

生物学中同位素示踪法

M. D. 凱門 著

科学出版社

58.1717
634

生物学中同位素示踪法

M. D. 凱門 著

王世真 等譯

Science 66

科学出版社

1962

MARTIN D. KAMEN
ISOTOPIC TRACERS IN BIOLOGY
ACADEMIC PRESS INC.
New York, 1957

內 容 簡 介

本书全面介绍在生物学及医学中如何应用示踪同位素。全书大体分为三部分。第一部分简述原子物理及放射化学,包括同位素的测量技术。第二部分用生动的例子讨论示踪方法学及其优缺点。第三部分罗列 29 种最主要元素的同位素,一一说明它们的制备、性质、分析及应用价值。

书中一共引用了一千多种经过选择的文献资料,对于从事示踪研究的工作者(生物学、生物化学、细菌学、医学等部门)可以提供丰富的参考内容。

生物学中同位素示踪法

M. D. 凱門 著

王世真 等译

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1962 年 7 月第一版 书号: 2538 字数: 412,000

1962 年 7 月第一次印刷 开本: 850 × 1168 1/32

(京) 0001—6,400

印张: 15 3/4

定价: 2.60 元

13080

譯 者 的 話

同位素示踪剂的应用在生物学及医学研究方法上掀起了划时代的技术革命。示踪方法解决了老的方法所不能解决的許多科学問題。特别是对于动物和人体内部以及生命細胞内部的动态变化情况,这方法到目前为止可以認為是不可缺少的研究工具。

本书首先介紹原子物理和放射化学的基本知識,接着討論同位素測定所需的仪器和技术。这些内容是生物学工作者进行示踪实验前应当熟悉的基础理論。书中其余的部分,分析起来,可以分为示踪方法的总論和各論两个大部分。总論包括第六章、第七章和第八章。在此三章中,作者詳細說明了示踪方法可以解决那些类型的研究問題,它的潛力和它的限制。所举的实例中包括許多已經成为經典的研究工作。各論部分分別提到氫、碳、氧、氮、磷、硫及其他二十三种重要元素的同位素。对于每一种同位素,几乎都仔細討論了它的制备、提純、性能、測定、应用范围及其优缺点。

全书中最充实与最出色的几章无疑是示踪方法的总論部分。在这部分里,作者举了許多有价值的研究工作的实例来証明示踪方法的各种可能性。例子有在文献中已經获得丰富研究成果的重大科学研究問題,象光合作用和固醇类、卟啉类等复杂代謝物的生物合成;也有虽然是刚开始露出苗头,却显然有发展前途的研究問題,如酶的作用机制、免疫学、病毒学和化学特效药的研究等。作者也討論了如何理解和处理示踪实验的結果,以避免得到錯誤的解释和結論。

这本专著虽然是一本概論,可以当作教科书,同时也是一本参考书。书中內容的出处,一律引証了原始資料,先后收集的参考书籍和論文达一千多种。书中还列举許多綜合性的表格,如放射性

原子核的性質表、標記化合物合成的總結表等。通過這些文獻和表格，讀者可以直接參閱自己所最感興趣的材料。

當然這本書也不是沒有缺點的。許多較新的成就，如用氚標記有機物的新技術、染色體复制機制的研究、 I^{132} 作為 I^{131} 的代用品、放射性同位素作為診斷機的放射源、同位素在內分泌學上的應用、神經傳遞因子的代謝等等都還未列入本書之中。輔酶 I 加氫的位置（見第 188 頁譯者注），雖然在 1954 年以前已經用示踪方法完全肯定，但是書中不但沒有討論新的實驗證據，而且插圖還畫着老的結構。第五章編寫的目的，據作者聲明，是解決“從書本知識搬到實驗室時研究者所遇到的一些實際問題”（詳見原序）；事實上，在這一點上，作者沒有做到，很難設想這一章的內容對初學者的具體實驗室工作中會起多大的幫助。各種同位素的輻射危險性，也討論得很不夠。書中印刷與校對方面的錯誤也不少，翻譯時已尽可能加以糾正了。

翻譯是按照該書的第三版進行的。第三版出版於 1957 年，其後沒有出現新版。只在 1959 年 12 月出過增訂本，其附錄中添加了“液體閃爍探測儀器的討論”這一新的內容，譯文中我們也包括進去了。

由於水平限制，錯誤在所難免。在詞句上欠妥之處恐怕更多。希望讀者提出批評，使譯文中錯誤和缺點有得到糾正的機會。

翻譯進行時，陸如山、王世真、吳冠芸、汪桂江、劉培楠、陳重、劉承斌、胡詠梅、李金照等同志均能在百忙中熱心合作，辛勤勞動。脫稿後，又承許多同志代為抄寫。對於以上同志，在此特表示衷心的感謝。

王世真 1961 年 3 月

目 录

第一章 原子核、放射性和放射性同位素的生产.....	(1)
一、引言	(1)
二、原子核的一般性质	(1)
(一) 原子核的结构.....	(1)
(二) 质量数和原子序数.....	(2)
(三) 同位素.....	(3)
(四) 原子核的质量.....	(4)
(五) 原子核的其他基本性质.....	(4)
三、原子核的分类	(5)
(一) 导言.....	(5)
(二) 同位素的分类及核力.....	(7)
(三) 同位素比例.....	(10)
(四) 比放射性及原子百分超.....	(11)
四、放射性	(12)
(一) 放射性衰变的种类.....	(12)
β 衰变; γ 衰变; α 衰变	
(二) 衰变基本规律.....	(16)
(三) 半衰期及平均寿命.....	(17)
(四) 放射性反应链.....	(20)
(五) 分支蜕变.....	(21)
(六) 放射性单位.....	(22)
五、核反应	(24)
六、中子引起的核反应	(28)
(一) 概论.....	(28)
(二) 中子源.....	(30)
铀裂变反应; 钍与氘核的反应; 锂与氘核的反应; 氘与氘核的反应; α 粒子反应	

(三) 中子反应.....	(31)
慢中子俘获; 发射质子的中子俘获; 发射 α 粒子的中子俘获; 发射中子的中子俘获; 核中子的多次射出; 結束語	
七、氘核引起的核反应	(34)
(一) 概論.....	(34)
(二) 氘核反应.....	(36)
发射质子的氘核俘获; 发射中子的氘核俘获; 发射 α 粒子的氘核俘获; 氘核俘获后多次中子发射; 氘发射; 氘核反应的产率及竞争作用	
八、靶子技术和放射化学	(39)
(一) 靶化学.....	(39)
(二) 用齐拉德-查莫尔斯法分离同位素	(42)
(三) 放射化学要点.....	(46)
同晶形取代; 表面吸附; 反常取代	
参考文献.....	(50)
第二章 示踪原子的辐射特征.....	(52)
一、引言	(52)
二、 β 射线	(54)
(一) β 射线的性质.....	(54)
(二) β 粒子的吸收.....	(55)
(三) β 粒子散射方面的一些情况.....	(60)
三、 γ 射线	(61)
(一) γ 射线的性质.....	(61)
(二) γ 射线与物质的相互作用.....	(62)
简单的综述; γ 射线的散射和吸收	
参考文献.....	(65)
第三章 同位素的测定.....	(68)
一、引言	(68)
二、放射性的测定	(68)
(一) 基本现象.....	(68)
(二) 基本的仪器.....	(70)
概論; 盖革-弥勒管; G-M管的构造和运用; 正比计数器;	

驗電器和靜電計

(三) 液体和固体介质中的分析——閃爍計數器 (85)

(四) 輔助的儀器 (91)

(五) 对放射性測定的校正 (93)

分辨時間;本底校正;效率的变化;吸收損失;样品的几何位置

(六) 放射性測定的統計学問題 (102)

(七) 放射性測定中的标准源和示踪剂强度的測定 (106)

(八) 放射自显影术 (108)

引言;实验步驟;限制和展望

三、稳定性同位素的測定 (115)

(一) 引言 (115)

(二) 密度法 (116)

(三) 电磁分析法 (118)

参考文献 (121)

第四章 輻射的危害性 (123)

一、概論 (123)

二、保健物理仪器 (126)

三、剂量的計算 (127)

四、屏蔽 (130)

参考文献 (131)

第五章 重要实验技术 (133)

一、概論 (133)

二、放射性測定样品的制备方法 (133)

三、气体計数 (136)

四、真空技术的一些注意事項 (137)

五、标记物質的燃烧 (137)

六、气体計数用的測定裝置 (140)

参考文献 (141)

第六章 示踪方法总論:生化方面,第一部分 (142)

一、示踪方法在生物学研究中的意义 (142)

二、生化方面的应用 (144)

(一) 对一般示踪物的要求	(144)
(二) 主要的局限性	(145)
(三) 细胞成分的动态及“代謝庫”的观念	(150)
(四) 前身-产物的研究	(152)
(五) 代謝循环及中間产物的探測	(162)
(六) 同位素竞争法	(173)
(七) 奥格斯通假說	(175)
(八) 生化平衡的可逆性	(178)
(九) 酶的作用机制	(182)
(十) 同位素稀释法	(188)
(十一) 結束語	(196)
第七章 示踪方法总論: 生化方面, 第二部分	(197)
一、中間代謝中的专题	(197)
(一) 光合作用中 CO_2 的固定	(197)
(二) 胆固醇的生物合成	(212)
(三) 卟啉的生物合成	(227)
(四) 結束語	(239)
二、对于用示踪方法研究中間代謝的一些批判性的意見	(239)
参考文献 (第六章及第七章)	(245)
第八章 示踪方法总論: 生理学及医学方面	(247)
一、引言	(247)
二、生理学方面的应用	(247)
(一) 通透性、吸收和分布的研究	(247)
(二) 利用同位素稀释法測定細胞內外間隙	(256)
(三) 代謝更新与完整机体的关系	(258)
(四) 輸运的研究	(260)
三、临床医学研究方面的应用	(261)
(一) 循环時間的測定: 毛細管運輸	(261)
(二) 摄取、积聚和排泄, 特別是应用到放射治疗及临床診斷 上的有关問題	(263)
(三) 血液学中的应用	(269)
血液生理学; 血容量的測定	

(四) 免疫学的研究	(276)
四、专题和結束語	(278)
(一) 糜烂剂与蛋白质的相互作用	(278)
(二) 青霉素的作用方式及生物合成	(279)
(三) 代謝促进剂的影响	(282)
(四) 病毒代謝和生物合成	(282)
(五) 化学特效葯物应用中的酶作用基础	(285)
(六) 結束語	(287)
参考文献	(288)
第九章 氫的同位素	(289)
一、引言	(289)
二、氫的測定	(291)
三、氫的測定	(294)
四、氫和氫作为氫的示踪剂	(296)
五、氫和氫作为碳的輔助示踪剂	(299)
六、氫同位素在临床研究中的应用及有关的輻射损伤問題	(309)
参考文献	(310)
第十章 碳的同位素	(311)
一、引言	(311)
二、短寿命的放射性碳 (C^{11})	(311)
三、稳定性的重碳 (C^{13})	(318)
(一) 引言	(318)
(二) 測定	(318)
四、长寿命的放射性碳 (C^{14})	(319)
(一) 历史	(319)
(二) 制备与性質	(324)
(三) C^{14} 的測定	(325)
(四) 用于碳示踪研究的有机中間物的合成	(330)
(五) 标记碳化合物的生物合成	(344)
自 CO_2 生物合成糖类及有机酸; 高級脂肪酸的生物合	
成; 氨基酸的生物合成; 其他化合物的生物合成	
(六) 降解方法	(354)

(七) 輻射的危害性	(359)
第十一章 氧、氮、磷和硫的同位素	(361)
一、氧的同位素	(361)
(一) 引言	(361)
(二) 制备和测定	(361)
(三) O^{18} 作为氧代謝中的示踪物	(365)
二、氮的同位素	(367)
(一) 引言	(367)
(二) N^{15} 的制备及测定	(368)
(三) N^{15} 作为氮的示踪物	(371)
三、磷的同位素	(372)
(一) 生产、制备及测定	(372)
(二) P^{32} 作为示踪物	(373)
(三) 輻射的危害性	(375)
四、硫的同位素	(376)
(一) 制备、性质及测定	(376)
(二) S^{35} 的示踪应用	(377)
(三) 硫的分布、保留及輻射耐受剂量	(378)
(四) S^{35} -标记化合物的合成	(379)
蛋氨酸和高半胱氨酸; 胱氨酸、半胱氨酸、高半胱氨酸和 同型胱氨酸; 糜烂剂; 生物合成(蛋白质; 抗菌素类)	
(五) 体内和体外蛋白质的更新	(382)
第十二章 在生物学中重要的各种放射性原子核	(385)
一、引言	(385)
二、碱金属与碱土金属示踪剂	(385)
(一) 碱金属示踪物的概况	(385)
(二) 制备、性质及测定	(386)
放射性钠; 放射性钾	
(三) 碱土金属示踪剂——镁、钙和锶	(390)
三、卤素的示踪同位素	(393)
(一) 氟	(393)
(二) 氯	(395)

(三) 溴	(397)
(四) 碘	(399)
(五) 輻射的危害性	(402)
四、痕量元素	(403)
(一) 引言	(403)
(二) 錳	(403)
(三) 鐵	(405)
示踪研究; 示踪同位素	
(四) 鈷	(409)
(五) 銅	(411)
(六) 鋅	(413)
(七) 鉬、釩和鈾	(415)
(八) 砷	(417)
(九) 硒、銻和碲	(420)
(十) 銀、金和汞	(421)
(十一) 結束語	(423)
参考文献	(423)
附录	(433)
一、放射性单位及标准	(433)
二、放射化学实验室的典型操作条例	(437)
三、层析法	(441)
四、生物学示踪研究中有意义的原子核	(451)
五、生物学上重要原子核的测定中液体閃爍探测仪的应用	(463)
名詞索引	(468)

第 一 章

原子核、放射性和放射性同位素的生产

一、引 言

应用同位素示踪方法于生物学问题时,对于示踪方法学的物理基础并不一定要具有详细的知識。然而,从事示踪方法的研究工作者和学生們多数都要求知道一些有关示踪物性质以及原子和原子核物理的基本材料。本书的前面几章就是为了满足这种要求而写的。下面扼要讨论与原子和原子核有关的事实及理论,但是更详尽的讨论则請参阅本章所列的参考文献。

二、原子核的一般性质

(一) 原子核的结构

所有元素都由原子或微小的基本单位所组成。原子含有一个带正电荷的原子核(半径 $<10^{-12}$ 厘米)。原子核虽然在原子容量(半径 $\sim 10^{-8}$ 厘米)中只占很小的一部分,却几乎代表原子核的全部重量。原子容量的绝大部分可以说是相当的“空”,此空间为带负电荷的电子所占有。电子比原子核中的粒子要轻几千倍。换句话说,原子核内的物质和原子内的物质相比,其密度要大得非常之多,接近于每毫升 10^8 吨。这种难以想象的密度包括着日常经验中所不曾遇到的一种力。必须设想当物质压缩成为原子核时会产生巨大的吸引力。

根据现有的知識,原子核含有质子和中子两种粒子。这两种粒子統称为核子。最輕的原子核是普通氢原子的核;它只是单独

的一个質子。其他原子核都是由数目約略相等的中子和質子加在一起而組成的。質子与中子的差別在于前者帶有一个正电荷(4.8025×10^{-10} 靜电单位)。在进一步討論这些粒子之前,拟簡單介紹核力的学說。

实验証明,核力只能达到非常小的距离,实际上比核的长度还要小得多的距离。有人假定,有一种比核子更小的短寿命的不稳定粒子不断生成,而核力的产生便是由于核子之間互相交換这些小粒子的結果。显然核力并非由于簡單的庫伦(靜电)吸引力,因为中子沒有电荷。同时,原子核中的靜电力應該是排斥力而不是吸引力,因为質子都帶有正电,其結果将使原子核散裂。

从宇宙綫粒子的研究知道,存在有质量介于电子和質子之間的核內粒子。它們叫介子。首先发现的介子的质量相当于210个电子的质量,現在被称为 μ 介子。从前认为核子之間这种 μ 介子的交換可能是核力生成的原因。可是这种看法已被实验所否定。实际上涉及核力的粒子是后来发现的另一种介子,即 π 介子。它的质量相当于275个电子的质量。这种介子还具有很多其他特性,足以担当核子間交換粒子的任务。 π 介子以不帶电、帶正电及帶負电三种形式存在,目前它是大多数原子核結構学說的中心。但迄今还未有完善的核力学說。

(二) 質量数和原子序数

原子核內質子数就是該元素的原子序数,常以 Z 字代表之。 Z 的数值在氫元素为1,漸增到101,后者属于最近发现的超鈾元素。 Z 表明原子核的整数正电荷,其大小决定保持原子內所显示电学中性所需的电子数目。

原子核中核子(中子加質子)的总数叫做質量数,常以 A 字代表之。 A 的数值总是用与該元素的原子量最接近的整数来表示(例子参看二(四)节)。 A 的数值由1漸增至255。

原子序数常写在化学符号的左下方而原子質量数則写在右上方;例如, ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^{23}_{11}\text{Na}$ 及 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 分別代表氫、鈉和磷等元素的某些

原子品种，有时也可不写原子序数，因为它可由化学符号而推知。

(三) 同位素

由于原子的化学性质决定于核电荷或原子序数，将中子加到由质子和中子所组成的任何原子核复合体时，会使原子的质量数增加一个整数但不改变核电荷。既然核电荷决定核外电子的数目，后者又决定原子的化学特性，当中子加到原子核时原子的化学特性不会发生变化。由此看来，有些原子核或原子彼此之间在原子核质量上不同但在化学性质上相同，它们叫做同位素。有的元素只有一种稳定性同位素 (${}^4\text{Be}^9$ 、 ${}^9\text{F}^{19}$ 、 ${}^{11}\text{N}^{23}$ 、 ${}^{15}\text{P}^{31}$ 等)；其他则为二种或多种稳定性同位素的混合物。

以硫为例来说明。硫有四种已知的同位素，其质量数为 32、33、34 及 36。依照上面所谈的命名原则，它们可写成 ${}_{16}\text{S}^{32}$ 、 ${}_{16}\text{S}^{33}$ 、 ${}_{16}\text{S}^{34}$ 、 ${}_{16}\text{S}^{36}$ 。这些原子核每个都含有 $Z = 16^*$ 个质子和分别含有 $(A - Z) = 16, 17, 18$ 及 20 个中子。对于稳定性原子核来说，中子数与质子数之比很接近于 1。但此比例数随着 Z 的数值而增大，直到 ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ 时达到 126/83 或 1.5。

具有相同的质量数和不同原子序数的原子核(同量异位素，isobar)也有存在的可能。 ${}_{48}\text{Cd}^{113}$ 和 ${}_{49}\text{In}^{113}$ ， ${}_{18}\text{Ar}^{40}$ 和 ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ 都是这样的例子。最后，具有相同电荷和质量数的原子核也可能以不同的构型或不同的能量状态而存在。这种原子核叫做同质异能素(isomer，见 16 页)。

同位素、同量异位素和同质异能素等名词都是指原子核的某些品种。原子核品种的总称为核种(nuclide)^[1]。譬如 H^2 、 H^1 、 Li^6 、 P^{31} 、 Ca^{40} 及 Ca^{42} 都是核种，但其中只有 H^2 、 H^1 和 Ca^{42} 、 Ca^{40} 是氢和钙的同位素。

* 原书误写成 $A = 16$ ——译者注。

[1] Kohman, T. P., *Am. J. Phys.* 15, 356 (1947).

(四) 原子核的质量

任何原子核的质量都是以原子量为 16 的氧同位素为标准而规定出来的, 这种氧同位素的质量规定为精确地等于 16. 例如, 氦原子核或质子和 O^{16} 相比其质量为 1.00758. 根据二(二)节的定义, 它的质量数为 1.

上述用于衡量原子核质量的单位叫做物理原子量单位. 此与化学原子量单位不同, 后者用于表示化学计算中的原子量. 化学原子量是把自然界含有少量的 O^{17} 和 O^{18} 两种稀有同位素的氧元素精确地规定为 16.0000……, 并以此作为标准重量, 它实际上较 O^{16} 标准原子略重一些. 化学单位比物理单位要大, 是后者的 1.000272 (± 0.000005) 倍. 第六位数字难以肯定, 因为同位素含量在这种精密度下有所波动.

文献中通常遇到的同位素质量都是根据物理单位. 它们不是原子核质量, 而是原子质量, 包括中性原子中核外电子的质量.

(五) 原子核的其他基本性质

除了电荷和质量以外, 原子核还具有类似原子物理中电子所具有的一些性质: 自旋、机械矩、磁矩及电矩. 根据所用量子力学的描述方法, 所有原子核都受两种统计学规律的支配. 这又决定于原子核的组成粒子属奇数或偶数, 也就是说, 质量数是单的或者是双的. 不过, 这些性质的存在与示踪方法学无关, 不需要进一步探讨.

本讨论中首要的原子核计有中子 (n)、质子 (p)、氦核 (d) 及 α 粒子 (α). 氦核是重氢的原子核. α 粒子是氦 (${}^4\text{He}^+$) 的原子核. 负电子或负乙种粒子 (β^-) 和正电子 (β^+) 虽然并不存在于原子核之内, 却是某些原子核反应的产物. 此外, 核子单位名单中还包括丙种射线 (γ) 和中微子 (neutrino), 前者为高能光子 (电磁辐射量子), 后者为假想发生于放出 β 射线的核反应中的一类粒子 (见 12 页).

三、原子核的分类

(一) 导 言

从爱因斯坦的特殊相对論可以推演出来质量(M)与能量(E)相关的公式,以 $E = Mc^2$ 代表之,式中 c 是光速. 这个关系在核子物理学中是很重要的,并且通过原子核的科学研究已經充分証明其正确性. 根据这个原理,质量的消失会带来巨大能量的释放. 在討論所产生能量的大小以前,为方便計拟先介紹电子伏特(eV)这个能量单位.

当一个单位电荷通过一个国际伏特的电位差而移动时,所获得的动能称为一个“电子伏特当量”. 与此相当的热能可以計算如下:設在充电到1伏特的电容器內,两个平行电板之間含有一克分子量(6.02×10^{23})的电子. 这些电子落在正电子板上,其动能轉化为热. 所得到的热能,以焦耳計,等于总电荷的庫伦数乘以电容器的电势差. 一克分子量的电子相当于1个法拉第,或約为96,500庫伦. 因此, $96,500 \times 1 = 96,500$ 焦耳的热生成了. 一卡(g.-cal.) 相当于4.18焦耳,所以 $96,500/4.18$ 或23,000卡/分子的热代表每原子获得1eV的动能. 每一电子所得到的动能相当 $23,000/6.02 \times 10^{23}$ 卡的热. 也就是說,一个eV等于 1.602×10^{-12} 尔格. 一般化学反应中热的变化約为每分子几个千卡到几百个千卡,由此可見化学能的范围都在0至10eV之間.

原子核相互作用所生的热,其数值可以应用质量-能量关系式而求得. 显然,这种能量比一般化学反应大得多,因为在后者观察不到质量有任何損耗. 相反地,在核反应中总质量发生显著的变化. 一个絕對质量单位(mu),即 O^{16} 的1/16,相当于931百万电子伏(MeV)^[2]. 換句話說,每克分子的原子核損耗一个mu时将释放大約 2.1×10^{13} 卡的热. 将一克分子的糖燃烧成 CO_2 及水所释放的热只有 7.2×10^5 卡.

最簡單的核反应是中子与質子結合而成氘核的反应: