

辅酶Q₁₀与人体健康系列丛书

辅酶Q₁₀与心脏健康

主编 吴 铁



科学出版社

辅酶 Q₁₀ 与人体健康系列丛书

辅酶 Q₁₀ 与心脏健康

主 编 吴 铁

副 主 编 唐林志 崔 燎

编 委 (以姓氏笔画为序)

丁喜生

王建伟

刘钰瑜

吕思敏

许碧莲

吴 红

吴 铁

邹丽宜

唐林志

崔 燎

覃冬云

特邀编委 赵 剑

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

辅酶 Q₁₀ 自 1957 年被发现以来, 引起了科学家们的高度重视, 他们做了大量的研究工作, 对它的了解与认识不断深入, 积累了大量的研究成果, 60 年来, 它已经从最初的神秘物质, 变成了我们身体细胞广泛存在的普通辅酶, 它已经从最初的昂贵的药品, 变成了增进人类健康的普通保健食品, 关于它的研究已经遍及全球, 已有几千篇研究论文发表在世界各种科学期刊。本套书重点介绍辅酶 Q₁₀ 与人类健康的研究经历与成果, 本册重点讲辅酶 Q₁₀ 与心脏健康的故事。本书前三章分别讲述辅酶 Q₁₀ 在心脏最多, 缺少辅酶 Q₁₀ 就会生病, 补充辅酶 Q₁₀ 就会强心, 介绍辅酶 Q₁₀ 对心脏及人体的作用, 第四章介绍辅酶 Q₁₀ 对心脏病的防治作用, 强调了“心病还须心药医”, 重点介绍国内外学者及医生们观察辅酶 Q₁₀ 对心脏的保护作用及对心脏病的预防作用的研究成果, 供读者们学习与参考, 也可作为进一步开展研究工作的参考。

本书以讲故事的形式, 试图把科学家们艰苦而复杂枯燥的研究方法, 启迪智慧并激励希望的科学发现以科普的形式向读者介绍, 试图把科普知识与学术专著融为一体, 成为普通读者及高水平的科学研究者 (包括医生) 都喜欢的读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

辅酶 Q₁₀ 与心脏健康 / 吴铁主编. —北京: 科学出版社, 2016

(辅酶 Q₁₀ 与人体健康系列丛书)

ISBN 978-7-03-048878-7

I. ①辅… II. ①吴… III. ①辅酶 Q—关系—心脏病—防治—研究 IV. ①Q552
②R541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 136771 号

责任编辑: 胡治国 王 超 / 责任校对: 李 影

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: A5 (890×1240)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 5 5/8

字数: 158 000

POD 定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

主 编 介 绍



吴铁,男,药理学教授,1955年1月生,1977年参加高考制度恢复后的首届高考并考入湛江医学院医疗系本科医学专业,1982年毕业后留本校(原湛江医科大学,现广东医科大学)药理学教研室先后任助教,讲师,副教授,教授,三级教授;先后担任该校的药理学教研室主任(1996~2006)、研究生导师(1996~)、博士后指导教师(2010~)、基础学院副院长(2003~2006)、药学院院长(2006~2014)、广东医学院-广东润和科技有限公司辅酶 Q₁₀ 联合研究中心主任(2013~)等职务。在此期间,带起了一个团结合作的科研团队,已培养硕士研究生 64 人,其中南粤优秀研究生 9 人,发表科研论文 500 多篇,累计申报 90 多项国家发明专利,其中有 30 多项发明专利获得国家授权,获广东省优秀专利发明者、广东医学院教学名师、优秀硕士研究生导师等称号。2010 年主编全国高等医药院校规划教材《药理学》案例版教材,出版后被全国 20 余所的高校作为本科教科书,2015 年主持该教材第二版编写,全国 40 所高校药理学专家参加了该编写团队。与崔燎合作编著学术专著《骨质疏松药理学动物实验与图谱》,入选华夏英才基金学术文库。2010 年受聘任中华医学百科全书药理学卷编委。还作为副主编或编委参与多部《药理学》《临床药理学》《皮肤科治疗学》等教材的编写工作,参与了《骨矿与临床》《骨质疏松症药效研究方法与技术》等著作的编写工作。

序

《辅酶 Q₁₀ 与心脏健康》一书是主编吴铁教授及其药理学教研团队的同仁通力合作、勤奋耕耘的又一力作，更是他们期望将复杂的药理学知识演绎为通俗易懂、妙趣横生的科普读物的有益尝试。

吴铁教授不仅是我的 1977 级医学本科五年同窗好友，又是 1982 年毕业后一起留校的同事。虽然分别任教病理学和药理学，专业不同，但志同道合，志趣相投，更似良师挚友。此后我辗转美、加两地访学深造，他却一直坚守母校任教，并在国内药理学届崭露头角。至千禧年初我正式在哈佛大学医学院、麻省总医院扎根立足，吴君已著作颇丰，教学科研硕果累累。作为导师，他先后培养了 60 多位研究生，有许多现已当上了教授，副教授，成为教学和科研骨干，可谓桃李满天下。他主编的全国医学院校规划教材《药理学》，已为几十所高校采用，数万本科生在读。他还担任中华医学百科全书药理学卷编委，以及其他多部专著的主编、副主编和编委。他著书立说，为中国药理学的发展和传播贡献良多！

辅酶 Q₁₀ 的发现和应用计有几十年历史了。在欧美已广泛应用，国内外研究论文逾千，但至今尚无一部专著面世，与其理论研究之深、应用之广的“江湖”地位相差甚远。《辅酶 Q₁₀ 与心脏健康》的出版，是吴铁教授及其研究团队多年来对辅酶 Q₁₀ 在药理学、营养学和预防医学等相关领域重要成果的专业集成，更是奉献给当下关注健康、科学养生人士的科普读物。我期望该书的出版将成为相关领域的医学科研人员及

临床工作者有用的参考书籍；更为重视自身防病治病与营养健康的广大读者所喜爱，并因而造福华夏百姓。谨在大洋彼岸为该书的出版表示衷心的祝贺！

美国，波士顿，哈佛大学医学院，麻省总医院

黄培根



Peigen Huang, MD, MSc.

Director, Cox-7 Animal Facility, Edwin L. Steele Laboratory of Tumor
Biology,

Assistant Professor, Harvard Medical School,

Assistant Biology, Massachusetts General Hospital, Department of
Radiation Oncology,

Boston, MA, 02114 USA

Email: peigen@steele.mgh.harvard.edu

前 言

辅酶 Q₁₀ 是什么？辅酶 Q₁₀ 是人体自身的重要物质吗？是人体细胞中的重要成分吗？是人体细胞代谢不可缺少的成分吗？

心脏为什么会跳动？辅酶 Q₁₀ 是心脏的活力之源吗？

心脏为什么会生病？是由于心脏缺乏辅酶 Q₁₀ 吗？

心病还需心药医，补充辅酶 Q₁₀ 对心脏疾病有好处吗？

本书是“辅酶 Q₁₀ 与人体健康系列丛书”之一，重点介绍“辅酶 Q₁₀ 与心脏健康”的有关故事，读者可以在本书的阅读过程中，通过自己的分析与判断，找到上述问题的答案。

关于辅酶 Q₁₀ 与心脏健康的故事，要从 1957 年开始，这一年，美国科学家首先在牛心脏的线粒体中发现了辅酶 Q₁₀，后来，英国科学家从维生素 A 缺陷的小鼠肝脏中得到了这种化合物，将其命名为辅酶 Q₁₀，开启了人类对辅酶 Q₁₀ 的探求之门。1972 年，意大利科学家证明了缺乏辅酶 Q₁₀ 是引发心脏病及其他疾病的原因之一，开启了人类对辅酶 Q₁₀ 与心脏健康的研究；1978 年，英国科学家米切尔教授用化学渗透理论解释了在生物能量转移包括在能量转换系统中辅酶 Q₁₀ 起重要的质子转移作用获得了诺贝尔化学奖，是人类对辅酶 Q₁₀ 的认识更上了一个台阶。辅酶 Q₁₀ 是人类的共同财富，但由于它没有专利保护，没有企业愿意出资对其进行系统的药理学研究，不过，由于辅酶 Q₁₀ 对人体健康杰出的保护作用以及对疾病明显的有益作用，引起了医学、药学、康复医学、保健医学等领域科学家们的高度重视，他们积极投入对辅酶 Q₁₀ 的研究，据 PubMed 数据库检索，以辅酶 Q₁₀ 为研究主题的科学论文已有 3000 多篇在世界公开的科学期刊中正式发表，在中国知网中文期刊网检索，我国也有 2000 多篇研究论文公开发表，辅酶 Q₁₀ 已经成为医学科学家高度重视的健康产品，辅酶 Q₁₀ 的发现，被誉为“营养研究的里程碑”，在美国、日本及欧洲国家，以辅酶 Q₁₀ 为独立成分的药品或保健食品，或以辅酶 Q₁₀ 为复合成分的药品或保健食品大量涌现，至今已超过 200 多项。2003 年，美国 FDA 正式批准把辅酶 Q₁₀ 作为食品添加剂，目前辅酶 Q₁₀ 已经被逐步应用于饮料、糖果、糕点、乳酪、酸奶等食品生产中。注意

到国内还没有一本介绍辅酶 Q₁₀ 的专著作品, 本书主编正在组织相关专业的同行参加共同编写一套“辅酶 Q₁₀ 与人体健康系列丛书”, 本书《辅酶 Q₁₀ 与心脏健康》为该系列丛书的第一册, 接下来我们将陆续编写《辅酶 Q₁₀ 与皮肤美容》《辅酶 Q₁₀ 与神经保护》《辅酶 Q₁₀ 与糖尿病》《辅酶 Q₁₀ 与抗肿瘤》《辅酶 Q₁₀ 与口腔疾病》等分册, 争取早日出版。

吴 铁

2016 年 6 月 1 日

目 录

第一章 辅酶 Q ₁₀ 概述	1
1. 辅酶 Q ₁₀ 的发现	1
2. 三羧酸循环	5
3. 三磷酸腺苷	6
4. 辅酶 Q ₁₀ 简介	8
第二章 心脏中的辅酶 Q ₁₀	12
1. 心脏的作用	12
2. 心脏的损伤与心脏的保健	16
3. 辅酶 Q ₁₀ 与心脏的动力	23
4. 辅酶 Q ₁₀ 在人体内的分布	28
5. 辅酶 Q ₁₀ 随年龄增长而减少	31
6. 辅酶 Q ₁₀ 的缺乏会导致疲劳与疾病	32
第三章 辅酶 Q ₁₀ 对人体健康有什么作用?	33
1. 辅酶 Q ₁₀ 是人体细胞能量加工厂的重要成员	33
2. 辅酶 Q ₁₀ 是体内自由基清除剂	34
3. 辅酶 Q ₁₀ 是体内具有重要作用的辅酶	35
4. 辅酶 Q ₁₀ 是心脏的保护神	36
5. 辅酶 Q ₁₀ 是神经细胞的保卫者	37
6. 辅酶 Q ₁₀ 的保肝护肝解毒作用	41
7. 辅酶 Q ₁₀ 能增强人体的免疫力	48
8. 辅酶 Q ₁₀ 能缓解疲劳, 保持足够的体力与精力	54
9. 辅酶 Q ₁₀ 能减轻肺损伤	60
10. 辅酶 Q ₁₀ 的肾保护作用	71

第四章 辅酶 Q ₁₀ 对心脏疾病有什么作用?	77
1. 辅酶 Q ₁₀ 对心力衰竭有效吗?	77
2. 辅酶 Q ₁₀ 对心绞痛有效吗?	94
3. 辅酶 Q ₁₀ 对高血压有效吗?	106
4. 辅酶 Q ₁₀ 对冠心病有效吗?	115
5. 辅酶 Q ₁₀ 对心律失常有效吗?	126
6. 辅酶 Q ₁₀ 对病毒性心肌炎有效吗?	141
7. 辅酶 Q ₁₀ 对肺心病及肺部疾病有效吗?	147
8. 辅酶 Q ₁₀ 对各种原因导致的心脏毒性有效吗?	158

第一章 辅酶 Q₁₀ 概述

心脏是怎样驱动的？它的动力在哪里？我们心中的火花，激情从何而来？科学家通过几百年的研究，探讨，终于发现了“它”！“它”是我们身体的动力，“它”是我们力量的源泉！“它”在我们的“心”中，“它”在我们的心脏中，“它”的名字叫做辅酶 Q₁₀！

1. 辅酶 Q₁₀ 的发现

1957 年，美国威斯康星大学 David Green 实验室的法雷得利克·科雷恩（弗莱德里克·克莱恩）博士（Dr. Frederick Crane）及其同事从牛心脏的心肌细胞线粒体脂提取物中第一次成功分离出一种新的纯品，这种新的物质就是能参与电子传递链的，被医学家称为“细胞能量之源”的物质——“它”，由于“它”存在范围非常广泛，弗莱德里克·克莱恩将其命名为“泛醌(ubiquinone)”，意思是无处不在的醌。之后英国的 Morton 教授从缺乏维生素 A 的老鼠肝中得到同一种化合物，并把它命名为 Coenzyme Q₁₀，简称 CoQ₁₀，即我们现在称为辅酶 Q₁₀ 的“它”。

1958 年，辅酶之父，美国著名的墨克制药公司高级研究员卡尔·福格士（卡鲁·福鲁卡斯）博士（Dr. Karl Folkers）等精确地描绘出了辅酶 Q₁₀ 的分子结构式并且在实验室用化学方法首次合成了“它”（图 1-1）。辅酶 Q₁₀ 的化学式为：2,3 dimethoxy-5 methyl-6 decaprenyl benzoquinone（2,3-二甲基-5-甲基-6-癸异戊烯基苯醌），分子式为 C₅₉H₉₀O₄、分子量为 863.36（其中 Q 代表醌化学基，10 代表尾端异戊二烯的个数）。

辅酶 Q₁₀（ubidecarenone），更细致的化学名称为：2-（3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35, 39-癸甲基-2, 6, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38-四十癸烯基）-5, 6 二甲氧基-3-甲基-p-苯醌，（[(2E, 6E, 10E, 14E, 18E, 22E, 26E, 30E, 34E)-3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35, 39-deca-methyltetraconta-2, 6, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38-decaenyl]-5, 6-dimethoxy-3-methylcyclohexa-2, 5-diene-1, 4-dione）。

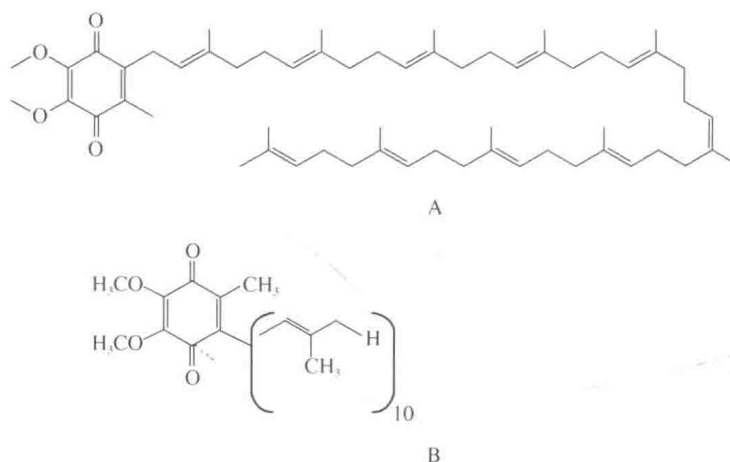


图 1-1 辅酶 Q₁₀ 的结构

辅酶 Q₁₀ 为黄色或浅黄色结晶固体粉末，熔点约 50℃，无臭、无味，易溶于氯仿、苯、四氯化碳，可溶于丙酮、乙醚、石油醚，微溶于乙醇，不溶于水和甲醇，见光分解成红色物质，对温度和湿度较稳定。辅酶 Q₁₀ 在脏器（心脏、肝、肾）、牛肉、豆油、沙丁鱼、鲭鱼和花生等食物中含量相对较高。摄入大约 500g 沙丁鱼、1000g 牛肉或 1500g 花生可分别提供约 30mg 辅酶 Q₁₀。

辅酶 Q₁₀ 是一种醌类物质，它的生物活性主要来自于其醌环的氧化还原特性和其侧链长异戊烯的理化性质。辅酶 Q₁₀ 的生物能活性是由于它的醌环在氧化呼吸链中起传递电子和质子的重要作用，这种作用是所有生命形式必不可缺少的，还是形成细胞能量 ATP（三磷酸腺苷）的关键步骤。ATP 是机体能量的主要储存形式，也是所有细胞功能赖以正常发挥的重要基础。从此意义上讲，辅酶 Q₁₀ 是细胞代谢和细胞呼吸激活剂，由于心肌细胞具有高耗能的生物特征，心肌细胞在人体细胞中含有辅酶 Q₁₀ 最高，并发现它在心肌细胞中发挥着重要的能量传递作用，后来，在人体多个组织器官中又发现了辅酶 Q₁₀ 的存在，现代研究，已经证明了辅酶 Q₁₀ 几乎存在于人体的所有细胞中，只是在心脏中含量最高，是心脏的动力源泉，缺少了，心脏动力就不足，低于正常时的 25%，心脏就会有病，这种病，医学上叫做心功能不全，也叫做“心力衰竭”，随着“它”缺少程度的增加，心力衰竭就会越来越重，临床已经开展了大量关于使用辅酶 Q₁₀ 治疗心脏病的研究，结果显示，各种病因引发的充

血性心力衰竭患者血液及组织中的辅酶 Q₁₀ 含量均显著偏低，且越严重的心力衰竭伴随越严重的辅酶 Q₁₀ 缺乏，补充辅酶 Q₁₀，许多心脏疾病就会好转，心力衰竭也会减轻。

辅酶 Q₁₀ 有氧化型和还原型两种形态，在体内这两种形态的辅酶 Q₁₀ 共同存在。还原型辅酶 Q₁₀（辅酶 Q₁₀H₂）具有很强的抗氧化作用，它可以清除多种氧化诱导剂（如高氯酸盐、亚氯酸盐、脂质氧化酶、过渡金属离子等）诱导产生的自由基，如氧中心自由基、碳中心自由基、单线态氧等；人血浆辅酶 Q₁₀H₂ 浓度增高可以提高血清 SOD 的水平。辅酶 Q₁₀H₂ 在体内能抑制自由基介导的膜脂蛋白氧化损伤；辅酶 Q₁₀H₂ 具有比维生素 E 更强的抗氧化活性。辅酶 Q₁₀ 是细胞自身产生的天然抗氧化剂，能抑制线粒体的过氧化，保护生物膜结构的完整性，对免疫力有非常特异的增强作用，具有提高吞噬细胞的吞噬率，增强抗体的产生，改善 T 细胞功能，延缓衰老等功能，是一种人类健康不可或缺的重要生理活性物质，辅酶 Q₁₀ 越来越受到市场关注，目前已被广泛应用于营养、化妆品等方面，尤其在营养补充方面，已成为未来的主要发展趋势。其被认为是 21 世纪细胞、生命化学治疗研究领域的开路先锋，补充和延伸了现代化的医疗技术手段。随着各种辅酶 Q₁₀ 产品的问世及推广应用，人类迎来了一个辅酶 Q₁₀ 的健康新时代。

首先发现辅酶 Q₁₀ 的法雷得利克·科雷恩博士是一个非常勤奋的科学家，从年轻起就开始了枯燥而劳动强度大科研生涯，兢兢业业，专心致志，由于发现了辅酶 Q₁₀ 获得美国化学学会的最高荣誉 Priestly Media 奖，被荣誉地称为“辅酶 Q₁₀ 研究之父”，当时他提出辅酶 Q₁₀ 对心脏机能起着重要的作用，他也亲自试验，每天坚持服用辅酶 Q₁₀，结果发现辅酶 Q₁₀ 的效果的确不错，卡鲁福鲁卡斯博士感到吃了辅酶 Q₁₀ 之后，整天精力都十分充沛，就是进行枯燥而劳动强度大，耗费脑力和精力的高难度的科研研究活动，都不感觉到累，他一生都在致力于科学研究，为人类科学做出了很大的贡献，他一直服用辅酶 Q₁₀ 直到 91 岁去世为止，为后人留下了许多宝贵的经验与财富。

1961 年英国著名的爱丁堡大学生化学家彼得·米切尔博士（Peter D. Mitchell）在他的生物系统能量转移过程的研究中发现辅酶 Q₁₀ 存在于任何细胞的粒线体中，在人体细胞能量的制造与输送中扮演相当重要的角色。他认为电子传递链像一个质子泵，电子传递过程中所释放的能量，

可促使质子由线粒体基质移位到线粒体内膜外膜间空间形成质子电化学梯度,即线粒体外侧的 H⁺ 浓度大于内侧并蕴藏了能量,他把这一假设称为“化学渗透理论”,用这个化学渗透理论解释了生物能的转换,并在生物膜上的能量转换实验中,成功地发现了辅酶 Q₁₀ 在人体细胞层产生能量的工作机制。彼得·米切尔博士因此重大发现而荣获 1978 年诺贝尔化学(医学)奖。

20 世纪 60 年代中期,日本著名的医生 Yamamura 开始第一次将辅酶 Q₁₀ 应用于人类疾病——充血性心力衰竭的治疗,并取得在当时难以想象的惊人效果,从此,有关辅酶 Q₁₀ 的医学用途和临床评价的研究大量开展,1976 年,辅酶 Q₁₀ 成为日本医院心脏病患者的正规用药。

1980 年起,随着对辅酶 Q₁₀ 的研究的不断深入,新的发现,新的研究成果的不断报道,日本和西方许多国家涌现出大量的、不同规模的理论和临床研究。1985 年,福格士博士(已转教于美国德克萨斯州州立大学奥斯丁分校医学院)和彼得·兰士恩博士(Dr. Peter H. Lans Joen)经过多年大量的研究,发布了第一次权威性的心脏病患者临床双盲试验结果。1986 年,福格士博士(美国科学院院士)因辅酶 Q₁₀ 的研究和贡献获得美国化学会最高奖 Priestley Medal。1990 年,美国前总统老布什亲自在白宫授予福格士博士美国国家科学院荣誉院士勋章。当时虽然辅酶 Q₁₀ 还是很昂贵,但还是有保健企业开始投入,很快就引爆了保健品市场。结果就是从 90 年代起,辅酶 Q₁₀ 一直都是美国营养食品市场里最受欢迎的和心血管系统功能的补充品。

总的来说,辅酶 Q₁₀ 是一种非维生素的营养物质,“它”存在于细胞的能量加工厂线粒体(mitochondrion)中,“它”是细胞的能量加工厂重要的生产成员,“它”是细胞的能量加工厂制造能量的主要参与者,“它”参与制造的能量叫做三磷酸腺苷,也就是我们常说的 ATP (adenosine triphosphate),ATP 是细胞生长必需的能量来源,是心脏跳动的能量基础,是人体活动的动力,“它”加强了心肌的新陈代谢,提高心脏跳动的效率,保证了人体正常的生命活动,没有“它”,心脏就停止跳动,生命就会结束。同时,辅酶 Q₁₀ 还有另外一个名字,叫做“辅酶”,它为什么叫做“辅酶”呢?因为辅酶 Q₁₀ 能加强体内与生命密切相关的其他酶的作用效果,如“三羧酸循环”的一些重要的酶,辅酶 Q₁₀ 在产生 ATP 的“三羧酸循

环”呼吸链中起递氢体的作用,广泛参与体内生物代谢过程,对多种酶均有激活作用,是细胞代谢和细胞呼吸激活剂;辅酶 Q₁₀ 还可作为重要的抗氧化剂和免疫增强剂。辅酶 Q₁₀ 在临床上广泛用于心脏病,如充血性心力衰竭、心绞痛、高血压、冠心病、心律失常(窦性心动过速、室性期前收缩等),病毒性心肌炎及心脏中毒等的辅助治疗,辅酶 Q₁₀ 还常用于急慢性病毒性肝炎、亚急性重型肝炎、原发性和继发性醛固酮增多症、脑血管障碍及出血性休克等疾病的综合治疗。

2. 三羧酸循环

三羧酸循环是需氧生物体内普遍存在的代谢途径,分布在线粒体。因为在这个循环中几个主要的中间代谢物是含有三个羧基的柠檬酸,所以叫做三羧酸循环,又称为柠檬酸循环或者是 TCA 循环、TAC; 或者以发现者 Hans Adolf Krebs (英 1953 年获得诺贝尔生理学或医学奖) 的姓名命名为 Krebs 循环。三羧酸循环是三大营养素(糖类、脂类、氨基酸)的最终代谢通路,又是糖类、脂类、氨基酸代谢联系的枢纽。三羧酸循环是将乙酰 CoA 中的乙酰基氧化成二氧化碳和还原当量的酶促反应的循环系统,该循环的第一步是由乙酰 CoA 与草酰乙酸缩合形成柠檬酸。反应物乙酰辅酶 A (一分子辅酶 A 和一个乙酰相连) 是糖类、脂类、氨基酸代谢的共同的中间产物,进入循环后会被分解最终生成产物二氧化碳并产生 H^+ , H^+ 将传递给辅酶——尼克酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD^+) 和黄素腺嘌呤二核苷酸(FAD),使之成为 $NADH + H^+$ 和 $FADH_2$ 。 $NADH + H^+$ 和 $FADH_2$ 携带 H 进入呼吸链,呼吸链将电子传递给 O_2 产生水,同时偶联氧化磷酸化产生 ATP,提供能量(图 1-2)。

三羧酸循环是生物机体获取能量的主要方式。首先,1 个葡萄糖经无氧酵解净生成 2 个 ATP,而有氧氧化可净生成 38 个 ATP (不同生物化学书籍上数字不同,大多数倾向于 32 个 ATP,其中三羧酸循环生成 24 个 ATP),在一般生理条件下,许多组织细胞皆从糖的有氧氧化获得能量。糖的有氧氧化不但释能效率高,而且逐步释能,并逐步储存于 ATP 分子中,因此能量的利用率也很高。其次,三羧酸循环是碳水化合物,脂肪和蛋白质三种主要有机物在体内彻底氧化的共同代谢途径,三羧酸

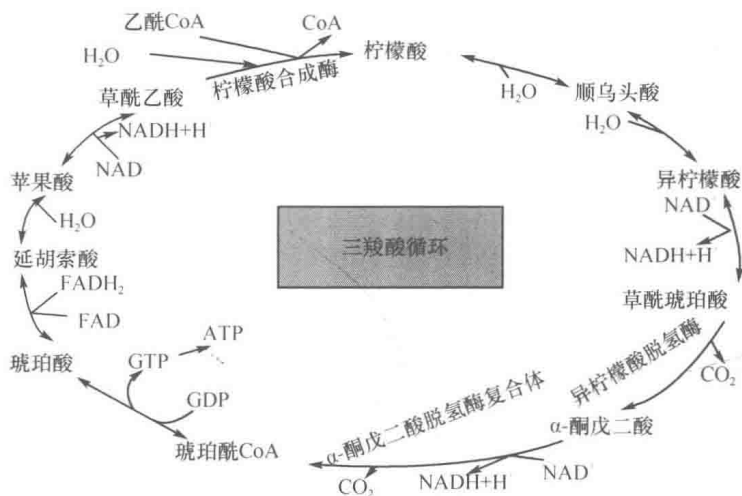


图 1-2 三羧酸循环图解

循环的起始物乙酰 CoA，不但是糖氧化分解的产物，它也可来自脂肪的甘油、脂肪酸和来自蛋白质的某些氨基酸代谢，因此三羧酸循环实际上是三种主要有机物在体内氧化供能的共同通路，估计人体内 2/3 的有机物是通过三羧酸循环而被分解的。再次，三羧酸循环是体内三种主要有机物互变的联络机构，因糖和甘油在体内代谢可生成 α -酮戊二酸及草酰乙酸等三羧酸循环的中间产物，这些中间产物可以转变成成为某些氨基酸；而有些氨基酸又可通过不同途径变成 α -酮戊二酸和草酰乙酸，再经糖异生的途径生成糖或转变成甘油，因此三羧酸循环不仅是三种主要的有机物分解代谢的最终共同途径，而且也是它们互变的联络机构。辅酶 Q₁₀ 在三羧酸循环产生 ATP 的呼吸链中起递氢体的作用，广泛参与体内生物代谢过程，对线粒体琥珀酸脱氢酶等多种酶均有激活作用，在细胞代谢和细胞呼吸中发挥重要作用。

3. 三磷酸腺苷

三磷酸腺苷 (ATP) 在生命过程中有什么作用？ATP 是生命体内最常见、最重要的高能磷酸化合物，它是一种核苷酸，作为细胞内能量传递的“分子电池”，可以储存和传递化学能。化学能与我们知道的太阳能的道理差不多，万物生长靠太阳，太阳白天照射大地，晚上没有太阳，没有光线，怎么办？人类为了解决照明问题，找到了许多办法，其中，

最节省能量，最清洁的办法就是用“太阳能电池”把白天多余的“太阳能”收集起来，存在“太阳能电池”里，晚上，当需要能量的时候，我们打开“太阳能电池”，就可以用这些能量为我们服务了，但，当这些能量用完了怎么办？好办，第二天，我们在太阳底下再充电，不就一起都解决了吗？这种能量是可再生，可循环利用的。ATP 就是我们祖先留给我们的“分子电池”，它通过不断地获得电子，储存了能量，在需要的时候，释放电子，同时释放能量，供机体细胞应用。ATP 分子的结构（图 1-3）是可以简写成 A-P~P~P，其中 A 代表腺苷，P 代表磷酸基团，~代表一种特殊的化学键，叫做高能磷酸键，高能磷酸键断裂时，大量的能量会释放出来。ATP 可以水解，这种水解就是指 ATP 分子中高能磷酸键的水解，ATP 的高能磷酸键水解时释放的能量多达 30.54kJ/mol，所以说 ATP 是细胞内的“分子电池”，人体中 ATP 的总量只有大约 0.1mol。人体细胞每日的能量需要水解 200~300mol 的 ATP，这意味着每个 ATP 分子每日要被重复利用 2000~3000 次。其实，ATP 在细胞内是不能被储存，ATP 的合成后必须在短时间内被消耗，因此，细胞线粒体通过三羧酸循环的电子传递链不断合成 ATP 才是最重要的，辅酶 Q₁₀ 就是电子传递链的重要物质。

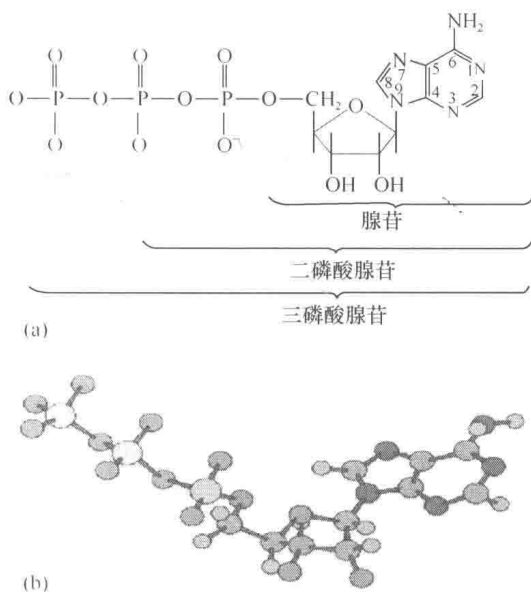


图 1-3 三磷酸腺苷 (ATP)