

血气分析与酸碱平衡紊乱

乌鲁木齐军区总医院检验科

孙振亚 编

乌鲁木齐军区后勤部卫生部

PDG

前 言

近十多年来,血气分析与酸碱平衡的理论及检测技术都有了很大进展。现代血气—酸碱分析仪能同时直测血液的二氧化碳分压(PCO_2)、PH和氧分压(PO_2)三项基本指标值,并由此而算出一系列与酸碱平衡密切相关的指标: T-CO_2 (总二氧化碳)、 HCO_3^- (碳酸氢根)、BE(碱余)、SB(标准重碳酸盐)和 Sat. O_2 (氧饱和度)。这样就把血气、电解质与酸碱平衡联系了起来。应用上述指标的变化关系,对判断酸碱失常的性质和类型具有指导意义。国内在七十年代已有译文和专著介绍这方面的理论及应用知识,但因内容较深而未能普及,至今不少基层医生对有关名词、术语、指标概念及临床意义仍不十分清楚,影响了它在酸碱诊断上的普遍应用。为此,我们搜集了国内外部分有关资料纂编成册,简浅地介绍有关的知识,望能对初学者起到辅导作用。

血气、电解质与酸碱平衡问题涉及的基础理论很广,由于水平有限,编写中错误一定不少,请读者指正。

本书蒙新疆医学院张楚武付教授及乌鲁木齐军区总医院王心和医师审阅,深表感谢。

编 者

一九八四年三月

目 录

第一章 血气的含义	(1)
1—1 血气与酸硷平衡.....	(2)
1—2 血液气体的理化知识.....	(2)
(1) 阿弗加德罗 (Avogadro) 定律.....	(2)
(2) 道尔顿 (Dalton) 氏气体分压法则	(2)
(3) 亨利 (Henry) 氏气体溶解于液相法则	(3)
(4) 表示气体量的条件及计算式.....	(4)
(5) 单位与符号.....	(5)
1—3 血液气体交换.....	(7)
图1—1 静息状态时人肺泡毛细血管的生理.....	(8)
图1—2 气体运输与酸硷平衡示意.....	(9)
图1—3 血气、电解质与酸硷平衡示意.....	(10)
第二章 血气与酸硷平衡的基础知识	(11)
2—1 氢离子存在的形式.....	(11)
2—2 酸硷的定义.....	(11)
2—3 PH的 概念.....	(12)
2—4 共轭硷 (Conjugat base) 的概念.....	(12)
2—5 缓冲对与缓冲硷.....	(13)
A. 缓冲对.....	(13)
B. 缓冲硷及其分布.....	(14)

第三章 酸碱平衡的生理调节	(15)
3—1 缓冲系统对酸碱平衡的调节.....	(15)
(一) 碳酸氢 ($\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$) 缓冲系统 ...	(15)
(二) 非碳酸氢缓冲系统.....	(19)
3—2 肺脏对酸碱平衡的调节.....	(21)
3—3 肾脏对酸碱平衡的调节.....	(21)
3—4 骨骼组织对酸碱平衡的调节.....	(25)
3—5 细胞内、外液离子转移对酸碱平衡的调节	(26)
3—6 内分泌腺对酸碱平衡的调节.....	(27)
第四章 血气、电解质与酸碱平衡的联系	(27)
4—1 生理学三定律.....	(28)
4—2 从Gamble图看电解质与酸碱平衡的联系	(30)
4—3 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 在肾脏的交换与酸碱平衡	(31)
4—4 K^+ 变化与酸碱平衡.....	(32)
4—5 Cl^- 变化与酸碱平衡.....	(34)
第五章 不同类型的酸碱紊乱	(35)
A. 单纯型酸碱紊乱.....	(35)
5—1 代谢性酸中毒 (原发性碱缺失)	(35)
5—2 代谢性碱中毒 (原发性碱过剩)	(39)
5—3 呼吸性酸中毒 (原发性肺泡通气功能不全)	(42)
5—4 呼吸性碱中毒 (原发性肺泡通气过度) ...	(44)
B. 混合型酸碱紊乱.....	(44)

5—5	呼吸性酸中毒并代谢性硷中毒	(45)
5—6	呼吸性酸中毒并代谢性酸中毒	(46)
5—7	代谢性酸中毒并呼吸性硷中毒	(46)
5—8	代谢性硷中毒并呼吸性硷中毒	(47)
第六章 血气、酸硷分析术语及指标的临床意义		
		(47)
6—1	大气压与气体的分压	(47)
6—2	血气 (Blood gas)	(48)
6—3	血液氧分压 (PO_2)	(48)
6—4	血液氧含量 ($C-O_2$)	(51)
6—5	血液氧结合量 (Oxygen Capacity)	(52)
6—6	血液氧容量	(52)
6—7	血液氧饱和度、氧解离曲线及 P_{50}	(53)
6—8	肺泡动脉氧分压差 ($A-aDO_2$)	(57)
6—9	血氧指标的正常值 (表)	(57)
6—10	血氧指标的临床应用	(58)
	(一) 鉴别缺氧类型	(58)
	(二) 右心导管采血测氧助诊先天性心脏病	(59)
	(三) 了解心脏功能	(60)
6—11	二氧化碳分压 (PCO_2)	(60)
6—12	总二氧化碳 ($T-CO_2$) 量	(63)
6—13	实际碳酸氢根 (HCO_3^- , AB)	(64)
6—14	标准碳酸氢根 (SB)	(64)
6—15	缓冲硷 (BB)	(65)
6—16	硷剩余 (BE)	(65)
6—17	蛋白质阴离子 ($Prot^-$ 或 Pr^-)	(67)

6—18	PH	(68)
6—19	PHNR (非呼吸影响的 PH 值)	(69)
6—20	残余阴离子 (RA) 与阴离子差距 (AG)	(70)
第七章	有关酸硷诊断的数据及资料	(72)
7—1	酸硷、血气、电解项目的正常值 (表)	(72)
7—2	血气、酸硷主要指标的病理极值 (表)	(74)
7—3	酸硷类型的鉴别 (表)	(80页后)
7—4	酸硷紊乱诊断检索 (表)	(76)
第八章	血气酸硷诊断图及计算图表的应用	
		(80)
8—1	西哥安德森 (Siggaard-Aderson) 直列线图说明	(80)
8—2	西哥安德森 (Siggaard-Aderson) 直列线简图	(82)
8—3	代谢性酸中毒代偿线图	(84)
8—4	代谢性硷中毒代偿线图	(84)
8—5	呼吸性酸中毒的代偿线图	(86)
8—6	西哥-安德森 (Siggaard-Anderson) 酸硷图在酸硷诊断中的应用	(88页后)
第九章	酸硷失常诊断举例	(92)
9—1	代谢性酸中毒呼吸代偿	(92)
9—2	呼吸性硷中毒代谢代偿	(93)
9—3	呼吸性酸中毒代偿不全	(93)
9—4	代谢性酸中毒代偿不全	(93)
9—5	呼吸性硷中毒未代偿	(94)
9—6	代谢性硷中毒未代偿	(94)

9—7	呼吸性酸中毒并代谢性酸中毒	(94)
9—8	代谢性酸中毒并呼吸性硷中毒	(95)
9—9	代谢性硷中毒并呼吸性硷中毒	(96)
9—10	呼吸性酸中毒并代谢性硷中毒	(96)
9—11	一例幽门狭窄所致的代谢性硷中毒	(97)
9—12	一例呼吸功能不全病人的代谢性硷中毒	(99)
9—13	一例腹泻小儿的代谢性酸中毒	(100)
9—14	一例水杨酸中毒而致的酸硷紊乱	(101)
第十章	酸硷失常的处理	(103)
10—1	酸硷失常的处理原则	(103)
10—2	酸中毒的补硷指征	(104)
10—3	主要抗酸药的作用机制、特点及注意事项	(105)
10—4	三种抗酸药的常用浓度及用量换算(表)	(107)
10—5	纠正酸中毒补硷量计算	(108)
10—6	硷中毒用抗硷药的计算	(109)
第十一章	有关脑脊液气体分析的资料	(111)
11—1	脑脊液中 PCO_2 、 HCO_3^- 与血液间的平衡	(111)
11—2	脑脊液、动脉血、颈内静脉血气体与酸硷指标正常值(表)	(121)
11—3	脑脊液、动脉血、颈内静脉血气体分析的临床意义	(114)
第十二章	样品采集、试剂配制、计算公式	(114)
12—1	血液样品的采集及注意事项	(114)

12—2	血液样品的采集方法	(115)
12—3	定标液及其他常用试剂配制	(116)
I	PH定标液配制	(116)
II	PCO ₂ 测定用试剂及配制方法	(117)
III	PO ₂ 测定用试剂	(120)
IV	恒温水添加剂	(120)
V	流体压力计用的紫色指示剂	(121)
VI	采血用抗凝剂	(121)
VII	管道清洗液	(121)
VIII	酶电报去垢剂。	(121)
12—4	计算公式	(121)
(1)	体液计算公式	(121)
(2)	补充水量计算(根据Na ⁺ 升高)公式	(121)
(3)	间质液阴阳离子浓度计算式	(122)
(4)	已知PH估算[H ⁺]mEq/L	(122)
(5)	已知[K ⁺]mEq/L估算PH	(122)
(6)	离子丢失补充量计算公式(适用于细胞外液)	(122)
(7)	蛋白质补充量计算公式(据Van Slyke)	(123)
(8)	硷性及酸性药物补给量计算公式	(123)
(9)	鼻管吸氧浓度计算	(123)
(10)	血气指标计算式	(123)
(11)	酸硷指标计算公式	(124)

附录

(一)	应当记忆的要点和数据	(125)
(二)	术语学	(127)

第 一 章

血 气 的 含 义

1—1, 血气与酸硷平衡

血气 (Blood gas), 就广义而言是指血液中的全部气体。在呼吸大气空气的情况下, 血液中主要含有氧 (O_2)、氮 (N_2)、二氧化碳 (CO_2) 及氩 (Ar) 等稀有气体。就狭义而言, 血气是指与人体气体交换有关的或呼吸有关的具有重要生理意义的氧 O_2 与二氧化碳 CO_2 。血气分析主要是指对后二者的检测。血气测定的结果与解释主要与通气、通气与血流分布、气体弥散等所谓肺功能、组织代谢、气体交换、血液的氧合、缓冲作用的程度和循环状况相联系。

目前在临床实际应用中将血气分析与酸硷平衡的检查已自然地等同起来了 (尽管不十分恰当)。因为肾每天约排出 50—150 毫升一当量的酸, 而肺亦相应排出约 200—400 升的 CO_2 , 所以, 从机体内环境酸硷稳定的机制来看, 血气 (肺功能) 与酸硷平衡的确很难分开。

近代检测仪器的进展, 同时可直接测得 PH、 $PaCO_2$ 、 PaO_2 三个指标值, 并根据前两项的数据可计算出硷超 (BE)、碳酸氢根 (HCO_3^-)、总二氧化碳 (T- CO_2) 等指标值。属于血气范围的有动脉血二氧化碳分压 ($PaCO_2$)、动脉血氧分压 (PaO_2) 及动脉血氧含量 ($Ca-O_2$); 属于酸硷平衡的指标有 PH ($[H^+]$ 的负对数值)、BE、 HCO_3^- 、 $PaCO_2$;

其中 BE 、 HCO_3^- 称之为酸碱平衡的代谢成分， PaCO_2 称之为酸碱平衡的呼吸成分。医学临床越来越多地运用这些指标来综合判断患者有无酸碱失常、失常的性质与类型。当重视到血气与酸碱平衡密切关系的时候，决不可忽略电解质在酸碱平衡调节中的重要作用，因为前述指标中的 HCO_3^- 既是 CO_2 （血气）的结合形式又是电解质阴离子，它是电解质与血气相互联系的典型代表。此外，还必须重视检测血清中的其他电解质如钾、钠、氯、钙等，使血气、电解质与酸碱平衡联系起来。

1—2、血液气体的理化知识

（1）阿弗加德罗（Avogadro）定律：即同温同压下，同体积的任何气体（不论其轻重）具有同数的分子，也就是说，一克分子的任何气体其分子数均为 6.023×10^{23} 个。将其引入气体克分子体积的概念：在STPD条件（标准温度 0°C 标准压力 760mmHg ，干燥状态）下，一克分子的任何气体是 22.4 升。 O_2 与 CO_2 通常是以STPD条件计算的。

（2）道尔顿(Dollton)氏气体分压法则：Dollton气体分压法则认为，混合气体的总压力为各自气体单独所占容积时的压力之和。

以空气为例，空气重量所致的大气压在海平面约为 760mmHg 。空气的组成（自地表到 100 公里高度）百分体积为 $\text{FN}_2 = 78.08\%$ ， $\text{FO}_2 = 20.95\%$ ， $\text{FCO}_2 = 0.03\%$ 。

大气压的公式是：

$$\text{PB} = \text{PN}_2 + \text{PO}_2 + \text{PCO}_2 + \dots\dots\dots (1)$$

因此，各自气体的分压可按下式计算：

气体的分压 = 大气压 $\times$ 单一气体的百分体积

$$\text{即 } P = P_B \times F \dots\dots\dots (2)$$

例如已知大气压 $P_B = 760\text{mmHg}$, 求 PO_2 ?

前述 $FO_2 = 20.95\%$

$$PO_2 = 760 \times 0.2095 = 159\text{mm} \cdot \text{Hg}$$

但应注意! 1 上述公式不适合于人体, 因为空气吸入人体(肺)后, 很快受到体温的饱和水蒸气分压 PH_2O (一般为 $47\text{mm} \cdot \text{Hg}$)的影响, 所以吸入气分压公式应改为:

$$P_i = (P_B - PH_2O) \times F$$

例如, $P_B = 760\text{mm} \cdot \text{Hg}$, $PH_2O = 47\text{mm} \cdot \text{Hg}$, $FO_2 = 20.95\%$, 求吸入气 $PO_2 = ?$

$$P_iO_2 = (760 - 47) \times 0.2095 = 150\text{mm} \cdot \text{Hg}$$

表1—1 人体各部位气体的分压与总压 (mmHg)

部 位 气 气体分压	吸入气 (I)	呼出气 (E)	肺泡气 (A)	动脉血 (a)	静脉血 (V)
PCO_2	0 (0.21)	26	39	39	44
PO_2	150	118	102	93	38
PN_2	563	569	572	564	564
PH_2O	47	47	47	47	47
总 压	760	760	760	743	693

(3) 亨利(Henry)氏气体溶解于液相法则: 气体在一定温度时溶解于液相的量与该气体在气相的分压成正比(此法则不适用于能和液体发生化学反应的气体如 NH_3 等)。Henry氏法则可以公式表示为:

$$C = a \cdot P / 760$$

注：C = 气体在液相的溶解量 (ml)；P = 该气体在气相的分压；a = 本生 (Bunsen) 氏溶解系数，即在STPD条件下，某气体在一定分压 (P) 时溶解于1毫升液体中的气体的毫升数；a值随温度的变化而不同，亦随液体的种类而不同；例如O₂的a值在40℃时 = 0.0231，37℃ = 0.0238，30℃ = 0.0261；说明O₂的a值随温度下降而增加 (气体溶于液体的量增加)。

用上式计算人呼吸空气时血中各气体的溶解量举例：设定体温 = 37℃，PAO₂ = 100mm·Hg，PAN₂ = 570mm·Hg，如不计肺泡动脉氧分压差时，则得

$$\text{O}_2\text{溶解量} = 0.0238 \times 100 / 760 = 0.0031 \text{ (ml/ml)};$$

$$\text{N}_2\text{溶解量} = 0.0127 \times 570 / 760 = 0.0095 \text{ (ml/ml)}。$$

(N₂的a值 = 0.0127 (37℃))

(4) 表示气体量的条件及计算式

气体易受温度、压力等条件的影响，因此在表示气体量的时候必须规定一定的条件，这些条件是：

BTPS (Body Temperature ambient pressure, Saturated with water vapor) 即以体温、大气压、饱和水蒸气压力为进行血液气体测量的条件。

ATPS (Ambient Temperature, ambient Pressure, Saturated With Water vapor) 即以环境温度、环境压力，饱和水蒸气为测定气体量的条件。

ATPD (Ambient Temperature, ambient Pressure, Dry) 即以环境温度、环境压力、干燥状态为表示气体量的条件。

STPD(Standard Temperature, standard Pressure, Dry)即以标准温度(0℃)、标准压力(760mm·Hg)、干燥状态为表示气体量的条件。

本条件(STPD)特适合于O₂及CO₂的表示。

例如一克分子的O₂与CO₂的体积可分别表示为:

VO₂STPD = 22.4升

VCO₂STPD = 22.4升(一般认为22.26升)

不同条件下气体体积换算式:

$$V_{STPD} = V_{ATPS} \times \frac{273}{(273 + t^{\circ}\text{C})} \times \frac{[PB - PH_2O(t^{\circ}\text{C})]}{760}$$

$$V_{STPD} = V_{BTPS} \times \frac{273}{310} \times \frac{(PB' - 47)}{760}$$

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \times \frac{310}{(273 + t^{\circ}\text{C})} \times \frac{[PB - PH_2O(t^{\circ}\text{C})]}{(PB - 47)}$$

(5) 单位与符号

1. 表示压力的单位与符号

atm (atmosphere 大气压)。

ata (atmosphere absolute, 绝对大气压)。

bar (= 1.013atm)。

KPCm⁻² (= 10000mmH₂O)。

MSW (Meter Of Sea Water, 海水深 1 米)

= 1.026mmH₂O

PSi (Pound per Square inch, 磅/平方吋)。

Torr (Torricelli, 缩写Torr, ‘托’ = atm/760,

标准大气压时 Torr = mmHg)。

Pa (Pascal, 帕斯卡, ‘帕’即 1 牛顿力/平方米)。

$133.322\text{Pa} = 1\text{mmHg}$

KPa (Kilopascal, 千帕, $=1000\text{Pa}$)。

13.3322KPa (千帕) $= 100\text{mm.Hg}$

0.133322KPa (千帕) $= 1.0\text{mm.Hg}$

1.0KPa (千帕) $= 7.5\text{mm.Hg}$

$\text{KPa} \times 7.5 = \text{mm.Hg}$

$\text{mm.Hg} \times 0.1333 = \text{KPa}$

II、浓度与容积的单位符号

M/L (克分子/升)。

ml% (毫升%), Vol% (容积%), ml/dl (毫升/分升)。

mM/L (mmol/L, 毫克分子/升)。

1 M 气体 VSTPD = 22.4 升 (L);

1 mM 气体 VSTPD = 22.4 毫升 (ml)

用于 CO_2 时:

1 M CO_2 , $\text{VCO}_2\text{STPD} = 22.26$ 升;

1 mM CO_2 , $\text{VCO}_2\text{STPD} = 22.26$ 毫升。

III、PH与 $[\text{H}^+]$ 的表示符号与单位换算

$\text{PH} = -\log[\text{H}^+]$, $[\text{H}^+]$ (或 CH^+) $= 10^{-\text{PH}}$, 表示 $[\text{H}^+]$, 因其量太小, 常用毫微克分子/升 (nanomol/L, 即 10^{-9}mol/L) 来表示。

PH与 $[\text{H}^+]$ 之间可用对数进行换算, 但步骤比较复杂且易出错, 为此, 这里推荐一简便换算方法: 记住 $\text{PH} = 7.40 = 40\text{nM}[\text{H}^+]$, 当PH自7.40起每增减0.01单位, $[\text{H}^+]$ 就向相反的方向变化 1 nanomol。这样就可以很快地完成换算,

例如PH由7.40增加至7.45, $[H^+]$ 就降至35nanomol/L, 又如当PH由7.40降至7.35时, $[H^+]$ 就增至45nanomol/L。

应当说明, 上述简易换算所得结果, 只有当 PH 在7.28—7.45时才与对数运算结果接近。

为了方便, 可事先计算出PH与 $[H^+]$ 对照表以备查阅。

PH	$[H^+]$ nanomol/L
6.80	158.5
6.90	125.9
7.00	100.0
7.10	79.4
7.20	63.0
7.30	50.1
7.40	40.0
7.50	31.0

1—3、血液气体交换

一个人有动脉、静脉、通过心脏进行血液循环, 经肺吸入新鲜 O_2 气呼出 CO_2 ; 这就是简单的气体交换。气体交换与酸碱平衡关系甚为密切, 见8,9,10页示意图。

图1—1中符号注释:

PA: 肺动脉; $P\bar{V}O_2$: 静脉血平均氧分压 = 40mmHg; $S\bar{V}O_2$: 静脉血平均氧饱和度 = 75%; $P\bar{V}CO_2$: 静脉血平均 CO_2 分压 = 46mmHg; $C\bar{V}CO_2$: 静脉血平均 CO_2 浓度 = 24 mM/L; $PH\bar{V}$ 静脉血平均PH = 7.38; 空白箭头指示血液灌注; PC: 肺泡毛细血管; Physiologic Shut: 生理分流(旁路); PV: 肺静脉; Pao_2 : 动脉血氧分压 = 95mmHg; Sao_2 : 动脉血氧饱和度 = 97%; $Paco_2$: 动脉血

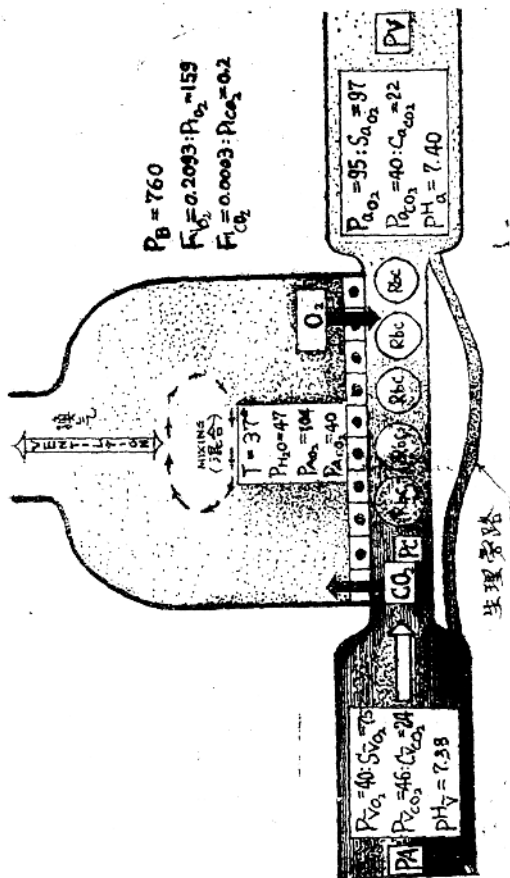


图1-1 静息状态时人肺泡毛细管生理图

图 1--2 气体运输与酸碱平衡

