

# 中子在农业科学技术和生物学中的一些应用

傅志东

(西北农业大学)

中子是一种基本粒子,是原子核的重要组成部分之一。因为它不带电,不受核内外电磁场的作用,较容易进入原子核而发生核反应,同时因为它的质量与<sup>1</sup>H差不多,在大量含氢的有机化合物和生命物质中有独特的和显著的散射效应,再加上它对样品损伤极小等优点,所以中子在农业科学技术和生物学中得到了广泛的应用。特别是从产生高通量中子束的核反应堆出现以来,这一领域发展很快,并在作物诱变育种、生物样品成分分析和生物大分子的结构研究等方面,都取得了不少成绩,受到各国物理学家和生物学家的重视。

## 一、中子诱变育种

过去用于诱变育种的物理因子主要是放射性元素辐射的 $\gamma$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\alpha$ 射线以及紫外线、X射线和人工电子束等。最近几年,中子,特别是快中子诱变育种受到育种学家的喜爱,他们作了许多工作。

中子可以按能量分为两类:千电子伏以下叫慢中子,以上叫快中子。慢中子与生物体相互作用,主要是与氮核反应产生质子,与氢核反应产生 $\gamma$ 射线。快中子主要是与氢核散射产生反冲质子(氢核),与碳、氮、氧等核散射产生反冲核,还有少量中子与核起反应产生 $\alpha$ 粒子、质子等。快中子在生物体中慢化后也成为慢中子。反冲质子、反冲核、 $\alpha$ 粒子等都有较强的电离本领,也就有较强的生物效应,比单纯使用 $\gamma$

射线有较高的诱变几率。上述中子效应可以使基因中的N,C等原子核产生变化而引起基因突变,也可以打断染色体而引起染色体突变,所以中子既可引起点突变也可引起体突变。这就是中子诱变育种的几率往往高于其它物理因子的原因。

实验表明,作物种子经中子处理后,可以产生多种诱变类型,主要有下面几种:

1.早熟突变:中子处理作物种子后,可产生生育期突变,从中可选育出早熟品种。

2.矮秆突变:作物种子经中子处理后也可以产生株型突变,从中可选育出矮秆品种。例如水稻景洪2号,原种高130cm,现种高90cm;玉米靖西荣劳,原种高170cm,现种高140cm,都有较大幅度的变化。上述两个品种用 $\gamma$ 射线处理,均未获得矮秆突变。

3.抗寒突变:用快中子照射某些种子还可以获得抗寒性突变。例如水稻窄叶青,经中子处理后所获得的抗寒品种“中窄叶青”,在2月下旬播种,其成秧率比原种提高七倍以上;非洲鲫鱼卵经中子照射后孵化的幼鱼,抗寒能力也有明显的提高。

此外,用快中子照射作物种子还得到了抗倒伏、抗病及增产等类型的突变。

快中子诱变有如下特点:

1.同一种作物不同的品种对快中子辐射的敏感性不同。例如中国科学院华南植物研究所对五个水稻品种用相同积分通量的快中子处理,有的获得突变,有的则未获得突变。用快中

子处理橡胶种子也有类似情况。

2. 复合处理比单一处理的突变率高。美国科学家对小麦的研究可以概括为如下规律:

$$R(\gamma + EMS) > R(n + EMS) > R(n) > R(\gamma). \quad (1)$$

苏联科学家对玉米的研究可概括为如下规律:

$$R(n + NEU) > R(\gamma + NEU) > R(X + NEU). \quad (2)$$

在(1),(2)两式中,  $R$  表示突变几率,  $\gamma, X, n$  分别表示  $\gamma$  射线、 $X$  射线和中子束,  $EMS$  是甲基磺酸乙脂,  $NEU$  是亚硝基乙脒,  $R(n), R(n + NEU)$  等分别表示单纯中子处理、中子与  $NEU$  复合处理的突变几率等。

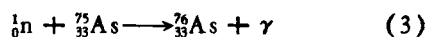
目前各国在快中子育种方面很活跃, 美国、苏联等十多个国家的科学家们作了大量工作。联合国科教文组织和国际原子能机构从 1966 年开始, 组织中子辐射育种的国际协作研究, 并举行过多次学术会议, 制定了协作的研究项目。后来, 许多国家成立了专门的研究室和实验室等。六十年代以来, 我国北京、广东、上海、广西和湖南等地的高等院校和研究机构也都作了大量工作, 取得了不少成绩。

## 二、中子活化分析

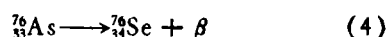
活化分析是一种核分析技术。今天它已发展为超痕量、痕量、半微量以至常量分析的一种重要手段。它具有灵敏度高、准确性好、适应性广等特点, 可分析多种元素, 并且具有非破坏性, 容易自动化等优点, 目前已广泛用于工业、农业、生物及医学各领域。活化分析有中子活化分析、光子活化分析和带电粒子活化分析等, 但由于中子的特点, 在整个活化分析中, 它占有主要的地位而为生物学家们所欢迎。

我们知道, 在核反应过程中的生成核, 有的是稳定的, 有的是不稳定的, 即是放射性的。产生放射性生成核的过程叫激活。中子活化分析即指用中子轰击待测样品, 使其激活, 样品中不同元素激活后产生不同的放射性生成核, 通过对它们的放射性的测定便可对待测样品作出定

性和定量分析, 从而确定激活前样品中含有那些元素及其含量。例如用中子活化分析砷, 核反应为



式中  ${}_{33}^{76}\text{As}$  为生成核, 是放射性的, 其半衰期为  $T = 26.32\text{h}$ , 既放出  $\gamma$  射线, 也放出  $\beta$  射线, 经  $\beta$  衰变后变为  ${}_{34}^{76}\text{Se}$ , 即



对  $\beta$  射线和  $\gamma$  射线进行能谱分析, 便可以定性或定量地确定待测样品中有无砷及其含量。

活化分析在生命科学中的应用主要是下面几方面:

1. 酶、蛋白质是维持有机体生命活动的基础, 因而研究其中的痕量元素的作用有重要的意义。而在现有的分析技术中, 活化分析是较理想的。例如测定胰岛素中的镉, 固氮酶中的钼和铁等。一般化学方法很难测定, 而活化分析则容易得多。

2. 脱氧核糖核酸 DNA 和其它核糖核酸 RNA 是生命体内的信息大分子, 其重要性是众所周知的。自从 1959 年第一次揭示出核酸中含有金属之后, 许多活化分析专家与生物学家合作, 对 DNA 及 RNA 中的金属元素的浓度及其新陈代谢过程用活化分析方法进行了研究。

3. 用可活化的稳定同位素作示踪剂, 研究生物体内各部分不同元素随时间的变化规律。在稳定同位素中, 有的经中子照射后变为放射性的, 称为可活化稳定同位素, 用它作示踪剂比起用放射性同位素示踪进行测定, 有不需操作放射性示踪剂的优点, 也扩大了示踪元素的品种。

此外, 中子活化分析还可以用于活体, 即进行活体的元素分析, 在医学上还可以研究各种疾病与痕量元素的关系等。

总之, 活化分析技术在生命科学中的应用是它的广泛应用中的一个很重要的方面。从 1964 年以来, 以《生命科学中的核活化技术》为题目的国际会议已召开过多次, 生物学家也愈来愈重视这一分析技术了。

### 三、中子散射法研究生物大分子的结构

近 20 年左右,中子散射法已发展成确定生物组织的重要成分、生物大分子结构等的有力的手段。传统上,这类问题一般是用 X 射线衍射和电子显微镜的电子束的散射方法解决。但是对于 X 射线和电子束,只有重原子才能获得高分辨率的图象;对含有大量轻元素的生物组织,因为散射太弱而难以甚至不可能得到清晰的图象。而对中子散射,氢、碳、氮、氧等轻元素都很灵敏而且可以分辨,所以对轻元素,中子是很好的探针。

目前的中子源可以获得的中子的波长范围在 0.1 nm 到 1 nm 之间,甚至可以得到波长为 0.2—0.4 nm 的近似的单色中子束。中子冷却后可得冷中子,有更长的波长,可以研究线度大到 50 nm 的生物样品的结构,如病毒或大分子聚合物。对制备近晶化的样品,中子散射图样的分辨率很高,可以给出原子水平的有价值的图象。当然,按分辨本领和可达样品大小两者讲,中子分析和 X 射线分析有较宽的重叠区,但中子分析具有独特的、X 射线分析不能相比的优点。

在生物学有关的散射实验中,人们常用“散射长度”这一概念来描述中子、电子或 X 射线等与原子或原子核的散射,它就是弹性散射的“散射振幅”,详细的定义和计算见参考文献 [9,10]。

用 X 射线分析所得的最后结果是一个以电子密度图表示的分子图象,在这样的图上,因为氢只有一个电子,所以很不明显,甚至对那些结构已经有了很好了解的小分子,电子密度图上氢的位置也会出现严重误差。在质量稍低的大分子电子密度图上,则根本找不到氢。

但是,在中子散射中,氢不仅与其它重元素有同数量级散射长度,而且其值是负的,即与在同一位置的其它原子相比,散射波出现 180 度相差。所以,在中子散射图上,其它原子以正峰值出现,而氢原子以负的“空穴”出现。这种反差的出现,使氢成为用中子散射容易探测的对

象。另外,中子散射中的一个有趣现象是氢( $^1\text{H}$ )和氘( $^2\text{H}$ )的散射长度有令人惊奇的差别。氢的散射长度是负的,而氘的散射长度是正的。所以,如果在样品中,我们用氘代换氢,在高分辨率散射图上,氢的负“空穴”被氘的正峰值所代替。生物组织中含有大量的氢,所以用这种所谓代换标记法可以对生物组织内的氢进行仔细研究。

研究生物物质的中子散射法分为两类:高分辨率,用于决定氢在生物分子中的分布;低分辨率,用于研究生物大分子集团中的亚分子集团的位置,例如可以得到球蛋白分子在染色体中的位置等。下面分别加以介绍。

#### 1. 高分辨率中子散射法

六十年代后期,中子散射在生物学研究中的主要课题是用尽可能高的分辨本领来确定蛋白质结构。首先涉及氢键,因为它部分地决定蛋白质的三维结构的稳定性。而在蛋白质的 X 射线衍射图上,氢原子是不可见的,不能直接观察氢键结构。在中子散射图上,氢键是直接可观察的,这对酶的研究也很重要,因为作为酶的蛋白质的催化形态通常都含有非常复杂的氢键网络,而且质子(氢原子核)的变化常常伴随着酶促反应的发生。

与上述问题有密切关系的是溶剂结构的研究。在溶液中,水很快围绕大分子而具有与纯溶剂水不同的性质,这些围绕大分子的水的结构对大分子折叠有重要的影响,所以人们很想了解其结构细节。用 X 射线方法可以观察到水,因为氧原子是可见的。但在电子密度图上难以排除“噪音”干扰,而在中子图上,水中的原子都清晰可见,“噪音”干扰变得很小。

其次,在中子图上,我们可以区别氮原子和氧原子,蛋白质中有多种残基,如天冬酰胺,在酰胺一边终止。在 X 射线图上很难将酰胺的羧基一边与它的胺的一边加以区别,而在中子图上,N 和 O 原子都比 X 射线图上的显著,加之氢原子也是可见的,因而能够容易识别其空间结构。

#### 2. 低分辨率中子散射法

低分辨率中子散射不是对个别原子的散射长度,而是对整体的平均散射性质进行研究,从而获得生物组织组成的有用信息。一般用散射长度密度来描述,它正比于所有原子的平均中子散射长度。例如水的散射长度密度接近于零,它的两个氢原子(每个散射长度为  $b = -0.37 \times 10^{-12} \text{cm}$ )的负贡献恰好与氧原子的正贡献(氧的散射长度为  $b = 0.667 \times 10^{-12} \text{cm}$ )相抵消。生物组织中不同组分的散射长度密度的差异反映出其中氢原子含量的差别。如果用氘取代氢,则因为氢原子的负贡献被氘的正贡献所补偿,散射长度密度将发生大的变化。例如,  $\text{D}_2\text{O}$  的散射长度密度与  $\text{H}_2\text{O}$  的相比是一个很大的正值,很容易被观察到。这种现象叫氘化,它总是使散射长度密度明显增加。利用这一原理发展起来的方法称为对比变化法,采用这种方法可以获得生物大分子许多有用信息。例如,在  $\text{H}_2\text{O}$  溶液中加入  $\text{D}_2\text{O}$ ,可以调节某种成分和溶剂之间散射长度密度之差,使其为零,于是另一种成分将支配整个散射,我们便可以得到后者的形状、大小等信息。如果改变“对比”,我们又可以获得其它成分的有关信息。

因为对比变化法从生物化学的角度讲是容易实现的,而且数据可直接收集,所以许多生物学家开始对它产生兴趣。目前它已在病毒研究及含蛋白质的双层类脂膜的结构研究中得到应用。

此外,在低分辨率中子散射中,氘标记法也是很有意义的。在 X 射线衍射中,同晶置换实验的结果是突出重原子的位置;而在低分辨率中子散射情况,用氘标记法可定出作为标记的氘原子。例如,测定生物膜双层分子中脂肪位置,双层分子中化学上的特定位置用氘标记,导致中子衍射的变动,显示出结构中类脂分子的氘化位置及其分布。

专门的氘化标记法还可以用来研究确定生

物大分子聚集体中亚单位的位置。目前已用这一方法对大肠杆菌的 RNA 聚合酶的五个亚单位的结构作了充分研究。在法国 Laue-Langevin 研究所等处,人们正在研究大肠杆菌的含有 22 个大分子成分的 30S 核蛋白体的亚单位及 50S 亚单位,其中前者的 19 个位置已被弄清。

由上述可见,研究生物大分子结构,中子散射法不仅可作为 X 射线衍射法和电子显微镜技术的补充手段,而且还有它自身的独特优点,能获得用其它方法无法得到的结构信息。它的缺点是需要较高级的设备(如高中子通量的核反应堆)和较长的曝光时间,在某些氘化标记实验中,对生物化学技术要求非常严格等。这些,特别是设备要求是许多国家,包括我国在内,在这方面工作开展较少的重要原因。考虑到其重要性,我们应在有条件的单位将这一工作逐步开展起来。

由上述可见,中子在农业科学技术及生物学的许多方面获得了应用。可以预见,随着核反应堆及其它中子源的发展,中子在这一领域的应用将会更加深入广泛。

- [1] 霍斯特等著,伍任译,中子活化分析,原子能出版社,(1978),9.
- [2] 柴之芳,活化分析基础,原子能出版社,(1982),12.
- [3] 中国科学院遗传研究所. 突变育种手册,科学出版社,(1973).
- [4] 许耀奎等,作物诱变育种,上海科学技术出版社,(1985),66.
- [5] 陈政发,原子能农业应用论文集,湖南省原子能农业应用研究所编印,(1980),26.
- [6] L. Cser 等等,何敏等译,应用于生物研究中的中子散射技术(论文集),科学出版社,(1986),2.
- [7] Peter B. Moore, *Physics Today* January (1985), 63-68.
- [8] Cantor and Schimmel, *Biophysical Chemistry, Part II, Techniques for the Study of Biological Structure and Function*, W. H. Freeman and Company, (1980), 829-834.
- [9] 周世勋,量子力学教程,人民教育出版社,(1979), 6, 176.