之形态与细胞；生理、生化和生物性能；种系和产地；以及成熟度和保藏期等因素，都对引变效果有一定影响，因此对育选和辐照剂量，剂量率和辐照期等关系方面都应从严考虑。

(二)、植株 可在生长发育的全过程中辐照，亦可在某一发育阶段进行；可辐照其全部或局部；亦可选用不同剂量辐照其不同部位，不同辐照，效果不同，这是为小批试验育种的一种对象，主要用于低剂量辐照刺激生长。

叶瓣过去错误认为叶瓣为植物的呼吸器官和光化组织部位，对育种关系不大，但在无性繁殖的作物，可使叶瓣产生不定芽，而后辐照引变，因不定芽系由单个表皮细胞发育而成，既可避免或减少嵌合体，亦可提高突变率，例如荷兰农业原子科学研究所用3千拉特辐照好望角莴苣苔叶，获得60%四倍体的幼植物，其中二倍体芽被抑制，从而育成5个有价值的突变品种，供推广种植。

(四)、花粉 经辐射引变，其中精子与卵子可结合为异质结合子，发育而成异质结合体植株，其后代可分离出许多突变体，故可选作辐射育

种对象。但须在花粉成熟，细胞处于脱氧核糖核酸（DNA）合成最旺盛期前进行辐照，现在有些国家曾辐照冬小麦和豌豆花粉，都获得大量突变。

另一方面，可将花粉培育成胚芽体，并由此辐射育成植株单倍体。对辐射育种具有重要利用价值。日本已对水稻试验成功。

（五）、子房 辐照子房不独可引起卵细胞突变，而且能影响受精作用和引发孤雌生殖，对育种亦极为有利。

（六）、无性繁殖器官 最适于用低剂量辐照刺激生长，以辐照其在生理上处于活跃状态的新生组织为宜。对块根可辐照其发芽的切枝，对块茎可辐照其原有芽眼，亦可使其产生新的不定芽。

六、方法

（一）、辐射育种 为了提高引变效率，各国曾采取种种辐照方法。在播种或移植后，经常定期观察其成活率、发育性、植株高度、染色体畸变频率、花粉育性、叶绿素突变、形态突变、显性基因和隐性基因、结实率、突变穗、和辐射损伤等等指标。各种方法各有特点，根据具体育种对象、目的、条件、与环境情况而定。

1. 不同辐射类型、剂量与剂量率，应用X—射线、γ—射线、热中子、快中子等辐射源；以不同剂量与剂量率等条件进行辐照。其中低剂量辐照已成为一种普遍的方法。

2. 一次辐照与分次辐照，在同一总剂量下，一次辐照和分数次辐照；或在收割后播种前这一段期间，分期分数次辐照。不同方法生物效应不同，产生的效果不一，一般都希望一次成功。同时必须注意，第一次辐照，往往对以后辐照有提高敏感性的倾向；相反，对有些作物，则有提高抗辐射性的作用。

3. 慢辐照与快辐照，由于两法剂量率不同，生物体内经受辐射过程

亦不同，产生的效应随之而异。尽管当代产生相似之突变体，而在其后代所产生的突变率则有差异。

4. 当代辐照与几代连续辐照、几代连续辐照，一般产生突变较多。但亦有产生“突变逐渐饱和”的现象。即逐代突变减少。

5. 内照射与外照射、内照射法系用 ^{32}P 、 ^{35}S 等放射性同位素或其标记化合物溶液浸种；或施于土壤使植物吸收；或注入植株茎杆、枝条、叶芽、和蓓蕾等部；以及给以 $^{14}\text{CO}_2$ 使其经光合作用同化于代谢物中。这些方法与外照射相比都可导致不同程度的辐射引变。其中以浸种法最为简便易行，亦甚普遍，发展历史亦较早。在剂量不超过每粒种子 8 微居时，突变率一般与剂量成正比，否则反为下降。

6. 不同气氛环境与播种时日，在不同温度、湿度、气体（空气、氧、氮、二氧化碳等气体）等环境下辐照；并在辐照后用含有不同气体之水浸种；以及不同时日播种。

7. 与化学引变药剂结合进行、应用射线、中子与各种浓度的化学药剂如 BDAB（1-4-双-重氮-乙酰-丁烷）、D（半胱胺酸）、DES（硫酸二乙酯）、EI（氮丙烷）、EMS（乙基甲甲烷磺酸盐）、EO（乙烯化氧）、HA（ ）、MMS（甲基甲烷磺酸盐）、NEU（亚硝基乙脒）、NMU（亚硝基甲脒）、等等成各种组合进行处理。

（二）、辐射保藏 在不影响粮食、食品的质量前提下，进行射线辐照。从而杀虫灭菌，便于保藏，辐照方法，较为简单。但所用剂量，则视食物品种和目的要求有所不同。对抑制块根块茎食物发芽，延迟鲜果成熟，常与杀虫灭菌相结合。对加工食品，往往与蒸煮、腌制、冷冻等法相配合。而在控制、消灭地区性特殊大群害虫，则采用辐射导致雄性不育，（即人工饲养，辐照导致不育雄虫，定期定量释放，藉以消灭全区害虫。）收效较为显著。

七、规律

根据各国所报道的研究试验结果，辐射对一般农作物的引变效应，可得出下列一些规律，以作参考：

(一)、辐射类型方面 从各种辐射类型及其与化学引变剂结合辐照所得突变率的效果，可按大小顺序，依次如下：

γ —射线 + EMS > EMS > 快中子 + EMS > 快中子 > γ —射线。

1. 快中子辐照较 γ —射线可产生更多的染色体畸变和低频率有用的突变体。

2. 快中子辐照无性生殖繁殖作物的有生长力部位，可产生更多的有用突变体，如 M_1 生长发育力强者则得高频率突变体。

3. 在适当的引变剂量下，快中子辐照水稻种子所引发的叶绿素突变较 γ —射线高2—3倍，所产生的突变穗%亦较高；辐照玉米种子，亦是如此。

4. 穿透力低的加速电子(β^- 射线)对刺激种植前和抑制发芽均较 γ —射线更为有效。如以2—3千拉辐照马铃薯，可完全抑制发芽6—7月。

(二)、剂量和剂量率方面。

1. 剂量增高，刺激程度亦随之升高，到一定限度，则对组织细胞损伤程度增高。

2. 同一类型辐射，剂量与引变频率成直线关系；但在较为复杂的突变，则呈指数曲线关系。

3. 剂量率对数与染色体畸变数成直线关系，对无性繁殖器官或幼苗最敏感。

4. 低剂量(500至1000拉特)辐照谷物，可获增产、早熟，提高蛋白质、脂肪淀粉、维生素、和纤维素等组织成份。增产程度，随土壤、气候、种子年令与活力、以及播种时期等条件而不同。可归纳

获得下列诸规律：

- (1)、土壤放射性本底高的农作物具抗辐射性，辐照剂量须高些；气候干燥地区所产农作物，辐照剂量也需高些。
- (2)、土壤、湿度和光照等气候条件对辐照有辅助作用；土壤肥沃的，辐照剂量可低些，反之则需高些。
- (3)、低剂量辐照玉米种子，含水份 12%，最佳剂量为 500 拉；高者用 250 拉，低者用 750 拉。水份增高，剂量则需低些。
- (4)、辐照后立即播种，增产较高；播种日期延迟愈久，刺激效应愈小，故辐照后至播种时之时间间隔愈长，辐照剂量也需高些。上年收割之种子，低剂量辐照，具有显著刺激效应；隔年或多年之种子，刺激效应随年代而减小。
- (5)、低剂量辐照马铃薯，早季较中季、晚季为敏感。早季用 150 拉，中季用 300 拉，晚季用 500 拉。如早、中季未发芽者，最佳剂量为 300 拉，而已发芽者，可减低 3—6 倍，只需 50 拉，因其更为敏感。
- (6)、块根块茎等无性繁殖作物，在其休眠期对辐射较在发芽期为敏感。
- (7)、辐照后增产效果，一般只能延续两代三代，三代后则渐退化，须继续辐照。

(三)、种子的形态与细胞性能方面

1. 豆科植物种子愈大，对辐射愈敏感，收缩的种子较光滑肥胖者为敏感。

2. 一般二倍体染色体数愈高，对辐射愈敏感。

3. 多倍体较二倍体抗辐射性为强，但亦有相反的现象。

4. 自（身）多倍体抗辐射性较二倍体为强；四倍体黑麦具有强抗辐射性。

5. 染色体和胞核容积愈大，辐射敏感性愈强；分裂期染色体愈大，每一染色体的脱氧核糖核酸量愈高，细胞的辐射敏感性亦愈高。