

## · 综述 ·

## 二氧化碳气腹、气胸对新生儿生理影响的研究进展



全文二维码

宫红波<sup>1</sup> 耿秋雨<sup>1</sup> 钊金法<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心 浙江大学医学院附属儿童医院麻醉科, 杭州 310052; <sup>2</sup> 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心 浙江大学医学院附属儿童医院新生儿外科, 杭州 310052

通信作者: 钊金法, Email: toujinfa@zju.edu.cn

**【摘要】** 近年来腔镜技术的飞速发展使小儿外科医师有机会将该技术应用于新生儿群体。新生儿行腹腔镜、胸腔镜手术时外科医师向其腹腔内、胸腔内充入二氧化碳气体, 建立气腹、气胸来获得满意的手术视野; 然而气腹、气胸的建立会造成腹腔、胸腔内压力升高, 进而导致二氧化碳滞留甚至高碳酸血症, 影响机体的生理功能。本文就建立二氧化碳气腹、气胸对新生儿的生理影响进行综述。

**【关键词】** 高碳酸血症; 外科手术; 儿童

**基金项目:** 国家自然科学基金(82171699)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202302046-017

### Research progress on the physiological effects of carbon dioxide pneumoperitoneum and pneumothorax on neonates

Gong Hongbo<sup>1</sup>, Geng Qiuyu<sup>1</sup>, Tou Jinfa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Clinical Research Center for Children's Health; Department of Anesthesiology, Affiliated Children's Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310052, China; <sup>2</sup> National Clinical Research Center for Children's Health; Department of Neonatal Surgery, Affiliated Children's Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310052, China

Corresponding author: Tou Jinfa, Email: toujinfa@zju.edu.cn

**【Abstract】** In recent years, the rapid development of endoscopic technology has allowed pediatric surgeons to apply this technique to the neonatal population. During laparoscopic and thoracoscopic surgeries in neonates, surgeons insufflate carbon dioxide into the abdominal and thoracic cavities to create pneumoperitoneum and pneumothorax, respectively, to achieve a satisfactory surgical view. However, the establishment of pneumoperitoneum and pneumothorax increases intra-abdominal and intrathoracic pressures, leading to carbon dioxide retention and potentially hypercapnia, which affects physiological functions. This article reviews the physiological effects of carbon dioxide pneumoperitoneum and pneumothorax on neonates.

**【Key words】** Hypercapnia; Surgical Procedures, Operative; Child

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (82171699)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202302046-017

伴随外科手术技术的发展, 全国儿童专科医院都在开展新生儿腔镜手术。新生儿并不是缩小版的成人, 其各个系统都在生长发育中, 有着特殊的生理特点, 尤其是呼吸系统的解剖生理与成人区别很大。二氧化碳气腹、气胸建立后, 由于腹(胸)内压力改变、机体对于二氧化碳的吸收代谢等因素导致新生儿的生理功能受到影响, 且新生儿大脑、心、肺等脏器功能发育不完善, 这些生理功能的改变可能会造成严重后果。尽管有报道称新生儿动脉二氧化碳分压(arterial carbon dioxide pressure, PaCO<sub>2</sub>) 范围为 9.5 ~ 64.3 mmHg (1 mmHg =

0.133 kPa), 但明确其安全范围的相关报道较少, 目前尚未达成共识<sup>[1]</sup>。本文结合国内外文献, 就二氧化碳气腹、气胸对新生儿的生理影响进行综述, 为今后新生儿腔镜手术的术中管理提供依据。

#### 一、二氧化碳气腹、气胸建立对新生儿呼吸系统的影响

二氧化碳充气是目前新生儿腔镜手术建立气腹、气胸的常规方法, 对呼吸功能影响较大, 包括腹(胸)内压力升高、患儿体位(头向上或向下倾斜)改变导致的通气功能改变、肺循环功能影响、二氧化碳吸收导致呼吸性酸中毒等。

新生儿腹腔容积小,人工气腹后腹腔压力升高,膈肌上移,肺膨胀受限,甚至发生肺不张导致通气-灌注不匹配和肺内分流,进而造成低氧血症、高碳酸血症,情况严重者可能导致细胞、组织和器官损伤甚至机体死亡<sup>[2]</sup>。 $\text{PaCO}_2$  可以调节呼吸作用,影响血液 pH 值,因此测定  $\text{PaCO}_2$  可反映呼吸功能对酸碱平衡的调节能力。若新生儿伴随心、肺基础疾病,则行腹腔镜、胸腔镜手术时更易发生高碳酸血症,甚至加重原有疾病。二氧化碳气腹建立后通过腹膜弥散入血,约 93% 的二氧化碳通过红细胞转运,7% 的二氧化碳通过物理途径溶解存于体内。二氧化碳除了经肺代谢外,被吸收的二氧化碳可存于体内,所以二氧化碳气腹停止时仍可见长时间的高碳酸血症,可对新生儿多系统造成影响,但该特点并未引起外科医师的足够重视,导致新生儿发生高碳酸血症的风险增高。国内新生儿二氧化碳气腹压力多设置为 4~8 mmHg,该压力下可导致肺顺应性降低 30%~50%,当患儿体位由仰卧位变为头低脚高位后,肺顺应性进一步降低,胸腔内压升高将限制通气导致肺不张和低氧血症的发生率增加,麻醉医师通过调节呼吸机参数使患儿过度通气,同时调整呼气末正压防止肺泡塌陷,并改善肺顺应性<sup>[3]</sup>。

患有先天性膈疝或食管闭锁患儿可能在肺发育不良的同时伴有肺部感染,术中更易出现呼吸性酸中毒、高碳酸血症以及低氧血症。针对上述情况麻醉医师可通过调节呼吸机参数(如加快呼吸频率、增大潮气量、提高氧浓度等方法)处理。由于二氧化碳气腹的建立和手术操作对患侧肺的机械压迫,手术过程中可能出现严重低氧血症、高碳酸血症,麻醉医师调整呼吸机参数可能会增加健侧肺出现气胸以及肺气压伤的发生率。鉴于气压伤对肺发育不全的患儿伤害极大,一些专家建议使用低潮气量、适宜的呼气末正压以及允许性高碳酸血症等肺保护性通气策略<sup>[4]</sup>。近些年提出的允许性高碳酸血症概念,一些学者认为其有器官保护作用,但发表在 *Lancet* 上的研究表明,允许性高碳酸血症并不能改善早产儿肺发育不良的发生率<sup>[5]</sup>。一项基于婴儿胸腔镜手术的回顾性分析表明,单肺通气时  $\text{PaCO}_2 > 50$  mmHg 及术毕氧合指数  $< 290$  mmHg 是婴儿肺部并发症的独立危险因素<sup>[6]</sup>。对于麻醉医师来说,如何保证手术视野、维持氧合并做好患儿肺保护是一个挑战。

## 二、二氧化碳气腹、气胸建立对新生儿循环系统的影响

二氧化碳气腹、气胸建立后,对新生儿的心输出量、血压、心率均有影响。结合文献分析主要原因如下:①气腹、气胸后腹(胸)内压升高,二氧化碳气腹压力及气体流速对大血管、心脏的机械压迫导致静脉回流受阻、心脏舒张功能受限减少,导致全身血管阻力高、心输出量低、平均动脉压降低、心率加快。一项动物实验表明,当腹腔压力为 4 mmHg 时,心输出量降低 20.5%,平均动脉压降低 14.8%;当腹腔压力为 10 mmHg 时,心输出量降低 25%,平均动脉压降低 18%;说明气腹建立后腹内压力升高对心输出量、平均动脉压影响明显<sup>[7]</sup>。虽然二氧化碳气腹对循环影响较大,但有研究表明对于生命体征平稳的患儿,选择胸腔镜手术可能获益

更多<sup>[8]</sup>。一些研究认为,新生儿先天性膈疝或食管闭锁行胸腔镜检查时采用 4~6 mmHg 的压力是合理的<sup>[9-10]</sup>。Liu 等<sup>[11]</sup>关于新生儿膈疝是否把腹腔镜手术方式作为第一选择的回顾性研究认为,胸腔镜组  $\text{PaCO}_2$  略高于开放组,但差异无统计学意义,胸腔镜手术仍是新生儿膈疝的首选术式。②二氧化碳气腹、气胸建立后,二氧化碳迅速弥散入血,血浆中二氧化碳浓度增加,导致肾上腺素和去甲肾上腺素浓度升高,从而引起交感神经系统兴奋,导致心率、收缩压和心输出量增加。一项研究发现, $\text{PaCO}_2$ 、pH 可影响心肌收缩功能以及冠状动脉血流,而高碳酸血症对心肌有直接抑制作用<sup>[12]</sup>。③头低脚高位是腹腔镜手术的常用体位,可以使腹腔内(尤其是盆腔)手术视野更加清晰。由于患儿处于头低脚高位,下肢以及内脏静脉回流增加导致心输出量的增加,在一定程度上减轻了腹内压和高碳酸血症产生的心血管不良反应<sup>[13]</sup>。④人工气腹、气胸使腹(胸)内压力明显增加,进而影响中心静脉压。Ponduru 等<sup>[14]</sup>分析了不同气腹压力对颈内静脉横截面积的影响,发现气腹压力与颈内静脉横截面积呈正相关,说明气腹压力与中心静脉压呈正相关。另有一项研究和 Ponduru 等<sup>[14]</sup>研究结论相同,认为过高的气胸压力以及过长的操作时间会导致中心静脉压力升高,可能导致心血管不良事件<sup>[15]</sup>。目前相关报道多基于成人,关于新生儿群体的相关报道较少。

## 三、二氧化碳气腹、气胸建立对新生儿肝肾功能的影响

目前国内外对于腹腔镜手术是否会影响新生儿肝功能的相关数据报道较少,肝功能损害是由于肝脏缺血缺氧造成肝细胞损害。正常情况下肝脏接受门静脉和肝动脉的双系统血供,肝细胞代谢旺盛,对血流和氧需求高,对低氧、低血压、低灌注敏感。二氧化碳气腹建立后腹腔压力升高,压迫肝脏血管,导致门静脉、肝动脉血管阻力升高,反射性引起肝脏血管收缩,使肝脏血流量减少,导致肝脏缺血、缺氧,对肝功能造成损害。既往研究认为,肝血流灌注存在“肝动脉缓冲效应”的自动调节机制,即肝动脉血流减少时,门静脉血流会代偿性增加,维持肝血流量总量不变,但二氧化碳气腹建立后,这一代偿机制可能丧失。一项关于大鼠的动物实验通过注入二氧化碳气体逐步增加腹内压力,发现腹内压力在 8~12 mmHg 时,门静脉血流速度显著降低<sup>[16]</sup>。Kuebler 等<sup>[17]</sup>对新生仔猪建立二氧化碳气腹并持续 2 h,观察到建立气腹最初肝动脉灌注量增加 30%,然而随着建立气腹时间的延长,肝动脉灌注量下降超过 70%,可以推测建立气腹初期由于肝动脉缓冲机制导致肝动脉血流量增加,随着时间延长,代偿机制丧失,肝动脉灌注量减少<sup>[18]</sup>。而另一项基于大鼠的研究发现,建立二氧化碳气腹 2 h 内未出现肝动脉缓冲效应,但停止气腹后肝功能检测提示肝功能受损<sup>[19]</sup>。国内一项基于幼兔的研究表明,给予长时间的二氧化碳气腹压力后,出现肝瘀血改变且术后 7 d 未改善<sup>[20]</sup>。这些动物实验表明,目前关于建立二氧化碳气腹对于肝功能的影响是有争议的,关于二氧化碳气腹对肝功能影响的相关报道较少。

二氧化碳气腹建立后导致肾功能损伤的主要原因是腹

内压升高对肾实质、肾血管直接压迫,导致肾血流灌注减少、尿量减少,进而导致肌酐、肾小球滤过率、尿素氮等指标的异常。建立二氧化碳气腹会导致交感神经活性增加,从而导致肾皮质血管收缩,影响肾小管、肾小球功能<sup>[21]</sup>。研究分析称二氧化碳气腹建立期间可导致肾功能损伤,伴有血清肌酐升高,而尿量、肾血流量下降,肾功能损伤程度可能受二氧化碳气腹建立的压力水平以及持续时间影响<sup>[22]</sup>。低气腹压力较少导致肾损伤,但对肾功能正常的患儿来说,气腹压力的高低对其肾功能无明显影响<sup>[23]</sup>。国内研究新生儿腹腔镜手术时间在 2 h 内,且二氧化碳气腹压力在 4 ~ 8 mmHg 范围内,通过超声监测肾脏血流动力学发现,二氧化碳气腹建立后可导致肾血流减少、流速减慢,但抽血检验肾功能腹腔镜组与开放组差异无统计学意义,认为新生儿腹腔镜手术是安全可行的<sup>[24]</sup>。目前新生儿腹(胸)腹腔镜手术时对肝肾功能的影响不明确,相关报道较少。

#### 四、二氧化碳气腹、气胸建立对新生儿神经系统的影响

在过去的几十年里,由于小儿外科医师技术的提高以及多学科围手术期管理理念的进步,使得新生儿微创技术得以顺利开展,但新生儿病理生理相对复杂,围手术期易发生脑损伤。有研究认为二氧化碳气腹建立后导致的新生儿高碳酸血症、腹腔压力增高会导致颅内压增加,动物实验也同样表明建立二氧化碳气腹建立后腹内压力升高会导致颅内压升高<sup>[25~27]</sup>。颅腔内容物主要为脑脊液、血液及脑组织,三者中任何一种体积增大超过脑代偿范围即可使颅内压升高。高碳酸血症会导致脑血管阻力下降、颅内压力升高、脑血流自我调节机制受损以及大脑血流灌注增加,从而影响大脑正常的氧供需平衡,而造成神经系统损伤。然而,Tuna 等<sup>[28]</sup>通过监测患儿脑氧饱和度来对比阑尾炎开放手术与腹腔镜手术发现,建立二氧化碳气腹不会影响脑氧合。动物实验报道称新生儿鼠建立气腹后似乎对神经发育没有任何影响,并不会引起成年期的行为改变<sup>[29]</sup>。Huettemann 等<sup>[30]</sup>使用经颅多普勒超声测定脑血流速度发现,儿童气腹建立后腹内压力升高是导致幼儿大脑中动脉血流速度增加的独立影响因素,并且高碳酸血症不导致脑灌注增加,血管反应性不受二氧化碳气腹影响。

Neunhoeffer 等<sup>[31]</sup>研究认为新生儿胸腔镜手术可能会导致脑氧饱和度下降(脑氧饱和度较基线下降超过 20%),可能由于二氧化碳气胸压力增高导致脑静脉回流减少,所以建议胸腔镜期间避免气胸压力超过 4 mmHg。亦有报道认为设定 5 mmHg 的二氧化碳气胸压力并不会影响患有食管闭锁新生儿的脑氧饱和度<sup>[32]</sup>。另一项研究发现,新生儿胸腔镜下膈疝修补术和食管闭锁手术期间脑氧饱和度会降低且术后持续 24 h<sup>[33]</sup>。另有研究认为,二氧化碳气腹建立期间的手术体位(头低脚高位和左侧卧位)对儿童的脑氧饱和度无影响,不影响血流动力学和脑灌注<sup>[34]</sup>。综合文献可知,PaCO<sub>2</sub> 45 ~ 60 mmHg、pH > 7.2、较低的充气压力(如 4 mmHg)可明显改善新生儿高碳酸血症和酸中毒,对新生儿神经系统发育可能无明显影响<sup>[34]</sup>。目前关于二氧化碳气腹、气胸建立后对

新生儿大脑影响的报道较少,新生儿生理过于复杂,仅用一种设备可能无法检测到脑血供、氧供、脑代谢的异常,应当结合不同的模式进行神经监测,规避影响脑功能的危险因素,对新生儿神经发育有重大意义。

近些年来,早产儿的腹(胸)腔镜手术逐渐增多,早产儿是新生儿中的特殊群体,关注早产儿脑发育更有必要。脑室管膜下存在着发达的胚胎生发层组织,毛细血管丰富,缺乏结缔组织支持,因而易发生脑室内出血(intraventricular hemorrhage, IVH)。早产儿中 IVH 的发生受到多因素影响,一项来自欧洲的研究认为,影响 IVH 发生的重要影响参数包括动脉血压、PaCO<sub>2</sub>、脑血流量<sup>[35]</sup>。早产儿脑血量的自动调节机制是不成熟的,无法代偿血压波动,一项基于极低体重儿的研究表明,当 PaCO<sub>2</sub> 超过 45 mmHg 时脑血流自动调节机制逐渐丧失,这可能是导致早产儿脑损伤的危险因素<sup>[36]</sup>。新生儿胸腔镜手术最常见的病种是新生儿食管闭锁和新生儿膈疝,患儿术中呼气末二氧化碳超过 50 mmHg 时说明患儿肺换气功能明显受到影响,麻醉医师很难通过调整呼吸机参数将呼气末二氧化碳调整为正常水平。一项关于出生后 72 h 内需要机械通气的早产儿的研究表明,呼气末二氧化碳急剧升高与脑氧饱和度增加且脑电活动减少有关,PaCO<sub>2</sub> 波动范围超过 5 mmHg 会影响脑氧饱和度和脑电活动并且可能与 IVH 的发生有关<sup>[37]</sup>。另有研究表明,在极低出生体重婴儿中,极高或者极低水平的 PaCO<sub>2</sub> 都与严重 IVH 的风险增加有关<sup>[38]</sup>。但也有研究表明,早产儿的神经发育与高碳酸血症不相关<sup>[39]</sup>。早产儿围手术期应避免 PaCO<sub>2</sub> 水平出现宽幅波动,虽然 PaCO<sub>2</sub> 判定重度 IVH 不具有灵敏度和特异度,但明确 PaCO<sub>2</sub> 阈值可能减少 IVH 的发生。因此,面对早产儿人群,外科医师建立二氧化碳气腹、气胸时对于压力的选择应格外谨慎。

#### 五、二氧化碳气胸、气腹建立对新生儿其他方面的影响

##### (一)二氧化碳气胸、气腹建立后通过加热、加湿二氧化碳对体温的影响

新生儿出生时体温调节中枢已发育但并不成熟,特别是早产儿,体温调控并不稳定,耐受外界环境变化的范围明显要比成人窄,容易受外界环境变化的影响而发生体温异常,影响新陈代谢和生理功能的正常进行,有研究建议将新生儿体温维持在 36.5℃~37.5℃<sup>[40]</sup>。一项来自欧洲的研究表明,新生儿入院体温低于 35.5℃与新生儿出生后 1 ~ 6 d 以及 7 ~ 28 d 的死亡风险增加相关,但与出生 28 d 后的患儿死亡率不相关<sup>[41]</sup>。多项研究表明,腹腔镜手术时加热或者加湿二氧化碳气体对患儿核心体温影响较小,不能预防低体温相关的并发症,且患儿获益较少<sup>[42~43]</sup>。考虑到新生儿保温方式的经济成本以及操作方式的难易程度,选择腹(胸)腔内加温冲洗、液体加温、提高手术室温、恒温毯等方法可能更适用。

##### (二)早产儿视网膜病变

早产儿视网膜病变(retinopathy of prematurity, ROP)是指在孕 36 周以内、低出生体重、长时间吸氧的早产儿,其未血



管化的视网膜膜发生纤维血管瘤增生、收缩,并进一步引起牵拉性视网膜脱离和失明。对于患有先天性膈疝、食管闭锁或其他肺部基础疾病的新生儿,由于其本身受到孕周、基础疾病、体重等因素影响,使麻醉医师围手术期管理变得困难。二氧化碳气腹、气胸建立后对肺功能的负面影响可能导致低氧血症、高碳酸血症,麻醉医师需要通过提高氧浓度以及增加潮气量等途径维持氧合,甚至需要暂停手术来保证患儿生命体征平稳。吸入高浓度氧可能会增加早产儿视网膜病变和失明的发生率,因此麻醉医师需要对患儿进行个体化评估及治疗,如何准确给氧以避免围手术期低氧血症、高氧血症仍需进一步研究。该领域专家建议通过氧气治疗的早产儿脉氧饱和度应以 90%~95% 为目标<sup>[44]</sup>。

## 六、小结

综上所述,二氧化碳气腹、气胸建立后对新生儿各系统生理功能的影响不容忽视,麻醉医师与外科医师对于术中新生儿的护理应做到细致、个体化。虽然客观条件(如新生儿疾病本身、患儿术前基本状态)不易改变,但外科医师以及麻醉医师应考虑如何降低相关风险因素,改善患儿预后并加快患儿康复速度。二氧化碳气腹、气胸的应用对新生儿似乎是安全可行的,二氧化碳气腹、气胸建立导致的生理系统改变对新生儿生长发育的最终影响需要大样本、前瞻性的研究以及长时间的随访来验证。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- [1] Wong SK, Chim M, Allen J, et al. Carbon dioxide levels in neonates: what are safe parameters? [J]. *Pediatr Res*, 2022, 91(5): 1049-1056. DOI: 10.1038/s41390-021-01473-y.
- [2] Cummins EP, Strowitzki MJ, Taylor CT. Mechanisms and consequences of oxygen and carbon dioxide sensing in mammals [J]. *Physiol Rev*, 2020, 100(1): 463-488. DOI: 10.1152/physrev.00003.2019.
- [3] 郝伟, 张琰, 录亚鹏, 等. 驱动压导向个体化呼气末正压对小儿腹腔镜手术中肺保护以及术后肺不张的影响研究 [J]. *临床小儿外科杂志*, 2022, 21(5): 468-473. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202111021-013.  
Hao W, Zhang Y, Lu YP, et al. Effect of driving pressure-guided individualized positive end-expiratory pressure titration on lung protection and postoperative atelectasis during laparoscopy in children [J]. *J Clin Ped Sur*, 2022, 21(5): 468-473. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202111021-013.
- [4] Blank RS, Colquhoun DA, Durieux ME, et al. Management of one-lung ventilation: impact of tidal volume on complications after thoracic surgery [J]. *Anesthesiology*, 2016, 124(6): 1286-1295. DOI: 10.1097/aln.0000000000001100.
- [5] Thome UH, Genzel-Boroviczeny O, Bohnhorst B, et al. Permissive hypercapnia in extremely low birthweight infants (PHELBI): a randomised controlled multicentre trial [J]. *Lancet Respir Med*, 2015, 3(7): 534-543. DOI: 10.1016/s2213-2600(15)00204-0.
- [6] 潘守东, 陈刚, 李帆, 等. 婴儿单肺通气胸腔镜手术后肺部并发症的发生率及其危险因素分析 [J]. *中国分子心脏病学杂志*, 2021, 21(2): 3809-3812. DOI: 10.16563/j.cnki.1671-6272.2021.04.005.
- [7] Pan SD, Chen G, Li F, et al. Incidence and risk factors of post-operative pulmonary complications in infants undergoing thoracoscopic surgery under one-lung ventilation [J]. *Mol Cardiol China*, 2021, 21(2): 3809-3812. DOI: 10.16563/j.cnki.1671-6272.2021.04.005.
- [8] Schäfer M, Sägeser H, Reichen J, et al. Alterations in hemodynamics and hepatic and splanchnic circulation during laparoscopy in rats [J]. *Surg Endosc*, 2001, 15(10): 1197-1201. DOI: 10.1007/s004640080159.
- [9] 程千千, 吴晔明, 王俊, 等. 影响新生儿膈疝生存率的相关因素分析-开放手术与腹腔镜下手术比较 [J]. *临床小儿外科杂志*, 2019, 18(3): 237-241. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2019.03.016.  
Cheng QQ, Wu YM, Wang J, et al. Analysis of related factors affecting neonatal sputum survival rate-Comparison between open surgery and endoscopic surgery [J]. *J Clin Ped Sur*, 2019, 18(3): 237-241. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2019.03.016.
- [10] Patkowski D. Thoracoscopic approach for oesophageal atresia: A real game changer? [J]. *J Pediatr Surg*, 2023, 58(2): 204-208. DOI: 10.1016/j.jpedsurg.2022.10.017.
- [11] Kotb M, Shehata S, Khairi A, et al. Thoracoscopic repair of neonatal congenital diaphragmatic hernia: minimizing open repair in a low-income country [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2021, 31(11): 1341-1345. DOI: 10.1089/lap.2021.0210.
- [12] Liu R, Zheng ZB, Tang CY, et al. Thoracoscopic surgery for congenital diaphragmatic hernia in neonates: Should it be the first choice? [J]. *Front Pediatr*, 2022, 10: 1020062. DOI: 10.3389/fped.2022.1020062.
- [13] Crystal GJ. Carbon dioxide and the heart: physiology and clinical implications [J]. *Anesth Analg*, 2015, 121(3): 610-623. DOI: 10.1213/ANE.0000000000000820.
- [14] Hatipoglu S, Akbulut S, Hatipoglu F, et al. Effect of laparoscopic abdominal surgery on splanchnic circulation: historical developments [J]. *World J Gastroenterol*, 2014, 20(48): 18165-18176. DOI: 10.3748/wjg.v20.i48.18165.
- [15] Ponduru S, Nanda A, Pakhare V, et al. The effect of different pressures of pneumoperitoneum on the dimensions of internal jugular vein-A prospective double-blind, randomised study [J]. *Indian J Anaesth*, 2022, 66(9): 631-637. DOI: 10.4103/ija.ija\_350\_22.
- [16] Ren YQ, Zhu X, Yan H, et al. Cardiorespiratory impact of intrathoracic pressure overshoot during artificial carbon dioxide pneumothorax: a randomized controlled study [J]. *BMC Anesthesiol*, 2022, 22(1): 76. DOI: 10.1186/s12871-022-01621-9.
- [17] Schmandra TC, Kim ZG, Gutt CN. Effect of insufflation gas and intraabdominal pressure on portal venous flow during pneumoperitoneum in the rat [J]. *Surg Endosc*, 2001, 15(4): 405-408. DOI: 10.1007/s004640000331.
- [18] Kuebler JF, Schukfeh N, Vieten G, et al. Arteriportal shunting, splanchnic capillary perfusion, and the effects of colloids during capnoperitoneum in neonatal and adolescent pigs [J]. *Surg Endosc*, 2018, 32(6): 2923-2931. DOI: 10.1007/s00464-017-6005-z.
- [19] Keramida G, Gregg S, Peters AM. Stimulation of the hepatic arterial buffer response using exogenous adenosine: hepatic rest/stress perfusion imaging [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(11): 5852-5861. DOI: 10.1007/s00330-020-06984-6.
- [19] Richter S, Olinger A, Hildebrandt U, et al. Loss of physiologic hepatic blood flow control ("hepatic arterial buffer response") during CO<sub>2</sub>-pneumoperitoneum in the rat [J]. *Anesth Analg*, 2001, 93

- (4):872-877. DOI:10.1097/00000539-200110000-00014.
- [20] 王春燕,李贵斌,刘扬,等.二氧化碳气腹对兔肝肾功能影响的实验研究[J].中华小儿外科杂志,2017,38(9):713-717. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2017.09.014. Wang CY, Li GB, Liu Y, et al. Effects of laparoscopic carbon dioxide pneumoperitoneum on functions of liver and kidney in infant rabbits[J]. Chin J Pediatr Surg, 2017, 38(9):713-717. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2017.09.014.
- [21] Bickel A, Loberant N, Bersudsky M, et al. Overcoming reduced hepatic and renal perfusion caused by positive-pressure pneumoperitoneum[J]. Arch Surg, 2007, 142(2):119-124. DOI:10.1001/archsurg.142.2.119.
- [22] Wever KE, Bruinijes MHD, Warlé MC, et al. Renal perfusion and function during pneumoperitoneum: a systematic review and meta-analysis of animal studies[J]. PLoS One, 2016, 11(9):e0163419. DOI:10.1371/journal.pone.0163419.
- [23] Özdemir-van Brunschot DMD, van Laarhoven KCJHM, Scheffer GJ, et al. What is the evidence for the use of low-pressure pneumoperitoneum? A systematic review[J]. Surg Endosc, 2016, 30(5):2049-2065. DOI:10.1007/s00464-015-4454-9.
- [24] 方琴,王昀,漆冬梅.腹腔镜手术人工气腹对新生儿肾血流动力学的影响[J].深圳中西医结合杂志,2019,29(13):4-6. DOI:10.16458/j.cnki.1007-0893.2019.13.002. Fang Q, Wang Y, Qi DM. Effect of laparoscopic operation on neonatal renal hemodynamics[J]. Shenzhen J Integra Tradit Chin West Med, 2019, 29(13):4-6. DOI:10.16458/j.cnki.1007-0893.2019.13.002.
- [25] Kamine TH, Papavassiliou E, Schneider BE. Effect of abdominal insufflation for laparoscopy on intracranial pressure[J]. JAMA Surg, 2014, 149(4):380-382. DOI:10.1001/jamasurg.2013.3024.
- [26] Rosenthal RJ, Friedman RL, Chidambaram A, et al. Effects of hyperventilation and hypoventilation on PaCO<sub>2</sub> and intracranial pressure during acute elevations of intraabdominal pressure with CO<sub>2</sub> pneumoperitoneum: large animal observations[J]. J Am Coll Surg, 1998, 187(1):32-38. DOI:10.1016/s1072-7515(98)00126-4.
- [27] Halverson A, Buchanan R, Jacobs L, et al. Evaluation of mechanism of increased intracranial pressure with insufflation[J]. Surg Endosc, 1998, 12(3):266-269. DOI:10.1007/s004649900648.
- [28] Tuna AT, Akkoyun I, Darcin S, et al. Effects of carbon dioxide insufflation on regional cerebral oxygenation during laparoscopic surgery in children: a prospective study[J]. Braz J Anesthesiol, 2016, 66(3):249-253. DOI:10.1016/j.bjane.2014.10.004.
- [29] Miranda A, Roque S, Pêgo JM, et al. Neurodevelopment impact of CO<sub>2</sub>-pneumoperitoneum in neonates: experimental study in a rat model[J]. J Surg Res, 2018, 221:293-303. DOI:10.1016/j.jss.2017.09.014.
- [30] Huettemann E, Terborg C, Sakka SG, et al. Preserved CO<sub>2</sub> reactivity and increase in middle cerebral arterial blood flow velocity during laparoscopic surgery in children[J]. Anesth Analg, 2002, 94(2):255-258. DOI:10.1097/00000539-200202000-00005.
- [31] Neunhoeffer F, Warmann SW, Hofbeck M, et al. Elevated intrathoracic CO<sub>2</sub> pressure during thoracoscopic surgery decreases regional cerebral oxygen saturation in neonates and infants-A pilot study[J]. Paediatr Anaesth, 2017, 27(7):752-759. DOI:10.1111/pan.13161.
- [32] Tytgat SHAJ, van Herwaarden MYA, Stolwijk LJ, et al. Neonatal brain oxygenation during thoracoscopic correction of esophageal atresia[J]. Surg Endosc, 2016, 30(7):2811-2817. DOI:10.1007/s00464-015-4559-1.
- [33] Bishay M, Giacomello L, Retrosi G, et al. Decreased cerebral oxygen saturation during thoracoscopic repair of congenital diaphragmatic hernia and esophageal atresia in infants[J]. J Pediatr Surg, 2011, 46(1):47-51. DOI:10.1016/j.jpedsurg.2010.09.062.
- [34] McCann ME, Lee JK, Inder T. Beyond anesthesia toxicity: anesthetic considerations to lessen the risk of neonatal neurological injury[J]. Anesth Analg, 2019, 129(5):1354-1364. DOI:10.1213/ANE.0000000000004271.
- [35] Lampe R, Rieger-Fackeldey E, Sidorenko I, et al. Assessing key clinical parameters before and after intraventricular hemorrhage in very preterm infants[J]. Eur J Pediatr, 2020, 179(6):929-937. DOI:10.1007/s00431-020-03585-9.
- [36] Kaiser JR, Gauss CH, Williams DK. The effects of hypercapnia on cerebral autoregulation in ventilated very low birth weight infants[J]. Pediatr Res, 2005, 58(5):931-935. DOI:10.1203/01.pdr.0000182180.80645.0c.
- [37] Dix LML, Weeke LC, de Vries LS, et al. Carbon dioxide fluctuations are associated with changes in cerebral oxygenation and electrical activity in infants born preterm[J]. J Pediatr, 2017, 187:66-72. e1. DOI:10.1016/j.jpeds.2017.04.043.
- [38] Fabres J, Carlo WA, Phillips V, et al. Both extremes of arterial carbon dioxide pressure and the magnitude of fluctuations in arterial carbon dioxide pressure are associated with severe intraventricular hemorrhage in preterm infants[J]. Pediatrics, 2007, 119(2):299-305. DOI:10.1542/peds.2006-2434.
- [39] Thome UH, Genzel-Boroviczeny O, Bohnhorst B, et al. Neurodevelopmental outcomes of extremely low birthweight infants randomised to different PCO<sub>2</sub> targets: the PHELBI follow-up study[J]. Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed, 2017, 102(5):F376-F382. DOI:10.1136/archdischild-2016-311581.
- [40] Wyllie J, Bruinenberg J, Roehr CC, et al. European resuscitation council guidelines for resuscitation 2015: section 7. Resuscitation and support of transition of babies at birth[J]. Resuscitation, 2015, 95:249-263. DOI:10.1016/j.resuscitation.2015.07.029.
- [41] Wilson E, Maier RF, Norman M, et al. Admission hypothermia in very preterm infants and neonatal mortality and morbidity[J]. J Pediatr, 2016, 175:61-67. e4. DOI:10.1016/j.jpeds.2016.04.016.
- [42] Matsuzaki S, Vernis L, Bonnin M, et al. Effects of low intraperitoneal pressure and a warmed, humidified carbon dioxide gas in laparoscopic surgery: a randomized clinical trial[J]. Sci Rep, 2017, 7(1):11287. DOI:10.1038/s41598-017-10769-1.
- [43] Balayssac D, Pereira B, Bazin JE, et al. Warmed and humidified carbon dioxide for abdominal laparoscopic surgery: meta-analysis of the current literature[J]. Surg Endosc, 2017, 31(1):1-12. DOI:10.1007/s00464-016-4866-1.
- [44] Sweet DG, Carnielli V, Greisen G, et al. European consensus guidelines on the management of respiratory distress syndrome-2019 update[J]. Neonatology, 2019, 115(4):432-450. DOI:10.1159/000499361.

(收稿日期:2023-02-28)

**本文引用格式:** 宫红波,耿秋雨,钊金法. 二氧化碳气腹、气胸对新生儿生理影响的研究进展[J]. 临床小儿外科杂志, 2024, 23(10):988-992. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202302046-017.

**Citing this article as:** Gong HB, Geng QY, Tou JF. Research progress on the physiological effects of carbon dioxide pneumoperitoneum and pneumothorax on neonates[J]. J Clin Ped Sur, 2024, 23(10):988-992. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202302046-017.