

# 压力控制通气-容量保证模式对学龄前胸外科手术患儿的影响:一项随机对照研究



全文二维码

王蕾 肖婷 杜真 朱义 朱诗利 屈双权

中南大学湘雅医学院附属儿童医院(湖南省儿童医院)麻醉手术科,长沙 410007

通信作者:屈双权,Email:shuangquanqu@126.com

**【摘要】 目的** 对学龄前胸外科手术患儿应用压力控制通气-容量保证模式进行效果观察,评估该通气模式对于患儿术后肺部并发症、氧合情况以及呼吸机相关肺损伤的影响。**方法** 本研究为前瞻性随机对照试验,按照一定纳入与排除标准收集 71 例接受胸外科手术的学龄前患儿作为研究对象。将患儿通过计算机生成的分配方案以 1:1 比例进行随机分组,分为压力控制通气-容量保证组(pressure-controlled ventilation-volume guaranteed, PCV-VG 组,  $n=36$ )和常规容量控制通气组(volume-controlled ventilation, VCV 组,  $n=35$ )。所有患儿围手术期通气方案遵从肺保护通气策略,PCV-VG 组设定为 PCV-VG 通气模式,VCV 组设定为 VCV 通气模式。主要观察指标为术后 72 h 以内肺部并发症发生率。次要观察指标包括术中呼吸力学指标、血气分析结果、循环监测结果,以及机械通气时间、住院时间等。**结果** PCV-VG 组术后肺部并发症发生率(3/36, 8.3%)显著低于 VCV 组(10/35, 28.6%,  $P=0.035$ ),差异具有统计学意义。相较于 VCV 组,PCV-VG 组单肺通气(one-lung ventilation, OLV)期间气道峰压[OLV 30 min:20(18, 22) cmH<sub>2</sub>O 比 25(23, 27) cmH<sub>2</sub>O, OLV 结束:17(15, 18) cmH<sub>2</sub>O 比 20(18, 22) cmH<sub>2</sub>O,  $P<0.001$ ]更低,呼吸阻力(OLV 30 min:48.7 $\pm$ 10.3 比 60.5 $\pm$ 13.3,  $P=0.027$ )更低,胸肺顺应性[OLV 30 min:6.0(4.0, 7.0) mL/cmH<sub>2</sub>O 比 5.0(4.0, 6.0) mL/cmH<sub>2</sub>O,  $P=0.021$ ; OLV 结束:8(7.0, 9.0) mL/cmH<sub>2</sub>O 比 7(6.0, 8.0) mL/cmH<sub>2</sub>O,  $P=0.041$ ]更好。此外,PCV-VG 组氧合情况[OLV 30 min:136.4(120.4, 165.0) mmHg; OLV 结束:190.2(179.3, 202.2) mmHg]显著优于 VCV 组[OLV 30 min:100.0(89.4, 137.5) mmHg; OLV 结束:176.8(142.1, 189.8) mmHg] ( $P>0.05$ ),术后机械通气时间(97.5(70.0, 137.5) min 比 120(95.0, 140.0) min,  $P=0.040$ )和住院时间[7(5, 9) d 比 8(7, 15) d,  $P=0.024$ ]更短。**结论** 压力控制通气-容量保证模式在学龄前胸外科手术患儿中应用,可显著降低术后肺部并发症的发生率,降低单肺通气期间气道压力、改善氧合情况。PCV-VG 模式可作为此类手术的优选机械通气方式。

**【关键词】** 胸外科手术; 肺通气, 方法; 单肺通气; 呼吸, 人工; 手术后并发症; 肺; 治疗结果; 儿童, 学龄前

**基金项目:**湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30325、2019JJ50295)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202409055-011

## Effect of pressure-controlled ventilation-volume guaranteed mode on preschool children undergoing thoracic surgery: a randomized controlled study

Wang Lei, Xiao Ting, Du Zhen, Zhu Yi, Zhu Shili, Qu Shuangquan

Department of Anesthesiology, The Affiliated Children's Hospital of Xiangya School of Medicine, Central South University (Hunan Children's Hospital), Hunan, 410007, China

Corresponding author: Qushuangquan, Email: shuangquanqu@126.com

**【Abstract】 Objective** This study aims to evaluate the effect of the pressure-controlled ventilation-volume guaranteed (PCV-VG) mode on postoperative pulmonary complications, oxygenation, and ventilator-associated lung injury in preschool children undergoing thoracic surgery. **Methods** This prospective randomized controlled trial included 71 preschool children undergoing thoracic surgery between April 2020 and June 2021. Participants were randomized in a 1:1 ratio using a computer-generated allocation scheme into the PCV-VG group ( $n=36$ ) and the conventional volume-controlled ventilation (VCV) group ( $n=35$ ). All perioperative

ventilation followed lung-protective ventilation strategies, with the PCV-VG group receiving PCV-VG mode and the VCV group receiving VCV mode. The primary outcome was the incidence of pulmonary complications within 72 hours postoperatively. Secondary outcomes included intraoperative respiratory mechanics, arterial blood gas analysis, circulatory parameters, mechanical ventilation duration, and hospital stay. **Results** The incidence of postoperative pulmonary complications in the PCV-VG group (3/36, 8.3%) was significantly lower than that in the VCV group (10/35, 28.6%,  $P=0.035$ ). During one-lung ventilation (OLV), the PCV-VG group demonstrated significantly lower peak airway pressure [OLV 30 minutes: 20 (18, 22) cmH<sub>2</sub>O vs. 25 (23, 27) cmH<sub>2</sub>O; end of OLV: 17 (15, 18) cmH<sub>2</sub>O vs. 20 (18, 22) cmH<sub>2</sub>O;  $P<0.001$ ] and lower respiratory resistance [OLV 30 minutes:  $48.7 \pm 10.3$  vs.  $60.5 \pm 13.3$ ;  $P=0.027$ ], along with better lung compliance [OLV 30 minutes: 6.0 (4.0, 7.0) mL/cmH<sub>2</sub>O vs. 5.0 (4.0, 6.0) mL/cmH<sub>2</sub>O;  $P=0.021$ ; end of OLV: 8 (7.0, 9.0) mL/cmH<sub>2</sub>O vs. 7 (6.0, 8.0) mL/cmH<sub>2</sub>O;  $P=0.041$ ]. Oxygenation in the PCV-VG group was also superior to the VCV group [OLV 30 minutes: 136.4 (120.4, 165.0) mmHg vs. 100.0 (89.4, 137.5) mmHg; end of OLV: 190.2 (179.3, 202.2) mmHg vs. 176.8 (142.1, 189.8) mmHg,  $P<0.05$ ]. Additionally, the PCV-VG group had shorter postoperative mechanical ventilation duration [97.5 (70.0, 137.5) minutes vs. 120 (95.0, 140.0) minutes;  $P=0.040$ ] and hospital stay [7 (5, 9) days vs. 8 (7, 15) days;  $P=0.024$ ]. **Conclusions** The PCV-VG mode significantly reduces postoperative pulmonary complications, lowers airway pressure during OLV, and improves oxygenation in preschool children undergoing thoracic surgery. PCV-VG can be considered the preferred mechanical ventilation strategy for such procedures.

**【Key words】** Thoracic Surgery; Pulmonary Ventilation, Methods; One-Lung Ventilation; Respiration, Artificial; Postoperative Complications; Lung; Treatment Outcome; Child, Preschool

**Fund program:** Hunan Natural Science Foundation of China (2023JJ30325&2019JJ50295)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202409055-011

单肺通气 (one-lung ventilation, OLV) 作为胸腔镜手术麻醉管理中的重要环节, 能够提供清晰手术视野, 使健侧肺受影响<sup>[1]</sup>。然而 OLV 非生理性, 可对呼吸系统造成不良影响, 导致通气/血流比例失衡, 动脉血氧分压 (partial arterial oxygen pressure, PaO<sub>2</sub>) 下降, 因而机械通气模式的选择尤为重要<sup>[2-4]</sup>。吸气压力过高、吸气时间延长、气体在肺内分布不均造成呼吸机肺损伤的主要原因<sup>[5-6]</sup>。研究表明 OLV 期间机械通气模式选择不当会导致气道峰压升高, 促进肺部炎症介质释放, 导致机械通气相关性肺损伤的发生, 是影响患儿手术后预后的重要因素<sup>[7]</sup>。在小儿胸腔镜手术中选择合适的机械通气方式对于避免呼吸相关肺损伤及改善患儿预后有着重要的临床意义。

压力控制通气-容量保证 (pressure-controlled ventilation-volume guaranteed, PCV-VG) 模式结合了压力控制通气和容量控制通气 (volume-controlled ventilation, VCV) 的优点, 不仅能够维持设定的分钟通气量, 还可以降低气压伤的发生率<sup>[8]</sup>。已有研究证实, 在成人外科手术中应用 PCV-VG 对于改善手术预后具有显著益处<sup>[2,9-10]</sup>。与成人不同的是, 在学龄前儿童中实施胸外科手术的疾病类型以先天性肺部畸形为主, 多数患儿症状较轻且肺部情况良

好, 因此, 在学龄前儿童 OLV 中应用 PCV-VG 是否可以与成人患者同样获益尚不明确。

本研究对接受胸外科手术的学龄前患儿采取 PCV-VG 和 VCV 两种机械通气模式, 比较两种通气模式对于患儿手术后肺部并发症 (postoperative pulmonary complications, PPCs)、OLV 期间呼吸力学指标以及氧合情况的影响, 探讨 PCV-VG 通气模式应用于学龄前患儿 OLV 中的临床意义。

## 资料与方法

### 一、临床资料

本研究为前瞻性随机对照研究, 获得了湖南省儿童医院伦理委员会审核批准 (HCHLL-2022-92), 并在中国临床试验注册中心注册 (ChiCTR2200065237)。研究对象入组前, 研究人员向患儿及其监护人详细说明了研究方案, 并从监护人处获得了书面知情同意书。

纳入标准: ①年龄 1~6 岁; ②美国麻醉医师协会 (American Society of Anesthesiologists, ASA) 分级 I~III 级, 拟行 OLV 下胸腔镜辅助胸科手术。排除标准: ①术前合并呼吸道感染和支气管哮喘; ②存在严重器官功能障碍 (如严重肝肾功能障碍、先天

性心脏病)或不愿意参加本研究。

为了确保各组病例之间均质性,对符合条件的患儿通过计算机生成的分配方案以 1:1 的比例进行随机分配,患儿被随机分配到 PCV-VG 组或 VCV 组,研究协调员对每例入组患儿进行随访,以确保严格遵守试验方案。分配方案密封在按顺序编号的不透明信封中。麻醉医师知晓分组情况,负责数据收集的研究人员、数据统计分析人员、手术医师和护理人员对分组情况均不知情。

## 二、研究方法

### (一)麻醉方案

所有患儿常规术前用药,入室后连接 5 导联心电图,监测脉搏血氧饱和度、脑电双频指数(bispectral index, BIS)及血压。麻醉诱导采取舒芬太尼  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、苯磺酸顺式阿曲库铵  $0.2 \text{ mg}/\text{kg}$ 、丙泊酚  $2 \sim 3 \text{ mg}/\text{kg}$ ,于 10 min 内泵入右美托咪定  $0.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,术中维持采取  $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可视喉镜下置入气管导管,在纤维支气管镜定位下使用管外法置入支气管封堵器,接麻醉呼吸机行机械通气。麻醉维持采取静脉吸入复合麻醉(瑞芬太尼  $0.2 \sim 0.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、丙泊酚  $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  静脉泵注以及七氟烷吸入(少于或等于 1 个最低肺泡有效浓度),以维持 BIS 在 40~60 之间。采用四个成串刺激(train of four, TOF)连续监测患儿肌松情况,间断静脉注射顺式阿曲库铵  $0.1 \text{ mg}/\text{kg}$ ,维持 TOF 值在 0~2 之间。

手术结束后带气管导管转入心胸外科监护室。当患儿达到拔管条件(自主呼吸节律规则,肌力恢复良好,出现呼吸道保护性反射,确认拔管后无引起呼吸道梗阻的因素存在)时拔除气管导管。

### (二)干预措施

所有患儿完成麻醉诱导后,连接麻醉机控制呼吸。PCV-VG 组围手术期采用 PCV-VG 通气模式。VCV 组采用 VCV 通气模式。两组围手术期呼吸参数设定均遵从保护性通气策略。

双肺通气(two-lung ventilation, TLV)时呼吸参数设定为:吸入氧浓度(fraction of inspiration oxygen,  $\text{FiO}_2$ )60%、吸呼比(inspiratory/expiratory, I/E)1:2、潮气量(tidal volume, VT)  $8 \text{ mL}/\text{kg}$ 、氧流量  $2 \sim 3 \text{ L}/\text{min}$ 、呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)  $5 \text{ mmHg}$  ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ ),调整呼吸频率(respiratory rate, RR)以维持呼气末二氧化碳分压(end-tidal carbon dioxide,  $\text{ETCO}_2$ ) 在  $4.7 \sim 6.7 \text{ kPa}$  之间。

单肺通气期间呼吸参数设定为: $\text{FiO}_2$  60%、I/E 为 1:2.5、VT  $6 \text{ mL}/\text{kg}$ 、氧流量  $2 \sim 3 \text{ L}/\text{min}$ 、PEEP  $5 \text{ mmHg}$ 、调整呼吸频率以维持  $\text{ETCO}_2$  在  $4.7 \sim 6.7 \text{ kPa}$  之间。

两组患儿于气管插管后、OLV 开始后以及 OLV 结束时(即恢复双肺通气之前)均进行肺复张。根据之前研究,本研究中肺复张操作如下:持续气道压为  $30 \text{ cmH}_2\text{O}$  ( $1 \text{ cmH}_2\text{O} = 0.098 \text{ kPa}$ ),持续时间为 15~20 秒<sup>[11-12]</sup>。

### 三、观察指标

主要观察指标为术后 72 h 内肺部并发症发生率。根据欧洲围手术期临床结果(European Perioperative Clinical Outcome, EPCO)定义,肺部并发症包含了呼吸道感染、肺不张、气胸、胸腔积液、呼吸衰竭、支气管痉挛及吸入性肺炎<sup>[13]</sup>。本研究组建了有 3 名经验丰富的医师组成的 PPCs 诊断小组,以确保 PPCs 发生率的准确评估。

次要观察指标包括:①呼吸力学指标:两组患儿在麻醉诱导后(T0)、手术开始时(T1)、OLV 后 30 min(T2)、OLV 结束时(T3)、手术结束时(T4)的气道峰压(peak airway pressure, Peak)、动态顺应性(dynamic lung compliance,  $\text{C}_{\text{dyn}}$ )、气道阻力(airway resistance,  $\text{Raw}$ );②两组患儿在上述 5 个重要时间点的血气分析结果,包括动脉血氧分压(partial arterial oxygen pressure,  $\text{PaO}_2$ )、二氧化碳分压(pressure of Carbon dioxide,  $\text{PaCO}_2$ )、氧合指数、呼吸指数(respiratory index, RI)等;③术中监测指标:即两组患儿在上述 5 个时间点的平均动脉压(mean arterial pressure, MAP)、心率(heart rate, HR)、血氧饱和度(oxygen saturation of blood,  $\text{SpO}_2$ )等;④其他相关指标:包括术后机械通气时长(定义为手术结束至达到拔除气管插管标准的小时数)、OLV 期间低氧血症(定义为  $\text{SpO}_2 < 92\%$  或  $\text{PaO}_2 < 8 \text{ kPa}$ ,且无任何血流动力学不稳定或气道受损的证据)发生率。

### 四、样本量计算

样本量大小采用 PASS 15.0.5 进行计算。根据前期预实验所得研究数据计算出两组 PPCs 的发生率,统计学功效取值为 0.8,  $\alpha$  为 0.05。通过计算共需要 64 例,考虑到 10% 失访率,最终本研究共需要纳入 70 例患儿。

### 五、统计学处理

采用 SPSS 25.0 进行统计学分析。对于计量资料,应用 Kolmogorov-Smirnov 检验判断样本分布的正态性,其中服从正态分布的计量资料(如  $\text{PaCO}_2$ 、

MAP、HR) 采用  $\bar{x} \pm s$  描述,不服从正态分布的计量资料(如气道峰压、PaO<sub>2</sub>、氧合指数)采用  $M(Q_1, Q_3)$  描述;计数资料采用例数(百分比)表示。服从正态分布的计量资料采用 Levene 检验进行方差齐性检验,服从方差齐性的计量资料,组间比较采用两独立样本  $t$  检验;不服从方差齐性的计量资料,组间比较采用  $t'$  检验。不服从正态分布的计量资料的组间比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。计数资料的组间比较采用 Pearson 卡方检验或 Fisher 精确概率法。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 结 果

本研究对 2022 年 11 月至 2023 年 11 月期间入住本院胸外科拟行胸腔镜手术的 82 例学龄前患儿进行筛查。其中 1 例入院后出现上呼吸道感染出院、1 例术前存在肝功能异常、2 例家属不愿意参与本研究、2 例家属不愿意接受手术,以上 6 例被排除。最终 76 例患儿纳入本研究,经随机化分组,每组 38 例。其中 2 例于手术过程中中转为开胸手术,1 例 OLV 后血流动力学不稳定、2 例 OLV 时间  $< 30$  min。按照意向治疗分析(intention-to-treat analysis, ITT)方法,最终 71 例学龄前儿童的数据参与最后的结果分析(图 1),其中 PCV-VG 组 36 例、VCV 组 35 例,两组患儿基线特征及术中相关情况差异无统计学意义( $P > 0.050$ ),具有可比性,见表 1。

PCV-VG 组与 VCV 组术后肺部并发症的发生

表 1 两组接受胸外科手术患儿的人口学特征和术中变量

Table 1 Demographic characteristics and intraoperative variables of children undergoing thoracic surgery in two groups

分组	年龄 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,岁]	体重 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,kg]	身高 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,cm]	性别 (男/女)	ASA 分级 ( I ~ II/Ⅲ)	疾病种类 (CCAM/隔离肺)	OLV 侧别 (左/右)
PCV-VG 组( $n=36$ )	3.1(2.0,4.5)	13.7(11.0,16.9)	96.5(85.5,104.8)	19/17	30/6	21/15	15/21
VCV 组( $n=35$ )	2.7(1.5,4.5)	13.5(10.8,18.0)	91.0(79.9,110.0)	16/19	34/1	22/13	18/17
$U/\chi^2$ 值	580.500	615.000	589.000	0.350	3.810	0.150	0.680
$P$ 值	0.568	0.863	0.637	0.638	0.107	0.809	0.479

分组	麻醉时长 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,min]	手术时长 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,min]	OLV 时长 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,min]	输液量 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,mL]	尿量 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,mL]	失血量 [ $M(Q_1, Q_3)$ ,mL]
PCV-VG 组( $n=36$ )	194.0 (162.5,236.3)	130.0 (110.0,158.0)	86.0 (69.3,121.5)	430.0 (250.0,537.5)	125.0 (70.0,200.0)	10(10,20)
VCV 组( $n=35$ )	200.0 (150.0,260.0)	140.0 (90.0,185.0)	85.0 (60.0,155.0)	400.0 (280.0,540.0)	150.0 (50.0,240.0)	20(10,30)
$U/\chi^2$ 值	608.000	626.000	627.000	627.000	620.500	592.000
$P$ 值	0.800	0.963	0.972	0.787	0.913	0.056

注 PCV-VG:压力控制通气-容量保证; VCV:容量控制通气; ASA:美国麻醉医师协会; CCAM:先天性肺囊性腺瘤样畸形; OLV:单肺通气; PCV-VG 组 1 例及 VCV 组 2 例需要静脉输注浓缩红细胞,分别为 1u、0.5u 及 1u,  $P = 0.641$

率分别为 8.3% 和 28.6%,差异有统计学意义( $P = 0.035$ )。进一步研究发现,PCV-VG 组患儿在术后胸腔积液、呼吸道感染、气胸以及肺不张的发生率上虽然低于 VCV 组,但差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。两组均无一例发生呼吸衰竭、支气管痉挛或吸入性肺炎。

PCV-VG 组有 2 例(5.6%)于 OLV 期间发生低氧血症,而 VCV 组有 8 例(22.7%)发生低氧血症,差异有统计学意义( $P = 0.046$ )。此外,仅 VCV 组有 1 例 OLV 期间发生严重低氧血症。PCV-VG 组患儿术后机械通气时长中位数为 97.5 min,较 VCV 组的 120 min 明显缩短,差异有统计学意义( $P = 0.040$ )。PCV-VG 组术后住院时长中位数为 7 天,较 VCV 组(8 天)明显缩短,差异有统计学意义( $P = 0.024$ )。见表 2。

从 T2 到 T4,PCV-VG 组的 Ppeak 均低于 VCV 组,差异均具有统计学意义( $P < 0.05$ )。T2 时间点可以观察到围手术期最高气道压力。此时,PCV-VG 组的 Ppeak 中位数为 20 cmH<sub>2</sub>O,显著低于 VCV 组(25 cmH<sub>2</sub>O)。关于 Raw 的结果显示,在 OLV 期间,PCV-VG 组的气道阻力低于 VCV 组。然而,这些差异仅在 T2 时间点有统计学意义( $P = 0.027$ )。此外,术中采用了 PCV-VG 通气模式的患儿在 OLV 期间的 Cydn 相比使用 VCV 通气模式的患儿有改善,差异亦有统计学意义(T2 时间点,  $P = 0.021$ ; T3 时间点,  $P = 0.041$ )。



表 2 两组接受胸外科手术患儿的主要观察指标及部分次要观察指标比较

Table 2 Comparison of primary and selected secondary outcome measures between the two groups of children undergoing thoracic surgery

分组	PPCs	呼吸系统感染	肺不张	呼吸衰竭	胸腔积液	气胸
PCV-V 组( $n=36$ )	3(8.3%)	1(2.8%)	2(5.6%)	0	1(2.8%)	1(2.8%)
VCV 组( $n=35$ )	10(28.6%)	4(11.4%)	5(14.3%)	0	2(5.7%)	3(8.6%)
$U/\chi^2$ 值	4.860	2.090	1.520	/	0.380	1.120
$P$ 值	0.035	0.199	0.260	/	0.614	0.357
分组	支气管痉挛	误吸性肺炎	低氧血症	严重低氧血症	术后机械通气时长 [ $M(Q_1, Q_3)$ , min]	术后住院时长 [ $M(Q_1, Q_3)$ , 日]
PCV-V 组( $n=36$ )	0	0	2(5.6%)	0	97.5(70.0,137.5)	7(5,9)
VCV 组( $n=35$ )	0	0	8(22.7%)	1(2.9%)	120.0(95.0,140.0)	8(7,15)
$U/\chi^2$ 值	/	/	0.790	1.040	452.500	435.000
$P$ 值	/	/	0.046	0.493	0.040	0.024

注 PCV-VG:压力控制通气-容量保证; VCV:容量控制通气; PPCs:术后肺部并发症

表 3 两组接受胸外科手术患儿术中呼吸力学参数比较

Table 3 Comparison of intraoperative respiratory mechanics parameters between the two groups of children undergoing thoracic surgery

气道峰压[ $M(Q_1, Q_3)$ , cmH <sub>2</sub> O]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	14(12,16)	16(14,17)	20(18,22)	17(15,18)	15(13,16)
VCV 组( $n=35$ )	15(14,17)	17(16,18)	25(23,27)	20(18,22)	17(14,18)
$U$ 值	477.500	483.000	137.500	276.000	377.000
$P$ 值	0.077	0.088	<0.001	<0.001	0.003
Raw( $\bar{x} \pm s$ )	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	35.7 $\pm$ 9.8	38.9 $\pm$ 9.9	48.7 $\pm$ 10.3	36.6 $\pm$ 8.4	30.2 $\pm$ 5.4
VCV 组( $n=35$ )	34.7 $\pm$ 10.4	41.7 $\pm$ 9.7	60.5 $\pm$ 13.3	45.5 $\pm$ 9.9	36.6 $\pm$ 7.5
$t$ 值	-0.390	1.210	4.180	4.080	4.160
$P$ 值	0.596	0.545	0.027	0.110	0.145
Cydn[ $M(Q_1, Q_3)$ , cmH <sub>2</sub> O]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	12.0(10.3,15.0)	10.0(8.3,12.8)	6.0(4.0,7.0)	8.0(7.0,9.0)	11.0(9.0,14.8)
VCV 组( $n=35$ )	11.0(8.0,14.0)	10.0(7.0,11.0)	5.0(4.0,6.0)	7.0(6.0,8.0)	10.0(8.0,13.0)
$U$ 值	747.000	711.500	821.500	811.500	743.000
$P$ 值	0.164	0.325	0.021	0.041	0.186

注 PCV-VG:压力控制通气-容量保证; VCV:容量控制通气; T0:麻醉诱导后; T1:手术开始时; T2:OLV 后 30 min; T3:OLV 结束时; T4:手术结束时

表 4 两组接受胸外科手术患儿术中血气分析结果比较

Table 4 Comparison of intraoperative arterial blood gas analysis results between two groups of children undergoing thoracic surgery

PaO <sub>2</sub> [ $M(Q_1, Q_3)$ , mmHg]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	242.3 (227.6,287.0)	217.2 (207.1,248.3)	136.4 (120.4,165.0)	190.2 (179.3,202.2)	225.8 (205.9,240.0)
VCV 组( $n=35$ )	232.3 (212.3,277.0)	212.8 (195.8,246.0)	100.0 (89.4,137.5)	176.8 (142.1,189.8)	219.6 (202.7,242.7)
$U$ 值	745.000	746.500	932.500	873.500	667.000
$P$ 值	0.184	0.137	0.002	0.015	0.597
PaCO <sub>2</sub> ( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	37.5 $\pm$ 2.8	38.8 $\pm$ 2.9	42.6 $\pm$ 2.7	40.7 $\pm$ 3.5	39.3 $\pm$ 2.0
VCV 组( $n=35$ )	36.7 $\pm$ 2.8	39.1 $\pm$ 4.1	48.2 $\pm$ 3.9	43.2 $\pm$ 5.0	39.0 $\pm$ 2.8
$t$ 值	-1.270	0.390	7.080	2.450	-0.540
$P$ 值	0.637	0.177	0.048	0.029	0.084

续上表

PH( $\bar{x} \pm s$ )	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	7.38 $\pm$ 0.03	7.37 $\pm$ 0.03	7.32 $\pm$ 0.05	7.34 $\pm$ 0.04	7.37 $\pm$ 0.04
VCV 组( $n=35$ )	7.39 $\pm$ 0.03	7.38 $\pm$ 0.04	7.28 $\pm$ 0.04	7.33 $\pm$ 0.05	7.36 $\pm$ 0.03
$t$ 值	1.450	0.480	-3.600	-0.660	-1.180
$P$ 值	0.780	0.283	0.581	0.497	0.485
PaO <sub>2</sub> /FiO <sub>2</sub> [ $M(Q_1, Q_3)$ , mmHg]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	403.8 (379.3, 478.2)	362.0 (345.1, 413.9)	227.4 (200.7, 275.1)	317.0 (298.8, 337.0)	376.4 (323.2, 400.0)
VCV 组( $n=35$ )	387.2 (353.8, 461.7)	354.7 (326.3, 410.0)	167.7 (149.0, 229.2)	294.7 (236.8, 316.3)	366.0 (337.8, 404.5)
$U$ 值	745.000	746.500	932.500	873.500	667.000
$P$ 值	0.184	0.137	0.002	0.015	0.597
RI [ $M(Q_1, Q_3)$ , %]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	64.5(35.3, 77.5)	68.5(41.3, 80.0)	154.0(119.8, 208.3)	94.0(67.5, 107.5)	61.5(42.8, 74.0)
VCV 组( $n=35$ )	49(35.0, 79.0)	69.0(52.0, 100.0)	270.0(210, 293.0)	156.0(78.0, 196.0)	72.0(45.0, 94.0)
$U$ 值	671.500	511.5	272.500	372.000	514.000
$P$ 值	0.633	0.173	<0.001	0.003	0.182

注 PCV-VG:压力控制通气-容量保证; VCV:容量控制通气; T0:麻醉诱导后; T1:手术开始时; T2:OLV 后 30 min; T3:OLV 结束时; T4:手术结束时

在每个亚组内, OLV 期间的 PaO<sub>2</sub> 均低于 TLV 期间, 而 PaCO<sub>2</sub> 的趋势正好相反。在 T2 和 T3 时间点, PCV-VG 组显示出较高的 PaO<sub>2</sub> 值, 而 PaCO<sub>2</sub> 水平较低。两组在 OLV 期间的 PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> 比值相比 TLV 期间, 呈下降趋势。此外, 在 VCV 组, T3 和 T4 时间点的 PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> 比值均明显低于 PCV-VG 组, 差异有统计学意义(T2 时间点,  $P=0.002$ ; T3 时间点,  $P=0.015$ )。在 OLV 期间, VCV 组的 RI 中位数

(T2 时间点为 270%, T3 时间点为 156%) 高于 PCV-VG 组(T2 时间点为 154%, T3 时间点为 94%), 差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。两组患儿术中心率及血压差异无统计学意义( $P>0.05$ )。在 OLV 期间, PCV-VG 组的 SpO<sub>2</sub> 中位数高于 VCV 组(T2: 99% 比 96%; T3: 100% 比 98%), 差异有统计学意义( $P<0.001$ )。见表 5。

表 5 两组接受胸外科手术患儿术中循环监测数据比较

Table 5 Comparison of intraoperative circulation monitoring data between two groups of children undergoing thoracic surgery

MAP( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	63.4 $\pm$ 4.6	62.5 $\pm$ 4.4	56.9 $\pm$ 5.7	57.7 $\pm$ 3.9	59.4 $\pm$ 5.2
VCV 组( $n=35$ )	64.0 $\pm$ 6.2	62.2 $\pm$ 7.7	58.0 $\pm$ 6.2	56.3 $\pm$ 5.3	59.6 $\pm$ 6.5
$t$ 值	0.300	-1.190	0.890	-0.790	0.480
$P$ 值	0.159	0.115	0.820	0.107	0.462
HR( $\bar{x} \pm s$ , 次/分)	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	111.1 $\pm$ 13.8	104.5 $\pm$ 14.2	108.6 $\pm$ 13.3	109.6 $\pm$ 13.6	109.4 $\pm$ 12.5
VCV 组( $n=35$ )	113.5 $\pm$ 15.0	106.7 $\pm$ 15.2	107.9 $\pm$ 14.0	107.9 $\pm$ 14.1	107.2 $\pm$ 12.6
$t$ 值	0.700	0.630	-0.220	-0.580	-0.730
$P$ 值	0.908	0.683	0.936	0.800	0.773
SpO <sub>2</sub> [ $M(Q_1, Q_3)$ , %]	T0	T1	T2	T3	T4
PCV-V 组( $n=36$ )	100(100, 100)	100(98, 100)	99(97, 100)	100(98, 100)	100(99, 100)
VCV 组( $n=35$ )	100(100, 100)	100(98, 100)	96(93, 97)	98(96, 99)	100(99, 100)
$U$ 值	647.500	610.500	1061.000	939.000	631.000
$P$ 值	0.697	0.732	<0.001	<0.001	0.660

注 PCV-VG:压力控制通气-容量保证; VCV:容量控制通气; T0:麻醉诱导后; T1:手术开始时; T2:OLV 后 30 min; T3:OLV 结束时; T4:手术结束时

## 讨 论

VCV 作为小儿 OLV 期间常用且经典的机械通气模式,能够确保稳定和准确的通气量<sup>[14-15]</sup>。但部分研究表明,在胸外科手术患者中,VCV 可能导致更高的炎性介质释放、更高的吸气峰压以及更差的动态顺应性<sup>[16-17]</sup>。PCV-VG 结合了 VCV 和压力控制通气的优点。在 PCV-VG 模式下,使用减速流模式来确保在最低吸气气道压力下提供恒定的潮气量<sup>[10]</sup>。PCV-VG 模式在成人患者中的应用已有较多研究和报道<sup>[18-20]</sup>。然而,针对儿童(尤其是学龄前儿童)的相关研究相对较少。由于儿童的肺解剖生理特点与成人存在显著差异,PCV-VG 在儿童中的应用及其效果亟需更多研究来验证和完善。本研究结果表明,PCV-VG 模式相较于临床上常用的 VCV 模式,在减少学龄前儿童术后肺部并发症、改善单 OLV 期间的氧合水平以及减少呼吸机相关肺损伤方面具有显著优势。

在胸外科手术中,OLV 技术的应用虽然为手术提供了清晰的操作视野,但由于儿童的肺部结构和功能尚未成熟,使得儿童在 OLV 期间更容易受到通气不均和压力波动的影响。OLV 过程中通气侧肺可能承受过高压力,导致肺泡过度膨胀,而未通气侧肺可能发生不完全萎陷。这些因素均增加了术后肺部并发症如肺不张、肺炎或急性肺损伤的风险<sup>[21-23]</sup>。PCV-VG 模式通过维持恒定的潮气量,同时提供更柔和的压力调节,减少了肺组织的过度膨胀和塌陷。这种自适应的通气策略减少了压力波动带来的肺损伤风险,从而有效降低了术后肺部并发症的发生率<sup>[2,24-25]</sup>。与上述研究结果一致,本研究也发现了在学龄前儿童 OLV 中应用 PCV-VG 模式,能够有效降低肺部并发症的发生率,缩短患儿术后机械通气时间及术后住院时间,改善患儿预后。这一研究发现支持了 PCV-VG 在学龄前儿童 OLV 中应用的安全性和有效性。

在胸外科手术中,OLV 对学龄前儿童的氧合有着特殊的影响。由于儿童(尤其是学龄前儿童)解剖生理特征和肺功能储备尚未完全发育成熟,导致他们在 OLV 期间更容易出现氧合不良。儿童的肺容积较小,气道较窄,这使得在 OLV 时,有效气体交换的面积更为有限。此外,儿童的血液循环系统对肺通气/灌注比例失调的耐受性较低,未通气肺的血流分流可能产生更严重的低氧血症<sup>[22]</sup>。PCV-VG 能够根据设定的潮气量自动调节通气压力,这对于

顺应性快速变化的儿童肺部尤为重要。这种模式有效维持了稳定的潮气量,减少了过度通气或通气不足导致的氧合波动。此外,PCV-VG 通过减少气道压力骤升的风险,维持更好的肺泡开放状态,从而优化了气体交换,改善了氧合。临床研究证据表明,机械通气相关肺损伤可能会加重已有的肺损伤,或使肺组织更易受到进一步损伤。这种现象被描述为“二次打击肺损伤模型”。在该模型中,初始损伤(如基础肺病、创伤或感染)使肺组织处于脆弱状态,接下来的打击(如机械通气的应激、过度膨胀或氧化应激)将进一步加重损伤。对儿童而言,PCV-VG 这种精准的通气调节不仅为学龄前期患儿提供了更高的氧合状态,还有效降低了呼吸机相关肺损伤的风险,从而为整个手术过程提供更安全的保障。由于儿科人群的特殊性,目前关于学龄前儿童在 OLV 中应用不同通气模式的高质量研究和文献有限。基于上述考量,我们设计并开展了本研究,并确认了在学龄前儿童 OLV 过程中应用 PCV-VG 模式的安全性和益处。然而,本研究仍有若干局限性需要考虑。首先,并未测量炎症生物标志物和氧化应激指数以直接评估肺损伤。其次,本研究未探讨 PCV-VG 模式对患儿术后长期肺损伤有无改善作用。最后,尽管在本研究中术后住院时长存在显著的统计学差异,但这一差异在临床上往往容易忽视。在实际临床工作中,术后住院时间往往受到外科操作、家属意愿以及社会经济因素等多方面的综合影响。因此,通气模式对患儿术后住院时长的具体影响仍然难以明确。这些局限性表明,未来的大规模、多中心研究应进一步验证 PCV-VG 模式在学龄前儿童中应用的长期影响和潜在优势。此外,PCV-VG 模式在其他类型胸外科手术以及更广泛的年龄组中应用的效果也值得进一步研究。

综上,在接受胸外科手术的学龄前儿童中应用 PCV-VG 能够有效降低术后肺部并发症的发生率,提升 OLV 期间氧合水平,降低气道压力,减轻呼吸机相关肺损伤。PCV-VG 可作为接受胸科手术的学龄前患儿优选机械通气模式,但仍需进一步研究以确保其在更广泛临床应用中的有效性。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 王蕾负责文献检索;王蕾、肖婷、屈双权负责论文设计;朱义、朱诗利负责数据收集;王蕾、杜真负责研究结果分析与讨论;王蕾负责论文撰写;肖婷、屈双权负责全文知识性内容的审读与修正

## 参 考 文 献

- [1] 肖婷,屈双权. 小儿单肺通气技术新进展[J]. 临床小儿外科

- 杂志, 2016, 15 (6): 625-628. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2016.06.027.
- Xiao T, Qu SQ. New progress in single lung ventilation technology for children[J]. J Clin Ped Sur, 2016, 15 (6): 625-628. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2016.06.027.
- [2] Yao WY, Yang MY, Cheng QH, et al. Effect of pressure-controlled ventilation-volume guaranteed on one-lung ventilation in elderly patients undergoing thoracotomy[J]. Med Sci Monit, 2020, 26: e921417. DOI: 10.12659/msm.921417.
- [3] Karzai W, Schwarzkopf K. Hypoxemia during one-lung ventilation: prediction, prevention, and treatment[J]. Anesthesiology, 2009, 110 (6): 1402-1411. DOI: 10.1097/ALN.0b013e31819fb15d.
- [4] DiCarlo JV, Raphaely RC, Steven JM, et al. Pulmonary mechanics in infants after cardiac surgery[J]. Crit Care Med, 1992, 20 (1): 22-27. DOI: 10.1097/00003246-199201000-00011.
- [5] Beitler JR, Malhotra A, Thompson BT. Ventilator-induced lung injury[J]. Clin Chest Med, 2016, 37 (4): 633-646. DOI: 10.1016/j.ccm.2016.07.004.
- [6] Kuchnicka K, Maciejewski D. Ventilator-associated lung injury[J]. Anaesthesiol Intensive Ther, 2013, 45 (3): 164-170. DOI: 10.5603/ait.2013.0034.
- [7] Schilling T, Kozian A, Kretschmar M, et al. Effects of propofol and desflurane anaesthesia on the alveolar inflammatory response to one-lung ventilation[J]. Br J Anaesth, 2007, 99 (3): 368-375. DOI: 10.1093/bja/aem184.
- [8] Szegedi LL, Bardoczky GI, Engelman EE, et al. Airway pressure changes during one-lung ventilation[J]. Anesth Analg, 1997, 84 (5): 1034-1037. DOI: 10.1097/00000539-199705000-00015.
- [9] Toker MK, Altıparmak B, Uysal Aİ, et al. Comparison of pressure-controlled volume-guaranteed ventilation and volume-controlled ventilation in obese patients during gynecologic laparoscopic surgery in the Trendelenburg position[J]. Braz J Anesthesiol, 2019, 69 (6): 553-560. DOI: 10.1016/j.bjan.2019.09.003.
- [10] Lin F, Pan LH, Qian W, et al. Comparison of three ventilatory modes during one-lung ventilation in elderly patients[J]. Int J Clin Exp Med, 2015, 8 (6): 9955-9960.
- [11] Young CC, Harris EM, Vacchiano C, et al. Lung-protective ventilation for the surgical patient: international expert panel-based consensus recommendations[J]. Br J Anaesth, 2019, 123 (6): 898-913. DOI: 10.1016/j.bja.2019.08.017.
- [12] Duff JP, Rosychuk RJ, Joffe AR. The safety and efficacy of sustained inflations as a lung recruitment maneuver in pediatric intensive care unit patients[J]. Intensive Care Med, 2007, 33 (10): 1778-1786. DOI: 10.1007/s00134-007-0764-2.
- [13] Jammer I, Wickboldt N, Sander M, et al. Standards for definitions and use of outcome measures for clinical effectiveness research in perioperative medicine: European Perioperative Clinical Outcome (EPCO) definitions: a statement from the ESA-ESICM joint task-force on perioperative outcome measures[J]. Eur J Anaesthesiol, 2015, 32 (2): 88-105. DOI: 10.1097/eja.000000000000118.
- [14] Sentürk M. New concepts of the management of one-lung ventilation[J]. Curr Opin Anaesthesiol, 2006, 19 (1): 1-4. DOI: 10.1097/O1.aco.0000192778.17151.2c.
- [15] Zhang L, Wang YP, Chen XF, et al. Effects of bronchial blockers on gas exchange in infants with one-lung ventilation: a single-institutional experience of 22 cases[J]. Transl Pediatr, 2020, 9 (6): 802-808. DOI: 10.21037/tp-20-391.
- [16] Heimberg C, Winterhalter M, Strüber M, et al. Pressure-controlled versus volume-controlled one-lung ventilation for MIDCAB[J]. Thorac Cardiovasc Surg, 2006, 54 (8): 516-520. DOI: 10.1055/s-2006-924413.
- [17] Tan J, Song ZH, Bian QM, et al. Effects of volume-controlled ventilation vs. pressure-controlled ventilation on respiratory function and inflammatory factors in patients undergoing video-assisted thoracoscopic radical resection of pulmonary carcinoma[J]. J Thorac Dis, 2018, 10 (3): 1483-1489. DOI: 10.21037/jtd.2018.03.03.
- [18] Li JL, Cai BG, Yu DD, et al. Pressure-controlled ventilation-volume guaranteed mode combined with an open-lung approach improves lung mechanics, oxygenation parameters, and the inflammatory response during one-lung ventilation: a randomized controlled trial[J]. Biomed Res Int, 2020, 2020: 1403053. DOI: 10.1155/2020/1403053.
- [19] Wang P, Zhao SH, Gao ZB, et al. Use of volume controlled vs. pressure controlled volume guaranteed ventilation in elderly patients undergoing laparoscopic surgery with laryngeal mask airway[J]. BMC Anesthesiol, 2021, 21 (1): 69. DOI: 10.1186/s12871-021-01292-y.
- [20] Gunenc FS, Seyidova İ, Ozbilgin S, et al. Comparison of pressure controlled, volume controlled, and volume guaranteed pressure controlled modes in prone position in patients operated for lumbar disc herniation: a randomized trial[J]. Medicine, 2024, 103 (6): e37227. DOI: 10.1097/md.00000000000037227.
- [21] 上官雪娟, 屈双权. 儿童单肺通气研究进展[J]. 临床小儿外科杂志, 2023, 22 (2): 188-191. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202206049-017.
- Shang Guan XJ, Qu SQ. Recent advances of one-lung ventilation in children[J]. J Clin Ped Sur, 2023, 22 (2): 188-191. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202206049-017.
- [22] Templeton TW, Piccioni F, Chatterjee D. An update on one-lung ventilation in children[J]. Anesth Analg, 2021, 132 (5): 1389-1399. DOI: 10.1213/ane.0000000000005077.
- [23] Lohser J. Evidence-based management of one-lung ventilation[J]. Anesthesiol Clin, 2008, 26 (2): 241-272. DOI: 10.1016/j.anclin.2008.01.011.
- [24] Kim KN, Kim DW, Jeong MA, et al. Comparison of pressure-controlled ventilation with volume-controlled ventilation during one-lung ventilation: a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Anesthesiol, 2016, 16 (1): 72. DOI: 10.1186/s12871-016-0238-6.
- [25] Song SY, Jung JY, Cho MS, et al. Volume-controlled versus pressure-controlled ventilation-volume guaranteed mode during one-lung ventilation[J]. Korean J Anesthesiol, 2014, 67 (4): 258-263. DOI: 10.4097/kjae.2014.67.4.258.
- (收稿日期: 2024-09-22)
- 本文引用格式:**王蕾, 肖婷, 杜真, 等. 压力控制通气-容量保证模式对学龄前胸外科手术患儿的影响: 一项随机对照研究[J]. 临床小儿外科杂志, 2024, 23 (12): 1166-1173. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202409055-011.
- Citing this article as:** Wang L, Xiao T, Du Z, et al. Effect of pressure-controlled ventilation-volume guaranteed mode on preschool children undergoing thoracic surgery: a randomized controlled study[J]. J Clin Ped Sur, 2024, 23 (12): 1166-1173. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202409055-011.