

经鼻湿化快速充氧交换通气联合手控喷射通气与喉罩通气在儿童肺泡灌洗术中的对比：一项随机、对照、非劣效研究

丁加慧^{1▲} 侯慧艳^{1,2▲} 徐睿¹ 季莹莹² 李文献¹ 蔡一榕¹ 韩园^{1△}

(¹复旦大学附属眼耳鼻喉科医院麻醉科 上海 200031; ²上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心麻醉科 上海 200127)

【摘要】 目的 评估经鼻湿化快速充氧交换通气(transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange, THRIVE)联合手控喷射通气(manually controlled jet ventilation, MCJV)在儿童全麻肺泡灌洗术中的通气效果与安全性,验证其在维持术中氧合等方面不差于喉罩通气(laryngeal mask airway, LMA),并比较术野暴露、术中及术后通气和换气等指标。方法 采用单中心、前瞻性、随机对照、非劣效设计,纳入2024年1—6月收治的2~12岁需全麻下行肺泡灌洗术的患儿,按照1:1随机分配至THRIVE+MCJV组($n=40$)和LMA组($n=40$)。主要结局指标为术中最低经皮氧分压(transcutaneous oxygen partial pressure, TcPO₂),次要结局指标包括术中脉搏氧饱和度(peripheral oxygen saturation, SpO₂)、术中经皮二氧化碳分压(transcutaneous carbon dioxide partial pressure, TcPCO₂)、术野暴露满意度、手术操作中断率、拔管时间及并发症发生率。结果 THRIVE+MCJV组和LMA组患儿术中TcPO₂最低值[(202.08±69.17) mmHg vs. (227.95±67.26) mmHg]和术中平均SpO₂(99.35%±1.44% vs. 99.34%±1.66%)差异均无统计学意义。与LMA组比较,THRIVE+MCJV组患儿术中TcPCO₂的峰值更高[(70.3±12.66) mmHg vs. (60.18±13.07) mmHg, $P=0.0007$],拔除通气装置时间更短[(4.74±1.57) min vs. (5.83±1.68) min, $P=0.0029$],术野暴露满意度更佳[4.83(5,5) vs. 4.53(4,5), $P=0.034$]。组间手术操作中断率、术后躁动、剧烈咳嗽及恶心呕吐发生率差异均无统计学意义。结论 在儿童全麻肺泡灌洗术中,采用THRIVE联合MCJV的方法可达到与LMA相类似的氧合水平,缩短术后拔管时间,并可改善术野暴露;但其TcPCO₂水平更高,在有经验的麻醉医师管理下可作为LMA通气的替代方案。

【关键词】 经鼻湿化快速充氧交换通气(THRIVE); 手控喷射通气(MCJV); 喉罩通气(LMA); 肺泡灌洗; 非劣效研究; 儿童

【中图分类号】 R614 **【文献标志码】** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-8467.2026.02.011

A randomized controlled non-inferiority trial of transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange combined with manually controlled jet ventilation versus laryngeal mask airway in pediatric bronchoalveolar lavage under general anesthesia

DING Jia-hui^{1▲}, HOU Hui-yan^{1,2▲}, XU Rui¹, JI Ying-ying²,
LI Wen-xian¹, CAI Yi-rong¹, HAN Yuan^{1△}

(¹Department of Anesthesiology, Eye and ENT Hospital, Fudan University, Shanghai 200031, China;

²Department of Anesthesiology, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China)

上海市卫健委卫生行业临床研究专项(202240315)

▲DING Jia-hui and HOU Hui-yan contributed equally to this work

△Corresponding author E-mail: yuan.han@fdecent.org

网络首发时间:2026-01-07 10:51:07 网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/31.1885.R.20260106.1606.004

【Abstract】 Objective To evaluate the intraoperative ventilation efficacy and safety of transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE) combined with manually controlled jet ventilation (MCJV) in pediatric patients undergoing bronchoalveolar lavage under general anesthesia, and to verify non-inferiority to laryngeal mask airway (LMA) in maintaining adequate oxygenation, and to compare surgical field visualization, as well as intraoperative and postoperative ventilation and gas exchange parameters. **Methods** A single-center, prospective, randomized controlled non-inferiority trial was conducted. Children aged 2-12 years scheduled for bronchoalveolar lavage under general anesthesia from Jan to Jun 2024 were enrolled and randomly allocated at a 1:1 ratio to either THRIVE+MCJV group ($n=40$) or LMA group ($n=40$). The primary outcome was the intraoperative lowest transcutaneous oxygen partial pressure ($TcPO_2$). Secondary outcomes included intraoperative average and the lowest peripheral oxygen saturation (SpO_2), the average and peak of transcutaneous carbon dioxide partial pressure ($TcPCO_2$), surgical field exposure satisfaction scores, the incidence of procedural interruption, duration of the ventilation device removal, and rate of postoperative complications. **Results** The lowest intraoperative $TcPO_2$ values were (202.08 ± 69.17) mmHg in THRIVE+MCJV group and (227.95 ± 67.26) mmHg in the LMA group. There was no statistically significant difference between THRIVE+MCJV group and LMA group in the mean intraoperative SpO_2 ($99.35\% \pm 1.44\%$ vs. $99.34\% \pm 1.66\%$). Compared to the LMA group, the intraoperative peak $TcPCO_2$ was higher in the THRIVE+MCJV group [(70.3 ± 12.66) mmHg vs. (60.18 ± 13.07) mmHg, $P=0.0007$], shorter duration to the removal of the ventilation device [(4.74 ± 1.57) min vs. (5.83 ± 1.68) min, $P=0.0029$], and superior surgical field exposure satisfaction scores [$4.83(5,5)$ vs. $4.53(4,5)$, $P=0.034$]. No significant differences were observed in either procedural interruption incidence or postoperative complications (agitation, severe cough, nausea/vomiting). **Conclusion** In pediatric bronchoalveolar lavage under general anesthesia, the combination of THRIVE and MCJV demonstrated non-inferiority to LMA in maintaining intraoperative oxygenation. It also improved surgical field visualization and enabled earlier extubation. Although associated with higher $TcPCO_2$, this approach may serve as a viable alternative to LMA ventilation when managed by experienced anesthesiologists.

【Key words】 transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE); manually controlled jet ventilation (MCJV); laryngeal mask airway (LMA); bronchoalveolar lavage; non-inferiority trial; child

* This work was supported by the Clinical Research Special Fund of Shanghai Municipal Health Commission in Health Field (202240315).

在儿童全身麻醉下行肺泡灌洗术时,维持良好的氧合并最大限度减少通气装置对手术视野的干扰是围术期管理的难点^[1]。此类患儿通常伴有肺炎或其他呼吸系统疾病,手术期间既要保持安全的氧合水平,还需配合外科经气道操作。喉罩通气(laryngeal mask airway, LMA)因操作简便、创伤小、血流动力学影响轻微等优势,作为一种声门上气道管理工具广泛应用于儿童麻醉。然而,在气道探查类手术中,LMA存在通气不足或误吸的潜在风险^[2-3],另一方面,LMA的通气导管通常外径较大,置入后占据咽喉部空间,干扰术者对咽喉或声门区

的直接视野或手术器械的操作通道,这在气道解剖狭窄或需要精细操作的儿童患者中尤为明显。因此,在部分上气道操作中,需权衡LMA所带来的通气便利性与术野暴露充分性之间的矛盾。

近年来,经鼻湿化快速充氧交换通气(transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange, THRIVE)作为一种新型窒息氧合技术,广泛应用于各类手术,如声门区激光手术、喉乳头状瘤切除术、会厌囊肿摘除术、气道异物取出术等^[4-6]。这项技术通过输送高流量湿化氧气,可在无气管插管和自主呼吸暂停的情况下维持较长时间

的氧合^[7-8]。相较于传统低流量窒息氧合技术,THRIVE具有一定的CO₂排出能力,可延缓血CO₂上升的速度^[9-10]。然而,对于具有肺部疾病的患儿,因有效肺泡数量少、肺实变等因素而导致单独使用THRIVE可能存在氧合维持困难^[11-12]。手控喷射通气(manually controlled jet ventilation, MCJV)通过通气导管输送间歇性高压氧气,操作者可根据通换气状态灵活掌握通气频率及压力参数,提供恰当的通气支持。由于仅需将一根细通气管(吸痰管)置入声门下,MCJV对手术操作的干扰较小;但频繁应用可能导致气压伤以及可能干扰肺灌洗操作^[13-14]。因此,结合THRIVE稳定供氧及MCJV灵活的通气支持的特点,或可作为替代LMA进行肺泡灌洗术气道管理的方案^[15]。

本研究通过单盲、随机对照、非劣效试验,旨在比较THRIVE联合MCJV方法与LMA在儿童全身麻醉下肺泡灌洗术中的应用效果及安全性,以期为该类手术中的气道管理策略提供科学依据,并为THRIVE和MCJV在儿童复杂气道手术中的潜在应用探索提供支持。

资料和方法

研究设计 本研究为单中心、单盲、随机对照试验,经上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心伦理委员会批准(批准号:SCMCIRB-K2023234-2),于2024年1—6月在上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心进行。所有入组患儿监护人术前均签署知情同意书。入选标准:年龄2~12岁;ASA分级I~III级;全身麻醉下择期肺泡灌洗手术。排除标准^[8]:已知或预期的插管困难,已知或预期的面罩通气困难,术前需要持续氧疗,患有先天性心脏病或呼吸系统发育畸形,神经肌肉阻滞使用禁忌证,返流误吸风险,对麻醉和手术中所用药物有过敏史,近期颅底骨折/颌面骨折,无法鼻通气(鼻衄/鼻中隔偏曲等)。本研究的实施和评估符合SPIRIT研究报告规范。

研究方案 由独立的生物统计学专家按照1:1的比例生成随机数字表。随机化结果封装于按顺序编号的不透明信封中,并于麻醉开始前开启。入组患者按照1:1的比例被随机分配至THRIVE+MCJV组或LMA组。由于THRIVE+MCJV和

LMA在外观上的显著差异,麻醉医师和试验研究人员无法实施盲法,受试者及其监护人不知晓分组情况。

干预措施 所有患儿术前禁食固体食物或牛奶6 h,禁水2 h,病房内开放外周静脉通路。患儿进入支气管镜室后,常规心电监护,监测项目包括心率(heart rate, HR)、无创血压、心电图、脉搏氧饱和度(peripheral oxygen saturation, SpO₂);经皮氧分压(transcutaneous oxygen pressure, TcPO₂)和经皮二氧化碳分压(transcutaneous carbon dioxide pressure, TcPCO₂)通过经皮监测仪(transcutaneous monitor, TCM, 丹麦Radiometer公司)进行实时连续监测^[16]。在使用TCM之前,对传感器进行校准,选择患儿的第3~5肋间进行皮肤清洁,以确保传感器与皮肤的良好接触。

THRIVE+MCJV组 待基础值采集完成后,开始静脉麻醉诱导。经静脉给予阿托品0.01 mg/kg、地塞米松0.2 mg/kg,异丙酚2~3 mg/kg(北京费森尤斯卡比医药有限公司)、芬太尼2 μg/kg(宜昌人福药业有限责任公司)、罗库溴铵0.6 mg/kg(德国Hameln Pharmaceuticals GmbH公司)进行诱导麻醉,继以异丙酚4~6 mg·kg⁻¹·h⁻¹+瑞芬太尼0.1 μg·kg⁻¹·min⁻¹持续泵注,维持麻醉深度,同时面罩吸入氧浓度为100%(6 L/min),完成给氧去氮,确保呼出气氧浓度>90%,且TcPCO₂>200 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa,下同),达标后停止面罩通气。经鼻高流量吸氧装置放置在患儿鼻腔处供氧(广州费雪派克医疗器械有限公司,体重≥10 kg的患儿使用S号鼻导管吸氧),温度37℃,流速2 L·kg⁻¹·min⁻¹,氧浓度100%。在Macintosh喉镜辅助下,经口将内径1.5 mm的供氧管(灭菌吸痰管)放至声门下,将供氧管道固定于口角处,连接到Manujet III(德国VBM公司),备MCJV通气。MCJV的驱动压为1~2.5 bar,根据胸廓抬起程度等实际情况调整压力及通气频率。保持患儿头部后仰以开放气道。

LMA组 麻醉和面罩通气同THRIVE+MCJV组。根据患儿体重选择型号合适的喉罩(≤10 kg使用1.5#; 10~20 kg使用2#; 20~30 kg使用2.5#; 30~50 kg使用3#, 丹麦Ambu® AuraFlex™公司)。喉罩置入并确认位置正确后,调整呼吸机参数以确保有效通气,随后手术开始。

记录两组患儿在手术操作过程中因呼吸事件

导致操作中中断的次数(中断次数 ≥ 1 次定义为阳性)、手术时长、通气失败发生率(呼吸事件导致操作中中断并更换的通气工具,记作阳性)、 SpO_2 平均值、血氧饱和度最低值、 $TcPO_2$ 值和 $TcPCO_2$ 值。两组患儿在手术结束即刻停用维持药物,并使用舒更葡糖钠(美国Patheon公司)4 mg/kg拮抗神经肌肉阻滞。常规吸痰,清理气道,患儿在恢复自主呼吸、潮气量 > 5 mL/kg、呼吸频率 > 12 次/分时拔除MCJV供氧导管或者喉罩。

将患儿转运至麻醉后复苏室(post anesthesia care unit, PACU)进行苏醒观察。在PACU,常规使用布地奈德和异丙托溴铵进行雾化吸入,记录最低的 SpO_2 ,并记录苏醒时长(最短不低于30 min)、剧烈咳嗽发生情况(1 min内连续咳嗽超过10 s)、不良反应及处理情况。Aldrete评分 ≥ 9 分为出PACU标准,记录出室 $TcPO_2$ 值和 $TcPCO_2$ 值。采用儿童麻醉苏醒谵妄评分(pediatric anesthesia emergence delirium score, PAEDs)对患儿躁动情况进行评分,PAEDs ≥ 10 分记作苏醒期躁动阳性,予以异丙酚或者家属陪伴安抚等措施处理。

气道干预 术中如果出现患儿 SpO_2 降低至80%以下,外科医师应即刻中断手术操作,取出纤支镜,通过加快MCJV或者调整LMA,观察患者氧合变化情况,并对患者进行口腔/气道分泌物清理,如果现有的通气方式无法纠正低氧的情况,立刻进行面罩加压通气,保障患者氧合,甚至采用喉镜直视下插入气管导管的方式进行气道管理,保障患者的通气。

观察指标

主要结局指标 术中患儿最低 $TcPO_2$ 。

其他指标 记录年龄、体重、身高、BMI,在入室后、麻醉诱导后、出手术室、出PACU时及术中每隔5 min记录1次平均动脉压(mean blood pressure, MBP)、HR、 SpO_2 、 $TcPO_2$ 和 $TcPCO_2$ 数值;记录患者的最低 SpO_2 、 $TcPO_2$ 和最高 $TcPCO_2$ 值,并记录手术操作是否中断、手术时长、喉痉挛、心律失常、术中呼吸并发症(如气道出血、气管支气管穿孔、纵膈气肿、气胸、胃充气),手术医师术野满意度评分;复苏期记录复苏时长、PACU不良事件发生率(如低氧、躁动、剧烈咳嗽等)、拔管时间、PACU停留时间、额外药物使用情况等。

手术医师术中根据气道内分泌物情况、出血情况及吸引频率进行评估,并通过气道内操作满意度

进行术野满意度评分^[17],评分标准为1~5分,分值越高代表术野越清晰,操作越顺利。1~3分表示术野遮挡、影响操作,满意度差;4~5分代表术野基本清晰,仅偶尔需吸引,不影响操作,满意度良好。评分方法参考Fromme-Boezaart术野出血评分标准^[18],并结合本研究儿童肺泡灌洗术的操作特点进行调整。

试验终止指标 出现以下情况时终止试验。

(1)自愿退出:受试者监护人可随时改变意愿退出研究项目;(2)干预期间出现干预相关的严重不良事件,如难以纠正的严重心律失常等,或需转入重症监护室治疗;(3)干预期间 $TcPCO_2 > 120$ mmHg超过5 min,或 $SpO_2 < 80\%$ 持续3 min^[7,19-20],且改为面罩通气或气管插管通气完成手术。

样本量的确定 根据既往文献^[21]及本研究前期预实验数据,传统LMA组患者术中最低 $TcPO_2$ 的平均值为 (200 ± 60) mmHg,设定非劣效界值(non-inferiority margin)为15 mmHg,认为若试验组(THRIVE+MCJV组)的 $TcPO_2$ 不低于对照组15 mmHg以上,即可判定其在组织氧合维持方面不劣于对照组。基于上述参数,在单侧显著性水平 $\alpha = 0.025$,检验效能(Power)=0.80条件下,使用PASS 2021软件进行样本量估算,结果显示每组需纳入至少37例受试者方可满足非劣效检验要求。考虑约5%的缺失率,最终确定每组纳入40例,共计80例患者参与研究。

统计学分析 使用SPSS 23.0统计软件进行数据统计分析。正态分布的计量资料采用 $\bar{x} \pm s$,非正态分布的用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示;参数数据用 t 检验进行分析;非参数数据采用Mann-Whitney检验进行分析。计数资料用频数(n)和百分比($\%$)表示,使用 χ^2 检验和Fisher精确检验进行比较。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

患儿的一般情况 2024年1—6月共收集98位患儿,12人因术前需要持续氧疗、6人因先天性心脏病或呼吸系统发育畸形排除;最终80例患儿完成入组,并完成研究数据收集,纳入统计分析。两组患儿术前的一般情况无统计学差异,详见表1。

表1 两组患儿的一般资料对照

Characteristics	THRIVE+MCJV group (n=40)	LMA group (n=40)	P
Age (y)	7.15 ± 1.78	7.33 ± 1.71	0.643
Weight (kg)	24.95 ± 8.69	25.71 ± 8.65	0.694
Height (cm)	125.28 ± 12.67	124.37 ± 13.82	0.760
BMI	15.72 ± 2.48	15.96 ± 2.54	0.667
Sex (M/F)	18/22	21/19	0.650
ASA classification (Grade I / II / III)	0/38/2	0/37/3	0.644
Type of surgery			
Bronchoalveolar lavage	33	35	0.531
Bronchoalveolar lavage and removal of airway foreign body	7	5	
Duration of pulmonary infection (d)	9.7 ± 4.12	9.35 ± 3.53	0.684
Pulmonary imaging			
Pneumonia only	7	3	0.419
Combined with airway foreign body	7	5	
Combined with lung consolidation	21	24	
Combined with lung consolidation and pleural effusion	5	8	

THRIVE: Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange; MCJV: Manually controlled jet ventilation; LMA: Laryngeal mask airway; BMI: Body mass index.

两组患儿 TcO_2 、 $TcPCO_2$ 、 SpO_2 、心率、血压的比较 THRIVE+MCJV 组与 LMA 组的术中最低 $TcPO_2$ 分别为 (202.08 ± 69.17) mmHg 和 (227.95 ± 67.26) mmHg, 两组间差异无统计学意义。尽管 THRIVE+MCJV 组术中最高 $TcPCO_2$ 高于 LMA 组 $[(70.3 \pm 12.66)$ mmHg *vs.* (60.18 ± 13.07) mmHg, $P=0.0007$), 离开手术室时 THRIVE+MCJV 组的 $TcPCO_2$ 也高于 LMA 组 $[(36.35 \pm 3.18)$ mmHg *vs.* (34.83 ± 1.69) mmHg, $P=0.009$], 但已恢复至生理范围。氧合监测数据显示, 两组术中平均 SpO_2 $(99.35\% \pm 1.44\% \text{ vs. } 99.34\% \pm 1.66\%)$ 及最低 SpO_2 $(97.08\% \pm 5.33\% \text{ vs. } 97.38\% \pm 5.55\%)$ 差异均无统计学意义。血流动力学指标方面, THRIVE+MCJV 组离开手术室时心率高于 LMA 组 $[(134.13 \pm 11.68)$ 次/分 *vs.* (128.7 ± 14.04) 次/分, $P=0.064$], 但 MBP 在各时间节点差异均无统计学意义, 详见表 2。上述结果提示, THRIVE+MCJV 联合通气方案在主要氧合终点上与传统 LMA 类似, 且未引发 CO_2 潴留相关血流动力学紊乱等问题。

两组操作中中断、通气失败、手术视野满意度及麻醉手术时间的比较 两组术中因呼吸事件导致的手术中中断率 $(5.0\% \text{ vs. } 10.0\%)$ 、通气失败率

$(2.5\% \text{ vs. } 5.0\%)$, 差异无统计学意义。THRIVE+MCJV 组术野满意度评分显著优于传统 LMA 组 $[4.83(5, 5) \text{ vs. } 4.53(4, 5), P=0.034]$ 。尽管两组手术时间差异无统计学意义 $[(10.34 \pm 5.31) \text{ min vs. } (10.09 \pm 3.45) \text{ min}]$, 但 THRIVE+MCJV 组通气装置移除时间更短 $[(4.74 \pm 1.57) \text{ min vs. } (5.83 \pm 1.68) \text{ min}, P=0.0029]$, 详见表 3。

两组患儿苏醒期并发症和 PACU 停留时长的比较 术后恢复监测数据显示, THRIVE+MCJV 组与 LMA 组在 PACU 相关结局指标上未见统计学差异(表 4)。两组患者 PACU 停留时长 $[(32.98 \pm 3.42) \text{ min vs. } (32.2 \pm 2.95) \text{ min}]$ 和 PAED 评分 $(1.4 \pm 3.11 \text{ vs. } 2.3 \pm 4.26)$ 差异均无统计学意义。在并发症方面, THRIVE+MCJV 组苏醒期躁动发生率为 $5.0\% (2/40)$, 与 LMA 组的 $10.0\% (4/40)$ 相比差异无统计学意义; 剧烈咳嗽发生率分别为 $35.0\% (14/40)$ 和 $25.0\% (10/40)$, 恶心呕吐发生率分别为 $12.5\% (5/40)$ 和 $7.5\% (3/40)$, 差异均无统计学意义。

讨 论

本研究首次采用前瞻性、随机对照试验设计,

表2 两组患儿 TcPO₂、TcPCO₂、SpO₂、心率、血压的比较

Tab 2 Comparison of perioperative changes in TcPO₂, TcPCO₂, SpO₂, HR and MBP in children between the two groups ($\bar{x} \pm s$)

Items	THRIVE+MCJV group (n=40)	LMA group (n=40)	P
TcPO ₂ baseline (mmHg)	83.73 ± 6.87	83.65 ± 3.79	0.951
Lowest TcPO ₂ during surgery (mmHg)	202.08 ± 69.17	227.95 ± 67.26	0.094
TcPO ₂ at the time of leaving the operating room (mmHg)	187.73 ± 54.83	196.28 ± 43.55	0.442
TcPO ₂ at the time of leaving PACU (mmHg)	88.70 ± 4.59	89.90 ± 4.79	0.256
TcPCO ₂ baseline (mmHg)	31.73 ± 3.05	32.20 ± 2.52	0.450
Highest TcPCO ₂ during surgery (mmHg)	70.30 ± 12.66	60.18 ± 13.07	< 0.001
TcPCO ₂ at the time of leaving the operating room (mmHg)	53.65 ± 6.77	48.90 ± 8.63	0.008
TcPCO ₂ at the time of leaving PACU (mmHg)	36.35 ± 3.18	34.83 ± 1.69	0.009
SpO ₂ (%) at baseline	99.25 ± 1.10	99.20 ± 0.82	0.819
Average SpO ₂ (%) during surgery	99.35 ± 1.44	99.34 ± 1.66	0.972
Lowest SpO ₂ (%) during surgery	97.08 ± 5.33	97.38 ± 5.55	0.806
SpO ₂ (%) at the time of leaving PACU	96.28 ± 1.88	95.80 ± 2.56	0.348
HR baseline (beat/min)	95.45 ± 17.25	96.78 ± 12.05	0.692
HR after induction (beat/min)	101.00 ± 16.07	104.58 ± 13.49	0.285
HR at the time of leaving the operating room (beat/min)	134.13 ± 11.68	128.70 ± 14.04	0.064
HR at the time of leaving PACU (beat/min)	96.82 ± 10.66	95.85 ± 9.36	0.876
MBP baseline (mmHg)	79.48 ± 6.91	77.48 ± 6.59	0.189
MBP after induction (mmHg)	77.05 ± 5.31	77.18 ± 6.69	0.927
MBP at the time of leaving the operating room (mmHg)	87.85 ± 7.72	85.88 ± 8.69	0.286
MBP at the time of leaving PACU (mmHg)	83.23 ± 5.28	82.40 ± 5.29	0.487

TcPO₂: Transcutaneous oxygen pressure; TcPCO₂: Transcutaneous carbon dioxide pressure; SpO₂: Peripheral oxygen saturation; HR: Heart rate; MBP: Mean blood pressure; PACU: Post anesthesia care unit. 1 mmHg=0.133 kPa.

表3 两组操作中中断率、手术时长、手术视野满意度评分、手术和麻醉复苏时长的比较

Tab 3 Comparison of procedure interruption rate, surgery duration, surgical field satisfaction score, and ventilatory device

removal time during alveolar lavage between the two groups [$\bar{x} \pm s$, M (P₂₅, P₇₅) or n(%)]

Parameters	THRIVE+MCJV group (n=40)	LMA group (n=40)	P
Procedure interruption	2 (5.0)	4 (10.0)	0.671
Ventilation failure	1 (2.5)	2 (5.0)	0.798
Surgical field satisfaction score (1-5)	4.83 (5,5)	4.53 (4,5)	0.034
Operation duration (min)	10.34 ± 5.31	10.09 ± 3.45	0.805
Time to ventilatory device removal (min)	4.74 ± 1.57	5.83 ± 1.68	0.003

THRIVE: Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange; MCJV: Manually controlled jet ventilation; LMA: Laryngeal mask airway.

表4 两组患儿 PACU 停留时长、躁动评分、谵妄、剧烈咳嗽及恶心呕吐发生率的比较

Tab 4 Comparison of outcomes between the two groups in PACU

[$\bar{x} \pm s$ or n(%)]

Items	THRIVE+MCJV group (n=40)	LMA group (n=40)	P
The duration of PACU stay (min)	32.98 ± 3.42	32.20 ± 2.95	0.280
PAED score (0-20)	1.40 ± 3.11	2.30 ± 4.26	0.284
Emergence agitation	2 (5.0)	4 (10.0)	0.671
Severe cough	14 (35.0)	10 (25.0)	0.464
Nausea and vomiting	5 (12.5)	3 (7.5)	0.709

THRIVE: Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange; MCJV: Manually controlled jet ventilation; LMA: Laryngeal mask airway; PACU: PACU; Post anesthesia care unit; PAED: Pediatric anesthesia emergence delirium score.

系统评估 THRIVE 联合 MCJV 在儿童肺泡灌洗术中的通气效果与临床可行性。结果表明,该联合通气方案在维持术中氧合方面不劣于传统 LMA,有良好的安全性和实用性。研究显示,THRIVE+MCJV 在维持稳定 SpO_2 与 $TcPO_2$ 方面效果良好,与 LMA 组无显著差异,验证了其氧合保障能力。此外,尽管 THRIVE+MCJV 组术中 $TcPCO_2$ 峰值升高(平均约 70 mmHg),但未超过临床接受阈值^[22],且术后迅速恢复至生理范围,未观察到相关不良事件,提示该通气策略能够在临床允许范围内短时程实现合理的 CO_2 水平控制,且在术野暴露清晰度与拔管效率方面具有一定优势,为儿童复杂气道手术中的通气管理提供了新的选择路径。

在本研究中,我们选取患儿术中最低 $TcPO_2$ 作为主要结局指标。 $TcPO_2$ 是一项无创、连续监测的参数,能够实时动态反映组织氧合状态,尤其在气道共享、操作中断或难以插管的场景下,对潜在的低氧风险预测敏感性好^[23]。此外,在 FiO_2 恒定、体温与皮肤灌注良好等前提下, $TcPO_2$ 的趋势与 PaO_2 具有良好线性相关性,虽无法完全替代动脉血气分析,但在围术期小儿监测中已被广泛用于评估氧合安全性^[24]。为增强通气安全性的评估,本研究还设置了 SpO_2 与 $TcPCO_2$ 等次要指标,以多参数联合判断氧合和气体交换状态,提升结论的科学性与严谨性。

肺泡灌洗患儿往往合并肺部感染、气道异物、气道高反应、肺实变、胸腔积液等并发症,是围术期呼吸并发症高发人群^[25]。术中需要维持气道通畅、充分氧合,同时避免通气方式对术野的干扰,是围术期气道管理中的技术难点。若气道管理方案选择不当,不仅可增加患儿发生喉痉挛、支气管痉挛等风险,还可能导致手术中断甚至失败。因此,探索和比较不同的术中通气方案,为个性化管理气道提供循证医学证据具有重要的实践意义。

THRIVE 提供了无创、无呼吸式的高流量湿化氧气^[26],MCJV 则以手控间歇性通气加以补偿^[27],从而弥补单独使用 THRIVE 可能出现的通气不足。与传统 LMA 通气相比,这种联合策略具有明显优势:其一,能够提供稳定、充分的氧合保障,降低术中低氧血症发生风险;其二,通过动态流量调节技术使气道分泌物清除效率提高,辅以喷射通气产生的层流效应,可显著改善支气管镜视野清晰度,减

少术野污染^[28-29]。

THRIVE+MCJV 组观察到较高的 $TcPCO_2$ 峰值,可能与 MCJV 的间歇性通气模式及灌洗操作过程中的气道吸引有关。灌洗操作要求气道内持续吸引以清除灌洗液和分泌物,此过程可能移除了 MCJV 瞬时高压气流中的氧气,从而降低肺泡内有效通气量,导致短暂性 CO_2 蓄积。然而,该指标仍处于临床可接受范围(55~75 mmHg)。研究发现,允许范围内高碳酸血症具有促进呼吸快速恢复的作用,加速术后拔管^[30-33]。此外,湿化的高流量氧供($>2 L \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)通过延长安全窒息窗口补偿了通气不足的缺陷,还可因减少气道黏膜损伤、稀释黏稠分泌物,降低术后肺不张及肺炎的风险。

THRIVE 联合 MCJV 在术野暴露方面表现优异,潜在原因包括:(1)鼻导管通气方式为手术操作提供了更充分的空间,避免了 LMA 占据声门上空间造成的空间遮挡,尤其在解剖结构狭窄或术区精细操作需求高的患儿中更具优势;(2)高流氧气和 MCJV 间歇性喷射所形成的层流效应有助于清除气道分泌物,改善镜下清晰度^[34]。此外,本研究观察到 THRIVE+MCJV 组拔管时间更短,这可能与允许性高碳酸血症促进自主呼吸早期恢复有关,该差异可能还受其他因素影响,尚需进一步研究确认。

本研究有一定局限:(1)采用经皮监测 $TcPO_2$ / $TcPCO_2$ 替代动脉血气分析,虽具良好相关性且便于实时连续监测,但在极端生理状态下的准确性仍需进一步验证。(2)研究对象为 2~12 岁、轻中度肺部疾病的患儿,研究结论的外推性在年龄更小(<2 岁)或存在严重基础疾病的患儿中尚需审慎评估。(3)THRIVE+MCJV 通气策略对操作者的技术熟练度要求较高,临床推广需依赖系统培训及经验积累。(4)该通气方式存在一定程度的 CO_2 滞留,提示该策略可能更适用于短时手术,其在长时间手术中的安全性尚需进一步评估。(5)未设置术后长期随访,限制了术后肺部并发症及远期恢复情况的全面评估。

尽管存在上述不足,THRIVE 联合 MCJV 仍展现出良好的临床应用前景。对于需精细操作且术野暴露要求较高的气道手术(如异物取出、喉裂修复、喉乳头状瘤切除),该技术可通过维持开放气道与稳定氧合的协同作用,有望降低术中气道失控风险,提升操作安全性与效率。未来需通过扩大样本

量的多中心研究进一步证实其在更复杂手术场景中的安全性与有效性,为儿童围术期气道管理提供更全面的循证支持。

综上所述,THRIVE联合MCJV在儿童全身麻醉下肺泡灌洗术中展示了与LMA相似的氧合效果和气道安全性。这种新型通气方式可作为儿童肺泡灌洗术的有效替代方案,为临床实践提供了新的依据。

作者贡献声明 丁加慧 论文构思和撰写,数据整理和分析。侯慧艳 论文构思和撰写,数据采集。徐睿 论文构思和撰写。季莹莹 数据采集和分析。李文献 研究设计,论文指导。蔡一榕 项目管理,研究设计。韩国 项目构建,研究设计,论文指导和修订。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] NAGUIB ML, STREETMAN DS, CLIFTON S, *et al.* Use of laryngeal mask airway in flexible bronchoscopy in infants and children [J]. *Pediatr Pulmonol*, 2005, 39(1): 56-63.
- [2] NUSSBAUM E, ZAGNOEV M. Pediatric fiberoptic bronchoscopy with a laryngeal mask airway [J]. *Chest*, 2001, 120(2): 614-616.
- [3] SUZEN A, KARAKUS SC, ERTURK N. The role of flexible bronchoscopy accomplished through a laryngeal mask airway in the treatment of tracheobronchial foreign bodies in children [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2019, 117: 194-197.
- [4] HUMPHREYS S, SCHIBLER A. Nasal high-flow oxygen in pediatric anesthesia and airway management [J]. *Paediatr Anaesth*, 2020, 30(3): 339-346.
- [5] KOTWINSKI D, PATON L, LANGFORD R. The role of high flow nasal oxygen therapy in anaesthesia [J]. *Br J Hosp Med (Lond)*, 2018, 79(11): 620-627.
- [6] LI Y, YANG J. Comparison of transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange and facemasks in preoxygenation: a systematic review and meta-analysis [J]. *Biomed Res Int*, 2022, 2022: 9858820.
- [7] RIVA T, PEDERSEN TH, SEILER S, *et al.* Transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange for oxygenation of children during apnoea: a prospective randomised controlled trial [J]. *Br J Anaesth*, 2018, 120(3): 592-599.
- [8] LEI G, WU L, XI C, *et al.* Transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange augments oxygenation in children with juvenile onset recurrent respiratory papillomatosis during surgery: a prospective randomized crossover controlled trial [J]. *Anesth Analg*, 2023, 137(3): 578-586.
- [9] PATEL A, NOURAEI SA. Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE): a physiological method of increasing apnoea time in patients with difficult airways [J]. *Anaesthesia*, 2015, 70(3): 323-329.
- [10] GUSTAFSSON IM, LODENIUS A, TUNELLI J, *et al.* Apnoeic oxygenation in adults under general anaesthesia using transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE) - a physiological study [J]. *Br J Anaesth*, 2017, 118(4): 610-617.
- [11] TRACHSEL D, SVENDSEN J, ERB TO, *et al.* Effects of anaesthesia on paediatric lung function [J]. *Br J Anaesth*, 2016, 117(2): 151-163.
- [12] SCHIBLER A, HENNING R. Positive end-expiratory pressure and ventilation inhomogeneity in mechanically ventilated children [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2002, 3(2): 124-128.
- [13] LIU Y, CHEN L, LI S. Controlled ventilation or spontaneous respiration in anesthesia for tracheobronchial foreign body removal: a meta-analysis [J]. *Paediatr Anaesth*, 2014, 24(10): 1023-1030.
- [14] KENDIGELEN P. The anaesthetic consideration of tracheobronchial foreign body aspiration in children [J]. *J Thorac Dis*, 2016, 8(12): 3803-3807.
- [15] NEKHENDZY V, SAXENA A, MITTAL B, *et al.* The safety and efficacy of transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange for laryngologic surgery [J]. *Laryngoscope*, 2020, 130(12): E874-E881.
- [16] SADOT E, GUT G, SIVAN Y. Alveolar ventilation in children during flexible bronchoscopy [J]. *Pediatr Pulmonol*, 2016, 51(11): 1177-1182.
- [17] PARVIZI A, HADDADI S, FAGHII HABIBI A, *et al.* Dexmedetomidine efficacy in quality of surgical field during endoscopic sinus surgery [J]. *Iran J Otorhinolaryngol*, 2019, 31(106): 281-288.
- [18] GIFFONI RB, ARGUELLES-HERNANDEZ J, DALMASCHIO MEP, *et al.* Dexmedetomidine supplementation for surgical field enhancement in endonasal surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *Rhinology*, 2024, 62(1): 2-12.
- [19] COTE CJ, WILSON S, AMERICAN ACADEMY OFP,

- et al.* Guidelines for monitoring and management of pediatric patients before, during, and after sedation for diagnostic and therapeutic procedures[J]. *Pediatrics*, 2019, 143(6):e20191000.
- [20] HUANG L, DHARMAWARDANA N, BADENOCH A, *et al.* A review of the use of transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange for patients undergoing surgery in the shared airway setting[J]. *J Anesth*, 2020, 34(1):134-143.
- [21] NISHIYAMA T, NAKAMURA S, YAMASHITA K. Comparison of the transcutaneous oxygen and carbon dioxide tension in different electrode locations during general anaesthesia[J]. *Eur J Anaesthesiol*, 2006, 23(12):1049-1054.
- [22] WEI W, LI X, FENG L, *et al.* The effect of intraoperative transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange on emergence from general anesthesia in patients undergoing microlaryngeal surgery: a randomized controlled trial[J]. *BMC Anesthesiol*, 2023, 23(1):202.
- [23] VAN WIJK JJ, VAN WETERINGEN W, HOEKS SE, *et al.* Validation of a new combined transcutaneous TCPCO₂ and TCPO₂ sensor in children in the operating theater[J]. *Paediatr Anaesth*, 2022, 32(3):429-435.
- [24] PANDEY G, BUTT SP, GHORI A, *et al.* Evaluation of transcutaneous non-invasive blood gas analysis for monitoring gas exchange in pediatric cardiac surgical patients post extubation[J]. *Braz J Cardiovasc Surg*, 2025, 40(3):e20240010.
- [25] MURRAY J, BOTTLE A, SHARLAND M, *et al.* Risk factors for hospital admission with RSV bronchiolitis in England: a population-based birth cohort study[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2):e89186.
- [26] BOOTH AWG, VIDHANI K, LEE PK, *et al.* Spontaneous respiration using intravenous anaesthesia and hi-flow nasal oxygen (STRIVE Hi) maintains oxygenation and airway patency during management of the obstructed airway: an observational study[J]. *Br J Anaesth*, 2017, 118(3):444-451.
- [27] LI S, LIU Y, TAN F, *et al.* Efficacy of manual jet ventilation using Manujet III for bronchoscopic airway foreign body removal in children [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2010, 74(12):1401-1404.
- [28] FRIZZOLA M, MILLER TL, RODRIGUEZ ME, *et al.* High-flow nasal cannula: impact on oxygenation and ventilation in an acute lung injury model [J]. *Pediatr Pulmonol*, 2011, 46(1):67-74.
- [29] DYSART K, MILLER TL, WOLFSON MR, *et al.* Research in high flow therapy: mechanisms of action [J]. *Respir Med*, 2009, 103(10):1400-1405.
- [30] KAUR S, DE LUCA R, KHANDAY MA, *et al.* Role of serotonergic dorsal raphe neurons in hypercapnia-induced arousals[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1):2769.
- [31] KAUR S, LYNCH N, SELA Y, *et al.* Lateral parabrachial FoxP2 neurons regulate respiratory responses to hypercapnia[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1):4475.
- [32] KAUR S, PEDERSEN NP, YOKOTA S, *et al.* Glutamatergic signaling from the parabrachial nucleus plays a critical role in hypercapnic arousal[J]. *J Neurosci*, 2013, 33(18):7627-7640.
- [33] KAUR S, WANG JL, FERRARI L, *et al.* A genetically defined circuit for arousal from sleep during hypercapnia[J]. *Neuron*, 2017, 96(5):1153-1167, e5.
- [34] PUTZ L, MAYNE A, DINCQ AS. Jet ventilation during rigid bronchoscopy in adults: a focused review [J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016:4234861.

(收稿日期:2025-03-06; 编辑:王蔚)