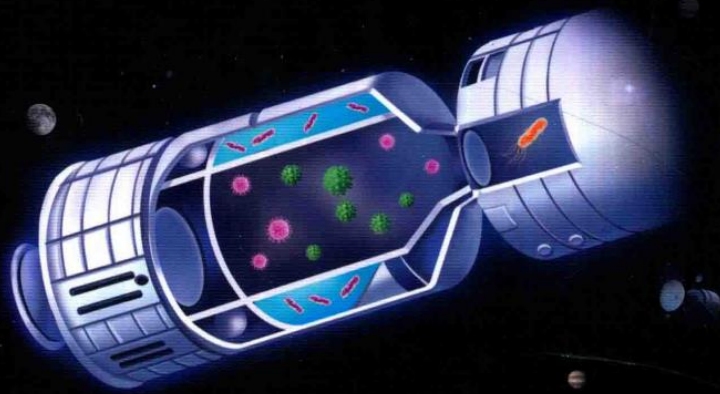




国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT


“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
航天医学与生命科学研究及应用丛书  
丛书主编：李莹辉



# 航天环境毒理学

SPACE ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY

何新星 编著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书重点阐述载人航天任务过程中特殊环境的毒理学问题、特点及规律,全书共分7章,第一章介绍了环境毒理学的历史由来、基本概念、相关实验方法和发展趋势;第二章介绍了航天环境毒理学的特点和规律,说明了航天环境毒理学的相关研究方向;第三章到第七章分别从空气毒理、再生水毒理、材料毒理、有害物理因素毒理以及微生物毒理等5个方面进行阐释,每一章从载人航天过程中有害因素的来源、生物学效应、相关容许标准、毒性评价原则与方法以及相关监测防护措施等方面进行叙述。同时对未来研究重点进行了探讨,力图相对完整地呈现航天环境毒理学的学科特点、当前研究结果和发展趋势。

本书适用于从事载人航天工程研制的相关工作人员、国内高校航空航天专业学生、相关研究机构工作人员及研究生等。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

航天环境毒理学 / 何新星编著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2021. 11

ISBN 978-7-5682-9938-1

I. ①航… II. ①何… III. ①航天环境-环境毒理学  
IV. ①V52②R994. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第124491号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 19.25

字 数 / 335千字

版 次 / 2021年11月第1版 2021年11月第1次印刷

定 价 / 114.00元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

## 前 言

从1961年4月12日，苏联航天员加加林首次进入太空开始，人类就从未曾停止过探索宇宙的步伐，2003年10月15日北京时间9时，杨利伟乘坐由长征二号F火箭运载的神舟五号飞船首次进入太空，象征着中国太空事业向前迈进了一大步。

脱离地球大气环境生活在太空中，给环境医学学科带来了全新的挑战，航天毒理学这一崭新的学科也随着人类探索宇宙的进程得以产生和发展，保障航天员太空生活的健康和高效工作成为这一学科的首要任务。从20世纪60年代开始，中国载人航天计划开始酝酿，1968年4月，航天医学工程研究所成立，老一辈科学家围绕中国载人航天计划开展了卓有成效的预先研究，中国航天环境医学研究随之起步，中国航天环境毒理学也随之诞生。

毒理学是一门古老的科学，它是研究外源因素（化学、物理、生物因素等）对生物体的毒性反应、作用机制及对抗措施等的应用学科，航天环境毒理学是航天环境医学的重要分支，也是古老毒理学科的新的分支，主要运用医学、生物学、化学、物理学、工程学等的原理及研究手段，研究人在太空飞行时，空气、水中的有毒有害物质以及飞行因素（失重、太空辐射等）对人体的生理功能的影响，寻找有效的防护及对抗措施，保证航天员的健康和安全，保障航天员高效工作。

本书作为国内第一部针对航天环境毒理进行独立阐述的书籍，力图比较全面地介绍国际载人航天环境毒理学的研究情况，重点对我国载人航天近三十年

的研究进展进行综述，并在传统的气体、液体、固体污染物毒性研究的基础上，考虑到广义的人体作用机理，增加了与载人航天密切相关的人工大气环境、空间辐射及微生物相关内容。

在编写过程中，编者力图把较新的研究成果展现出来，但人类在不断向着更高、更远、更长时间的航天飞行不断迈进，载人航天事业的飞速发展催生的新技术、新手段不断呈现，编者的学识水平和经验有限，缺点和错误不可避免，敬请读者朋友们斧正。

编著者

# 目 录

第一章 环境毒理学基础 .....	001
第一节 毒理学的起源与发展 .....	003
第二节 环境毒理学 .....	004
一、基本概念 .....	005
二、实验方法 .....	011
三、发展趋势 .....	012
参考文献 .....	013
第二章 航天环境毒理学特点 .....	015
第一节 航天环境因素的人体效应 .....	017
第二节 航天器舱内大气成分和压力 .....	019
第三节 航天器环境空气污染 .....	020
第四节 航天器用水安全 .....	022
第五节 舱内微生物安全 .....	023
第六节 空间辐射安全 .....	024
一、电离辐射 .....	024
二、非电离辐射 .....	025
参考文献 .....	026

<b>第三章 航天空气毒理</b> .....	027
<b>第一节 概述</b> .....	028
<b>第二节 大气成分和压力</b> .....	029
一、舱内大气成分和压力 .....	029
二、氧分压 .....	035
三、二氧化碳分压 .....	039
<b>第三节 航天器乘员舱污染物</b> .....	063
一、污染来源 .....	063
二、乘员舱内污染物的特征 .....	083
三、乘员舱化学污染物的健康影响 .....	086
四、与污染相关疾病的诊断 .....	101
五、乘员舱大气污染物最高容许浓度的制定 .....	105
六、乘员舱化学污染的监测 .....	127
七、乘员舱化学污染的控制与防护 .....	130
八、月尘 .....	140
<b>参考文献</b> .....	148
<b>第四章 航天再生水毒理</b> .....	151
<b>第一节 空间站水的需求</b> .....	152
一、总量需求 .....	152
二、水温控制 .....	154
<b>第二节 再生水</b> .....	154
<b>第三节 水质要求</b> .....	156
一、感官指标 .....	156
二、化学指标限值 .....	158
三、微生物限值 .....	171
<b>第四节 水质监测和评价</b> .....	173
一、飞行前材料和水容器评估和测试 .....	173
二、发射前水质检测和评价 .....	173
三、飞行过程水质监测 .....	173
四、飞行结束后对采样水质评价 .....	175
五、微生物监测和评价 .....	176
<b>第五节 再生水净化措施</b> .....	177

一、超滤 .....	177
二、吸收 .....	178
三、电化学方法 .....	178
四、反渗透 .....	178
五、蒸馏 .....	179
第六节 空间站再生水污染防治措施 .....	179
一、提出空间站再生水水质要求 .....	179
二、再生水污染源控制 .....	180
三、再生水净化措施 .....	180
四、水质的监测和评价 .....	180
五、其他措施 .....	181
参考文献 .....	181
<b>第五章 航天材料毒理 .....</b>	<b>183</b>
第一节 概述 .....	185
一、材料毒理学的基本概念 .....	185
二、开展材料毒理学研究的意义 .....	186
第二节 非金属材料的脱气与热解产物 .....	187
第三节 非金属材料脱气与热解产物的毒性作用 .....	191
一、非金属材料脱气与热解产物的毒效应分类 .....	191
二、影响材料脱出物毒性作用的因素 .....	191
第四节 航天材料脱出物的检测方法 .....	194
一、准备条件 .....	194
二、检测方法 .....	196
第五节 非金属材料的毒性评价 .....	201
一、航天非金属材料的毒性评价 .....	201
二、载人航天器舱用材料的相关筛选标准 .....	202
参考文献 .....	204
<b>第六章 航天有害物理因素毒理 .....</b>	<b>205</b>
第一节 电离辐射 .....	206
一、电离辐射的种类 .....	207
二、电离辐射来源 .....	208
三、电离辐射生物学效应 .....	215

四、电离辐射剂量限值 .....	227
五、辐射防护设计 .....	230
六、辐射监测 .....	234
七、空间站电离辐射防护设计建议 .....	239
第二节 非电离辐射 .....	240
一、非电离辐射的类型 .....	240
二、非电离辐射的来源 .....	241
三、人对非电离辐射的反应 .....	242
四、非电离辐射的暴露限值 .....	247
五、非电离辐射防护的设计 .....	257
六、空间站非电离辐射防护设计建议 .....	258
参考文献 .....	258
<b>第七章 航天微生物毒理</b> .....	<b>261</b>
第一节 载人航天器微生物污染 .....	263
一、美国航天器舱内微生物污染水平 .....	264
二、俄罗斯航天器舱内微生物污染水平 .....	264
三、国际空间站微生物污染 .....	265
第二节 微生物危害 .....	266
一、微生物生物学特性 .....	266
二、微生物的危害 .....	268
第三节 微生物检测 .....	270
第四节 微生物控制 .....	274
一、微生物控制标准 .....	274
二、微生物控制方法 .....	278
参考文献 .....	283
索引 .....	284

## 第一章

# 环境毒理学基础

环境毒理学是研究环境中各种有害因素对人体健康的影响及其作用机制的一门学科。随着工业化和城市化的快速发展，环境中的有害物质日益增多，对人类健康构成了严重威胁。因此，研究环境毒理学的基础理论和方法，对于预防和控制环境污染、保护人类健康具有重要意义。

环境毒理学的研究对象包括物理因素、化学因素和生物因素。物理因素如噪声、辐射等；化学因素如重金属、农药、有机溶剂等；生物因素如细菌、病毒、真菌等。这些因素通过不同的途径进入人体，对人体产生直接或间接的损害作用。

环境毒理学的研究方法包括流行病学调查、动物实验、体外实验和分子生物学技术等。流行病学调查可以揭示环境因素与疾病之间的关联；动物实验可以模拟人体暴露于环境因素后的反应；体外实验可以研究有害物质对细胞的毒性作用；分子生物学技术可以揭示有害物质对基因表达的调控作用。

环境毒理学的研究成果广泛应用于环境风险评估、职业卫生、食品安全和公共卫生等领域。通过了解有害物质的毒性作用机制，可以为制定环境标准、采取防护措施提供科学依据，从而减少环境污染对人类的危害。

毒理学是研究外源的物理、化学和生物等因素对生物体或生态系统的损伤作用、效应与机制，以及毒副作用的预防、诊断和后救治的科学。它主要应用生理学、生物学、生物化学、卫生学、药理学与病理学等基础学科理论和技术，通过动物实验、组织器官的离体实验、临床医学观察和流行病学调查等方法，研究外来物质在动物体内或生态系统中的吸收、分布、代谢和排出。本书主要关注对人体的毒理学影响，毒理学研究成果主要用于有害物质的安全性评价或危险性评价，为制定卫生健康标准提供科学依据。

毒理学目前已发展成为具有一定基础理论和实验手段的独立学科，并形成了新的毒理学分支：

从研究内容上可分为：描述毒理学、机制毒理学和管理毒理学三类。

从学科划分上可分为：法医毒理学、临床毒理学、法规毒理学、研究毒理学等。

从应用范围上可分为：食品毒理学、工业毒理学、农药毒理学、军事毒理学、环境毒理学和生态毒理学等。

从研究对象上可分为：动物毒理学、植物毒理学和人体毒理学等。

从研究领域上可分为：药物毒理学、食品毒理学、工业毒理学、环境毒理学、分析毒理学、管理毒理学等。

从研究的靶器官上可分为：眼毒理学、耳毒理学、肝脏毒理学、肾脏毒理学、神经毒理学、生殖毒理学、免疫毒理学等。

## | 第一节 毒理学的起源与发展 |

毒理学是一门古老而又年轻的学科。它的起源非常久远，伴随着人类的历史始终存在，在中国古代文献中就有对毒物和中毒的文献记载，但毒理学作为一门学科开展系统研究起始于 20 世纪初，它的历史远比数学、物理、化学等传统学科要年轻得多。

毒理学的发展历程可简要概括如下。

公元前 2735 年，神农氏的《神农本草经》中已记载了 365 种药用植物和 265 种毒药物以及一些毒物的相应解毒剂。

公元前 580 年，人们研究了金属对人体的毒性效应，提出了中毒的因果关系。

公元前 132—63 年，小亚细亚本都王国国王 Mithridates 是系统研究毒物对人体作用的第一人，被认为是临床毒理学的创始人。他的解毒法就是通过不断小剂量地接触，以提高人体对毒物的耐受能力。

1493—1541 年，Paracelsus 指出：所有物质都是毒物，没有绝对的非毒物，剂量决定一种物质是不是毒物，他还确立了剂量-反应关系这一重要的毒理学概念，被认为是毒理学发展史上的重要里程碑。

1633—1714 年，意大利医生 Ramazzini 研究了岩石工硅沉着病、陶器工坐骨神经痛病、镀金工眼炎和铅中毒，被视为职业中毒病的创始人。

1775 年，英国著名医生 Pott 研究了烟筒清扫工患阴囊癌的关系，揭示了多环芳香烃致癌作用的事实，由此提出将毒物作用于靶器官的概念，被认为是现代毒理学的开端。

19 世纪以后，有机化学的发展大大促进了现代毒理学的研究与发展。Magendie (1738—1855 年)、Orfila (1787—1853 年)、Bernard (1813—1878 年) 等人的工作被认为是真正开始了实验毒理学的创新研究工作，为药理学、治疗学、实验毒理学奠定了基础，Orfila 被视为现代毒理学的奠基人。

第二次世界大战时期，药品、军需品、合成纤维及化学工业的发展刺激了毒理学的研究。同时如化学、物理学、生物学、医学、药理学及统计学等基础学科的发展也使毒理学研究得到了快速发展。

19 世纪末药品的大量使用造成中毒事件的频发引起了美国的重视，1906 年美国通过了第一个《美国食品与药品法》。

20 世纪 20—40 年代, 有机氯农药的广泛使用、雌激素的合成与应用、抗生素的大规模生产与应用, 在产生预期效果的同时也显现出了一些危害作用, 毒理学研究进一步受到关注。1930 年《Archives of Toxicology》杂志的创刊, 以及在 20 世纪 40 年代对胆碱酯酶抑制剂的发现、有机磷中毒及解毒机制的研究、化学致癌作用的研究、对混合功能氧化酶及细胞色素 P-450 对毒物代谢转化作用的研究为毒理学研究写下了浓重的一笔。

20 世纪 70—80 年代, 分子生物学技术的迅速发展和在毒理学研究中的应用使毒理学研究步入分子水平。这一时期毒理学的重要出版物主要有 C. Klaassen 主编的 *Casarett & Doull's Toxicology* (1975)、Hayes 主编的 *Principles and Methods Toxicology* (1982), 包括 90 年代 Sipes 等主编的 *Comprehensive Toxicology* (1997), 这些毒理学著作至今已多次再版, 成为毒理学的经典著作。

20 世纪 80 年代至今是毒理学发展的鼎盛时期, 1981 年我国出版的《中国医学百科全书·毒理学》已有分子毒理学词条; 1989 年中华预防医学会成立了卫生毒理学及生化毒理学组; 1993 年中国毒理学会成立 (Chinese Society of Toxicology, CST), 随后成立了 18 个专业委员会。

毒理学最初是研究化学物质对生物机体的损害作用及其作用机理的科学。近些年来, 毒理学的研究领域已扩大到其他有害因素的毒性效应研究, 如放射性核素、微波等物理因素以及生物因素等, 不只限于化学物质。

## | 第二节 环境毒理学 |

环境毒理学是毒理学的一个重要分支, 它是运用医学及生物学技术, 利用毒理学方法研究环境中有害因素对人体健康的影响的学科。它的主要任务是研究环境污染物质对机体可能产生的生物学效应、作用机理以及预防方法等, 为制定环境卫生标准、做好环境保护工作提供科学理论依据。

环境污染对机体的作用具有下列特点:

- (1) 接触剂量通常较小;
- (2) 较长时间内反复接触甚至终生接触;
- (3) 多种环境污染物协同作用;
- (4) 接触的人群个体差异大, 从婴幼儿到老年人, 健康程度不一, 易感性差异大;
- (5) 接触环境不同, 既有居室环境、大气环境接触, 也有车间职业接触。

环境毒理学主要研究环境污染物在环境中的降解和转化，以及其在动植物体内的吸收、分布、结合、排泄等生物转运过程及代谢转化等，主要任务有以下四项：

- (1) 研究环境污染物在环境中的降解、转化及分布规律；
- (2) 定量分析人体吸收剂量；
- (3) 定量评定环境污染物对机体的影响，确定其剂量-效应关系，为制定环境卫生标准提供依据；
- (4) 研究环境污染物的预防及治疗措施。

环境毒理学与生态毒理学相辅相成，生态毒理学是随着环境问题的日益突出而产生的新兴学科，生态毒理学通常研究有害物质对生态系统的影响，解释自然界中人为污染物增加造成的生态风险，最终影响人类的生存环境。生态毒理学的研究成果用于支持环境政策、法律、标准和污染控制方法的制定。各国出台的环境管理方法中都运用了生态毒理技术，如化学品和排放物的安全性评价、污染物生物降解能力、生物技术产品的管理措施、污染防治技术的效果评估等领域都运用了生态毒理学的研究成果，如河流湖泊生物治理技术的安全性和效果评估以及废水排放生态风险评估等都是这方面的应用实例。

## 一、基本概念

环境毒理学的基本概念包括毒性、剂量、效应和反应、非损害作用与损害作用、生物转运、吸收、分布及排泄等。

### (一) 毒性

毒性是有毒物质进入机体引起有害生物学作用的相对能力。毒性高的物质只要相对较小的剂量或浓度就能对机体造成损害，而毒性低的物质需要较大的剂量或浓度才可能呈现毒性。物质毒性的高低是相对的，离开剂量谈毒性没有意义，在某种程度上，只要达到一定数量（阈值），任何物质对机体都具有毒性；如果控制在容许范围之内，则任何物质都不具备毒性。毒性除与物质和机体接触的数量有关外，还与物质本身的理化特性及其与机体接触的途径相关。

### (二) 剂量

剂量是决定外来化合物对机体损害作用的最重要因素，任何一种有毒物质的危害作用及毒性效应均与其剂量有密切关系。剂量的概念通常指与机体接触的外来化合物的量、吸收入机体的外来化合物量、外来化合物在靶器官作用部位或体液中的浓度。由于体内剂量测定比较困难，所以通常剂量的概念指机

体吸收外来化合物的浓度或数量。剂量单位通常以每单位体重接触的外来化合物的质量来表征, 例如  $\text{mg}/\text{kg}$  体重。

### 1. 致死量 (Lethal Dose)

致死量指可能造成机体死亡的剂量。但在某一群体中, 死亡个体数目的多少与个体差异有密切关系, 随年龄、性别、健康程度等的不同, 所需的剂量也不一致, 因此, 致死量又有下列不同概念:

(1) 绝对致死量 (LD100): 造成群体全部死亡的最低剂量。

(2) 半数致死量 (LD50): 引起某一群体 50% 死亡所需的剂量, 也称致死中量。LD50 数值越小, 表示外来化合物毒性越强; 反之, LD50 数值越大, 则毒性越低。

### 2. 最大无效用剂量 (Maximal No-Effect Level)

最大无效用剂量即指在一定时间内, 一种外来化合物按一定方式或途径与机体接触, 按照目前的科学水平, 用最灵敏的试验方法和观察指标未能观察到任何对机体的损害作用的最高剂量。

最大无作用剂量通常根据亚慢性毒性或慢性毒性试验的结果确定, 是评定外来化合物对机体损害作用的主要依据, 以此为基础可制定一种外来化合物的每日容许摄入量 (Acceptable Daily Intake, ADI) 和最大容许浓度 (Maximal Allowable Concentration, MAC)。ADI 指人类终生每日摄入该外来化合物不致引起任何损害作用的剂量, MAC 指某一外来化合物可以在环境中存在而不致对人体造成可见损害作用的浓度。

### 3. 最小有效用剂量 (Minimal Effect Level)

最小有效用剂量指在一定时间内, 一种外来化合物按一定方式或途径与机体接触, 机体的某项观察指标开始出现异常变化或使机体开始出现损害作用所需的最低剂量, 也可称为中毒阈剂量, 或中毒阈值。理论上, 最大无效用剂量和最小效用剂量应该相差不大, 但由于对损害作用的观察指标受此种指标观测方法灵敏度的限制, 故可能检不出细微的变化, 只有两种剂量的差别达到一定的程度, 才能明显地观察到损害作用程度的不同。所以最大无效用剂量与最小有效用剂量之间仍然有一定的差距, 通常按 10 倍差距进行换算。

当外来化合物与机体接触的时间、方式或途径和观察指标发生改变时, 最大无作用剂量和最小有效用剂量也将随之改变, 所以在表示一种外来化合物的最大无作用剂量和最小有效用剂量时, 必须说明试验动物的物种品系、接触方式或途径、接触持续时间和观察指标。

### (三) 效应和反应

效应表示一定剂量外来化合物与机体接触后可引起的生物学变化。此种变化的程度用计量单位来表示,例如若干个、毫克、单位等。

反应是一定剂量的外来化合物与机体接触后,呈现某种效应并达到一定程度的比率,或者产生效应的个体数在某一群体中所占的比率,一般以%或比值表示。

剂量与效应关系或剂量与反应关系是毒理学的重要概念,剂量效应和剂量反应关系可以用曲线表示,即以表示效应强度的计量单位或表示反应的百分率或比值为纵坐标,以剂量为横坐标,绘制散点图,可得出一条曲线。不同外来化合物在不同具体条件下所引起的效应或反应类型不同,主要是效应或反应与剂量的相关关系不一致,可呈现不同类型的曲线。在一般情况下,剂量效应或剂量反应曲线有以下几种类型:

(1) 直线型:剂量与效应或反应强度呈直线关系;随着剂量的增加,效应或反应的强度也随着增加,成正比关系。通常这种关系并非在所有剂量水平都呈线性,随剂量大小可能有一定的波动,通常在中等剂量范围内才呈现线性关系。

(2) 抛物线型:剂量与效应或反应呈非线性关系,即随着剂量的增加,效应或反应的强度也增加,但最初增高急速,然后变为缓慢。

(3) S形曲线型:当剂量开始增加时,反应不明显,剂量继续增加至某一范围,反应明显增大,但当剂量再增加时,反应又不明显,呈S形反应曲线。该曲线在50%反应率的斜率最大,即反应变化最为明显,因此常用引起50%反应率的剂量来表示化合物的毒性大小,如半数致死剂量(LD<sub>50</sub>)。大多数毒物的剂量反应关系均属于此种类型。

(4) 突变型:即剂量增加时反应并不随之加剧,直到剂量达到一定程度时,突然出现明显反应。某些化合物剂量再增加时该反应消失并出现另外一种反应。如某些致畸物的作用即属于此种类型,剂量增加到一定范围时致畸率突然增加,超过此范围则引起胚胎死亡。

### (四) 非损害作用与损害作用

#### 1. 非损害作用

一般认为非损害作用不引起机体功能形态、生长发育和寿命的改变,不引起机体某种功能容量的降低,也不引起机体对额外应激状态代偿能力的损伤。机体发生的变化在机体代偿能力范围之内,当机体停止接触该种外毒化合物

后, 机体维持正常运转的能力不会有所降低, 机体对其他外界有害因素的易感性也不应增高。

## 2. 损害作用

损害作用与非损害作用相反, 具有下列特点:

- (1) 机体的正常形态、生长发育过程受到影响, 寿命亦将缩短;
- (2) 机体功能容量或应激状态代偿能力降低;
- (3) 机体维持稳定的能力下降;
- (4) 机体对其他外界有害因素的易感性增高。

## (五) 生物转运

外来化合物在机体的吸收、分布和代谢过程, 统称为生物转运。外来化合物在体内的生物转运主要通过下列机理。

### 1. 简单扩散

外来化合物在生物体内的扩散是依其浓度梯度差决定物质的扩散方向的, 即由生物膜的化合物浓度较高的一侧向浓度较低的一侧扩散, 当两侧达到动态平衡时, 扩散中止。简单扩散过程中不需要消耗能量, 外来化合物与膜通常不发生化学反应, 是物理过程, 故称为简单扩散。简单扩散是外来化合物在生物体内转运的主要方式, 一般情况下大部分外来化合物通过简单扩散进行生物转运。除浓度梯度差影响简单扩散外, 还有温度、压力等因素也会对简单扩散过程产生影响。

### 2. 滤过

滤过是外来化合物透过生物膜上亲水性孔道的过程。水可以借助渗透压梯度和液体静压作用通过孔道进入细胞, 外来化合物以水作为载体, 随之被动转运。

### 3. 主动转运

外来化合物透过生物膜由低浓度处向高浓度处移动的过程称为主动转运。其主要特点如下:

(1) 可逆的浓度梯度转运需要消耗代谢能量。

(2) 转运过程需要载体参加。载体通常是生物膜上的蛋白质, 载体与被转运的外来化合物形成复合物而转运至膜的另一侧, 释放外来化合物后, 载体又回到原处, 并继续进行第二次转运。

(3) 载体是生物膜的组成成分, 具有一定容量, 当化合物浓度高到载体饱和时, 转运达到极限。

(4) 主动转运有选择性。特定结构的化合物才能被转运。

(5) 主动转运有竞争性。如果两种化合物基本结构相似,且使用同一转运系统,则两种化合物之间可能产生竞争抑制。

#### 4. 胞饮和吞噬

液体或固体外来化合物被生物膜包围,然后将被包围的液滴或较大颗粒并入细胞内,达到转运的目的,前者称为胞饮,后者称为吞噬。机体内外来异物的消除,例如白细胞吞噬微生物、肝脏网状内皮细胞对有毒异物的消除与此有关。

### (六) 吸收

吸收是外来化合物经过各种途径透过机体的生物膜进入血液循环的过程。吸收的途径主要分为以下几种。

#### 1. 经胃肠道吸收

胃肠道是外来化合物最主要的吸收途径。许多外来化合物可随同食物或饮水进入消化道并在胃肠道中被吸收。一般外来化合物在胃肠道中的吸收主要是通过简单扩散。外来化合物在胃肠道的主要吸收部位在小肠。

#### 2. 经呼吸道吸收

肺泡上皮细胞层极薄且血管密布,吸收最快的是气体、小颗粒气溶胶和脂水分配系数较高的物质。呼吸道中的吸收主要是简单扩散,即利用肺泡气与血浆的浓度差进行吸收。一种气体在肺泡气中的浓度,可用其在肺泡中的分压表示,随着吸收过程的进行,血液中该气体的分压将逐渐增高,分压差则相应降低,该气体在血液中的分压将逐渐接近在肺泡气的分压,最后达到平衡,呈饱和状态。在饱和状态时,气体在血液中的浓度( $\text{mg/L}$ )与在肺泡气中的浓度( $\text{mg/L}$ )之比,称为血/气分配系数,即气体在血液中的浓度与气体在肺泡中的浓度比值。血/气分配系数越大,溶解度越高,表示该气体越易被吸收。

气体在呼吸道内的吸收速度与其溶解度和分子量有关。在一般情况下,吸收速度与溶解度成正比。非脂溶性的物质被吸收时通过亲水性孔道,其吸收速度主要受分子量大小的影响:分子量大的物质,相对吸收较慢,反之亦然。溶于生物膜脂质的物质,吸收速度与分子量大小关系不大,而主要决定于其脂/水分配系数,脂/水分配系数大者吸收速度相对较高。

影响化学物质经呼吸道吸收的因素还有肺泡通气量和血流量。

#### 3. 经皮肤吸收

外来化合物经皮肤吸收,一般可分为两个阶段:第一阶段是外来化合物透过皮肤表皮,即角质层的过程,为穿透阶段;第二阶段即由角质层进入乳头层和真皮,并被吸入血液,为吸收阶段。

经皮肤吸收的主要机理是简单扩散,扩散速度与很多因素有关。