

酸碱平衡紊乱的程序化分析：附4例案例分析

马春园 王桂杰

223600 江苏宿迁,沭阳县人民医院肾内科(马春园);110000 辽宁沈阳,中国医科大学公共基础学院数学教研室(王桂杰)

通讯作者:王桂杰, Email: gjwang@mail.cmu.edu.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2017.05.010

【摘要】 **目的** 建立酸碱平衡紊乱分析的标准化流程,借助酸碱平衡坐标图对酸碱平衡紊乱案例进行分析。**方法** 系统回顾酸碱平衡理论和新近研究进展,明确酸碱平衡分析中重要的概念、定义、公式、各种参数的意义及酸碱平衡分析中的规律与推论,梳理酸碱平衡紊乱分析流程和步骤,介绍酸碱平衡坐标图在实例中的应用。**结果** 总结并提出酸碱平衡紊乱分析的“四参四步”程序化分析方法,以全面分析酸碱平衡紊乱问题。“四参”即 pH、动脉血二氧化碳分压(PaCO_2)、碳酸氢根(HCO_3^-)和阴离子隙(AG)。“四步”即:①根据 pH 定酸、碱,然后结合 PaCO_2 和 HCO_3^- 两参数,确定原发性或主要酸碱平衡紊乱类型;②根据原发性或主要酸碱平衡紊乱类型选用合适代偿公式,确定有无双重混合型酸碱平衡紊乱;③原发性酸碱平衡紊乱为呼吸性酸中毒(呼酸)或呼吸性碱中毒(呼碱),同时伴有 AG 增高型代谢性酸中毒(代酸),应计算潜在 HCO_3^- ,用潜在 HCO_3^- 替代实测 HCO_3^- 与经代偿公式计算所得的代偿区间进行比较,进而判断有无三重混合型酸碱平衡紊乱类型;④对经前3步判断为单纯代酸(AG 增高型)的数据进一步分析,计算 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值,判断是否同时合并非 AG 增高型代酸或代谢性碱中毒(代碱)。在临床实际应用中可以借助酸碱平衡坐标图实现对酸碱平衡紊乱类型的快速判断,分别以 PaCO_2 、 HCO_3^- 为横、纵坐标建立直角坐标系,经原点(0, 0)和(40, 24)点可做一条直线,线上所有点 pH 均等于 7.40;以 $\text{pH}=7.40$ 等值线、 $\text{PaCO}_2=40 \text{ mmHg}$ 线(1 mmHg=0.133 kPa)和 $\text{HCO}_3^- = 24 \text{ mmol/L}$ 线可将图形分成 7 个区域,分别代表酸碱正常区及主呼碱区、代碱+呼碱区、主代碱区、主呼酸区、呼酸+代酸区、主代酸区,根据患者指标数值,通过读取(PaCO_2 , HCO_3^-)或(PaCO_2 , 潜在 HCO_3^-)点在酸碱平衡坐标图上的位置,便可快速判断其酸碱平衡情况及酸碱平衡紊乱类型。**结论** “四参四步”程序化分析方法在酸碱平衡紊乱分析中系统且全面,同时借助酸碱平衡坐标图可以对酸碱平衡紊乱的类型进行快速判断,值得普及和推广。

【关键词】 酸碱平衡紊乱; 血气分析; 酸中毒; 碱中毒

基金项目: 辽宁省自然科学基金(201102249)

Procedural analysis of acid-base balance disorder: case serials in 4 patents Ma Chunyuan, Wang Guijie

Department of Nephrology, Shuyang People's Hospital, Suqian 223600, Jiangsu, China (Ma CY); Teaching Section of Mathematics, China Medical University, Shenyang 110000, Liaoning, China (Wang GJ)

Corresponding author: Wang Guijie, Email: gjwang@mail.cmu.edu.cn

【Abstract】 **Objective** To establish the standardization process of acid-base balance analysis, analyze cases of acid-base balance disorder with the aid of acid-base balance coordinate graph. **Methods** The acid-base balance theory were reviewed systematically on recent research progress, and the important concepts, definitions, formulas, parameters, regularity and inference in the analysis of acid-base balance were studied. The analysis of acid-base balance disordered processes and steps were figured. The application of acid-base balance coordinate graph in the cases was introduced. **Results** The method of "four parameters-four steps" analysis was put forward to analyze the acid-base balance disorders completely. "Four parameters" included pH, arterial partial pressure of carbon dioxide (PaCO_2), HCO_3^- and anion gap (AG). "Four steps" were outlined by following aspects: ① according to the pH, PaCO_2 and HCO_3^- , the primary or main types of acid-base balance disorder was determined; ② primary or main types of acid-base disorder were used to choose the appropriate compensation formula and to determine the presence of double mixed acid-base balance disorder; ③ the primary acid-base balance disorders were divided into two parts: respiratory acidosis or respiratory alkalosis, at the same time, the potential HCO_3^- should be calculated, the measured HCO_3^- should be replaced with potential HCO_3^- , to determine whether there were three mixed acid-base disorders; ④ based on the above analysis the data judged as the simple AG increased-metabolic acidosis was needed to be further analyzed. The ratio of $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ was also needed to be calculated, to determine whether there was normal AG metabolic acidosis or metabolic alkalosis. In the clinical practice, PaCO_2 (as the abscissa) and HCO_3^- (as the ordinate) were used to establish a rectangular coordinate system, through origin (0, 0) and coordinate point (40, 24) could be a straight line, and all points on the straight line pH were equal to 7.40. The acid-base balance coordinate graph could be divided into seven areas by three straight lines [namely $\text{pH}=7.40$ isoline, $\text{PaCO}_2=40 \text{ mmHg}$ (1 mmHg = 0.133 kPa) line and $\text{HCO}_3^- = 24 \text{ mmol/L}$ line]: main respiratory alkalosis area, main metabolic alkalosis area, respiratory + metabolic alkalosis area, main respiratory acidosis

area, main metabolic acidosis area, respiratory + metabolic acidosis area and normal area. It was easier to determine the type of acid-base balance disorders by identifying the location of the (PaCO_2 , HCO_3^-) or (PaCO_2 , potential HCO_3^-) point on the acid-base balance coordinate graph. **Conclusions** "Four parameters-four steps" method is systematic and comprehensive. At the same time, by using the acid-base balance coordinate graph, it is simpler to estimate the types of acid-base balance disorders. It is worthy of popularizing and generalizing.

【Key words】 Acid-base balance disorder; Blood gas analysis; Acidosis; Alkalosis

Fund program: Natural Science Foundation of Liaoning Province (201102249)

酸碱平衡对于临床危重患者具有重要意义,及时识别酸碱平衡紊乱类型并正确处理,可以提高危重患者的抢救成功率。阴离子间隙(AG)、潜在碳酸氢根(HCO_3^-)和 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值的提出加深了对酸碱平衡紊乱的认识,但也给酸碱平衡紊乱的正确分析增加了难度。本研究通过系统回顾酸碱平衡理论和新近研究进展,提出应用“四参四步”程序化分析方法全面评估酸碱平衡紊乱问题,同时借助酸碱平衡坐标图对酸碱平衡紊乱案例进行分析,旨在建立一种标准化的酸碱平衡紊乱分析流程,以提高临床医生对酸碱平衡紊乱识别的准确性。

1 酸与碱的概念

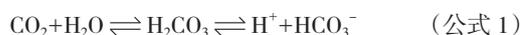
酸碱质子理论^[1]指出:凡是能给出质子(即 H^+)的物质都是酸;凡是能接受 H^+ 的物质都是碱。化学反应中,酸性物质释放出 H^+ 后,必然会生成一个对应碱(A^-),如 HA (酸) $\rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{A}^-$ (碱)。酸与碱形成共轭平衡体系。

2 酸碱平衡的机体调节

机体主要通过4种方式实现对酸碱平衡的调节^[2]: ① 体液缓冲系统:包括碳酸氢盐缓冲系统和非碳酸氢盐缓冲系统,体液缓冲是机体应对酸碱负荷的第一道防线;其特点是即刻发挥对酸碱的调控,但缓冲能力有限,仅能将强酸变弱酸,不能彻底清除酸碱物质。② 肺:主要通过改变肺泡通气量,进而影响动脉血二氧化碳分压(PaCO_2),实现对酸碱平衡的调控;其特点是对酸碱的调控迅速而精细。③ 肾:主要通过肾小管细胞泌 H^+ 、排 NH_4^+ 和重吸收 HCO_3^- ;其特点是对酸碱平衡进行慢、粗调节,但潜力巨大。④ 细胞:通过细胞内外离子交换,如 $\text{H}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ 逆向交换体和 $\text{Cl}^- \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$ 逆向交换体。

3 酸碱平衡紊乱的评价指标(四参)介绍

碳酸氢盐缓冲系统(公式1)作为体液缓冲系统的重要组成部分,是发现和判断酸碱平衡紊乱的病理生理学基础。反映机体酸碱程度的直接指标是 H^+ 浓度,经推导得出 H^+ 浓度计算公式(公式2)^[3];公式中 K 为碳酸的电离平衡常数。



$$[\text{H}^+] = K \times \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (\text{公式2})$$

3.1 pH:因为机体中 H^+ 浓度非常低(nmol/L水平),进而提出pH概念,其定义为 H^+ 浓度的负对数。经公式2推导可得出著名的Henderson-Hasselbakh方程式^[1-2](公式3)。

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log_{10} \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \times \text{PaCO}_2} \right) \quad (\text{公式3})$$

式中, pKa 为碳酸的电离平衡常数 K 的负对数; α 为 CO_2 溶解度系数,数值为 0.03 mmol/L。

3.2 PaCO_2 与 HCO_3^- : Henderson-Hasselbakh 方程式将反映机体酸碱程度的指标 pH 和引起酸碱平衡紊乱的病因学指标 HCO_3^- 、 PaCO_2 紧密联系在一起。通常 pH 下降提示可能存在酸中毒, pH 升高提示可能存在碱中毒;而 HCO_3^- 代表代谢性因素变化, PaCO_2 代表呼吸性因素变化。

3.3 AG: AG 是指血液中未测定阴离子(UC)和未测定阳离子(UA)之差。依据溶液电中性原理可得出公式(公式4)。

$$\text{AG} = \text{UC} - \text{UA} = [\text{Na}^+] - ([\text{HCO}_3^-] + [\text{Cl}^-]) \quad (\text{公式4})$$

AG 代表不可测定的固定酸(主要是 HPO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 和有机酸根离子等),内源或外源因素造成体内不可测定的酸性物质堆积,酸性物质解离成 H^+ 和对应的酸根阴离子, H^+ 消耗体内 HCO_3^- , 酸根阴离子则增加体内 UC 总量,导致 AG 增高。因此, AG 增高是区别两种类型代谢性酸中毒(代酸),即 AG 正常型代酸和 AG 增高型代酸,以及诊断混合型酸碱平衡紊乱的重要指标。

4 酸碱平衡紊乱的分类

4.1 单纯型酸碱平衡紊乱(SABD):呼吸性酸中毒(呼酸);呼吸性碱中毒(呼碱);代酸;代谢性碱中毒(代碱)。

4.2 双重混合型酸碱平衡紊乱(DABD): ① 酸碱一致型:呼酸+代酸、代碱+呼碱; ② 酸碱混合型:呼碱+代酸、呼酸+代碱、代酸+代碱; ③ 双重代酸型:AG增高型代酸+AG正常型代酸。

4.3 三重混合型酸碱平衡紊乱 (TABD): ① 呼酸 + AG 增高型代酸 + 代碱 (呼酸型); ② 呼碱 + AG 增高型代酸 + 代碱 (呼碱型)。

必须强调,目前临床上只能对并发 AG 增高型代酸的 TABD 作出判断,而对伴有 AG 正常型代酸的 TABD,理论上存在,但尚缺乏有效的判断手段。

5 酸碱平衡紊乱分析中的规律与推论

深刻理解和掌握下列规律和推论对理解和判断酸碱平衡紊乱有重要作用。

5.1 规律 1: pH 在正常范围内可见于以下情况:

① 酸碱平衡正常; ② 代偿期酸碱平衡紊乱; ③ 混合型酸碱平衡紊乱。

5.2 规律 2: 代谢性酸碱平衡紊乱主要靠肺代偿,而呼吸性酸碱平衡紊乱主要靠肾代偿。

5.3 规律 3: SABD 时 HCO_3^- 或 PaCO_2 的代偿变化具有同向性、极限性和时限性。

5.4 规律 4: SABD 时原发性酸碱平衡紊乱变化大于代偿变化,机体既不能完全代偿,也不会过分代偿。

5.5 规律 5: 理论上,增加 1 mmol/L 不可测定固定酸会消耗 1 mmol/L HCO_3^- ,即 $\Delta \text{AG} \uparrow = \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 。

5.6 规律 6: 机体不会通过产生足够多的 AG 去代偿原发性碱中毒 (代碱或呼碱) 引起的改变^[4]。

5.7 推论 1: 原发性或主要酸碱平衡紊乱类型决定 pH 偏向 (pH < 7.40 偏酸或者 pH > 7.40 偏碱)。如 pH < 7.40,则提示原发性或主要酸碱平衡紊乱类型为酸中毒 (代酸或呼酸); 如 pH > 7.40,则提示原发性或主要酸碱平衡紊乱类型为碱中毒 (代碱或呼碱)。

5.8 推论 2: 当 HCO_3^- 与 PaCO_2 的变化方向相反时 ($\text{HCO}_3^- \downarrow / \text{PaCO}_2 \uparrow$ 或 $\text{HCO}_3^- \uparrow / \text{PaCO}_2 \downarrow$) 为酸碱一致型 DABD,两者不能相互代偿, pH 发生显著变化; HCO_3^- 与 PaCO_2 变化方向相同时 ($\text{HCO}_3^- \downarrow / \text{PaCO}_2 \downarrow$ 或 $\text{HCO}_3^- \uparrow / \text{PaCO}_2 \uparrow$),则可能为 SABD 或 DABD。

5.9 推论 3: AG 升高明显超出其正常范围 (一般 AG > 16 mmol/L),一定存在独立的 AG 增高型代酸^[5],提示可能发生 TABD。

6 “四参四步”程序化分析法分析酸碱平衡紊乱

“四参”主要指 pH (正常参考范围 7.35 ~ 7.45, 平均 7.40)、 PaCO_2 (正常参考范围 34 ~ 46 mmHg, 平均 40 mmHg; 1 mmHg = 0.133 kPa)、 HCO_3^- (正常参考范围 21 ~ 27 mmol/L, 平均 24 mmol/L) 和 AG (正常参考范围 8 ~ 16 mmol/L, 平均 12 mmol/L)。需强调两点: ① pH、 PaCO_2 是由血气分析仪直接测得,而 HCO_3^- 是经 Henderson-Hasselbakh 方程式计算得

出,并非直接测量值^[1]; ② 不同血气分析仪检测指标的参考区间略有差异,进行酸碱平衡紊乱分析时需要参考本单位的实验室标准确定各参数的参考区间和平均水平^[6]。分析酸碱平衡紊乱前应对获得的数据进行初判,若 pH、 PaCO_2 、 HCO_3^- 和 AG 均在其正常参考范围内,基本可排除存在酸碱平衡紊乱; 若有任一指标超出其正常参考范围,均提示存在酸碱平衡紊乱,需进行程序化分析。

6.1 第一步: 根据 pH 初步判定是酸血症还是碱血症,再结合 PaCO_2 、 HCO_3^- 判断酸碱平衡紊乱的主要类型。根据上述代偿规律和推论,一般来说, SABD 的 pH 是由原发性酸碱平衡紊乱类型决定的; DABD 或 TABD 的 pH 是由主要酸碱平衡紊乱类型决定的。酸碱平衡紊乱的原发性类型及判断方法见表 1。

pH	PaCO_2 (mmHg)	HCO_3^- (mmol/L)	原发性酸碱平衡紊乱类型
< 7.40 (酸性)	> 40 ^a	> 24	呼酸
	< 40	< 24 ^a	代酸
	> 40 ^a	< 24 ^a	呼酸 + 代酸
> 7.40 (碱性)	> 40	> 24 ^a	代碱
	< 40 ^a	< 24	呼碱
	< 40 ^a	> 24 ^a	呼碱 + 代碱
= 7.40 (中性)	< 40 ^a	< 24 ^a	呼碱 + 代酸
	> 40 ^a	> 24 ^a	呼酸 + 代碱
	= 40	= 24	正常 / 异常

注: 1 mmHg = 0.133 kPa; a 代表原发性改变

6.1.1 如果 pH < 7.40,提示血液偏酸,可能存在酸中毒; 原发性酸碱平衡紊乱只有 3 种可能: ① pH < 7.40, $\text{PaCO}_2 > 40$ mmHg, $\text{HCO}_3^- > 24$ mmol/L,即以 PaCO_2 升高为主征的呼酸; ② pH < 7.40, $\text{HCO}_3^- < 24$ mmol/L, $\text{PaCO}_2 < 40$ mmHg,即以 HCO_3^- 下降为主征的代酸; ③ pH < 7.40, $\text{HCO}_3^- < 24$ mmol/L, $\text{PaCO}_2 > 40$ mmHg,即以 PaCO_2 升高、 HCO_3^- 下降为主征的呼酸 + 代酸。但决不会出现 pH < 7.40、 $\text{PaCO}_2 < 40$ mmHg、 $\text{HCO}_3^- > 24$ mmol/L 的情况。

6.1.2 如果 pH > 7.40,提示血液偏碱,可能存在碱中毒; 原发性酸碱平衡紊乱只有 3 种可能: ① pH > 7.40, $\text{PaCO}_2 < 40$ mmHg, $\text{HCO}_3^- < 24$ mmol/L,即以 PaCO_2 下降为主征的呼碱; ② pH > 7.40, $\text{HCO}_3^- > 24$ mmol/L, $\text{PaCO}_2 > 40$ mmHg,即以 HCO_3^- 升高为主征的代碱; ③ pH > 7.40, $\text{HCO}_3^- > 24$ mmol/L, $\text{PaCO}_2 < 40$ mmHg,即以 PaCO_2 下降、 HCO_3^- 升高为主征的呼碱 + 代碱。但决不会出现 pH > 7.40、 $\text{PaCO}_2 > 40$ mmHg、 $\text{HCO}_3^- < 24$ mmol/L 的情况。

6.1.3 如果 $\text{pH}=7.40$, 提示血液处于中性状态, 但并不代表不存在酸碱平衡紊乱, 此时存在 3 种可能:

- ① $\text{pH}=7.40$, $\text{PaCO}_2 > 40 \text{ mmHg}$, $\text{HCO}_3^- > 24 \text{ mmol/L}$, 即呼酸 + 代碱; ② $\text{pH}=7.40$, $\text{PaCO}_2 < 40 \text{ mmHg}$, $\text{HCO}_3^- < 24 \text{ mmol/L}$, 即呼碱 + 代酸; ③ 正常血气: $\text{pH}=7.40$, $\text{PaCO}_2 = 40 \text{ mmHg}$, $\text{HCO}_3^- = 24 \text{ mmol/L}$, $\text{AG} < 16 \text{ mmol/L}$ 。但决不可能出现以下两种情况: ① $\text{pH}=7.40$, $\text{PaCO}_2 > 40 \text{ mmHg}$, $\text{HCO}_3^- < 24 \text{ mmol/L}$; ② $\text{pH}=7.40$, $\text{PaCO}_2 < 40 \text{ mmHg}$, $\text{HCO}_3^- > 24 \text{ mmol/L}$ 。

判定血液酸碱状态和原发性或主要酸碱平衡紊乱类型至关重要, 这不仅决定了下一步如何选择代偿公式, 更是指导临床对酸碱平衡紊乱给予正确干预的前提条件。

6.2 第二步: 根据代偿情况判断单纯型或混合型酸碱平衡紊乱。经第一步分析, 初步判断出 4 种 SABD 类型(呼酸、代酸、呼碱、代碱)和 4 种混合型酸碱平衡紊乱类型(呼酸 + 代酸、呼碱 + 代碱、呼碱 + 代酸、呼酸 + 代碱)。对于 4 种 SABD, 需进一步分析机体对原发性酸碱平衡紊乱的代偿情况, 以判断是否存在混合型酸碱平衡紊乱。具体方法是: 根据原发性酸碱平衡紊乱类型选择对应的代偿公式, 计算出代偿区间的上、下限; 继发性改变的 PaCO_2 或 HCO_3^- 在代偿区间内可认定为 SABD, 在代偿区间外可认定为混合型酸碱平衡紊乱。常用的代偿公式主要有两种, 即 Caroll 代偿公式^[7]和 Narins 代偿公式^[8]。

6.3 第三步: 根据 AG 值判断 TABD 的类型。如果 $\text{AG} > 16 \text{ mmol/L}$, 则表明伴有 AG 增高型代酸, 提示可能有 TABD。

6.3.1 在判断以呼吸型为原发性或主要酸碱平衡紊乱时(呼酸或呼碱), 要对 HCO_3^- 进行补偿, 计算补偿 HCO_3^- (ΔHCO_3^-), 因为导致 AG 升高的酸性物质消耗了血中的 HCO_3^- , 掩盖了肾脏对呼吸型酸碱平衡紊乱的代偿作用。理论上讲, AG 增量刚好等于 HCO_3^- 消耗量(公式 5)。

$$\Delta \text{HCO}_3^- = \Delta \text{AG} = \text{AG} - 12 \quad (\text{公式 } 5)$$

Gabow^[9]首次提出“潜在 HCO_3^- ”概念, 其定义是假定无 AG 增高型代酸情况下, 未被固定酸中和前的 HCO_3^- 值(公式 6)。

$$\begin{aligned} \text{潜在 } \text{HCO}_3^- &= \text{实测 } \text{HCO}_3^- + \Delta \text{HCO}_3^- \\ &= \text{实测 } \text{HCO}_3^- + \Delta \text{AG} \end{aligned} \quad (\text{公式 } 6)$$

在判断以呼吸型为原发性或主要酸碱平衡紊

乱时, 按呼酸或呼碱代偿公式计算出代偿区间的上、下限; 此时应用潜在 HCO_3^- (而非实测 HCO_3^-) 与计算的代偿上、下限进行比较, 判断是否存在 TABD。

6.3.2 伴 AG 增高时, 经第一步判断为以代谢型为原发性或主要酸碱平衡紊乱时(代酸或代碱), 则无需对 HCO_3^- 进行补偿, 因为呼吸只对此时代谢型酸碱平衡紊乱的综合效应进行代偿。

6.3.3 伴 AG 增高时, 经第一步判断为混合型酸碱平衡紊乱时(呼酸 + 代酸、呼碱 + 代碱、呼碱 + 代酸、呼酸 + 代碱), 无需特殊处理, 在最终诊断时要加上“AG 增高型代酸”。

6.4 第四步: 针对经前 3 步判断为单纯 AG 增高型代酸进行进一步分析, 判断是否同时合并 AG 正常型代酸或代碱。AG 增高必然消耗 HCO_3^- , 造成代酸。AG 的增量用 ΔAG 表示, $\Delta \text{AG} = \text{AG} - 12$; HCO_3^- 的消耗量用 ΔHCO_3^- 表示, $\Delta \text{HCO}_3^- = 24 - \text{HCO}_3^-$ 。单纯 AG 增高型代酸, 理论上 $\Delta \text{AG} \uparrow = \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$, 或者说 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow = 1:1$, 如果 AG 增高型代酸同时合并其他类型酸碱平衡紊乱, 就会出现 $\Delta \text{AG} \uparrow \neq \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$; 但在实际情况下尚需要考虑到非碳酸氢盐缓冲系统的作用和不可测定酸种类的影响, 即 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 实际比值是可变的^[10]。所以, 单纯 AG 增高型代酸时 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow = 1 \sim 1.6:1$ ^[11]。若 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow < 1$, 则提示合并非 AG 增高型代酸; 若 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow > 1.6$, 则说明存在独立的代碱。

理论上, $\text{AG} > 16 \text{ mmol/L}$ 且 $\text{HCO}_3^- < 24 \text{ mmol/L}$ 时应该计算 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值, 但实际上由于 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值同时受到呼吸因素的影响, 因此该步骤仅针对经前 3 步判断为单纯 AG 增高型代酸的进一步分析。笔者认为可以使用标准碳酸氢盐替代实测 HCO_3^- 计算 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值, 因为标准碳酸氢盐是指在标准状态下, 即血液在 $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 血红蛋白氧饱和度为 1.00, PaCO_2 为 40 mmHg 的气体平衡后, 所测得的 HCO_3^- 浓度。标准碳酸氢盐去除的呼吸性因素影响, 标准碳酸氢盐增高或降低只能由代谢性因素变化而来, 因此用标准碳酸氢盐计算的 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值不受呼吸因素的影响, 扩展了其应用范围。但其可行性及科学性还需要基础实验进一步验证。

7 酸碱平衡坐标图

酸碱平衡坐标图有助于更好地理解和分析酸碱平衡紊乱类型, 酸碱平衡坐标图有很多种, Arbus^[12]

提出的平衡坐标图最实用。pH、PaCO₂和HCO₃⁻三者之间一定满足Henderson-Hasselbakh方程式,即已知任意2个参数,第3个参数便可确定。分别以PaCO₂和HCO₃⁻建立直角坐标系,经原点(0,0)和(40,24)点可做一条虚线,虚线上的所有点pH均等于7.40。pH=7.40等位线、PaCO₂=40 mmHg线和HCO₃⁻=24 mmol/L线可将整个图形分成六区,分别为主呼碱区(I)、代碱+呼碱区(II)、主代碱区(III)、主呼酸区(IV)、呼酸+代酸区(V)、主代酸区(VI)。中心六边形区域为酸碱正常区(VII),该区内的pH、PaCO₂和HCO₃⁻值均在各自正常参考范围内。以主代碱区为例,根据代偿公式可添加红、蓝两条线,分别代表代碱的呼吸代偿上、下限(由代偿公式计算得出),凡落在两线之间的点均可诊断为单纯型代碱(A点),而落在两线之外的点,依其偏向,可诊断为以代碱为主的DABD,如代碱+呼碱、代碱+呼酸。通过读取(PaCO₂, HCO₃⁻)或(PaCO₂, 潜在HCO₃⁻)点在酸碱平衡坐标图上的位置,便可实现对酸碱平衡紊乱类型的快速判断。

8 案例分析(图1)

8.1 案例1: pH为7.50, PaCO₂为48 mmHg, HCO₃⁻为36 mmol/L。

分析:3个参数均不在其正常参考范围内,提示存在酸碱平衡紊乱。第一步:pH>7.40, HCO₃⁻>24 mmol/L, PaCO₂>40 mmHg,初步诊断代碱为原发性酸碱平衡紊乱因素。第二步:将HCO₃⁻=36 mmol/L代入代碱的Narins代偿公式PaCO₂=40+(HCO₃⁻-24)×(0.4~0.9),计算出PaCO₂的代偿区间为44.8~50.8 mmHg。患者实测PaCO₂为48 mmHg,刚好在代偿区间内,因此最终诊断为单纯型代碱(代偿期)。

8.2 案例2: pH为7.50, PaCO₂为20 mmHg, HCO₃⁻为15 mmol/L, AG为22 mmol/L。

分析:4个参数均异常,提示存在酸碱平衡紊乱。第一步:pH>7.40,表明碱中毒为原发性或主要酸碱平衡紊乱,是导致pH偏碱的首要因素;根据PaCO₂<40 mmHg, HCO₃⁻<24 mmol/L,初步诊断呼碱为原发性酸碱平衡紊乱因素。第二步:将PaCO₂=20 mmHg代入慢性呼碱的Caroll代偿公式HCO₃⁻=24-(40-PaCO₂)×0.5±2.5,计算出HCO₃⁻的代偿区间为14~16 mmol/L。第三步:AG>16 mmol/L,说明同时伴有AG增高型代酸。在判断以呼吸型为原发性或主要酸碱平衡紊乱时(本例属呼碱),要对HCO₃⁻进行补偿,计算潜在HCO₃⁻,潜在HCO₃⁻=

实测HCO₃⁻+(AG-12)=25;然后用潜在HCO₃⁻替代实测HCO₃⁻,与第二步计算的代偿上、下限进行比较,潜在HCO₃⁻大于代偿上限,说明存在使HCO₃⁻升高的独立因素,即存在代碱。故最终诊断为呼碱型TABD,即慢性呼碱+代碱+代酸(AG增高型)。

8.3 案例3: pH为7.15, PaCO₂为15 mmHg, HCO₃⁻为5 mmol/L, AG为25 mmol/L。

分析:4个参数均不在正常范围,提示存在酸碱平衡紊乱。第一步:pH<7.40, HCO₃⁻<24 mmol/L, PaCO₂<40 mmHg,初步诊断代酸为原发性酸碱平衡紊乱因素。第二步:将HCO₃⁻=5 mmol/L代入代酸的Narins代偿公式PaCO₂=40-(24-HCO₃⁻)×(1~1.4),计算PaCO₂代偿区间为13.4~21.0 mmHg。患者实测PaCO₂为15 mmHg,刚好在代偿区间内,提示为代酸(代偿期)。第三步:经前2步可判断原发性酸碱平衡紊乱类型为代谢性的(非呼吸性),不必计算潜在HCO₃⁻,故此步骤可跳过。第四步:AG>16 mmol/L,提示存在AG增高型代酸,因经前3步诊断为单纯代酸,因此还需计算ΔAG↑/ΔHCO₃⁻↓,进一步判断HCO₃⁻下降是否由AG升高单一因素引起。经计算ΔAG↑/ΔHCO₃⁻↓=0.68<1,提示AG增量不足以引起HCO₃⁻明显下降,说明存在非AG增高型代酸,两者共同作用使HCO₃⁻明显下降。故最终诊断为代酸(AG增高型)+代酸(非AG增高型)。

8.4 案例4: pH为7.40, PaCO₂为29.4 mmHg, HCO₃⁻为17.8 mmol/L, AG为21 mmol/L。

分析:尽管pH=7.40在正常范围内,但刚好处在酸碱的分界线上,由于PaCO₂、HCO₃⁻均明显低于其正常参考范围下限,因此必然存在酸碱平衡紊乱,而且是混合型酸碱平衡紊乱,两种酸碱平衡紊乱的作用效果相互抵消,造成pH既不偏酸,也不偏碱。第一步:PaCO₂<40 mmHg提示存在呼碱, HCO₃⁻<24 mmol/L提示存在代酸,初步诊断为呼碱+代酸。第二步:因为原发性酸碱平衡紊乱不论是按照呼碱还是代酸分析,最终诊断均为呼碱+代酸,故此步骤略过。第三步:AG>16 mmol/L,提示存在AG增高型代酸,可基本确定诊断为呼碱+代酸(AG增高型)。第四步:因为此案例并非单纯AG增高型代酸,呼碱本身会对ΔAG↑/ΔHCO₃⁻↓比值产生影响,所以此步骤的分析并不适用。故最终诊断为呼碱+代酸(AG增高型)。

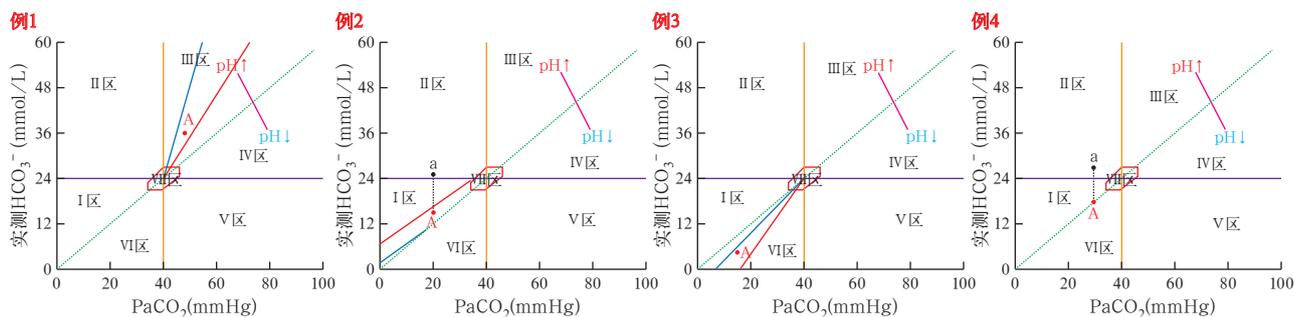


图1 采用“四参四步”程序化分析法分析酸碱平衡紊乱 I~VII区分别代表主呼碱区、代碱+呼碱区、主代碱区、主呼酸区、呼酸+代酸区、主代酸区及酸碱正常区；绿虚线为 $\text{pH}=7.40$ 等值线，橙实线为 $\text{PaCO}_2=40$ mmHg线(1 mmHg=0.133 kPa)，紫实线为 $\text{HCO}_3^- = 24$ mmol/L线；红点A代表 $(\text{PaCO}_2, \text{HCO}_3^-)$ ，黑点a代表 $(\text{PaCO}_2, \text{潜在HCO}_3^-)$ ；红实线代表代偿上限，蓝实线代表代偿下限；红蓝实线之间的区域为代偿区间。案例1： $\text{pH} 7.50$ ， $\text{PaCO}_2 48$ mmHg， $\text{HCO}_3^- 36$ mmol/L；选择Narins代偿公式计算，提示患者 PaCO_2 在代偿区间内，故诊断为单纯型代碱代偿期。案例2： $\text{pH} 7.50$ ， $\text{PaCO}_2 20$ mmHg， $\text{HCO}_3^- 15$ mmol/L， $\text{AG} 22$ mmol/L；选择Caroll代偿公式计算，提示潜在 HCO_3^- 大于代偿上限，结合 $\text{AG} > 16$ mmol/L，故诊断为呼碱型三重混合型酸碱平衡紊乱，即慢性呼碱+代碱+代酸(AG增高型)。案例3： $\text{pH} 7.15$ ， $\text{PaCO}_2 15$ mmHg， $\text{HCO}_3^- 5$ mmol/L， $\text{AG} 25$ mmol/L；选择Narins代偿公式计算，提示患者 PaCO_2 在代偿区间内，结合 $\text{AG} > 16$ mmol/L、 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow < 1$ ，故诊断为代酸(AG增高型)+代酸(非AG增高型)。案例4： $\text{pH} 7.40$ ， $\text{PaCO}_2 29.4$ mmHg， $\text{HCO}_3^- 17.8$ mmol/L， $\text{AG} 21$ mmol/L； pH 在正常范围内，但 PaCO_2 、 HCO_3^- 均低于其正常参考范围下限，结合 $\text{AG} > 16$ mmol/L，故诊断为呼碱+代酸(AG增高型)

9 总结

酸碱平衡紊乱分析应遵从以下步骤：①根据 pH 定酸、碱，结合 PaCO_2 和 HCO_3^- 确定原发性或主要酸碱平衡紊乱类型；②根据原发性或主要酸碱平衡紊乱类型选用相应的代偿公式，确定有无混合型酸碱平衡紊乱；③如果经第一步认定原发性酸碱平衡紊乱类型为呼酸或呼碱，同时伴有 AG 增高型代酸，应该计算潜在 HCO_3^- 替代实测 HCO_3^- 与经代偿公式计算所得的代偿区间进行比较，进而判断酸碱平衡紊乱类型；④针对经前3步判断为单纯型代酸(AG增高型)的数据进一步分析，计算 $\Delta \text{AG} \uparrow / \Delta \text{HCO}_3^- \downarrow$ 比值，判断是否同时合并非AG增高型代酸或代碱。并非所有案例都能完成所有步骤，但经此四步的程序化分析基本可以判断除AG正常型代酸+代碱以外的酸碱平衡紊乱类型。

需要强调的是：动脉血气分析虽对酸碱平衡紊乱的判断甚为重要，但不能单凭血气分析结果作出诊断，必须结合临床资料进行综合分析。当血气分析结果与临床实际不符时，应进行双重核对，既要分析血气参数是否有误、酸碱分析过程是否正确，也要分析临床病史、治疗信息是否有疏漏。必要情况下，应对生化指标和动脉血气分析进行多次复查，动态观察参数变化，以免临床判断失误。

综上所述，在酸碱平衡紊乱的判断过程中，特别是对混合型酸碱平衡紊乱的判断较为繁杂，而且酸碱平衡紊乱的代偿公式也不便于记忆，可以借助酸碱平衡坐标图实现对酸碱平衡紊乱类型的快速判断，也可将人的分析思维转化为计算机语言，开发出酸碱平衡紊乱分析软件^[13]，借助计算机实现对酸碱

平衡紊乱类型的判断。

参考文献

- [1] McNamara J, Worthley LI. Acid-base balance: part I. Physiology [J]. Crit Care Resusc, 2001, 3 (3): 181-187.
- [2] 张海鹏. 酸碱平衡紊乱[M]//王迪浚, 金惠铭. 人体病理生理学. 3版. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 300-316.
- [3] Zhang HP. Acid-base disturbance [M]//Wang DX, Jin HM. Human pathophysiology. 3rd ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008: 300-316.
- [4] Henderson LJ. The theory of neutrality regulation in the animal organism [J]. Am J Physiol, 1908, 21: 427-448.
- [5] Haber RJ. A practical approach to acid-base disorders [J]. West J Med, 1991, 155 (2): 146-151.
- [6] Adams LG, Polzin DJ. Mixed acid-base disorders [J]. Vet Clin North Am Small Anim Pract, 1989, 19 (2): 307-326.
- [7] 张路, 王薇, 王治国. 全国血气和酸碱分析检测项目参考区间现状调查 [J]. 中华危重病急救医学, 2015, 27(10): 816-820. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2015.10.007.
- [8] Zhang L, Wang W, Wang ZG. Investigation of reference intervals of blood gas and acid-base analysis assays in China [J]. Chin Crit Care Med, 2015, 27 (10): 816-820. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2015.10.007.
- [9] Carroll HJ, Oh MS. Water, electrolyte, and acid-base metabolism [M]. Philadelphia: Lippincott, 1978: 287-289.
- [10] Narins RG, Emmett M. Simple and mixed acid-base disorders: a practical approach [J]. Medicine (Baltimore), 1980, 59 (3): 161-187.
- [11] Gabow PA. Disorders associated with an altered anion gap [J]. Kidney Int, 1985, 27 (2): 472-483. DOI: 10.1038/ki.1985.34.
- [12] Reddy P, Mooradian AD. Clinical utility of anion gap in deciphering acid-base disorders [J]. Int J Clin Pract, 2009, 63 (10): 1516-1525. DOI: 10.1111/j.1742-1241.2009.02000.x.
- [13] 游怀舟, 顾勇, 林善镛. 酸碱平衡紊乱 [M]//陈灏珠, 林果为, 王吉耀. 实用内科学. 14版. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 962-976.
- [14] You HZ, Gu Y, Lin ST. Acid-base disturbance [M]//Chen HZ, Lin GW, Wang JY. Practice of internal medicine. 14th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 962-976.
- [15] Arbus GS. An *in vivo* acid-base nomogram for clinical use [J]. Can Med Assoc J, 1973, 109 (4): 291-293.
- [16] 陈波, 黄海樱, 周强, 等. 血气酸碱失衡分析软件的开发与应用评价 [J]. 中华危重病急救医学, 2014, 26 (11): 832-835. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2014.11.013.
- [17] Chen B, Huang HY, Zhou Q, et al. Development and practice evaluation of blood acid-base imbalance analysis software [J]. Chin Crit Care Med, 2014, 26 (11): 832-835. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2014.11.013.

(收稿日期: 2017-02-13)