

肺保护通气对创伤性脑损伤患者脑功能的影响

辛超 高巨 葛亚丽 吴可汀 陈小萍

扬州大学临床医学院 江苏省苏北人民医院麻醉科, 扬州 225000

通信作者: 陈小萍, Email: 330989007@qq.com

【摘要】目的 评价驱动压指导的个体化呼气末正压 (Positive End-expiratory Pressure, PEEP) 肺保护性通气策略对中度创伤性脑损伤 (Traumatic Brain Injury, TBI) 脑功能的影响。**方法** 急诊实施颅内血肿清除术患者 111 名, 年龄 18 ~ 65 岁, BMI 17 ~ 28 kg/m², ASA 分级 III ~ IV 级, 术前格拉斯哥昏迷评分 9 ~ 11 分。采用随机数字表法分为 0 cmH₂O PEEP 组 (0 PEEP)、5 cmH₂O PEEP 组即传统组 (5 PEEP) 和驱动压指导个体化 PEEP 通气组 (P 组)。采用容量控制通气模式, VT 为 6 mL/kg, FiO₂ 为 60%, 吸呼比 1:2, 0 PEEP 组和 5 PEEP 组患者气管插管后即给予 PEEP 0 或 5 cmH₂O 进行通气直至手术结束, P 组插管后行驱动压指导的个体化 PEEP 滴定通气策略。分别于气管插管后 5 min (T1)、手术开始后 60 min (T3)、手术结束后 5 min (T4) 行血气分析, 记录 PaO₂、PaCO₂, 肺动态顺应性 (C_{dyn}); 于麻醉诱导前 (T0)、个体化组 PEEP 滴定后 (T2, 0 PEEP、5 PEEP 两组对应通气后 10 min) 和 T4 时刻测量视神经鞘直径 (ONSD); 于术前、术后 1 d、3 d 采用 ELISA 法测定血清神经元特异性烯醇化酶 (NSE) 浓度; 追踪术后 30 d 内神经系统并发症 (颅内感染、颅内高压、癫痫、脑水肿等) 发生情况。**结果** 与 0 PEEP、5 PEEP 组比较, P 组 T3~4 时 C_{dyn} 和 PaO₂ 升高 ($P < 0.05$); 3 组之间 ONSD 差异无统计学意义 ($P > 0.05$); P 组 NSE 在术后 1、3 d 明显下降, 3 组患者术后 30 d 神经系统并发症的发生率差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。**结论** 驱动压指导的个体化 PEEP 肺保护性通气策略有助于改善 TBI 患者的肺功能和脑功能。

【关键词】 驱动压; 呼气末正压; 肺保护性通气; 创伤性脑损伤; 肺动态顺应性; 颅内压; 视神经鞘直径; 神经元特异性烯醇化酶

基金项目: 江苏省青年医学重点人才项目 (QNRC2016337)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2023.12.016

Effects of lung protective ventilation on brain function in patients with traumatic brain injury

Xin Chao, Ge Yali, Gao Ju, Wu Keting, Chen Xiaoping

Department of Anesthesiology, Clinical Medical College of Yangzhou University Northern Jiangsu People's Hospital Yangzhou 225000 China

Corresponding author: Chen Xiaoping, Email: 330989007@qq.com

【Abstract】Objective To evaluate the effect of individualized positive end-expiratory pressure (PEEP) ventilation strategy guided by driving pressure on intraoperative intracranial pressure in patients with moderate traumatic brain injury (TBI). **Methods** Total of 111 patients aged 18-65 years old, with BMI of 17-28 kg/m², ASA grade of III - IV, and Glasgow coma score of 9-11 before operation were treated with evacuation of intracranial hematoma in emergency. The patients were randomly divided into 0 cmH₂O PEEP group (Group 0 PEEP), 5 cmH₂O PEEP group (Group 5 PEEP) and individualized PEEP ventilation group (Group P) guided by driving pressure. The volume control ventilation mode is adopted, VT is 6 mL/kg, FiO₂ is 60%, and the inspiratory expiratory ratio is 1:2. Patients in Group 0 PEEP and Group 5 PEEP were given PEEP 0 or 5 cmH₂O for ventilation after tracheal intubation until the end of the operation. Patients in Group

P were given individualized PEEP titration ventilation strategy guided by driving pressure after intubation. Blood gas analysis was performed at 5 min (T1) after tracheal intubation, 60 min (T3) after operation, and 5 min (T4) after operation. PaO₂, PaCO₂, and dynamic compliance (C_{dyn}) were recorded. The optic nerve sheath diameter (ONSD) was measured before anesthesia induction (T0), after PEEP titration in group P (T2, 10 min after ventilation in group 0 PEEP and 5 PEEP) and at T4; Serum neuron specific enolase (NSE) concentration was measured by ELISA before and 1 day and 3 days after operation; The occurrence of nervous system complications (intracranial infection, intracranial hypertension, epilepsy, brain edema, etc.) within 30 days after operation was followed up. **Results** Compared with group 0 PEEP and 5 PEEP, C_{dyn} and PaO₂ in group P increased at T3-4 ($P < 0.05$), ONSD was not significantly different among the three groups ($P > 0.05$), NSE in group P decreased significantly at 1 and 3 days after operation, and the incidence of neurological complications in the three groups was not significantly different at 30 days after operation ($P > 0.05$). **Conclusions** Individualized PEEP ventilation strategy guided by driving pressure can help improve lung and brain function in TBI patients.

【 Key words 】 Drive pressure; Positive end-expiratory pressure; Lung protective ventilation; Traumatic brain injury; Lung dynamic compliance; Intracranial pressure; Optic nerve sheath diameter; Neuron-specific enolase

Fund program: Key Medical Talents Project for Young People in Jiangsu Province (QNRC2016337)

DOI:10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2023.12.016

TBI 是全球重大公共卫生事件, 每年约 1 000 万人因此遭受巨大创伤以及巨额的经济负担^[1-2]。TBI 患者常继发肺部及脑部并发症, 其中, 直接的颅脑损伤会降低机体对气道的保护和破坏天然防御屏障, 从而引发多种肺损伤, 如神经性肺水肿、急性呼吸窘迫综合征和通气相关性肺炎。与此同时, 肺部的生理病理改变(如缺氧等)又会正反馈影响大脑, 加重颅内高压, 从而引发相关神经系统疾病^[3-4]。因此, 对颅脑损伤手术患者进行肺保护通气近年来备受关注^[5-6]。驱动压指导的个体化 PEEP 通气策略已应用于胸部和腹部手术及危重症患者, 能有效改善肺氧合功能, 降低术后肺部并发症的发生率^[7-9]。然而 PEEP 在颅脑手术中的应用仍存争议, 研究表明 PEEP 会一定程度升高胸内压, 阻碍静脉的回流, 引起颅内压(ICP)升高^[11]。但也有研究发现, 当 PEEP 增加至 15 cmH₂O 时也并未引起 TBI 患者 ICP 升高以及脑灌注下降^[12]。本团队前期研究表明, TBI 患者术中采用固定 5 cmH₂O PEEP 可有效改善患者术中氧合, 且不引起颅内压的明显增高^[10]。本研究拟探讨驱动压指导的个体化 PEEP 通气策略对中度 TBI 患者术中的 ICP、血清脑损伤标志物水平以及术后 30 d 神经系统并发症的影响。

1 资料与方法

本研究已通过中国临床试验中心注册(注册

号: ChiCTR2200066795) 批准, 并获得本院医学伦理会的批准(伦理号: 2019KY-180), 与所有符合条件的研究参与者或其亲属签署书面知情同意书。选择需急诊行手术治疗的中度 TBI 患者, 术前格拉斯哥昏迷评分 9 ~ 11 分共 111 例: 年龄 18 ~ 65 岁, ASA 分级 III ~ IV 级, BMI 17 ~ 28 kg/m², 创伤后 6 h 内行 CT 或 MRI 检查确诊, 后直接送手术室紧急手术; 排除标准: 眼部外伤或眼部疾病史; 肺部疾病史、胸部手术史及外伤史; 此次外伤后引起的创伤性湿肺及其他脏器严重损伤; 精神病或神经系统疾病病史; 呕吐误吸或饱胃。通过计算机随机生成数字进行分配为 3 组 ($n=37$), 并将数字分配密封在不透明的信封中 0 cmH₂O PEEP 组(0 PEEP 组)、5 cmH₂O PEEP 组(5 PEEP 组)和驱动压指导的个体化 PEEP 通气组(P 组)。

患者入室后面罩吸氧(氧流量=6 L/min, FiO₂=100%), 开放下肢外周静脉通路, 常规监测 ECG、HR、NIBP 和 SpO₂, 并在局麻下行桡动脉穿刺置管术, 监测有创动脉血压。麻醉诱导: 将患者上半身抬高 30°, 静脉注射丙泊酚 0.5~1.0 mg/kg、罗库溴铵 0.6 mg/kg、舒芬太尼 0.5 μg/kg, 可视喉镜经口气管插管成功后连接麻醉机(Drager, 美国)行机械通气, 由一名控制呼吸机参数的麻醉医师打开信封, 并根据随机分组结果进行通气模式的设置。

通气模式：气管插管后，3 组患者均予以容量控制通气模式，潮气量为 6 mL/kg，FiO₂ 为 50%，吸呼比 1:2，呼吸频率 12~16 次/min，维持呼气末二氧化碳 (PetCO₂) 35~45 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa)。所有患者诱导后均进行股静脉穿刺置管，开放中心静脉通路。0 PEEP 组和 5 PEEP 组患者气管插管后即给予 PEEP 0 或 5 cmH₂O 进行通气直至手术结束，P 组插管后行驱动压指导的个体化 PEEP 滴定通气策略。PEEP 滴定方法：PEEP 从 2 cm H₂O 逐渐增加到 10 cm H₂O，每 10 个呼吸周期增加 1 cm H₂O，同时记录 P_{plat} 和 PEEP，并计算驱动压 ($\Delta P = P_{\text{plat}} - \text{PEEP}$)。最后选择产生最低驱动压力的 PEEP 水平后，保持该水平 PEEP 通气至术毕。

麻醉维持：吸入 1~2% 七氟醚，静脉泵注右美托咪定 0.6 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 、瑞芬太尼 6 ~ 12 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 、顺苯磺酸阿曲库胺 5 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。手术过程中采用目标导向液体管理，当平均动脉压降低幅度超过诱导前的 20% 或脉搏变异度 $\geq 12\%$ 时，酌情使用麻黄碱或去甲肾上腺素来维持血流动力学稳定。

分别于气管插管后 5 min (T1)、手术开始后 60 min (T3)、手术结束后 5 min (T4) 取 1 mL 动脉血进行血气分析，记录 PaO₂、PaCO₂、肺顺应性 (Cdyn)。分别于麻醉诱导前 (T0)、C 组 PEEP 滴定后 (T2, 0 PEEP、5 PEEP 两组对应通气后 10 min) 和 T4 时刻测量视神经鞘直径 (ONSD)。ONSD 由另一名经过专业超声技能培训、具有丰富超声技能工作经验、且对本研究不知情的医生测量。在上述时间点使用频率 5 ~ 10 MHz 的线阵探头 (wisonic, 中国)，采取合适角度，在距视乳头后 3 mm 横断面和矢状面位置分别测量 ONSD，每侧测量 3 次并取平均值。

取患者外周静脉血样 5 mL，采用 ELISA 法测定患者麻醉诱导前 5 min (T0)、术后 1 d (T5) 和术后 3 d (T6) 血清神经元特异性烯醇化酶 (NSE) 浓度 (试剂盒购于扬州必帮生物技术有限公司)。追踪术后 30 d 内神经系统并发症 (颅内感染、颅内高压、癫痫、脑水肿等) 发生情况。

依据本研究前期试验所得结果，设置检验水准 $\alpha = 0.05$ ，检验效能 $1 - \beta = 0.9$ ，利用 PASS 15 软件计算得到总样本量 $n=87$ 例 (每组 27 例)，考虑失访以及拒访的情况 20% 计算，最终至少需要的研究对象总计 111 例 (每组 37 例)。采用线性混合效应模型比较 ONSD、血清 NSE 浓度、PaO₂、PaCO₂、Cdyn 组内和组间的变化。并用最小均方

(least square mean) (95%CI) 进行数据描述。基线资料和术后神经系统并发症采用单因素方差分析检验。使用 R 软件 (4.0.1) 进行所有统计分析，以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

本研究初筛共纳入 111 例患者，由于 8 例患者拒绝参加试验，1 例患者眼部手术史、3 例患者眼部受伤、5 例患者术前呕吐误吸严重、1 例患者术后 24h 内死亡、2 例患者术后放弃治疗，最终纳入 91 例患者，其中 0 PEEP 组 31 例，5 PEEP 组 30 例，P 组 30 例。见图 1。

三组患者性别、年龄、BMI 和手术时间比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，见表 1。

相较于 T₁ 时刻，三组 MAP 在 T₃、T₄ 时刻均明显下降 ($P < 0.05$)。与 T₁ 时相比，三组 PaO₂ 和 Cdyn 在 T₃、T₄ 时刻均差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。其中，5 PEEP 组 T4 时刻 PaO₂ 和 Cdyn 明显高于 0 PEEP 组，而 P 组 T₃、T₄ 时刻 PaO₂ 和 Cdyn 均明显高于 0 PEEP 组。 ($P < 0.05$)。此外，

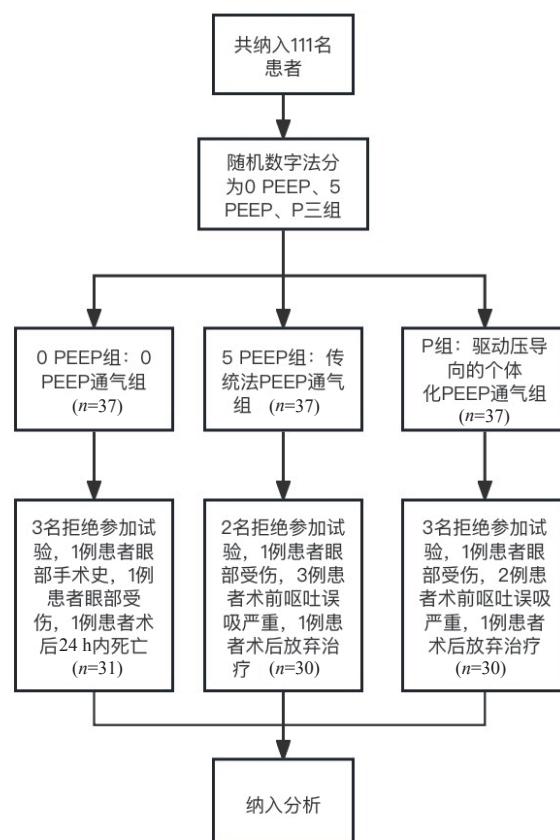


图 1 研究流程图

Fig.1 Study flow chart

三组的 PaO₂、PaCO₂、C_{dyn} 都随手术进程发生显著改变 ($P < 0.05$) 见表 2。

相较于 T1 时, T4 时三组 ONSD 都明显增加 ($P < 0.05$), 组间差异无统计学意义 ($P > 0.05$) (表 3)。本研究中三组 NSE 表达水平均随时间下降 ($P < 0.05$)。其中 C 组在术后第 1 天及第 3 天降幅更为明

表 1 患者临床基线资料
Table 1 Clinical baseline data of patients

指标	0 PEEP 组 (n=31)	5 PEEP 组 (n=30)	P 组 (n=30)	P 值
性别				
男	19(61.3%)	18(60.0%)	22(73.3%)	0.489
女	12(38.7%)	12(40.0%)	8(26.7%)	
年龄 (岁)	58.5 (34.0, 74.0)	60.0 (49.0, 71.0)	54.5 (50.0, 74.0)	0.216
ASA				
Ⅲ	11(35.5%)	8(26.7%)	10(30.0%)	0.744
Ⅳ	20(64.5%)	22(73.3%)	20(70.0%)	
BMI	24.0 (20.3, 26.8)	24.3 (20.9, 33.0)	24.6(19.6, 35.0)	0.709
出血量 (mL)	310.0 (200, 550)	300.0 (200, 450)	310.0 (210, 479.5)	0.579
补液量 (mL)	2500 (1879.0, 3100.0)	2600 (1926.0, 3150.0)	2500 (1900, 3000.0)	0.642
麻醉时间 (min)	235.2(195, 291.7)	245.0(205, 284.0)	240.8(200.6, 276.4)	0.448
手术时间 (min)	185.5(165.0, 230.5)	193.0(174.8, 251.5)	191.3(169.4, 242.6)	0.538

注: BMI: 体重指数。分类变量采用频数 (百分数) 描述, 不符合正态分布的连续变量采用中位数 (四分位数间距) 描述

表 2 三组患者不同时间血流动力学和呼吸力学指标的比较
Table 2 Comparison of hemodynamics and respiratory mechanics indexes in three groups of patients at different time

指标	0 PEEP 组 (n=31)	5 PEEP 组 (n=30)	P 组 (n=30)	P 值
MAP				
T ₁	105.4 (100.0~110.8)	109.3(103.8~114.7)	104.5(99.1~109.9)	0.434
T ₃	85.7 (80.3~91.2) ^d	80.5(75.1~85.9) ^e	82.4(76.9~87.8) ^f	0.395
T ₄	89.3 (83.8~94.7) ^d	83.1(77.7~88.5) ^e	83.6(78.1~89.0) ^f	0.211
PaO ₂				
T ₁	219(193~246)	254(228~280)	257(231~283)	0.085
T ₃	302(276~329) ^d	333(307~360) ^e	365(339~391) ^{ef}	0.005
T ₄	355(329~381) ^d	398(371~424) ^{be}	421(395~447) ^{ef}	0.002
PaCO ₂				
T ₁	42.8(41.1~44.5)	43.8(42.2~45.5)	44.5(42.8~46.2)	0.357
T ₃	40.4(38.7~42.1) ^d	39.1(37.4~40.8) ^e	37.8(36.1~39.5) ^f	0.542
T ₄	37.8(36.1~39.5) ^d	37.1(35.4~38.8) ^e	36.0(34.3~37.7) ^f	0.316
C _{dyn}				
T ₁	37.6(36.7~38.4)	38.0(37.1~38.8)	37.5(36.6~38.3)	0.706
T ₃	40.7(39.8~41.5) ^d	41.9(41.0~42.8) ^e	42.1(41.2~43.0) ^{ef}	0.049
T ₄	41.8(40.9~42.7) ^d	43.1(42.2~44.0) ^{be}	44.0(43.1~44.8) ^{ef}	0.004

注: 与 0 PEEP 组比较, ^{a, b, c} $P < 0.05$; 与 T₁ 时比较, ^{d, e, f} $P < 0.05$

表 3 三组患者不同时间 ONSD 的比较 (mm)
Table 3 Comparison of ONSD of three groups of patients at different time (mm)

组别	T ₁	T ₂	T ₄	P 值
0 PEEP 组 (n=31)	4.92(4.74~5.10)	5.02(4.84~5.20)	5.16(4.97~5.34) ^a	<0.001
5 PEEP 组 (n=30)	4.99(4.81~5.17)	4.99(4.81~5.17)	5.10(4.92~5.28) ^b	<0.001
P 组 (n=30)	5.02(4.83~5.20)	5.02(4.83~5.20)	5.09(4.90~5.27) ^c	0.002

注: 与 T₁ 时比较, ^{a, b, c} $P < 0.05$

显 ($P < 0.05$) (表 4)。3 组患者术后 30 d 神经系统并发症的发生率差异无统计学意义, $P > 0.05$, 见表 5。

表 4 两组患者不同时刻血清 NSE 浓度比较 (pg/mL, $\bar{x} \pm s$)
Table 4 Comparison of serum NSE concentration at different time between the two groups (pg/mL, $\bar{x} \pm s$)

组别	T ₀	T ₃	T ₆
0 PEEP 组 (n=31)	11.27(10.76~11.78)	5.79(5.28~6.30)	3.57(3.06~4.08)
0 PEEP 组 (n=30)	10.79(10.28~11.30)	5.75(5.24~6.26)	3.35(2.84~3.86)
P 组 (n=30)	10.95(10.44~11.46)	4.40(3.89~4.41)	2.79(2.28~3.30)

表 5 三组患者术后 30 d 神经系统并发症 (n,%)
Table 5 Three groups of patients with postoperative 30 d neurological complications (n,%)

并发症	0 PEEP 组 (n=31)	5 PEEP 组 (n=30)	P 组 (n=30)	P 值
颅内感染	3 (10%)	5 (17%)	3 (10%)	0.643
颅内高压	6 (19%)	7 (23%)	7 (23%)	0.910
癫痫	3 (9%)	2 (7%)	2 (7%)	0.878
脑水肿	6 (19%)	6 (20%)	7 (23%)	0.920
再手术	2 (6%)	1 (3%)	2 (7%)	0.817

3 讨论

颅脑损伤时, 脑 - 肺之间存在着复杂的交互作用关系。颅脑损伤患者本身颅内压的进行性升高, 会影响大脑结构和脑血流灌注, 导致大脑缺血缺氧^[11]。一项回顾性研究中表明, 对于 TBI 患者采用合适的通气策略可以预防脑缺氧并改善预后^[13]。因此, 笔者将驱动压导向 PEEP 肺保护性通气策略应用于中度 TBI 患者手术过程中, 以期取得良好的肺脑保护效应。在本研究中发现, 相较于 0 PEEP 组, P 组的 PaO₂ 和 C_{dyn} 升高更为明显, 提示驱动压指导的个体化 PEEP 通气策略更有利于改善围术期患者肺功能。

此外, TBI 继发肺损伤导致的缺氧和颅内高压会进一步加重神经系统损伤, 如此形成恶性循环^[14]。但理论上, PEEP 会在一定程度内增加胸内压, 阻碍中心静脉回流, 进而使 ICP 升高^[11]。然而很多研究认为一定程度的 PEEP 并不会导致 ICP 明显升高。超声测量视神经鞘直径可以实时、无创监测颅内压, 可以在术中实时进行 ICP 的评估^[15]。Gupta 等^[16] 通过 ONSD 评估了 TBI 患者中 PEEP 与 ICP 的关联程度, 发现当 PEEP 从 0~10 cmH₂O 增加时, ONSD 和 ICP 没有显著增加, 而在 Balakrishnan 等^[17] 研究中则发现 PEEP 从 5~10 cmH₂O 增加时会导致 ONSD 明显增加。在混合效应模型中, 提示 3 组 ONSD 都随时间略有升高趋

势,但在同一时刻下并差异无统计学意义,故该学者认为 PEEP 与 ICP 并无直接关联。因此,在 TBI 患者中给予一定 PEEP 是安全可行的。与此相一致的是在本研究中 ICP 仅轻微升高,其原因可能是:① PEEP 只有引起 PaCO₂ 显著增加时才会导致 ICP 的升高^[18],而本研究维持了患者 PaCO₂ 的正常水平。② TBI 患者几乎都实施急诊手术,用于 PEEP 维持的通气时间较短,不足以引起 ONSD 的变化。③ Nemer 等^[12]在探究高水平 PEEP 对 TBI 患者颅内压影响时发现,10 cmH₂O 的 PEEP 是安全的,不会导致颅内压大幅升高。而 Gupta 等^[16]则发现当 PEEP 从 10~15 cmH₂O 增加时,ONSD 和 ICP 显著增加。在本研究中个体化 PEEP 最高仅为 10 cm H₂O,可能不会引起 ICP 的显著增加。

NSE 是一种糖酵解烯醇化酶的同工酶,主要定位于神经元和神经内分泌细胞的细胞质内^[19]。众所周知,它可作为神经损伤的生物标志物,与神经损伤的严重程度明显相关^[20]。在本项研究中,三组 TBI 患者在入室时的 NSE 水平分别为 11.27(10.76~11.78),10.79(10.28~11.30),10.95(10.44~11.46),符合文献报道的浓度范围内(6.5~21.2 ng/mL)^[2,21]。这可能与神经损伤后 NSE 释放入血以及再灌注损伤和免疫炎症反应正反馈加重损坏神经元有关^[20]。并且,研究中 NSE 表达水平随时间走势稳定下降。其中,相较于对照组,P 组的 NSE 表达水平在术后第 1 天以及第 3 天下降趋势更为明显。发生这种现象的原因可能是术中肺保护通气策略保证了肺泡的氧分压,降低了因缺氧而导致的后续神经损伤。

最后,笔者对患者术后进行 30 d 追踪随访,发现三组的术后神经系统并发症发生率相当。提示尽管在术中做了采用了一定的肺保护通气测量,对神经系统的保护效应并不明确,且很难使 TBI 患者的神经系统结局发生显著改观,需要综合考虑围手术期中多方面的因素。

在本研究中,与固定 PEEP 0 或 5 cmH₂O 相比,驱动压指导的个体化 PEEP 通气策略可以显著提高患者的肺顺应性和氧合能力,降低血清 NSE 水平,而不引起颅内压的显著增加。这些结果表明,该策略可以改善 TBI 患者的肺功能和脑功能,具有一定的神经保护作用。该策略的改善机制可能与以下因素有关:①个体化 PEEP 可以根据患者的肺状态调整,避免过度膨胀或塌陷,维持肺泡的稳定性和

均匀性,减少通气不均和肺泡损伤^[22]。②个体化 PEEP 可以提高肺泡的氧分压,改善氧合,防止缺氧引起的神经元损伤^[23]。③个体化 PEEP 可以维持适当的胸内压,保证脑灌注压,防止颅内压升高引起的脑缺血^[24]。

本研究存在一定的局限性:① ONSD 测量的时间点未延伸至患者手术后入住重症监护室,仅反映了 ONSD 的短期改变;②本研究仅使用了颅内压和 NSE 这两个指标来评估脑功能,这些指标存在一定的局限性和不足,不能全面反映脑损伤的程度和预后。未来需要更多的指标和研究方法来验证本研究的假设,比如脑灌注压、脑血流、脑氧合、脑电图、神经影像学、神经功能评估等。③在术后重症监护室阶段机械通气患者可能采用了不同的通气方法,未能全面、科学地反映术中个体化 PEEP 对 TBI 患者整个围术期脑、肺功能的影响,后续将完善研究细节进行进一步探究。

综上所述,对于计划实施急诊颅内血肿清除术的中度创伤性脑损伤患者,驱动压指导的个体化 PEEP 肺保护通气策略有助于改善患者的肺功能和脑功能,可能更利于术后神经系统功能的恢复。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 辛超、吴可汀:实验操作、论文撰写;辛超:数据收集及整理、统计学分析;陈小萍、高巨、葛亚丽:研究设计、论文修改

参 考 文 献

- [1] Sorby-Adams AJ, Marcoionni AM, Dempsey ER, et al. The role of neurogenic inflammation in blood-brain barrier disruption and development of cerebral oedema following acute central nervous system (CNS) injury[J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(8): 1788. DOI: 10.3390/ijms18081788.
- [2] Bechtel K, Frasure S, Marshall C, et al. Relationship of serum S100B levels and intracranial injury in children with closed head trauma[J]. *Pediatrics*, 2009, 124(4): e697-e704. DOI: 10.1542/peds.2008-1493.
- [3] Lee K, Rincon F. Pulmonary complications in patients with severe brain injury[J]. *Crit Care Res Pract*, 2012, 2012: 207247. DOI: 10.1155/2012/207247.
- [4] Mrozek S, Constantin JM, Geeraerts T. Brain-lung crosstalk: implications for neurocritical care patients[J]. *World J Crit Care Med*, 2015, 4(3): 163-178. DOI: 10.5492/wjccm.v4.i3.163.

- [5] 朱志强, 姜毓敏, 裴辉. 不同 PEEP 对重度颅脑损伤术后脑灌注压及脑氧代谢的影响[J]. 中华急诊医学杂志, 2020, 29(8): 1108-1110. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2020.08.017.
- [6] 查俊, 李艳, 王鑫怡, 等. 基于 EIT 的整体不均匀性指数对颅脑创伤患者术后肺部感染的预测价值[J]. 中华急诊医学杂志, 2022, 31(12):1642-1647. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2022.12.013.
- [7] Karalapillai D, Weinberg L, Peyton P, et al. Effect of intraoperative low tidal volume vs conventional tidal volume on postoperative pulmonary complications in patients undergoing major surgery: a randomized clinical trial[J]. JAMA, 2020, 324(9): 848-858. DOI: 10.1001/jama.2020.12866.
- [8] Marret E, Bonnet F. Lung protective ventilation and thoracic anesthesia[J]. J Thorac Dis, 2019, 11(Suppl 9): S1426-S1427. DOI: 10.21037/jtd.2019.04.104.
- [9] Chiumello D, Mongodi S, Algieri I, et al. Assessment of lung aeration and recruitment by CT scan and ultrasound in acute respiratory distress syndrome patients[J]. Crit Care Med, 2018, 46(11): 1761-1768. DOI: 10.1097/CCM.0000000000003340.
- [10] Jiang LL, Wu YJ, Zhang Y, et al. Effects of intraoperative lung-protective ventilation on clinical outcomes in patients with traumatic brain injury: a randomized controlled trial[J]. BMC Anesthesiol, 2021, 21(1): 182. DOI: 10.1186/s12871-021-01402-w.
- [11] Liu HR, Wu XM, Li JL, et al. Individualized PEEP ventilation between tumor resection and dural suture in craniotomy[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2020, 196: 106027. DOI: 10.1016/j.clineuro.2020.106027.
- [12] Nemer SN, Caldeira JB, Santos RG, et al. Effects of positive end-expiratory pressure on brain tissue oxygen pressure of severe traumatic brain injury patients with acute respiratory distress syndrome: a pilot study[J]. J Crit Care, 2015, 30(6): 1263-1266. DOI: 10.1016/j.jcrc.2015.07.019.
- [13] Robba C, Asgari S, Gupta A, et al. Lung injury is a predictor of cerebral hypoxia and mortality in traumatic brain injury[J]. Front Neurol, 2020, 11: 771. DOI: 10.3389/fneur.2020.00771.
- [14] Chacón-Aponte AA, Durán-Vargas ÉA, Arévalo-Carrillo JA, et al. Brain-lung interaction: a vicious cycle in traumatic brain injury[J]. Acute Crit Care, 2022, 37(1): 35-44. DOI: 10.4266/acc.2021.01193.
- [15] Chen LM, Wang LJ, Hu Y, et al. Ultrasonic measurement of optic nerve sheath diameter: a non-invasive surrogate approach for dynamic, real-time evaluation of intracranial pressure[J]. Br J Ophthalmol, 2019, 103(4): 437-441. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2018-312934.
- [16] Balakrishnan S, Naik S, Chakrabarti D, et al. Effect of respiratory physiological changes on optic nerve sheath diameter and cerebral oxygen saturation in patients with acute traumatic brain injury[J]. J Neurosurg Anesthesiol, 2022, 34(1): e52-e56. DOI: 10.1097/ANA.0000000000000706.
- [17] Gupta N, Singh VK, Jafa S. Correlation of positive end-expiratory and intracranial pressure using the ultrasonographic-guided measurement of optic nerve sheath diameter in traumatic brain injury patients[J]. Neurol India, 2021, 69(6): 1670-1674. DOI: 10.4103/0028-3886.333532.
- [18] Robba C, Ball L, Nogas S, et al. Effects of positive end-expiratory pressure on lung recruitment, respiratory mechanics, and intracranial pressure in mechanically ventilated brain-injured patients[J]. Front Physiol, 2021, 12: 711273. DOI: 10.3389/fphys.2021.711273.
- [19] Xu CM, Luo YL, Li S, et al. Multifunctional neuron-specific enolase: its role in lung diseases[J]. Biosci Rep, 2019, 39(11): BSR20192732. DOI: 10.1042/BSR20192732.
- [20] Schindler CR, Lustenberger T, Woschek M, et al. Severe traumatic brain injury (TBI) modulates the kinetic profile of the inflammatory response of markers for neuronal damage[J]. J Clin Med, 2020, 9(6): 1667. DOI: 10.3390/jcm9061667.
- [21] Park DW, Park SH, Hwang SK. Serial measurement of S100B and NSE in pediatric traumatic brain injury[J]. Childs Nerv Syst, 2019, 35(2): 343-348. DOI: 10.1007/s00381-018-3955-y.
- [22] Giardina A, Cardim D, Ciliberti P, et al. Effects of positive end-expiratory pressure on cerebral hemodynamics in acute brain injury patients[J]. Front Physiol, 2023, 14: 1139658. DOI: 10.3389/fphys.2023.1139658.
- [23] Boesing C, Schaefer L, Hammel M, et al. Individualized positive end-expiratory pressure titration strategies in superobese patients undergoing laparoscopic surgery: prospective and nonrandomized crossover study[J]. Anesthesiology, 2023, 139(3): 249-261. DOI: 10.1097/ALN.0000000000004631.
- [24] Li HP, Lin YN, Cheng ZH, et al. Intracranial-to-central venous pressure gap predicts the responsiveness of intracranial pressure to PEEP in patients with traumatic brain injury: a prospective cohort study[J]. BMC Neurol, 2020, 20(1): 234. DOI: 10.1186/s12883-020-01764-7.

(收稿日期 : 2023-07-11)

(本文编辑 : 何小军)