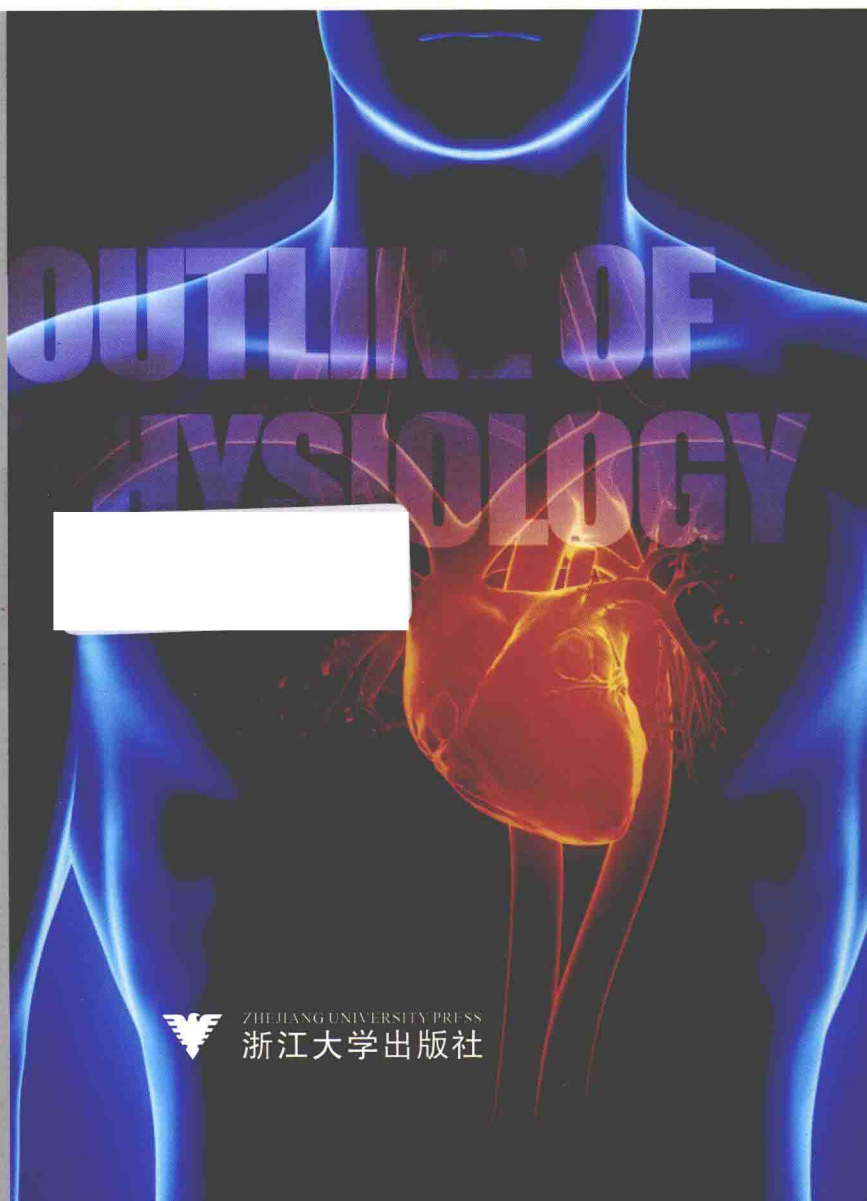


马青 张俊芳 主编

生理学纲要



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

生理学纲要

马 青 张俊芳 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

生理学纲要 / 马青, 张俊芳主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-308-13117-9

I. ①生… II. ①马… ②张… III. ①人体生理学—医学院校—教材 IV. ①R33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 076331 号

生理学纲要

马 青 张俊芳 主编



责任编辑 张凌静(zlj@zju.edu.cn)

封面设计 十木米

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 浙江省良渚印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.5

字 数 280 千

版 印 次 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-13117-9

定 价 25.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

编 委 会

主 编 马 青 张俊芳

副主编 杨利敏 孟德欣 张冬梅 王 悦

编 委 (按姓氏笔画排序)

王钦文 汤治元 陈晓薇 徐淑君 魏晓菲

前 言

“生理学”是医学教学的骨干课程,是介绍人体正常生理功能的基础课程。目前,“生理学”课程普遍采用现代化的多媒体教学方式,其优点为信息量大、图文并茂,在学时少、内容多的情况下,充分发挥了提高课堂教学质量的作用。与此同时,课后学生需要一本配合多媒体课堂教学的精编纲要教材,以便及时复习和掌握课堂教学内容。

本教材以表格化、条理化、框图化的表现方式,归纳了生理学的概念、原理和内容;简洁精练地提纯了“生理学”的教学内容,方便记忆;为配合现代多媒体教学,帮助复习和掌握生理学内容,为学生进入后续课程的学习打下坚实的基础。

本教材依据作者群多年的教学经验,并参考国内外多部生理学教材,借助简洁的表格、明朗的框图,清晰、简明地概括了生理学内容,欲达到内容精练、要点明确、易懂易记、减轻学生负担、培养学生的归纳能力、提高生理学教学质量之目的。本教材可作为高等学校生理学教师或医学生的参考书,也可作为研究生入学考试、执业医师考试、各种医学函授考试的复习用书,更可作为教师的讲稿。

由于作者水平有限,书中必定存在许多问题和错误,恳切希望读者给予批评指正,以便再版时修正。

马 青 张俊芳

2014年3月

目 录

第一章 绪 论.....	1
第二章 细胞生理.....	7
第三章 血液生理	23
第四章 循环生理	38
第五章 呼吸生理	64
第六章 消化生理	78
第七章 能量代谢和体温	91
第八章 肾脏生理	97
第九章 感官生理.....	111
第十章 神经生理.....	120
第十一章 内分泌生理.....	151
第十二章 生殖生理.....	169

第一章

绪 论

【大纲要求】

1. 掌握内环境与稳态,生理功能的自控原理和反馈调节(负反馈、正反馈、前馈)。
2. 熟悉人体生理功能调节(神经调节、体液调节、自身调节)。
3. 了解生理学的研究内容、研究方法,生理学与医学的关系。

【纲要内容】

一、生理学

(一)概念

生理学是研究机体生命活动现象和功能的学科。

(二)研究内容

生理学主要研究机体的循环、神经、呼吸、泌尿、消化、感官、内分泌、生殖等系统的生理功能。

(三)研究任务

研究机体的生理作用、生理机制、产生条件和影响因素等。

(四)研究对象

机体生理功能活动规律。

(五)研究水平

其研究细胞、分子水平,器官和系统水平,整体水平等相关学科、定义及例子等见表 1-1。

表 1-1 生理学的研究水平

研究水平	细胞、分子水平	器官和系统水平	整体水平
简 称	细胞生理学或普通生理学	器官生理学	整体生理学
定 义	研究细胞和生物大分子的物化特性和生理特性及其产生机制的学科	阐明器官和系统的功能、影响因素及其调节机制,以及器官在整个机体中的作用	研究整个机体的各器官、各系统的相互联系与功能调节机制的学科
举 例	细胞静息电位和动作电位 细胞膜通道离子电流 EPO 对 Hb 的调节	巴甫洛夫小胃 心脏灌流实验 心血管调节实验	高原生理、潜水生理 运动生理、航天生理

(六) 研究方法

主要采用实验观察与实验研究进行研究(见图 1-1)。



图 1-1 研究方法

(七) 发展简史

1628 年 Harvey 撰写《心与血的运动》，标志着生理学成为独立的学科。

1926 年林可胜创立中国生理学会，创办《中国生理学杂志》。

(八) 生理学与医学的关系

生理学是一门重要的医学基础课程。

二、体液和内环境

(一) 体液

机体内液体的总称为体液，约占体重的 60%(见图 1-2)。

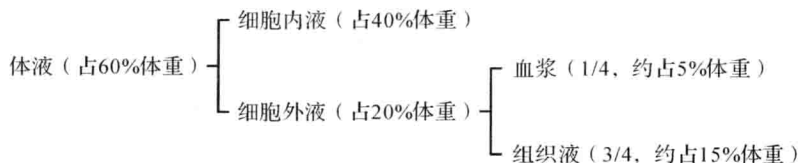


图 1-2 体液的组成

(二) 内环境

1. 概念:细胞直接生存的环境即细胞外液称为内环境。

2. 作用:①为细胞提供必要的理化条件;②为细胞提供营养物质;③接受细胞代谢产物。

3. 特征——内环境稳态。

(1)概念:内环境的化学组成、理化特性处于相对稳定和动态平衡状态,如血浆 $\text{pH} = 7.35 \sim 7.45$;血钾浓度 $= 3.5 \sim 5.5 \text{ mmol/L}$;血钙浓度 $= 2.25 \sim 2.75 \text{ mmol/L}$ 。

(2)应用:血浆代用液,如任氏液用于两栖类动物,乐氏液用于哺乳动物。

(3)维持和调节稳态的途径:神经调节、体液调节、自身调节。

(4)稳态的拓展:正常生命活动是稳态的表现。如形态、代谢、功能、免疫等处于相对恒定和动态平衡状态。

(5)稳态的生理意义:保证和维持机体正常的新陈代谢;保证细胞兴奋性的存在;保证机体正常代谢的进行,如糖代谢、脂肪代谢、蛋白质代谢、酸碱代谢、水盐代谢、胆色素代谢、维生素代谢等,机体正常生理功能和免疫功能的完成。当机体超出正常的稳态范围时,就属于

疾病状态。

三、生理功能的调节

(一)神经调节

1. 概念:由神经反射参与的调节称为神经调节。
2. 基本方式——反射。

(1)概念:反射是在中枢神经系统参与下,机体对刺激发生的规律性反应。

(2)结构基础——反射弧:感受器→传入神经→神经中枢→传出神经→效应器。

(3)分类:据反射形成条件和反射弧特点进行分类(见表 1-2)。

表 1-2 神经反射的分类

比较项	非条件反射	条件反射
形成时间	先天遗传,生来既有	后天获得,非遗传性,学而得之
属性	种族共有	个体特有
反射弧	固定的反射弧	暂时性联系
数量	数量有限	数量无限
可变性或可塑性	呆板,不易改变	可塑性大,有易变性
预见性	无	有
刺激与反应的关系	有因果关系	无因果关系
参与的中枢	低位中枢(皮层下中枢)	高位中枢(大脑皮层中枢)+各级中枢
神经活动	初级神经活动	高级神经活动
生理意义	使机体具有基本的适应能力,维持个体生存与种族延续	随环境变化不断形成新的反射;更高度精确地适应内外环境变化
两者关系	是形成条件反射的基础	能控制非条件反射活动
举 例	山楂放嘴里流口水	见山楂流口水

3. 特点:神经调节是机体功能调节的主要方式,起主导作用,其反应迅速、作用部位准确、持续时间短暂、作用范围局限。

(二)体液调节

1. 概念:化学物质(激素、细胞因子)通过体液途径对生理功能的调节。
2. 方式(见表 1-3):

表 1-3 体液调节的方式

方式	定义与举例
远距分泌	定义:内分泌细胞→激素→血液循环→靶细胞 例:胰岛 B 细胞→胰岛素→血液循环→靶细胞(肝脏、骨骼肌)→血糖降低
旁分泌	定义:化学物质(激素)经过组织液扩散作用于相邻靶细胞的体液调节 例:细胞→化学物质(组胺、激肽、前列腺素)→血管平滑肌→局部血流调节

续表

方式	定义与举例
神经分泌	定义:神经细胞分泌激素经过轴浆运输贮存在神经垂体→释放入血液→靶细胞 例:下丘脑神经细胞→抗利尿激素(ADH)→贮存神经垂体→血液循环→靶细胞
神经—体液调节	定义:传出神经→内分泌腺→激素→血液循环→靶细胞 例:交感神经兴奋→肾上腺髓质→Adr、NE→血液循环→靶细胞 寒冷→皮肤→中枢→下丘脑→TRH→腺垂体→TSH→甲状腺→ T_3, T_4 →产热

3. 特点:反应缓慢、作用部位弥散、持续时间持久、作用范围广泛。

4. 神经调节与体液调节的区别(见表 1-4):

表 1-4 神经调节与体液调节的区别

比较项	神经调节	体液调节
信息	有	有
传递方式	神经冲动沿神经元传导,递质越过突触间隙	经血液运输
发挥作用速度	迅速	缓慢
作用维持时间	短暂(记忆储存除外)	持久
作用范围与精度	局限、精确	广泛弥散、不是很精确
作用距离	短	长
作用的灵敏性	灵活	不灵活
其他	有预见性;人类还有语言、文字,扩大感觉范围	自我稳定较明显

(三)自身调节

1. 概念:机体不依靠神经或体液调节,由组织细胞本身产生的适应性反应。

2. 举例:心肌异长调节(Starling 机制)、心肌等长调节、脑血流量调节、肾血流量调节、球—管平衡、渗透性利尿、Wolf-Chaikoff 效应。

3. 特点:①涉及范围小;②调节幅度小;③调节不灵敏。

四、生理功能的自动控制原理

(一)原理模式图(见图 1-3)

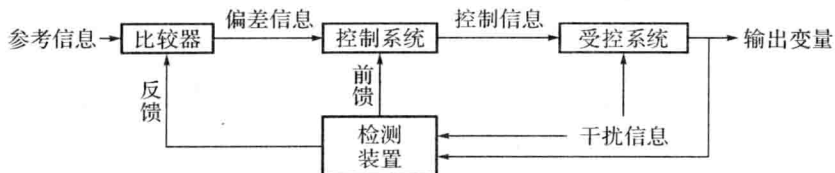


图 1-3 生理功能的自动控制原理模式

(二)类型(调节方式)

1. 负反馈。

(1)概念:反馈信息与控制信息作用相反的反馈,即反馈信息对控制系统的制约作用,确

保机体功能活动相对稳定。

(2)关系式:偏差信息(Se)=参考信息(Si)-反馈信息(Sf) [Sf 为负值, Se 减小]。

(3)举例:体温调节、减压反射、肺牵张反射、血糖调节、血钙调节、血压调节。

(4)特点:①可逆性;②敏感性;③滞后效应;④波动性。

2. 正反馈。

(1)概念:反馈信息与控制信息作用相同的反馈,即反馈信息对控制系统的促进作用,加速机体生理过程的迅速完成或达到极限。

(2)关系式:偏差信息(Se)=参考信息(Si)+反馈信息(Sf) [Sf 为正值, Se 增加]。

(3)举例:分娩、血凝、排便反射、排尿反射、射精、动作电位去极相、胆盐的肠肝循环、月经周期 LH 峰、胃蛋白酶原的激活、心室肌动作电位 3 期 K^+ 外流、恶性循环。

(4)特点:①不可逆的再生性状态;②偏态性。

(5)负反馈与正反馈的比较(见表 1-5)。

表 1-5 负反馈与正反馈的比较

比较项	负反馈	正反馈
反馈信息方向	与控制信息相反	与控制信息相同
对控制系统的作用	制约、抑制、减弱其活动	再生、促进、加强其活动
调节作用方向	双向可逆	单向不可逆
作用效果	偏差信息↓,控制信息↓,输出变量↓	偏差信息↑,控制信息↑,输出变量↑
输出与输入关系	输出制约输入	输出强化输入

3. 前馈。

(1)概念:反馈信息直接作用于控制系统对控制信息的调节称为前馈。

(2)举例:①看见食物引起唾液分泌;②进食引起胰岛素分泌增加;③条件反射等。

(3)特点:①预见性;②适应性。

(4)负反馈与前馈的比较(见表 1-6)。

表 1-6 负反馈与前馈的比较

比较项	负反馈	前 馈
作用	维持稳态	维持稳态
速度	慢	快
偏差	必然出现偏差	较少出现偏差
波动性	有,在恢复过程中逐步趋向稳定	无,迅速稳定
滞后性	存在滞后性,不能预先监测干扰,仅在受干扰后逐渐恢复稳态	无滞后性,能预先监测干扰,防止干扰的扰乱及时做出适应性反应

【概念】

1. 生理学(physiology);

2. 体液(body fluid);

3. 内环境(internal environment);
4. 稳态(homeostasis);
5. 神经调节(nervous regulation);
6. 反射(reflex);
7. 体液调节(humoral regulation);
8. 神经—体液调节(nervous-humoral regulation);
9. 旁分泌(paracrine);
10. 自身调节(auto regulation);
11. 负反馈(negative feedback);
12. 正反馈(positive feedback);
13. 前馈(feed-forward);
14. 习服(acclimatization)。

【思考题】

1. 人体生理功能活动的主要调节方式有哪些? 各有何特征? (试比较神经调节、体液调节和自身调节的作用特点。)
2. 何谓神经调节? 简述它的结构基础和特点, 并比较非条件反射与条件反射的区别。
3. 什么是体液调节? 简述经典体液调节(内分泌调节)、神经—体液调节和局部体液调节的作用途径。
4. 何谓内环境和稳态? 内环境稳态有何生理意义?
5. 简述人体机能活动的自动控制原理。
6. 何谓正反馈和负反馈? 列举5项以上属于正反馈和负反馈调节的生理过程。
7. 试比较下列生理活动的区别: ①条件反射与非条件反射; ②神经调节与体液调节; ③负反馈与正反馈; ④负反馈与前馈。

【本章总括】

生理学: 概念/研究内容/研究任务/研究对象/研究水平/研究方法/发展简史

体液: 概念/体液分布

内环境: 概念/作用/特征(稳态: 概念/应用/调节/生理意义)

生理功能的调节	—	神经性调节: 概念/特点/基本方式(反射: 概念/反射弧/条件反射与非条件反射)
		体液调节: 概念/特点/方式(内分泌调节/神经—体液调节/旁分泌调节/神经分泌调节)
		自身调节: 概念/实例/特点

生理功能的自动控制原理: 模式图/负反馈/正反馈/前馈

第二章

细胞生理

【大纲要求】

1. 掌握细胞膜的物质转运、细胞信息传递、细胞电生理、细胞兴奋性。
2. 熟悉神经—肌接头兴奋传递过程、骨骼肌收缩原理、肌肉收缩的形式和影响因素。
3. 了解细胞膜的基本结构和化学组成。

【纲要内容】

一、细胞膜结构和化学组成

(一) 结构

1. 电镜下细胞膜形态结构:致密带—透明带—致密带。
2. 细胞膜分子结构:细胞膜以液态的脂质双分子为基架,其中镶嵌着不同结构和功能的蛋白质称为液态镶嵌模型。

(二) 化学组成(见表 2-1)

表 2-1 细胞膜的化学组成

组成	组成/成分	功能	特性
脂质	磷脂、胆固醇、糖脂	屏障作用	分极性;流动性;横向运动;稳定性
蛋白质	通道	转运 $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$	特异性;全或无开放;不同功能状态
	载体	转运葡萄糖、氨基酸	结构特异性;饱和性;相对竞争抑制
	离子泵	转运离子	消耗能量;结构特异性;饱和现象
	受体	辨认和接受化学物质	结构特异性;饱和性;结合可逆性
	抗原	免疫标志物	
	膜内酶	效应器酶作用	举例:AC、GC、PLC
糖类	功能:抗原决定簇,起免疫标记作用;膜受体的识别部分		

二、细胞膜的物质转运

细胞膜的物质转运如图 2-1 所示。

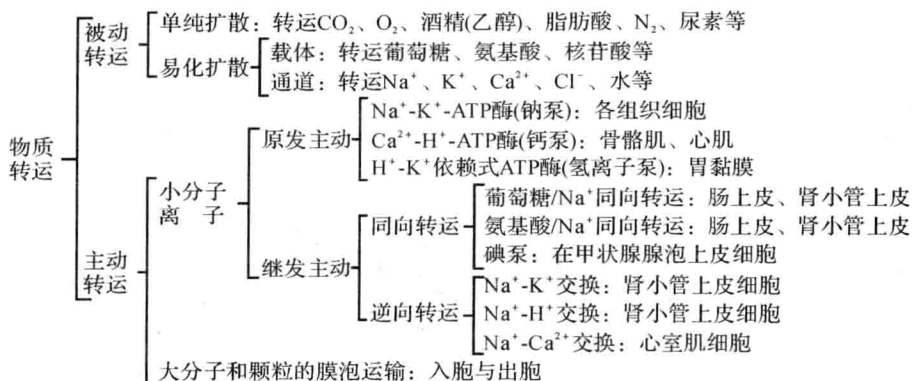


图 2-1 细胞膜的物质转运

(一) 单纯扩散

1. 定义: 脂溶性小分子物质由细胞膜的高浓度向低浓度的净移动过程称为单纯扩散。
2. 衡量指标: 扩散通量(J)。
- (1) 定义式: 扩散通量 = (1/扩散面积) × 浓度梯度。
- (2) 关系式: 扩散通量 = 通透性 × 浓度梯度。
- (3) 通透性: 物质通过细胞膜的难易程度。
- (4) 结论: 扩散通量与浓度梯度呈线性关系。
3. 依靠单纯扩散的物质: CO₂、O₂、N₂、类固醇激素、乙醇、脂肪酸、尿素等。
4. 特点: ①顺浓度梯度(不耗能); ②无饱和现象; ③无结构特异性。

(二) 易化扩散

1. 定义: 水溶性小分子或离子借助载体或通道由细胞膜的高浓度向低浓度的扩散过程称为易化扩散。
2. 特点: ①顺浓度梯度(不耗能); ②膜蛋白质为中介物; ③具有选择性; ④扩散通量主要受膜外因素调控。
3. 类型。
- (1) 载体。
- 1) 定义: 能与被转运物结合的细胞膜蛋白质称为载体。
- 2) 特征: ①结构特异性; ②饱和性; ③相对竞争抑制。
- 3) 依靠载体转运的物质: 葡萄糖、氨基酸。
- (2) 通道。
- 1) 定义: Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Cl⁻等离子由高浓度向低浓度跨膜快速移动的膜蛋白。
- 2) 种类(见表 2-2)。
- 3) 特征: ①离子选择性; ②门控特性; ③全或无式开放; ④不同功能状态: 静息 → 激活 → 失活 → 静息。
- 4) 调控(见表 2-3)。

表 2-2 钠、钾、钙通道

通道	通道结构与功能的关系	阻断剂
Na ⁺ 通道	S4:通道电压感受器,与通道激活有关 S5~S6 胞外环:决定离子选择性和通透性	河豚毒(TTX)
K ⁺ 通道	S4:通道电压感受器,与通道激活有关 S5~S6 胞外环:决定离子选择性和通透性	四乙基铵、4-氨基吡啶
Ca ²⁺ 通道		异搏定(维拉帕米 verapamil)

表 2-3 通道的调控

通道 比较项	化学门控信道	电位门控通道	机械门控通道
定义	化学信息决定开关的通道	膜电位决定开关的通道	机械刺激决定开关的通道
分布	胞—树突触后膜 视网膜感光细胞 终板膜(N 型 ACh 通道)	神经细胞 肌肉细胞 腺体细胞	内耳基底膜毛细胞
开放结果	局部膜电位	动作电位	感受器电位
举例	ACh、谷氨酸、门冬氨酸、 γ -氨基丁酸、甘氨酸等化学门控通道	电压门控 Na ⁺ 通道 电压门控 K ⁺ 通道 电压门控 Ca ²⁺ 通道	机械门控 K ⁺ 通道

5)意义:理解细胞生物电和兴奋性的基础。

4. 通道与载体的区别(见表 2-4)。

表 2-4 通道与载体的区别

比较项	通道	载体
特征	具有结构特异性,但比载体低; 具有开放和关闭两种状态; 无饱和现象	结构特异性; 竞争性抑制; 饱和现象
举例	Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Cl ⁻ 快速移动	葡萄糖和氨基酸

5. 易化扩散与单纯扩散的区别(见表 2-5)。

表 2-5 易化扩散与单纯扩散的区别

比较项	单纯扩散	易化扩散
转运率	慢	快
饱和现象	无饱和现象	有饱和现象
特异性	无特异性	有特异性
以膜蛋白为中介	不需要	需要
顺浓度梯度/顺电位梯度	是	是
耗能情况	不耗能	不耗能

(三)主动转运

1. 定义:细胞通过泵蛋白的自身耗能,将分子或离子由低浓度向高浓度移动的过程。

2. 特征:①逆电—化学梯度(耗能);②结构特异性;③饱和现象。

3. 类型:分为原发性主动转运和继发性主动转运。

(1)原发性主动转运:细胞直接利用 ATP 将物质逆浓度梯度和电位梯度的跨膜转运,包括钠钾泵、钙泵、质子泵等。

(2)继发性主动转运:利用原发性钠泵建立的 Na^+ 势能储备进行的第二次物质跨膜的主动转运。例如,①小肠上皮对葡萄糖的转运过程:在管腔膜侧[葡萄糖(逆浓度)+ Na^+ (顺浓度)]共用载体→进入上皮细胞→在基底膜侧[葡萄糖(载体)+ Na^+ 泵]→进入血液。② Na^+ - Ca^{2+} 交换体:3 个 Na^+ 进入细胞内,1 个 Ca^{2+} 排出细胞外的膜蛋白。

4. 钠泵。

(1)定义:具有 ATP 酶活性的主动转运钠—钾离子的膜蛋白称为钠泵。

(2)化学本质: Na^+ - K^+ 依赖性 ATP 酶。

(3)分子结构与功能的关系(见表 2-6)。

表 2-6 钠泵的分子结构与功能的关系

亚单位	跨膜次数	钠泵分子二级结构	功 能
α 亚单位	10 次	H1~H2 胞外环	哇巴因(ouabain)结合位点
		H3~H4 胞外环	K^+ 结合位点
		H5~H6 胞外环	K^+ 结合位点
		H4~H5 胞内环	ATP 结合位点,ATP 酶磷酸化位点
		H6~H7 胞内环	Na^+ 结合位点
		H8~H9 胞内环	Na^+ 结合位点

(4)转运机制:细胞消耗一个 ATP 分子,3 个 Na^+ 泵出细胞外,2 个 K^+ 泵入细胞内。

(5)运转结果:造成超极化。消耗一个 ATP 分子,胞外净增一个正电荷称为生电性钠泵。

(6)特征:方向性(定向性)。

(7)调控或影响因素:当胞内钠 $\uparrow$ 、血钠 $\downarrow$ 、血钾 $\uparrow$ 时,引起 Na^+ 的外向流量 $\uparrow$ 和 K^+ 的内向流量 $\uparrow$ 。

(8)启动钠泵的最敏感因素:细胞内 Na^+ $\uparrow$ 。

(9)生理作用 and 意义:

1)保证细胞内外 Na^+ 、 K^+ 不均匀分布,有利于细胞生物电的形成。

2)提供细胞外高钠,建立 Na^+ 势能储备,为继发性主动转运葡萄糖和氨基酸作准备。

3)细胞内高钾,为胞内生化的反应提供必要条件,也是产生静息电位的前提条件。

4)把细胞外 K^+ 及时泵入细胞内,防止高血钾。

5)维持细胞质渗透压和细胞容积相对稳定,防止细胞水肿。

6)为 Na^+ - Ca^{2+} 交换提供动力,维持细胞内 Ca^{2+} 浓度稳定发挥作用。

7)为 Na^+ - H^+ 交换提供动力,维持细胞内 pH 稳定发挥重要作用。

(10) 钠泵阻断剂: 哇巴因。

(四) 膜泡运输: 出胞和入胞

1. 出胞。

(1) 定义: 大分子物质(激素、酶原、神经递质)以分泌囊泡方式排出细胞外的过程。

(2) 过程: ①内质网合成; ②高尔基复合体输送; ③囊胞形成; ④囊胞外排。

(3) 调控因素: ①膜电位; ②化学信号, Ca^{2+} 内流、激素。

2. 入胞。

(1) 定义: 物质团块或大分子物质(某些血浆蛋白、抗原、细菌、病毒等)进入细胞。

(2) 过程: ①辨认; ②异物小胞形成; ③与溶酶体结合; ④被水解酶消化、分解。

三、细胞的信息传导功能

(一) 概述

1. 跨膜信号转导: 生物活性物质(激素、神经递质和细胞因子)通过受体或离子通道的作用, 激活或抑制细胞功能的过程。

2. 受体。

(1) 定义: 细胞特异地接受化学物质(激素、递质、药物)的蛋白质称为受体。

(2) 类型。

1) 依据受体所在部位分成: 膜受体、胞质受体、核受体。

2) 依据受体作用分成: 离子通道型受体、G 蛋白耦联受体、酶联型受体、招募型受体。

(3) 本质: 蛋白质或酶。

(4) 特点: ①结构特异性; ②饱和性; ③结合可逆性。

(5) 激动剂: 与受体结合后, 引起特定生物效应的物质称为受体激动剂。

(6) 阻断剂: 与受体结合后, 不引起或减少生物效应的物质称为受体阻断剂。

3. 配体: 凡能与受体发生特异性结合的活性物质。

(二) G 蛋白耦联受体介导途径(见表 2-7)

表 2-7 G 蛋白耦联受体介导途径

AC-cAMP-PKA 途径	PLC-DG-PKC/PLC-IP ₃ -Ca ²⁺ 途径
激素(H)+G 蛋白耦联受体 ↓ G 蛋白 ↓ 腺苷酸环化酶(AC) Mg^{2+} ↓ $\text{ATP} \longrightarrow \text{cAMP(环一磷酸腺苷)}$ ↓ 蛋白激酶 A(PKA) ↓ 蛋白质磷酸化 ↓ 生物效应	激素(H)+G 蛋白耦联受体 ↓ G 蛋白 ↓ 磷脂酶 C(PLC) ↓ $\text{磷脂酰二磷酸肌醇(PIP}_2\text{)} \longrightarrow \text{三磷酸肌醇(IP}_3\text{)}$ ↓ 二酰甘油(DG) 胞内 Ca^{2+} ↑ ↓ 蛋白激酶 C(PKC) 钙调蛋白(CaM) ↓ 生物效应 ← 蛋白质磷酸化 ← Ca^{2+} -CaM 蛋白激酶(Ca-MAPK)