

# 感染性休克患者静动脉 CO<sub>2</sub> 含量差的主成分分析

万茜茜<sup>1,2</sup> 刘瑞婷<sup>1</sup> 李媛媛<sup>1</sup> 翁利<sup>1</sup> 彭劲民<sup>1</sup> 杜斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国医学科学院北京协和医学院 北京协和医院内科重症监护室, 北京 100730

<sup>2</sup> 嘉兴市第二医院重症监护室, 嘉兴 314000

通信作者: 杜斌, Email: dubin98@gmail.com

**【摘要】目的** 提取感染性休克患者静动脉 CO<sub>2</sub> 含量差 [C(v-a)CO<sub>2</sub>] 的主成分 (PC), 比较这些主成分对 [C(v-a)CO<sub>2</sub>] 的数值的贡献程度。**方法** 回顾性纳入北京协和医院内科重症监护室收治的感染性休克患者, 在 Swan-Ganz 肺动脉漂浮导管的监测下分析容量负荷试验前后 1 h 内的所有成对动脉和混合静脉血气分析。采用主成分分析提取 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的主成分。采用 Spearman 相关性分析评估各主成分与 C(v-a)CO<sub>2</sub>、心输出量之间的相关性。单因素分析 28 d 存活组和病死组各主成分的差异。**结果** 104 名感染性休克患者的 504 对血气分析纳入分析。患者的中位数年龄 62 (48, 71) 岁, 男性 59.6% (62/104)。共有 4 个主成分, 共解释总方差的 77.7%。PC1 包含 PaO<sub>2</sub>, PvO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub> 和 SvO<sub>2</sub>, PC2 包含 PHa 和 PHv, PC3 包含 Hb 和 Het, PC4 包含 PaCO<sub>2</sub> 和 PvCO<sub>2</sub>。28 d 存活和病死组的 PC4 差异有统计学意义。PC4 可较弱预测 28 d 病死率 (AUROC 0.634, 95%CI 0.527~0.741, P=0.015)。**结论** 在感染性休克患者中, 动静脉 [C(v-a)CO<sub>2</sub>] 主要由氧合、pH、Hb、CO<sub>2</sub> 分压差等四个维度的主成分构成, 其中, 静动脉 CO<sub>2</sub> 分压差 [P(v-a)CO<sub>2</sub>] 可以较弱地预测 28 d 病死率。

**【关键词】** 感染性休克; 静动脉 CO<sub>2</sub> 含量差; 静动脉 CO<sub>2</sub> 分压差; 主成分分析; 休克; 容量负荷试验; 血气分析; 混合静脉

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2500801)

DOI:10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2024.04.005

## Principal component analysis of venous to arterial CO<sub>2</sub> content gap in septic shock patients

Wan Xixi<sup>1,2</sup>, Liu Ruiting<sup>1</sup>, Li Yuanyuan<sup>1</sup>, Weng Li<sup>1</sup>, Peng Jinmin<sup>1</sup>, Du Bin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Medical Intensive Care Unit, Peking Union Medical College Hospital, Peking Union Medical College and Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China. <sup>2</sup>Department of Intensive Care Unit, The Second Hospital of Jiaxing, Jiaxing, Zhejiang Province, 314000, China

Corresponding author: Du Bin, Email: dubin98@gmail.com

**【Abstract】Objective** The principal components (PC) of venous-to-arterial carbon dioxide content difference (C(v-a)CO<sub>2</sub>) were extracted in septic shock patients, in order to compare the contribution of the principal components to C(v-a)CO<sub>2</sub>. **Methods** Septic shock patients monitored by Swan Ganz floating catheter in the Medical Intensive Care Unit of Peking Union Medical College Hospital were included in the retrospective study. All pairs of arterial and mixed-venous blood gases within 1 h before and after a flood challenge were included in the analyses. The principal component method was used to extract the components of C(v-a)CO<sub>2</sub>. Spearman correlation analysis was used to evaluate the correlation between the components and C(v-a)CO<sub>2</sub>, and the correlation between the components and cardiac output. The differences of the components between the 28-day survival group and 28-day death group were analyzed by univariate analysis. **Results** A total of 504 pairs of blood gases in 104 septic shock patients were included in the analyses. The median age of patients was 62 years (IQR, 48 to 71), and 59.6% (62/104)

were men. Four principal components were extracted and the components account for 77.7% of variance. PC1 included PaO<sub>2</sub>, PvO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub> and SvO<sub>2</sub>. PC2 included pH<sub>a</sub> and pH<sub>v</sub>. PC3 included Hb and Hct. PC4 included PaCO<sub>2</sub> and PvCO<sub>2</sub>. There was a significant difference in PC4 between the two group. PC4 could weakly predict the 28-day death (AUROC 0.634, 95%CI 0.527-0.741,  $P=0.015$ ). **Conclusions** In patients with infectious shock, arteriovenous [C(v-a)CO<sub>2</sub>] consists of principal components of four dimensions: oxygenation, pH, Hb, and CO<sub>2</sub> partial pressure difference. Arterial CO<sub>2</sub> partial pressure difference [P(v-a)CO<sub>2</sub>] weakly predicts 28-d morbidity and mortality.

**【 Keywords 】** Septic shock; Venous-to-arterial carbon dioxide content difference; Venous-to-arterial carbon dioxide tension difference; Principal component analysis; Shock; Fluid challenge; Blood gas analysis; Mixed venous.

**Fund program:** National Key R&D Program of China (2021YFC2500801)

DOI:10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2024.04.005

感染性休克患者中, 静动脉 CO<sub>2</sub> 差 (CO<sub>2</sub> gap) 可被看作组织低灌注的敏感指标<sup>[1]</sup>。静动脉 CO<sub>2</sub> 差可表示为静动脉 CO<sub>2</sub> 含量差 (C(v-a)CO<sub>2</sub>) 或分压差 (P(v-a)CO<sub>2</sub>)。P(v-a)CO<sub>2</sub> 是构成 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的一部分, 床旁计算简便, 是常用于临床的指标。然而, 由于霍尔登效应, 有时 P(v-a)CO<sub>2</sub> 并不能真实反映 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的改变<sup>[2]</sup>。根据 Fick 定律 [CO<sub>2</sub> 产生量 (VCO<sub>2</sub>) = 心输出量 (CO) × C(v-a)CO<sub>2</sub>], VCO<sub>2</sub> 不变的情况下, C(v-a)CO<sub>2</sub> 是更能准确反映 CO 的指标。血液中 CO<sub>2</sub> 含量 (CCO<sub>2</sub>) 主要包括三部分形式的 CO<sub>2</sub>: 碳酸氢盐, 物理溶解 (主要是 PCO<sub>2</sub> 分压) 和化学结合<sup>[3]</sup>。尽管 CCO<sub>2</sub> 的测量和模拟计算均很复杂<sup>[4-6]</sup>, 难以床旁便捷使用, 然而, C(v-a)CO<sub>2</sub> 比 P(v-a)CO<sub>2</sub> 要更准确地代表 CO<sub>2</sub> gap。因此, 探索 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的临床价值仍具有重要意义。

主成分分析是一种数据降维技术, 能将大量相关变量转化为很少的不相关变量, 这些无关变量成为主成分<sup>[7]</sup>。本研究的目的是使用统计方法分析提取感染性休克患者 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的主成分, 评估这些成分在 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的数值中的贡献, 且评估这些成分与治疗效果的关联。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究为回顾性研究。获得了北京协和医院伦理委员会的批准 (伦理号 JS-3480D) 并免除了知情同意。筛选 2016 年 10 月至 2020 年 10 月期间北京协和医院 MICU 收治的感染性休克患者。

### 1.2 研究方法

纳入标准: (1) 符合感染性休克 3.0 诊断标准<sup>[8]</sup>。(2) 患者均置入 Swan-Ganz 肺动脉漂浮导管。(3)

患者行容量负荷试验。(4) 患者同时存在扩容前后的动脉和混合静脉血气分析。排除标准: 未满 18 周岁或年龄超过 80 周岁; 妊娠。扩容后 CO 增长 10% 定义为有容量反应性。根据纳 / 排标准共筛选出 104 名患者。同时收集人口学、血流动力学、实验室检查、结局指标。

将患者扩容前和扩容后 1 h 内的所有成对血气中的动静脉 pH、PO<sub>2</sub>、PCO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、Hb、Hct、体温纳入主成分分析, 得出这些变量的主成分 (PC)。计算出每个血气分析的主成分数值。

### 1.3 统计学方法

统计软件使用 SPSS 26.0 软件、GraphPad Prism 7。分类变量采用例 (百分比) 表示, 定量资料用 Shapiro-Wilk 检测正态分布。符合正态分布的定量资料用均数 ± 标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示, 不符合正态分布的使用中位数 (四分位数间距)  $M(IQR)$ 。正态分布数据组间比较采用 Student's *t* 检验; 非正态分布的数据组间比较采用 Mann-Whitney *U* 检验。采用 Spearman 相关性分析评估主成分与 CO 之间、CCO<sub>2</sub> 之间的相关性。CO<sub>2</sub> 含量采用 Giovannini 的方法计算。使用 ROC 曲线判断扩容前末次成对血气分析的主成分对 28 d 病死率的预测价值。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

研究共纳入 104 名患者, 共分析 504 对动静脉血气分析。93.2% (97/104) 的患者有 5 对血气分析。患者的中位数年龄 62 岁 (48, 71), 男性 59.6% (62/104)。患者入院时 SOFA 评分为 (12 ± 3) 分, 患者最常见的感染来源为肺部 (61.5%), 28 d 病死率 56.7% (59/104)。P(v-a)CO<sub>2</sub> 中位数为 5.0 (3.0,

6.8) mmHg(1 mmHg=0.133 kPa), C(v-a)CO<sub>2</sub> 的中位数为 2.57 (1.73, 3.64)mL/100 mL。

主成分分析的碎石图见图 1。选取特征值大于 1 的碎石为主成分。构成 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的共有 4 个主成分(图 1, 表 2)。主成分 1 (PC1) 主要包括 PaO<sub>2</sub>, PvO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub> 和 SvO<sub>2</sub>, 解释整体变量的 28.7%; PC2 主要包括 pH<sub>a</sub> 和 pH<sub>v</sub>, 可解释整体变量的 22%; PC3 主要

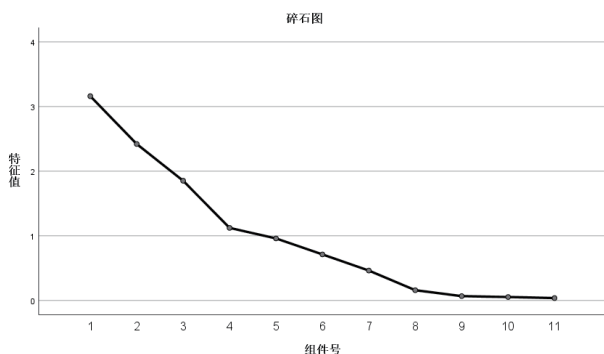


图 1 C(v-a)CO<sub>2</sub> 主成分碎石图

Fig 1 scree plots of principal components of C(v-a)CO<sub>2</sub>

表 1 患者的基线临床特征 (n=104)

Table 1 The baseline clinical characteristics of the patients (n=104)

基线特征	数值 (n = 104)
年龄 [岁, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	62 (48, 71)
性别 (男) (n, %)	62 (60)
体表面积 (m <sup>2</sup> )	1.83 (1.71, 1.93)
APACHE II 评分	25 ± 8
SOFA 评分	12 ± 3
基础疾病 (n)	
高血压	35
冠心病	12
糖尿病	20
哮喘、COPD	9
慢性肾功能不全	15
感染灶 (n)	
肺部	64
血流	11
腹腔	21
平均动脉压 [mmHg, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	81(75, 86)
心率 (次/min)	116(23)
心输出量 [L/min, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	6.5(5, 8.4)
pH[M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	7.39 (7.34, 7.44)
乳酸 [mmol/L, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	2.8(1.6, 4.2)
SvO <sub>2</sub> [%, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	65.5(60.5, 74.2)
P(v-a)CO <sub>2</sub> [mmHg, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	5(3, 6.8)
C(v-a)CO <sub>2</sub> [mL/100 mL, M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	2.57(1.73~3.64)
机械通气 (n)	100
使用激素 (n)	50
血管活性药物	
NE (n)	104
NE[μg/(kg·min), M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )]	0.5 (0.3, 1.1)
ICU 病死率 (n, %)	59 (56.7)

NE: 去甲肾上腺素

包含 Hb 和 Hct, 可解释整体变量的 16.8%; PC4 主要包含 PaCO<sub>2</sub> 和 PvCO<sub>2</sub>, 解释整体变量的 10.2%。四个主成分共解释整体变量的 77.7%。

C(v-a)CO<sub>2</sub>、CO 与各主成分的相关性见表 3。C(v-a)CO<sub>2</sub> 的主成分中, 与 C(v-a)CO<sub>2</sub> 数值大小呈显著相关性的是 PC1 (Spearman r 0.13, 95%CI 0.04~0.22, P=0.003)、PC3 (Spearman r 0.21, 95%CI 0.12~0.29, P<0.001) 和 PC4 (Spearman r -0.46, 95%CI -0.53~-0.39, P<0.001)。与 CO 数值大小呈显著相关性的是 PC2 (Spearman r -0.21, 95%CI -0.29~-0.12, P<0.001) 和 PC3 (Spearman r -0.12, 95%CI -0.21~-0.03, P=0.01)。28 d 存活与病死患者的 C(v-a)CO<sub>2</sub> 差异无统计学意义。存活组与病死组的 PC4 差异有统计学意义 [(58 ± 12) vs. (52 ± 10), P=0.019]。PC4 预测病死率的 ROC 曲线见图 2 (AUROC 0.634, 95%CI 0.527~0.741, P=0.015)。PC1、PC2 和 PC3 均不能预测病死率 (P > 0.05)。

表 2 主成分的构成

Table 2 Composition of PCs

指标	PC1	PC2	PC3	PC4
方差占比 (%)	28.7	22.0	16.8	10.2
pH <sub>a</sub>	0.051	0.451	0.027	0.058
pH <sub>v</sub>	0.063	0.447	0.033	0.072
PaO <sub>2</sub>	0.344	0.14	-0.128	0.126
PvO <sub>2</sub>	0.314	-0.161	0.059	-0.009
SaO <sub>2</sub>	0.357	0.128	-0.078	0.065
SvO <sub>2</sub>	0.351	-0.059	0.107	0.002
PaCO <sub>2</sub>	0.076	0.091	-0.059	0.545
PvCO <sub>2</sub>	0.06	0.116	-0.042	0.55
T	-0.024	0.232	0.211	0.062
Hb	-0.013	0.001	0.453	-0.082
Hct	-0.017	0.045	0.442	-0.01

注: 灰色数值表示载荷小于 0.3

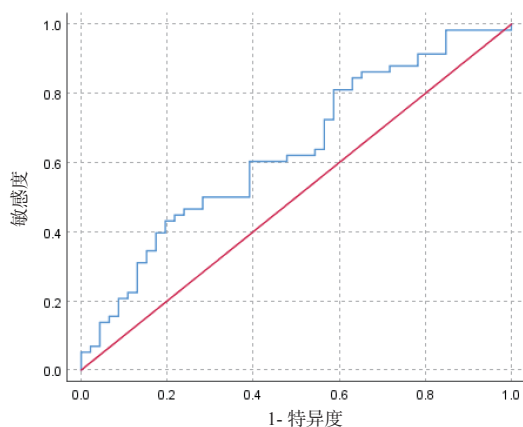
表 3 C(v-a)CO<sub>2</sub> 和 CO 与各主成分之间的的相关性 (n=504)

Table 3 The overall correlations between PCs-C(v-a)CO<sub>2</sub> and PCs-CO (n=504)

指标	CCO <sub>2</sub>	95%CI	P 值	CO	95%CI	P 值
PC1	0.13	0.04~0.22	0.003	0.05	-0.04~0.13	0.31
PC2	0.09	-0.00~-0.17	0.05	-0.21	-0.29~-0.12	<0.001
PC3	0.21	0.12~0.29	<0.001	-0.12	-0.21~-0.03	0.01
PC4	-0.46	-0.53~-0.39	<0.001	0.03	-0.06~-0.12	0.51

### 3 讨论

本研究发现, 在感染性休克患者中, 构成 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的变量可分解成四个维度的主成分, 四个维度分别代表氧合、pH、Hb、CO<sub>2</sub> 分压差等。C(v-a)CO<sub>2</sub> 数值的大小主要与氧合、Hb 和 CO<sub>2</sub> 分



AUROC 曲线下面积为 0.634, 95% 置信区间 (0.527, 0.741),  $P=0.015$

图 2 PC4 预测病死率的 ROC 曲线

Fig 2 Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis presentation of PC4 to predict death

压差相关。CO<sub>2</sub> 分压差可较弱预测 28 d 病死率。

根据 Fick 定律 [ $VCO_2=CO \times C(v-a)CO_2$ ], 当  $VCO_2$  处于稳定状态时, CO 下降可导致 CO<sub>2</sub> gap 增加<sup>[9]</sup>。基于此原理, CO<sub>2</sub> gap 可被用作组织低灌注的敏感指标。由于床旁使用简单, PCO<sub>2</sub> gap 常被应用于临床。然而由于霍尔登效应的影响, P(v-a)CO<sub>2</sub> 不能真实反映 C(v-a)CO<sub>2</sub>。C(v-a)CO<sub>2</sub> 的测量和计算均很复杂, 造成其应用受限。本研究使用主成分分析法提取了感染性休克患者 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的构成成分。将组成 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的多个变量分为四个维度, 分别为氧合情况、pH、Hb 和 P(v-a)CO<sub>2</sub>, 共解释总方差的 77.7%。C(v-a)CO<sub>2</sub> 与氧合情况、Hb 和 P(v-a)CO<sub>2</sub> 呈弱相关性, 与 pH 无明显相关性。说明 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的变化主要和这三个主成分相关, 血液酸碱度对 C(v-a)CO<sub>2</sub> 的数值无显著影响。Bidani 等<sup>[10]</sup> 研究表明, Hct 由 45% 降至 30% 会导致最大 25%CO<sub>2</sub> 产生量的减少, Hct 由 45% 降至 15% 会导致最大 50%CO<sub>2</sub> 产生量的减少。C(v-a)CO<sub>2</sub> 与氧合、Hb 的关联也与霍尔登效应相符<sup>[2,11]</sup>, C(v-a)CO<sub>2</sub> 和 P(v-a)CO<sub>2</sub> 之间的差别主要是霍尔登效应, 而单纯血液的氧合情况并不影响 CO<sub>2</sub> 的结合或释放, 必须有 Hb 的参与才导致霍尔登效应从而对 C(v-a)CO<sub>2</sub> 造成影响<sup>[6, 12-13]</sup>。本研究结果与 Giovannini 的 CCO<sub>2</sub> 计算步骤相一致<sup>[4]</sup>。Giovannini 使用迭代的方法将 CCO<sub>2</sub> 的计算分为两部分: 一部分由动脉至静脉的 CO<sub>2</sub> 分压差组成; 一部分由霍尔登效应组成。

主成分分析是一种数据降维技术, 将大量相

关变量转化为一组很少的不相关变量 (即主成分), 并且尽可能保留原始数据集的信息, 对大型数据集的处理效率高。本研究结果表明, 在氧合、pH、Hb、P(v-a)CO<sub>2</sub> 这四个维度的主成分中, 仅由 Hb 代表的 PC3 与 CO 呈弱相关性, Hb 是与灌注最为相关的指标, 而其他三个主成分与 CO 均无相关性, 但 Hb 与病死率无相关性。Hb 水平增加后, 通过改善血管内血容量和携氧能力而改善全身灌注和代谢。这一结果与之前的研究相符: Elizalde 等<sup>[14]</sup> 研究表明在需补液治疗的患者中, Hb 可以提高全身血管阻力。扩容后, 由于 Hb 可能会稀释导致浓度下降, 可能影响全身血流动力学。梁立丰等<sup>[15]</sup> 研究表明 Hct 与不良预后相关。然而 Holst 等<sup>[16]</sup> 研究表明, 感染性休克患者中 Hb 的高目标和低目标治疗的 90 d 病死率差异无统计学意义。

P(v-a)CO<sub>2</sub> 可预测 28 d 病死率。这与先前的研究一致。Muller 等<sup>[17]</sup> 研究表明感染性休克在 12 h 内持续的高 P(cv-a)CO<sub>2</sub> 有更高的 28 d 病死率。Gao 等<sup>[18]</sup> 研究显示感染性休克患者 ( $n=145$ ) PcvCO<sub>2</sub>/Ca-cvO<sub>2</sub> 是 28 d 病死率的独立预测指标。2020 年 Duhailib 的一项包含 2 155 名休克患者的 Meta 分析提示, CO<sub>2</sub> gap 的升高与更高的病死率相关 ( $OR$  2.22; 95%CI 1.3~3.82;  $P=0.004$ )。由于床旁 PCO<sub>2</sub> 计算方便, 可广泛在床旁使用。

本研究的价值在于探索了各成分对 C(v-a)CO<sub>2</sub> 数值的贡献, 并发现了其中的相关性, 这与临床实际密切相关。但本研究有一些局限性。首先, 本研究是一个单中心研究, 难以推广结果至其他中心。但本研究中血气分析数量已满足分析变量的 10 倍, 可认为此样本量建立的模型相对具有稳健性。其次, 主成分解释其含义往往具有一定的模糊性, 不如原始样本完整。本研究中并非所有患者做血气分析的次数均相同, 结果可能产生偏倚。最后, 本研究纳入的均是感染性休克患者, 结论可否推广至其他类型的休克患者, 仍需进一步研究。

总之, 在感染性休克患者中, C(v-a)CO<sub>2</sub> 主要由氧合、pH、Hb、P(v-a)CO<sub>2</sub> 等四个维度的主成分构成, 但主要与 Hb 和 P(v-a)CO<sub>2</sub> 相关。其中, P(v-a)CO<sub>2</sub> 可以较弱地预测 28 d 病死率。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 万茜茜、李媛媛: 研究设计、论文撰写; 万茜茜、刘瑞婷: 数据收集及整理、统计学分析; 翁利、彭劲民、杜斌: 论文修改

## 参 考 文 献

- [1] Endo Y, Hirokawa T, Miyasho T, et al. Monitoring the tissue perfusion during hemorrhagic shock and resuscitation: tissue-to-arterial carbon dioxide partial pressure gradient in a pig model[J]. *J Transl Med*, 2021, 19(1): 390. DOI: 10.1186/s12967-021-03060-5.
- [2] Teboul JL, Scheeren T. Understanding the Haldane effect[J]. *Intensive Care Med*, 2017, 43(1): 91-93. DOI: 10.1007/s00134-016-4261-3.
- [3] Ltaief Z, Schneider AG, Liaudet L. Pathophysiology and clinical implications of the veno-arterial PCO<sub>2</sub> gap[J]. *Crit Care*, 2021, 25(1): 318. DOI: 10.1186/s13054-021-03671-w.
- [4] Giovannini I, Chiarla C, Boldrini G, et al. Calculation of venoarterial CO<sub>2</sub> concentration difference[J]. *J Appl Physiol*, 1993, 74(2): 959-964. DOI: 10.1152/jappl.1993.74.2.959.
- [5] Cavaliere F, Giovannini I, Chiarla C, et al. Comparison of two methods to assess blood CO<sub>2</sub> equilibration curve in mechanically ventilated patients[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2005, 146(1): 77-83. DOI: 10.1016/j.resp.2004.11.008.
- [6] Visser BF. Pulmonary diffusion of carbon dioxide[J]. *Phys Med Biol*, 1960, 5: 155-166. DOI: 10.1088/0031-9155/5/2/305.
- [7] Jolliffe IT, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2016, 374(2065): 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [8] Singer M, Deutschman CS, Seymour CW, et al. The third international consensus definitions for sepsis and septic shock (sepsis-3)[J]. *JAMA*, 2016, 315(8): 801-810. DOI: 10.1001/jama.2016.0287.
- [9] Brandi LS, Bertolini R, Pieri M, et al. Comparison between cardiac output measured by thermodilution technique and calculated by O<sub>2</sub> and modified CO<sub>2</sub> Fick methods using a new metabolic monitor[J]. *Intensive Care Med*, 1997, 23(8): 908-915. DOI: 10.1007/s001340050431.
- [10] Bidani A, Crandall ED. Analysis of the effects of hematocrit on pulmonary CO<sub>2</sub> transfer[J]. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 1982, 53(2): 413-418. DOI: 10.1152/jappl.1982.53.2.413.
- [11] Loeppky JA, Luft UC, Fletcher ER. Quantitative description of whole blood CO<sub>2</sub> dissociation curve and Haldane effect[J]. *Respir Physiol*, 1983, 51(2): 167-181. DOI: 10.1016/0034-5687(83)90038-5.
- [12] May AG, Omecinski KS, Frankowski BJ, et al. Effect of hematocrit on the CO<sub>2</sub> removal rate of artificial lungs[J]. *ASAIO J*, 2020, 66(10): 1161-1165. DOI: 10.1097/MAT.0000000000001140.
- [13] Saludes P, Proença L, Gruartmoner G, et al. Central venous-to-arterial carbon dioxide difference and the effect of venous hyperoxia: a limiting factor, or an additional marker of severity in shock?[J]. *J Clin Monit Comput*, 2017, 31(6): 1203-1211. DOI: 10.1007/s10877-016-9954-1.
- [14] Elizalde JI, Moitinho E, García-Pagán JC, et al. Effects of increasing blood hemoglobin levels on systemic hemodynamics of acutely anemic cirrhotic patients[J]. *J Hepatol*, 1998, 29(5): 789-795. DOI: 10.1016/s0168-8278(98)80260-2.
- [15] 梁立丰, 张文娟. 预测重症患者院内心脏骤停列线图的建立与验证 [J]. *中华急诊医学杂志*, 2023, 32(1): 38-45. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2023.01.007.
- [16] Holst LB, Haase N, Wetterslev J, et al. Lower versus higher hemoglobin threshold for transfusion in septic shock[J]. *N Engl J Med*, 2014, 371(15): 1381-1391. DOI: 10.1056/NEJMoa1406617.
- [17] Muller G, Mercier E, Vignon P, et al. Prognostic significance of central venous-to-arterial carbon dioxide difference during the first 24 hours of septic shock in patients with and without impaired cardiac function[J]. *Br J Anaesth*, 2017, 119(2): 239-248. DOI: 10.1093/bja/aex131.
- [18] Gao XH, Cao W, Li PJ. Pcv-aCO<sub>2</sub>/Ca-cvO<sub>2</sub> combined with arterial lactate clearance rate as early resuscitation goals in septic shock[J]. *Am J Med Sci*, 2019, 358(3): 182-190. DOI: 10.1016/j.amjms.2019.04.025.

( 收稿日期 : 2023-10-07 )

( 本文编辑 : 何小军 )