

# 呼气末二氧化碳监测的临床应用

杨敏<sup>1</sup>, 赵集<sup>1</sup>, 刘闵<sup>1</sup>, 李炬颖<sup>2</sup>, 袁清霞<sup>3</sup>

<sup>1</sup>延安大学附属医院麻醉科, 陕西 延安

<sup>2</sup>延安大学附属医院急诊科, 陕西 延安

<sup>3</sup>延安大学附属医院重症医学科, 陕西 延安

Email: 374376353@qq.com

收稿日期: 2020年9月7日; 录用日期: 2020年9月21日; 发布日期: 2020年9月28日

## 摘要

呼气末二氧化碳分压( $P_{ET}CO_2$ )是指呼吸末呼出气中二氧化碳浓度, 呼气末二氧化碳监测是一种无创监测手段。对于呼吸和循环功能监测最直接的方法是进行动脉血气分析, 该法为有创操作、不能连续测定且费用较高昂, 与血气分析相比 $P_{ET}CO_2$ 可以无创、实时、连续监测患者呼吸与循环功能, 美国麻醉医师协会(ASA)早已规定 $P_{ET}CO_2$ 为麻醉期间的基本监测项目。现将从 $P_{ET}CO_2$ 监测的基本原理以及测定方法、 $P_{ET}CO_2$ 影响因素、 $P_{ET}CO_2$ 临床应用(包括气管导管位置确定、循环功能监测、肺栓塞等的辅助诊断)三大方面阐述 $P_{ET}CO_2$ 的临床应用进展, 为一线医生们在评估病人病情时提供帮助。

## 关键词

呼气末二氧化碳分压, 监测, 临床应用

# Clinical Application of End-Tidal Carbon Dioxide Monitoring

Min Yang<sup>1</sup>, Ji Zhao<sup>1</sup>, Min Liu<sup>1</sup>, Juying Li<sup>2</sup>, Qinxia Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Anesthesiology, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

<sup>2</sup>Emergency Department, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

<sup>3</sup>Department of Critical Care Medicine, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Email: 374376353@qq.com

Received: Sep. 7<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

End-tidal carbon dioxide partial pressure ( $P_{ET}CO_2$ ) refers to the concentration of carbon dioxide in the exhaled breath at the end of respiration. End-tidal carbon dioxide monitoring is a non-invasive

monitoring method. The most direct method for monitoring respiratory and circulatory function is to perform arterial blood gas analysis. This method is invasive, cannot be measured continuously and is expensive. Compared with blood gas analysis,  $P_{ET}CO_2$  can monitor the patient's respiratory and circulatory functions non-invasively, in real time, and continuously. The American Association of Anesthesiologists (ASA) has long established  $P_{ET}CO_2$  as a basic monitoring and observation item during anesthesia. This paper expounds the progress of clinical application of  $P_{ET}CO_2$  from three aspects: the basic principle and determination method of  $P_{ET}CO_2$  monitoring, the influencing factors of  $P_{ET}CO_2$ , and the clinical application of  $P_{ET}CO_2$  (including the location of endotracheal tube, monitoring of circulatory function, auxiliary diagnosis of pulmonary embolism, etc.), so as to provide help for front-line doctors in evaluating the condition of patients.

## Keywords

End-Tidal Carbon Dioxide Partial Pressure, Monitor, Clinical Application

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在临床实践中,对于呼吸和循环功能监测最直接的方法是进行动脉血气分析,该法为有创操作、不能连续测定且费用较高昂,这些因素促使我们需要寻找一个更适合的监测指标来指导呼吸循环功能的评估。呼气末二氧化碳分压(end tidal carbon dioxide pressure,  $P_{ET}CO_2$ )是指呼吸末呼出气中二氧化碳(carbon dioxide,  $CO_2$ )浓度,  $P_{ET}CO_2$  是一种无创监测手段,成为人体除血压、心电、血氧、体温、血压之外的另一个生命体征监测指标[1]。近年来,随着传感分析等技术迅速发展,  $P_{ET}CO_2$  监测已拥有简便、实时、连续、灵敏度高等优点,在国外早已成为临床监测的常规手段[2],美国麻醉医师协会(ASA)早已规定  $P_{ET}CO_2$  为麻醉期间的基本监测项目,呼气末二氧化碳监测在各种类型手术、危重病人抢救以及重症监护室等越来越受到重视。

## 2. 基本原理以及测定方法

### 2.1. 基本原理

二氧化碳(carbon dioxide,  $CO_2$ )的弥散速度约为氧气弥散速度的 20 倍,所以极易从肺毛细血管进入肺泡气中形成肺泡二氧化碳压力(partial pressure of carbon dioxide in alveolar air,  $P_ACO_2$ ),致使动脉血中  $CO_2$  压力(arterial partial pressure of carbon dioxide,  $PaCO_2$ )和  $P_ACO_2$  能快速达到平衡,因此  $PaCO_2$  几乎等于  $P_ACO_2$ 。但因肺内残气量与解剖无效腔中气体的稀释,呼出气中  $CO_2$  分压与  $P_ACO_2$  以及  $PaCO_2$  相比是有所下降的[3]。有研究表明,在无效腔与潮气量比值稳定在 0.3 时,  $P_{ET}CO_2$  与  $PaCO_2$  间有很好的相关性,临床上可以通过测定  $P_{ET}CO_2$  反映  $PaCO_2$  的变化,以监测患者的通气功能[4]。

呼气末二氧化碳(end tidal carbon dioxide,  $ETCO_2$ )检测方法有红外线吸收光谱法、质谱分析法、罗曼光谱法、光声光谱法等,其中最常用的方法是红外线吸收光谱技术[5]。 $CO_2$  主要吸收波长为 4260 nm 的红外光,基于其此特性,根据  $CO_2$  吸收率可以其浓度,此方法反应迅速,测定方便[6]。

依据气体采样传感器位置不同,  $CO_2$  检测仪可分为主流型与旁流型。主流型是将传感器直接连接在病人的气管导管接头上作为人工气道的一部分,气流主动经过传感器。优点在于直接与气流接触、识别

反应快、气道内分泌物或水蒸气对监测效果影响小、不丢失气体；缺点在于明显增加气道管路负重和呼吸死腔以及不适用于未行气管插管的病人。旁流型是目前大部分监测仪是采用的方法，传感器并不直接连接在通气回路中，呼出的气体经由抽气泵抽取部分至测量室进行测量，抽气速度为 20~300 ml/min，气流被动进入传感器。优点在于不增加回路的死腔量以及部件的重量，可对有自主呼吸的病人进行监测；不足之处是识别反应稍慢。因水蒸汽或气道内分泌物而影响取样，对于低流速通气或小儿，抽吸采样产生的气流丢失可能影响潮气量测定和呼吸机触发，所以在行低流量麻醉或小儿麻醉中应注意补充因取样而丢失的气体量[7]。

## 2.2. 测定方法

临床上有平静呼气法和延长呼气法两种测定方法。平静呼气法即病人平静呼吸时对  $P_{ET}CO_2$  进行测量；延长呼气法嘱病人做深呼吸，使呼气时间>5 s，测量第 5 秒末的  $P_{ET}CO_2$  [8]。侯海佳等认为在呼吸内科普通病房  $P_{ET}CO_2$  监测病情中，延长呼气法较平静呼气法更优越，但对于体内存在高水平  $CO_2$  的疾病(如慢性阻塞性肺疾病伴 II 型呼吸衰竭)，2 种方法的  $P_{ET}CO_2$  都低估了动脉血  $PaCO_2$ ，临床中更应该以动脉血为准，但动态监测延长呼气法测定  $P_{ET}CO_2$  仍具有重要的临床意义[9]。

## 3. $ETCO_2$ 影响因素

$CO_2$  的外源性吸收、内源性产生、代谢排出障碍，医源性因素，药物本身的作用以及患者自身的疾病等均会影响  $ETCO_2$  的浓度或分压。

### 3.1. 外源性因素

随着加速康复外科(enhanced recovery after surgery, ERARS)理念以及日间手术的提出，要求缩短患者住院时间，采用小切口小创伤手术，使其术后快速恢复，减少直接与间接医疗费用，充分利用卫生资源，基于此，外科越来越多开展腔镜手术。其中腔镜手术气腹的建立是至关重要的， $CO_2$  具备不燃烧性、不易溶解于血液及组织的特性，使其成为腹腔镜手术广泛采用的气腹介质。腹腔镜中建立  $CO_2$  气腹后，会升高腹压，减少下肢静脉回流，抬高横膈，增加胸腔内压力，导致左心室充盈受到影响，降低心排出量；同时，膈肌运动会受到升高的腹压的影响，减少潮气量， $CO_2$  潴留，提高  $CO_2$  分压，引发高碳酸血症。 $CO_2$  具有较高的弥散性，且较易溶于血，加之气腹建立过程中腹腔及其血管间形成的浓度差，使  $CO_2$  通过腹膜弥散至血液中，增加  $PaCO_2$ ，从而影响  $P_{ET}CO_2$  [10]。

### 3.2. 内源性因素

$P_{ET}CO_2$  主要受  $CO_2$  的产生量、肺泡通气功能、肺血流量这三个因素影响。在麻醉过程中患者的处于低代谢水平，肺泡通气功能保持相对稳定，即三个主要因素中两个主要因素基本保持不变。根据单一变量原则，此时  $P_{ET}CO_2$  水平与肺部血流相关，而肺血流量又主要受到心输出量(cardiac output, CO)影响，故  $P_{ET}CO_2$  水平的变化在一定程度上可以反应出 CO 的水平。近年来已经有多项临床研究和动物实验提示  $P_{ET}CO_2$  与心输出量具有很好的相关性，因此  $P_{ET}CO_2$  可以作为 CO 的临床监测参考指标，并且能够对容量反应性做出判断[11]。非麻醉状态病人，二氧化碳主要经呼吸作用排出体外，与肺的通气功能密切相关，当患者通气功能障碍或者呼吸道阻塞时会影响  $P_{ET}CO_2$ 。对于肺栓塞病人，会出现  $PaCO_2$  升高而  $P_{ET}CO_2$  下降[12]。

### 3.3. 代谢排出障碍

当机体处于缺氧、高代谢状态时(如甲亢、恶性高热等疾病)，会产生大量的  $CO_2$ ，甚至导致高碳酸血

症产生,致血压下降, $P_{ET}CO_2$ 升高;当机体处于低温、低代谢状态时,将会减少  $CO_2$  的产生,降低  $P_{ET}CO_2$ 。

人体内酸性物质主要有两大类:挥发酸(碳酸)和固定酸(非挥发性酸),呼吸运动(肺)和肾脏是人体主要的酸碱平衡调节器官,其中肾脏发挥主要作用。肾脏通过对肾小球滤过的碳酸氢盐的重吸收和生成新的碳酸氢盐,从而使细胞外液中的碳酸氢盐的浓度保持稳定,以维持体液的酸碱平衡。此外肾脏的泌氢离子和碳酸氢根离子重吸收功能受动脉血的二氧化碳分压等多种因素的影响,从而影响  $P_{ET}CO_2$ 。

### 3.4. 其它因素

抗酸药物的应用,如碳酸氢钠、氢氧化铝等会使体内  $CO_2$  产生增多, $P_{ET}CO_2$  升高;医源性的过度通气或者通气不足也会影响  $P_{ET}CO_2$ ;肺实变、肺不张、肺水肿及血管的病变更会影响  $P_{ET}CO_2$ 。

## 4. 呼气末二氧化碳监测的临床应用

### 4.1. 管导管位置的确定

行气管插管后,ETCO<sub>2</sub>波形监测可以作为检测气管导管位置的金标准,优于胸部听诊法以及X线摄片[13]。Choi指出最可靠地确定气管导管位置的方法为  $P_{ET}CO_2$  监测,特别对插管困难、肥胖、肺气肿、乳房巨大者更有价值[14]。当连续出现 4~6 个稳定的波形时,可以认为气管导管位置正确;当气管导管误入食道时, $P_{ET}CO_2$  降到零,没有稳定的波形, $P_{ET}CO_2$  还能对通气过程中导管的扭曲梗阻做出诊断。双肺同时通气时两侧各自的  $P_{ET}CO_2$  的变化,对判断双腔支气管导管位置有一定的参考价值,选择下降 5% 作为上限值,判断导管位置异常的敏感度和诊断准确率相对较高[15]。

对于心跳骤停患者,肺血流量急剧减少,致使  $P_{ET}CO_2$  骤降为 0,通过及时而有效的胸外心脏按压后, $CO_2$  逐步增加,组织代谢产生的  $CO_2$  重新输送至肺,出现稳定的  $CO_2$  波形即认为气管插管在气管内。

### 4.2. 循环功能的监测

高国贵研究表明  $P_{ET}CO_2$  监测能准确反应心肺复苏患者的循环及通气功能,指导心肺复苏[16]。美国心脏协会(AHA)在 2015 年心肺复苏指南中建议,在心肺复苏过程中, $P_{ET}CO_2$  可作为判断 CO 的指标之一,协助判断复苏情况以及预后[17]。在心肺复苏的高级生命支持阶段, $P_{ET}CO_2$  可以监测判断自主循环情况, $P_{ET}CO_2$  突然上升大于 10 mmHg,提示自主循环可能恢复[18]。对于已经行气管插管的非创伤性成人住院心肺复苏患者,持续 10 分钟  $P_{ET}CO_2$  小于 10 mmHg 预示患者预后不良,可能是 CPR 终止的标志[19]。但复苏过程中  $P_{ET}CO_2$  的变化受肾上腺素、碳酸氢钠等药物以及胸外按压质量的影响, $P_{ET}CO_2$  仅作为参考指标,需联合心率、动脉血压、脉搏氧饱和度等临床指标综合判断自主循环是否恢复。

容量反应性是指快速补液后,心搏量(stroke volume, SV)或 CO 随之增加的现象,反映出心功能处于其 Frank-Starling 心功能曲线的上升段,容量反应性是急危重症患者病情评估的重要参数。邹宇君等研究表明  $P_{ET}CO_2$  可以判断容量反应性,建议使用 ETCO<sub>2</sub> 监测联合直腿抬高试验评估容量反应性, $P_{ET}CO_2$  上升大于 5% 可认为有容量反应性[20]。对于 ETCO<sub>2</sub> 监测联合快速补液试验,输注 500 ml 晶体液后, $P_{ET}CO_2$  浓度上升大于 5.8% 提示有容量反应性[21]。

### 4.3. 辅助判断

张年春等研究认为  $P_{ET}CO_2$  诊断骨科术后患者肺栓塞中具有良好应用价值,当出现肺栓塞时,可表现为肺血流动力学变化和通气功能下降, $P_{ET}CO_2$  升高[22]。Ramme 等研究显示骨科术后发生肺栓塞的患者  $P_{ET}CO_2$  均大于 43 mmHg,针对整形外科术后患者筛查肺栓塞的研究提示当  $P_{ET}CO_2$  大于 43 mmHg,可不进行 CTA 检查[12]。若  $P_{ET}CO_2$  突然下降,而血中二氧化碳数值升高,提示肺栓塞可能。

ASA 推荐术中应常规监测  $P_{ET}CO_2$ , 用来指导通气量的调节。在颅脑外科手术时在  $P_{ET}CO_2$  为 30 mmHg 和 20 mmHg, 尤其在 20 mmHg 时, 通过过度通气可以降低颅内压, 使脑组织轻微回缩[23]; 在腹腔镜手术中通过监测  $P_{ET}CO_2$  来调整呼吸频率和潮气量对减轻腹腔镜手术中二氧化碳的蓄积是有效的[12]; 丁丽红等研究表明在全麻期间, 患者  $PaCO_2$  与  $P_{ET}CO_2$  存在显著相关性( $P < 0.05$ ), 通过监测  $P_{ET}CO_2$  可及时发现呼吸道异常现象, 具有应用价值[24]。

#### 4.4. 其它

对于非全麻病人, 可以采用经鼻导管测定  $P_{ET}CO_2$ , 郭杭珍等报告 20 例硬膜外麻醉, 采用经鼻导管法测定  $P_{ET}CO_2$ , 结果显示  $PaCO_2$  与  $P_{ET}CO_2$  均值差异无显著性,  $PaCO_2$  与  $P_{ET}CO_2$  经相关检验均为正相关关系, 相关度( $r$ )为 0.818 与 Brampton 报道一致, 认为鼻咽腔置管监测  $P_{ET}CO_2$  方法简单, 病人无痛苦, 监测数值与  $PaCO_2$  相近, 可信度高, 能动态连续监测病人  $PaCO_2$ , 为不需要气管插管的重症病人提供一种有效的监测手段。对于危重病人, 可以行床边连续无创监测  $P_{ET}CO_2$ , 以了解患者的通气功能, 调节呼吸参数, 维持正常的  $PaCO_2$ , 有利于患者病情的稳定。对于小儿, 胡国峰等认为与脉搏氧饱和度相比,  $P_{ET}CO_2$  能更直观的反映麻醉状态下患儿的通气情况[25]。在小儿非插管全麻中容易出现呼吸功能减弱, 呼吸道不畅而导致  $CO_2$  蓄积, 鼻导管  $P_{ET}CO_2$  监测可提高小儿非插管的安全性, 建议将  $P_{ET}CO_2$  作为小儿非插管全麻常规监测项目[26]。

#### 5. 展望

$P_{ET}CO_2$  只能反映通气状况, 并且影响因素众多(基础代谢、循环、呼吸等), 只能将其纳为临床参考指标之一, 还需同时监测吸入氧浓度、血氧饱和度以及血气分析等来综合分析患者呼吸与循环情况。但是  $P_{ET}CO_2$  可以连续、无创监测, 并且随着技术的进步、认识的加深, 已经成为临床医生在评估病人情况的一项重要参考指标。未来还会有更多的临床研究成果, 将会进一步拓宽  $P_{ET}CO_2$  的应用范围。

#### 参考文献

- [1] 郭建彪. 丙泊酚联合小剂量舒芬太尼静脉麻醉对无痛人流流产患者呼末二氧化碳的影响[J]. 中国卫生产业, 2013(33): 83-84.
- [2] 林佳鹤, 周国庆, 陈东升, 等. 过度通气正常二氧化碳分压的方式对促进异氟醚麻醉苏醒的有效性和安全性[J]. 临床麻醉学杂志, 2015(5): 464-466.
- [3] 吴珏. 麻醉与二氧化碳[J]. 国外医学麻醉学与复苏分册, 1984(4): 148-150.
- [4] 应诗达. 呼气末二氧化碳监测的临床应用[J]. 潍坊医学院学报, 1994(1): 21-23.
- [5] Blanch, L., Romero, P.V. and Lucangelo, U. (2006) Volumetric Capnography in the Mechanically Ventilated Patient. *Minerva Anestesiologica*, 72, 577-585.
- [6] 叶继伦, 周惠玲, 武志刚, 等. 在呼吸气体监测中的呼吸末二氧化碳测量的有效性评价[J]. 中国医学物理学杂志, 2009, 26(1): 985-989.
- [7] Walsh, B.K., Crotwell, D.N. and Restrepo, R.D. (2011) Capnography/Capnometry during Mechanical Ventilation: 2011. *Respiratory Care*, 56, 503-509. <https://doi.org/10.4187/respcare.01175>
- [8] 刘杰, 陈荣昌, 钟南山. 呼出气二氧化碳和体表氧饱和度监测在慢性阻塞性肺疾病呼吸衰竭患者中的应用[J]. 南方医科大学学报, 2010(7): 1565-1568.
- [9] 侯海佳, 谭伟, 代冰, 等. 不同呼气法呼气末二氧化碳动态监测的临床应用价值比较[J]. 山西医药杂志, 2014(18): 2123-2126.
- [10] 何思伟, 毛小川. 腹腔镜手术中麻醉及呼气末二氧化碳水平对脑血流灌注的影响分析[J]. 检验医学与临床, 2017, 14(14): 2148-2149, 2161.
- [11] 宋青, 张宏. 肝切除手术中监测呼气末二氧化碳对心功能变化的作用[J]. 中华医学杂志, 2002(12): 24-25.
- [12] Ramme, A.J., Iturrate, E., Dweck, E., et al. (2016) End Tidal Carbon Dioxide as a Screening Tool for Computed To-

- mography Angiogram in Postoperative Orthopaedic Patients Suspected of Pulmonary Embolism. *The Journal of Arthroplasty*, **31**, 2348-2352. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.03.033>
- [13] 佚名. 急诊呼气末二氧化碳监测专家共识[D].
- [14] Choi, H.J., Tremper, K.K. and Garber, S.Z. (1986) End-Tidal Pco<sub>2</sub>: Should It Be a Standard of Care in Obstetric Anesthesia? *Anesthesiology*, **64**, 829-830. <https://doi.org/10.1097/0000542-198606000-00032>
- [15] 吴晓平. 监测呼气末二氧化碳分压在双腔支气管导管定位中的临床应用[J]. 中国医师进修杂志, 2009(24): 48-49.
- [16] 高国贵, 胡海华, 余自然, 等. 呼吸末二氧化碳监测心肺复苏患者的临床意义[J]. 中国医药指南, 2014, 12(33): 70.
- [17] Neumar, R.W., Shuster, M., Callaway, C.W., *et al.* (2015) Part 1: Executive Summary: 2015 American Heart Association Guidelines Update for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*, **132**, 67-70. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000252>
- [18] Pokorná, M., Necas, E., Kratochvíl, J., *et al.* (2010) A Sudden Increase in Partial Pressure End-Tidal Carbon Dioxide (p(et)co<sub>2</sub>) at the Moment of Return of Spontaneous Circulation. *The Journal of Emergency Medicine*, **38**, 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2009.04.064>
- [19] Yu, X.Z., *et al.* (2018) Predictive Value of Continuous Monitoring End-Tidal Carbon Dioxide Partial Pressure on In-Hospital Resuscitation Outcome: Secondary Analysis of the Data from a Multicenter Observational Study. *Chinese Critical Care Medicine*.
- [20] Monnet, X., Bataille, A., Magalhaes, E., *et al.* (2013) End-Tidal Carbon Dioxide Is Better than Arterial Pressure for Predicting Volume Responsiveness by the Passive Leg Raising Test. *Intensive Care Medicine*, **39**, 93-100. <https://doi.org/10.1007/s00134-012-2693-y>
- [21] Jacquet-lagrèze, M., Baudin, F., David, J.S., *et al.* (2016) End-Tidal Carbon Dioxide Variation after a 100- and a 500-ml Fluid Challenge to Assess Fluid Responsiveness. *Annals of Intensive Care*, **6**, 37. <https://doi.org/10.1186/s13613-016-0141-9>
- [22] 张年春, 朱建华, 钟小明, 等. 呼吸末二氧化碳分压在诊断骨科手术患者术后肺栓塞中的价值[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2017, 9(7): 166-169.
- [23] Grmec, S. and Mally, S. (2004) Prehospital Determination of Tracheal Tube Placement in Severe Head Injury. *Emergency Medicine Journal*, **21**, 518-520.
- [24] 丁丽红. 临床麻醉中呼气末二氧化碳分压监测的临床应用及意义[J]. 中国现代药物应用, 2018(16): 69-70.
- [25] 胡国峰, 戴品红. 呼气末二氧化碳监测在小儿不插管氯胺酮麻醉中的临床应用[J]. 中国医药指南, 2013(15): 566-567.
- [26] 鲁会卿, 王韬渊, 陈宁. 呼气末二氧化碳监测在小儿非插管全麻中的临床应用[J]. 医疗卫生装备, 2011(8): 64, 66.