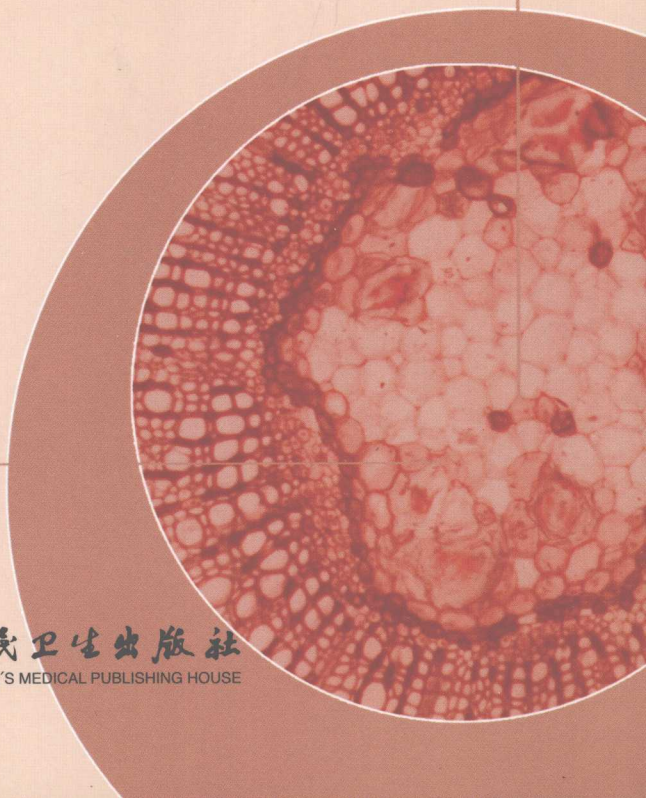


# 酸碱平衡和 酸碱平衡紊乱

编者 张家骧 史延芳



人民卫生出版社  
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE



# 酸碱平衡和酸碱平衡紊乱

编者 张家骧 史延芳



R589.6  
ZJX

人民卫生出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

酸碱平衡和酸碱平衡紊乱/张家骧等编. —北京:  
人民卫生出版社, 2008. 8

ISBN 978 - 7 - 117 - 10324 - 4

I. 酸… II. 张… III. 酸碱紊乱 - 基本知识  
IV. R589. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086977 号

## 酸碱平衡和酸碱平衡紊乱

编 者: 张家骧 史延芳

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010 - 67616688)

地 址: 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

邮 编: 100078

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: [pmph@pmph.com](mailto:pmph@pmph.com)

购书热线: 010 - 67605754 010 - 65264830

印 刷: 北京汇林印务有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 705 × 1000 1/16 印张: 6.25

字 数: 116 千字

版 次: 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978 - 7 - 117 - 10324 - 4/R · 10325

定 价: 16.00 元

版权所有, 侵权必究, 打击盗版举报电话: 010 - 87613394

(凡属印装质量问题请与本社销售部联系退换)



临床各科多种疾病常伴发酸碱平衡紊乱，严重影响机体代谢和功能，加重原发病的病情，甚至威胁生命。因此，了解机体对酸碱平衡的调节机制、酸碱平衡紊乱及其诊断方法极为重要。本书从临床实际需要出发，结合新进展，理论与实际并重，介绍了酸碱平衡的生理、酸碱平衡紊乱的代偿、血气分析和电解质诊断指标及其意义、酸碱平衡紊乱的程序化诊断方法和酸碱平衡紊乱。酸碱平衡紊乱的程序化诊断方法包括了诊断酸碱失衡的全过程：诊断指标、诊断前的准备、诊断步骤和血液酸碱度变化的命名。增加了诊断指标，包括编者推导出来的新诊断指标。明显增多了酸碱失衡的可诊断类型。本书首次采用表格式程序化的诊断方式进行诊断，层次清楚，各诊断步骤之间的走向和定位清晰，衔接紧密。简单的酸碱失衡只需要进行两步，复杂者最多五步就可得出诊断。书中列举酸碱失衡患者实际诊断过程的实录，便于读者体验该诊断方法的实际应用。

衷心希望读者对书中不足之处提出意见和建议。

张家骧 史延芳

2008年5月

第一章 酸碱平衡的生理 .....	1
第一节 基本概念 .....	1
一、酸和碱 .....	1
二、 $H^+$ 浓度和 pH .....	1
三、酸的解离常数 .....	2
四、Henderson-Hasselbalch 公式 .....	3
五、等 $H^+$ 离子原则 .....	4
六、肾脏的净酸排出量 .....	4
第二节 体内酸碱物质的来源 .....	4
一、酸性物质 .....	4
二、碱性物质 .....	5
第三节 酸碱平衡的调节 .....	5
一、体液缓冲系统的调节作用 .....	5
(一) 体液缓冲系统的分布 .....	6
(二) 缓冲系统的作用机制 .....	7
(三) 体液的主要缓冲系统 .....	8
1. $HCO_3^-/H_2CO_3$ 缓冲系统 .....	8
2. 非 $HCO_3^-/H_2CO_3$ 缓冲系统 .....	9
二、肺的调节作用 .....	11
三、肾脏的调节作用 .....	11
(一) 肾脏的解剖学特点 .....	11
(二) 肾脏碳酸酐酶的分布 .....	15
1. 碳酸酐酶定位的判断方法 .....	16
2. 肾脏碳酸酐酶分布的实验研究 .....	17
(1) 关于 CA II 和 CAIV 的实验研究 .....	17
(2) 关于 CA XII 和 CA XV 的实验研究 .....	19

(三) 肾脏对酸碱平衡的调节	20
1. 再吸收 $\text{HCO}_3^-$	20
2. 重新生成 $\text{HCO}_3^-$	23
(1) 酸化尿和从尿排出酸	23
(2) 产铵和从尿排出铵	24
3. 肾脏的净酸排出量	28
4. 影响肾脏调节酸碱平衡的其他因素	29
5. 新生儿再吸收和重新生成 $\text{HCO}_3^-$ 的功能发育	30
<b>第二章 酸碱平衡紊乱的代偿</b>	31
第一节 酸碱平衡紊乱代偿所需的时间	31
第二节 酸中毒的代偿	32
第三节 碱中毒的代偿	33
<b>第三章 血气和电解质诊断指标及其意义</b>	35
一、动脉血气指标	35
二、血清电解质	39
<b>第四章 酸碱平衡紊乱的程序化诊断方法</b>	42
第一节 诊断指标	44
1. 临床指标	44
2. 检测指标	44
3. 计算指标	44
第二节 判断酸碱失衡前的准备工作	48
第三节 诊断步骤	50
第一步 探索存在酸碱失衡的线索	50
第二步 判断主要的酸碱失衡	50
第三步 判断单纯型或二联酸碱失衡	55
第四步 判断代谢性酸中毒的性质	55
第五步 判断代谢性碱中毒的性质	55
第六步 判断代酸合并代碱或代碱合并代酸	59
第七步 判定三联酸碱失衡	59
第八步 判定四联酸碱失衡	59
第四节 酸碱失衡的血液酸碱度变化的命名	63
第五节 酸碱失衡病例实际诊断过程的实录	63

附录：两组单纯型酸碱平衡紊乱预计代偿范围计算公式的比较分析 .....	70
<b>第五章 单纯型和混合型酸碱平衡紊乱</b> .....	77
<b>第一节 单纯型酸碱平衡紊乱</b> .....	77
一、代谢性酸中毒 .....	78
二、代谢性碱中毒 .....	82
三、呼吸性酸中毒 .....	84
四、呼吸性碱中毒 .....	85
<b>第二节 混合型酸碱平衡紊乱</b> .....	86
<b>参考文献</b> .....	88

# 第一章

## 酸碱平衡的生理

在人体内，几乎所有的酶都需要在一定的  $H^+$  浓度 ( $[H^+]$ ) 的情况下才能发挥适宜的活性。 $H^+$  浓度失常，则酶活性将发生障碍，机体功能随之发生障碍。人体在代谢过程中不断产生酸性和碱性物质（主要是前者），故精确地调节  $H^+$  浓度至关重要。机体通过调节机构（体液缓冲系统和肺、肾）的代偿调节作用，使体液  $H^+$  浓度 (pH) 经常保持在相对恒定的正常范围内，以保证机体的正常代谢和生理功能。

### 第一节 基础概念

#### 一、酸 和 碱

凡是能够释出（提供）质子 ( $H^+$ ) 的物质都是酸。凡是能结合（接受）质子 ( $H^+$ ) 的物质都是碱。但是酸和碱不是孤立的，酸给出质子 ( $H^+$ ) 后生成相应的碱。碱接受质子 ( $H^+$ ) 后生成相应的酸  $[HA \rightleftharpoons H^+ + A^-]$ （碱）。酸和碱这种相互依存、相互转化的关系称为酸碱的共轭关系。例如碳酸 ( $H_2CO_3$ ) 在水中离子化，生成  $H^+$  和  $HCO_3^-$ （共轭碱）。 $HCO_3^-$  结合  $H^+$ ，生成  $H_2CO_3$ （共轭酸）。酸与它的共轭碱，或碱与它的共轭酸构成共轭酸碱对，例如  $H_2CO_3$  与  $HCO_3^-$ 。酸和碱都可以是分子、阳离子或阴离子。

#### 二、 $H^+$ 浓度和 pH

体液的正常  $H^+$  浓度 ( $[H^+]$ ) 维持在狭小的范围内（表 1-1）。动脉血的均值为  $0.000\ 04\text{mEq/L}$  ( $40\text{nEq/L} = \text{pH } 7.40$ )，变化范围仅  $3 \sim 5\text{nEq/L}$ 。由于正常  $[H^+]$  很小，应用很长的小数不方便，常用  $H^+$  浓度的负对数即 pH 来表示。



$$\text{pH} = \log_{10}(1/[\text{H}^+]) = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

例如:正常 $[\text{H}^+] = 0.000\ 000\ 04\text{Eq/L}(40\text{nEq/L})$

$$\text{pH} = \log_{10}[0.000\ 000\ 04] = 7.40$$

从该公式可见 pH 与  $[\text{H}^+]$  呈负相关, 因此低 pH 相当于高  $\text{H}^+$  浓度, 高 pH 相当于低  $\text{H}^+$  浓度。人体可耐受的低限值为 pH 6.8, 高限值为 pH 8.0 (表 1-2)。pH 的每一整数的变化相当于 10 倍的酸度的变化 (对数变化)(表 1-3)。

表 1-1 体液的正常  $\text{H}^+$  浓度和 pH

	$[\text{H}^+]$ (mEq/L)	pH
细胞外液		
动脉血	$4.0 \times 10^{-5}$	7.40
静脉血	$4.5 \times 10^{-5}$	7.35
组织间隙液	$4.5 \times 10^{-5}$	7.35
细胞内液	$1 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-5}$	6.0 ~ 7.4
尿液	$3 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-5}$	4.5 ~ 8.0

表 1-2 pH 变化对机体的影响

状态	pH	对机体的影响
酸血症	<7.00	有生命危险
酸血症	7.10 ~ 7.30	有不利影响
正常	7.35 ~ 7.45	正常
碱血症	7.44 ~ 7.69	有不利影响
碱血症	>7.70	有生命危险

表 1-3 pH 和氢离子浓度  $[\text{H}^+]$ (nEq/L) 的转换表

pH	6.8	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0
$[\text{H}^+]$	158	100	80	64	51	40	32	26	20	16	13	10

### 三、酸的解离常数

在平衡状态下, 酸 (HA) 解离为  $\text{H}^+$  和  $\text{A}^-$  (碱) 的速度与  $\text{H}^+$  和  $\text{A}^-$  (碱) 结合为 HA 的速度是相同的。酸的解离常数  $K_a$  亦称平衡常数或离子化常数, 参见本章第三节酸碱平衡的调节的有关内容。

$$K_a = [\text{H}^+][\text{A}^-]/[\text{HA}]$$

酸的解离常数  $K_a$  越高, 该酸的解离度越高, 强度越大。强酸的  $K_a$  很高, 它在水溶液中几乎完全解离 (离子化), 释出大量  $H^+$ 。例如, 盐酸 ( $HCl$ )、硫酸 ( $H_2SO_4$ ) 和磷酸 ( $H_3PO_4$ ) 等。弱酸的  $K_a$  低, 其解离度 (离子化程度) 很低, 在溶液中的酸度 (游离  $H^+$  的浓度) 也低。例如, 乳酸、碳酸 ( $H_2CO_3$ ) 等。在细胞外液中, 与酸碱平衡调节有关的酸和碱多是弱酸及其共轭碱 (conjugate base), 其中, 以  $H_2CO_3$  和  $HCO_3^-$  最为重要。

由于解离常数的应用范围很广, 而且常是小数。为了使用方便, 将  $K_a$  改为负对数形式  $pK_a$ 。

$$pK_a = \log_{10}(1/K_a) = -\log_{10}K_a$$

在水溶液中, 每一种酸都有一个特有的  $pK_a$ 。由于  $pK_a$  与溶液的离子强度呈负相关, 因此, 强酸的  $K_a$  高, 而  $pK_a$  低; 弱酸的  $K_a$  低, 而  $pK_a$  高。

#### 四、Henderson-Hasselbalch 公式

当将一种酸 ( $HA$ ) 加入水中时, 可逆地解离为  $H^+$  和  $A^-$  (即该酸的共轭碱)。



在平衡后如下式:

$$[H^+] = K_a \times \frac{[HA]}{[A^-]}$$

将两边转变为负对数:

$$-\log[H^+] = -\log K_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

用  $pH$  和  $pK_a$  分别替代  $-\log[H^+]$  和  $-\log K_a$ , 得出 Henderson-Hasselbalch 公式:

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]} \quad \text{即} \quad pH = pK_a + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

$$[H_2CO_3] = 0.03 \bullet \times PaCO_2 \text{ mmHg} \quad \bullet \text{ 为 } CO_2 \text{ 的溶解系数}$$

该公式表示  $pH$ 、 $HCO_3^-$  和  $H_2CO_3$  三者间的动态变化关系。可见  $pH$  决定于  $[HCO_3^-]/[H_2CO_3]$  的比值, 而不是它们各自的绝对值。或者说  $pH$  和  $pK_a$  决定  $[HCO_3^-]/[H_2CO_3]$  的比值。

## 五、等 H<sup>+</sup> 离子原则

根据质量作用定律,任何弱酸的酸与其解离的碱性阴离子(共轭碱阴离子)的比值(酸/共轭碱阴离子)(即缓冲对的比值)是由溶液的 [H<sup>+</sup>] 及解离常数 (K<sub>a</sub>) 决定的(参见 Henderson-Hasselbalch 公式)。对于酸或碱的缓冲,体液内的各缓冲对是共同参与的,并不是某缓冲对的孤立作用。在血浆中的各个缓冲系统(缓冲对)都与 [H<sup>+</sup>] 平衡,又在彼此之间平衡。而且在稳定状态下,细胞外液与细胞内液的 [H<sup>+</sup>] 亦相平衡,称为等 H<sup>+</sup> 原则(isohydric principle)。

$$[\text{H}^+] = K_{a1} \times \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{HCO}_3^-]} = K_{a2} \times \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]}{[\text{HPO}_4^{2-}]} = K_{a3} \times \frac{[\text{HPr}]}{[\text{Pr}^-]}$$

• K<sub>a1</sub>、K<sub>a2</sub> 及 K<sub>a3</sub> 为同时存在的各缓冲系统(缓冲对)的解离常数

当某缓冲对的含量和比值发生变化时,[H<sup>+</sup>](pH)即发生变化。其他缓冲对根据[H<sup>+</sup>](pH)及其 pK<sub>a</sub> 值自动调整其含量和比值,亦随之变化,又建立新的平衡。所以测定某一缓冲系统即可对其他缓冲系统和体内总缓冲系统的储存量以及 pH 提供良好的估量。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 缓冲系统的缓冲能力最强,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 又易于测量,故常作为判定酸碱平衡状态的主要指标。

## 六、肾脏的净酸排出量

参见本章第三节酸碱平衡的调节中的有关内容。

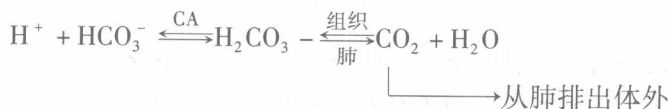
### 第二节 体内酸碱物质的来源

体内酸碱物质主要来源于三大营养物质的代谢产物,少量来自食物、饮料和药物。

#### 一、酸性物质

包括挥发性酸(碳酸)和非挥发性酸(或称固定酸)。

1. 挥发性酸 即碳酸(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>),是由糖、脂肪和蛋白质氧化代谢的尾产物 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>O 结合生成的。H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 可再解离为 H<sup>+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。



正常成人每天在代谢过程中产生 CO<sub>2</sub> 约 300L。组织产生的 CO<sub>2</sub> 进入毛细

血管血，与  $\text{H}_2\text{O}$  结合生成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ （碳酸），或其反过程，可缓慢地自发进行。但在红细胞、肾小管上皮细胞及肺泡上皮细胞存在碳酸酐酶（CA），在其催化作用下，反应速度大大加快。然而碳酸仅在血液转运过程中暂时生成，它在肺毛细血管解离为  $\text{CO}_2$  和水。每日产生的大量  $\text{CO}_2$  从肺排出体外。 $\text{CO}_2$  的排出速度与其产生速度相等，故动脉血  $\text{CO}_2$  分压（ $\text{PaCO}_2$ ）、 $\text{H}_2\text{CO}_3$  和 pH 不会发生变化。

**2. 固定酸（非挥发性酸）** 固定酸主要是由蛋白质代谢产生的。

（1）蛋白代谢产物：蛋白质氧化产生强酸（硫酸或磷酸）。①含硫氨基酸（甲硫氨酸、半胱氨酸、胱氨酸）的代谢产物为硫酸。②含磷有机物（磷脂、核酸、磷蛋白、磷酸甘油酯）的代谢产物为磷酸。肾功能衰竭时，代谢产物排出障碍导致硫酸和磷酸潴留，发生代酸。

（2）糖和脂肪的代谢产物：有机酸（乳酸、乙酰乙酸、 $\beta$ -羟丁酸）为糖和脂肪的代谢产物。正常情况下，这些酸可进一步氧化为  $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2\text{O}$ ，并不影响体液 pH。但在某些异常情况下，有机酸产量增加或潴留，可导致酸中毒。①窒息、缺氧或休克时组织灌注不良等导致组织供氧不足，葡萄糖无氧酵解增加，发生乳酸性酸中毒。②糖尿病酮症时脂肪分解代谢增多，乙酰乙酸和  $\beta$ -羟丁酸潴留，发生糖尿病酮症酸中毒。

## 二、碱性物质

主要是由食物或药物在体内代谢后产生。例如，蔬菜、水果等含有机酸的钾盐或钠盐，其有机酸根在体内结合  $\text{H}^+$  产生有机酸（柠檬酸、苹果酸、乳酸等），继续氧化生成  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{O}$ ，排出体外。而与有机酸根结合的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  则与  $\text{HCO}_3^-$  结合生成  $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{KHCO}_3$ ，使血中的  $\text{HCO}_3^-$  增加。

## 第三节 酸碱平衡的调节

体内产生或摄入的酸性或碱性物质，在缓冲系统和肺、肾的代偿调节作用下，使体液 pH 保持在正常范围内。若体内酸性或碱性物质过多，或者酸碱平衡的调节功能失常，使体液 pH 发生变化，可导致酸中毒或碱中毒。

### 一、体液缓冲系统的调节作用

缓冲物质是指在溶液中能够吸收或提供  $\text{H}^+$  的物质。当向溶液中加入酸或碱时，缓冲物质具有减轻 pH 变化程度的作用。体液缓冲系统是由弱酸及其共轭碱所组成（缓冲对），包括细胞内、外液中的碳酸氢盐（ $\text{HCO}_3^-$ ）及非碳酸氢盐缓冲系统。

根据 Henderson-Hasselbalch 公式:

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{\text{共轭碱}}{\text{酸}}$$

例如,  $\text{pH} = 6.1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$  ( $= 0.03 \times \text{PaCO}_2 \text{ mmHg}$ )

$$\text{pH} = 6.8 + \log \frac{[\text{HPO}_4^{2-}]}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]}$$

溶液中缓冲对的效果决定于它们的浓度和  $\text{pK}_a$ 。良好的缓冲对具有高浓度和它的  $\text{pK}_a$  等于或接近于所期望的溶液的  $\text{pH}$ , 此时缓冲对的双方之间的比值等于或接近 1:1, 对酸和碱的缓冲作用均佳。在大多数情况下, 当  $\text{pH}$  处在高于或低于  $\text{pK}_a$  1 个  $\text{pH}$  单位的范围之内时, 缓冲酸和碱的效果都良好。若超过这个范围, 缓冲效果降低, 当给予一定量的酸或碱时,  $\text{pH}$  的变化将增大。但是血浆  $\text{pH}$  的正常均值为 7.40,  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  缓冲对的  $\text{pK}_a$  为 6.1,  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  比值为 20/1, 缓冲固定酸的能力增强, 有利于缓冲机体每日产生的大量固定酸, 适合机体的实际需要。因此, 适合机体的实际需要是评价缓冲系统效果的基本标准 (图 1-1)。

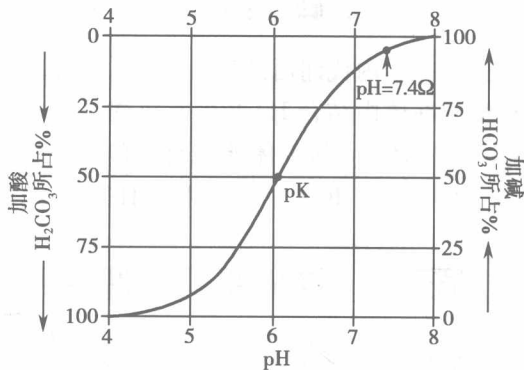


图 1-1 向溶液中的  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  缓冲系统加酸和加碱的滴定曲线

显示  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  比值及  $\text{pH}$  的变化, 和细胞外液  $\text{pH} = 7.40$  时的  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  比值 (20/1)

## (一) 体液缓冲系统的分布

### 1. 血液

(1) 血浆:  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Pr}^-/\text{HPr}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 。

(2) 红细胞:  $\text{Hb}^-/\text{HHb}$ 、 $\text{HbO}_2^-/\text{HHbO}_2$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、有机磷酸盐。  
在血浆及红细胞中, 分别以  $\text{HCO}_3^-$  及 Hb 缓冲系统为主 (表 1-4)。

表 1-4 全血各缓冲系统的分布

缓冲系统	占全血缓冲系统总量的%
<b><math>\text{HCO}_3^-</math> 缓冲系统</b>	
血浆	35
红细胞	18
	53
<b>非 <math>\text{HCO}_3^-</math> 缓冲系统</b>	
Hb 及 $\text{HbO}_2$	35
血浆蛋白	7
无机磷酸盐	2
有机磷酸盐	3
	47

2. 间质液 (包括淋巴液)  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , 以前者为主。

3. 细胞内液 (不包括红细胞)  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Pr}^-/\text{HPr}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、有机磷酸盐, 以前两者为主。肌肉细胞占体细胞的 1/2, 是发挥细胞内缓冲作用的主要组织。由于细胞内液含量大, 正常人体对酸或碱的缓冲作用的 60% 是由其完成的。

## (二) 缓冲系统的作用机制

缓冲系统是维持机体酸碱平衡的第一道防线。细胞外液的缓冲系统对于体内生成的或摄入的  $\text{H}^+$  在几分钟内即迅速发挥缓冲作用。一部分  $\text{H}^+$  进入细胞和骨骼, 被细胞内和骨骼的缓冲系统所缓冲, 约需数小时才起作用。但是缓冲系统仅可减轻缓冲对比值和 pH 的偏移程度, 对机体具有一定的保护作用, 并没有恢复  $\text{HCO}_3^-$  含量的作用。

1. 体内挥发性酸 (碳酸) 由非  $\text{HCO}_3^-$  缓冲系统缓冲, 其中最重要的是 Hb 缓冲系统。其缓冲碳酸的能力占血液的 90% 以上。

2. 可滴定酸 (固定酸) 或碱 可被所有  $\text{HCO}_3^-$  及非  $\text{HCO}_3^-$  缓冲系统所缓冲, 以  $\text{HCO}_3^-$  缓冲系统的作用最大。由于其含量在细胞外液 (包括血浆) 中最大, 而且是开放系统, 是细胞外液中最有效和最重要的缓冲系统。对于可滴定酸 (固定酸) 或碱的缓冲, 细胞外液的缓冲系统起第一线的作用, 细胞内液也具有重要作用, 最后需肺、肾的调节。



CO<sub>2</sub> 的溶解系数。

本式包括 2 个常数(pK<sub>a</sub> 及 CO<sub>2</sub> 的溶解系数)和 3 个变数,用以表示 pH、[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]及[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]之间的动态变化关系。知道变数中的 2 个,即可算出另 1 个。可见,pH 是由[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]比值决定的。当 pH = 6.1 时,[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]各占 50%,缓冲酸或碱的能力最强。当 pH = 7.40 时,[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] = 24/1.2 = 20/1,缓冲固定酸的能力明显增大,适合人体在代谢过程中缓冲不断产生酸性物质的实际需要。

$$\begin{aligned} \text{正常情况下: } \text{pH} = 7.40 &= 6.1 + \log(24/1.2) = 6.1 + 1.3 \\ &\bullet \log 24/1.2 = \log 20/1 = \log 20 = 1.3 \end{aligned}$$

上式的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为代谢因素,受肾脏调节;H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 为呼吸因素,受呼吸调节。pH 由 [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] 比值决定,而不是各自的绝对值。正常人血浆 pH 为 7.40,[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] 比值为 20/1 (24/1.2)。比值改变,pH 随之改变。[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]降低或[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]增高时 pH 下降;反之则升高。原发性[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]增加或减少为代谢性碱中毒(代碱)或代谢性酸中毒(代酸)。原发性肺排出 CO<sub>2</sub> 障碍或过度,使[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]增加或减少为呼吸性酸中毒(呼酸)或呼吸性碱中毒(呼碱)。当[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]比值增加或减少时,机体通过肺(呼吸性)和肾(代谢性)的代偿调节,可减轻该比值和 pH 的偏移程度,使 pH 接近正常。但它们达到最大代偿所需时间不同(表 4-4)。缓冲系统的作用最直接,起第一线作用。在细胞外液即刻起作用,在细胞内液需 2~4 小时;呼吸调节约数分钟,而肾脏调节较慢,需要数日。但是呼吸和代谢代偿是有限度的,在酸或碱中毒时,轻症病例虽可恢复 pH 到正常范围的低值或高值(完全代偿),并不能使 pH 完全恢复到其原来的正常值。严重病例则 pH 将低于或高于正常范围即酸血症或碱血症(部分代偿,即失代偿)。

**2. 非 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 缓冲系统** 对于代谢性和呼吸性酸碱失衡都具有缓冲作用。

(1) H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>/HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 缓冲系统:该缓冲对的 pK<sub>a</sub> 为 6.8,接近期望的 pH 7.4,对酸碱的缓冲效果良好。由于它们在细胞外液中的含量很低,所起的作用很小。但是,该缓冲对对于肾小管液和细胞内液却具有重要的作用。因为:①该缓冲对在肾小管液中大大浓缩,浓度变得很高;而且肾小管液的 pH 较低,接近其 pK<sub>a</sub> (6.8),所以其缓冲作用提高;②该缓冲对在细胞内液中的浓度比细胞外液高很多倍,而且细胞内液的 pH 低于细胞外液,更接近该缓冲对的 pK<sub>a</sub>,缓冲作用增强。

当加入强酸例如盐酸(HCl)时,强酸(HCl)被转换为弱酸(NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>),使 pH 的降低程度减少。





当加入强碱 (NaOH) 时, 强碱 (NaOH) 被转换为弱碱 ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), 使 pH 的升高程度减少。

(2) 蛋白缓冲系统 ( $\text{Pr}^-/\text{HPr}$ ): 蛋白是体内含量丰富的缓冲物质, 特别是在细胞内液。血浆蛋白的等电点绝大部分在 4.0 ~ 7.3 之间, 而血液的 pH 为 7.40 (7.35 ~ 7.45), 大于血浆蛋白的等电点, 故在生理的 pH 情况下, 血浆蛋白是弱酸。血浆蛋白的一部分以弱酸的形式存在, 另一部分则形成弱酸盐, 这两部分构成蛋白缓冲系统。但血浆蛋白仅占全血缓冲系统总量的 7%, 所起缓冲作用很小。

(3) 血红蛋白缓冲系统 ( $\text{Hb}^-/\text{HHb}$ ): 血液中  $\text{CO}_2$  的转运有三种形式: ①物理溶解形式: 约占  $\text{CO}_2$  转运总量的 8%。在血浆中溶解的  $\text{CO}_2$  量很少, 与  $\text{HCO}_3^-$  构成  $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$  缓冲系统。②碳酸氢盐 (主要是  $\text{HCO}_3^-$ ) 形式: 约占  $\text{CO}_2$  转运总量的 78%, 主要存在于血浆中。③氨基甲酸血红蛋白形式: 约占  $\text{CO}_2$  转运总量的 14% (图 1-2)。

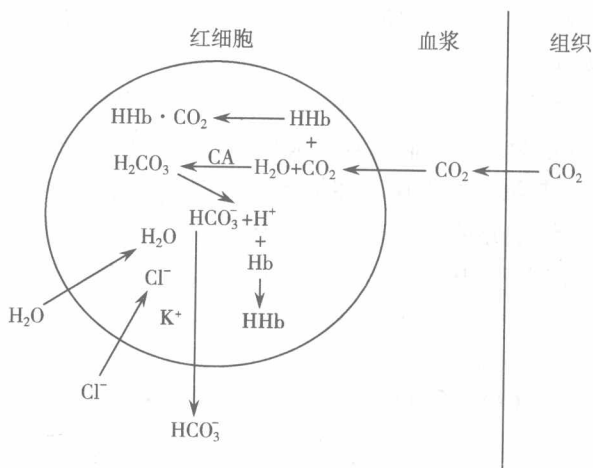


图 1-2  $\text{CO}_2$  的转运

$\text{HHb} \cdot \text{CO}_2$  为氨基甲酸血红蛋白 ( $\text{Hb}-\text{NHCOOH}$ )

1) 碳酸氢盐形式: 机体在代谢过程中产生大量  $\text{CO}_2$ , 进入血液后被转运到肺排出体外。红细胞内的血红蛋白对于缓冲  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  与水在碳酸酐酶催化下生成的碳酸都具有重要作用。 $\text{CO}_2$  进入血液后, 由于红细胞中的  $\text{CO}_2$  分压低于血浆, 再进入红细胞。 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  在碳酸酐酶的催化下合成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , 随即解离为  $\text{H}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$ 。 $\text{H}^+$  被  $\text{Hb}/\text{HHb}$  缓冲系统所缓冲,  $\text{H}^+$  与  $\text{Hb}^-$  结合, 生成  $\text{HHb}$ 。 $\text{HCO}_3^-$  通过红细胞膜上的  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  交互运载体进入血浆, 与