

## 胸壁压迫在急性呼吸窘迫综合征通气中的应用前景

柳宇华, 张钊培, 刘晓青, 刘学松

(广州医科大学附属第一医院重症医学科 广州呼吸健康研究所, 广州 510120)

**摘要** 急性呼吸窘迫综合征(ARDS)是一种危及生命的非心源性肺水肿。尽管肺保护性通气策略是ARDS治疗的基石,但部分患者仍无法有效缓解低氧血症或减少呼吸机相关性肺损伤。近期研究发现,通过胸壁或腹部按压可以改善肺顺应性,缓解ARDS患者吸气末期肺泡过度膨胀。胸壁压迫作为一种对仰卧患者胸部腹侧施加重物的方法,具有潜在的临床获益能力,也被认为是诊断ARDS患者肺泡过度通气的方法之一。本综述从生理及临床角度分析胸壁压迫在ARDS患者通气中的应用,并探讨其机制与临床意义,旨在为ARDS患者的治疗提供新思路 and 依据。

**关键词** 急性呼吸窘迫综合征;胸壁压迫;机械通气;呼吸力学;肺顺应性

中图分类号:R563.8 文献标志码:A 文章编号:1005-930X(2024)08-1193-07

DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.013

### The application of chest wall compression in ventilation of acute respiratory distress syndrome patients

LIU Yuhua, ZHANG Zhaopei, LIU Xiaoqing, LIU Xuesong. (Department of Critical Care Medicine, the First Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou Institute of Respiratory Health, Guangzhou 510120, China)

**Abstract** Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is a life-threatening non-cardiogenic pulmonary edema. Despite lung-protective ventilation strategies serving as the cornerstone of ARDS treatment, some patients still fail to effectively alleviate hypoxemia or reduce ventilator-induced lung injury. Recent studies have revealed that chest or abdominal compression can improve lung compliance and mitigate alveolar overdistension during the end-inspiratory phase in ARDS patients. Chest wall compression, as a method of applying weight to the ventral aspect of the chest in supine patients, holds potential clinical benefits and is recognized as one of the diagnostic tools for alveolar hyperventilation in ARDS patients. This review aims to analyze the application of chest wall compression in the ventilation of ARDS patients from both physiological and clinical perspectives, exploring its mechanisms and clinical significance. Ultimately, it seeks to provide novel insights and evidence for the treatment of ARDS patients.

**Keywords** acute respiratory distress syndrome; chest wall compression; mechanical ventilation; respiratory mechanics; lung compliance

急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)作为一种临床常见的肺损伤,其病死率可高达35%~50%,严重威胁患者的生命健

康<sup>[1]</sup>。ARDS的显著病理生理特征之一是肺内病变分布的不均一性,具体表现为重力依赖区的肺泡塌陷萎缩与非重力依赖区的肺泡过度扩张并存<sup>[2-3]</sup>,这

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(No. 82070084);广东省自然科学基金资助项目(No. 2020B1111340001);实验室专项项目(No. GZNL2024A01016)

[通信作者] 刘学松

[收稿日期] 2024-07-28

种病理改变在机械通气过程中尤为明显,并加剧肺组织的进一步损伤。肺保护性通气策略是ARDS的治疗基石,可以使患者在临床结局上受益<sup>[4]</sup>。然而,尽管肺保护性通气策略在多数ARDS患者中展现了良好的治疗效果,但在特定患者群体中,传统的肺保护策略可能无法缓解低氧血症并加重呼吸机相关性肺损伤。

俯卧位通气策略能够显著且可逆地增强胸骨周围及腹侧区域的支撑力,有效减轻心脏对肺部的压迫,并缓解腹内压(intra-abdominal pressure, IAP)对肺部的推挤<sup>[5]</sup>。这种体位有助于扩张重力依赖区的肺泡,改善跨肺压的分布,进而提高通气血流比例,对于改善肺换气功能具有积极作用。并且俯卧位在改善肺部通气的同时,较少对呼吸系统总顺应性(respiratory system compliance,  $C_{RS}$ )及呼气末容积造成不利影响,维持了呼吸系统的整体稳定性<sup>[5-6]</sup>。此外,俯卧位通气可以降低呼吸机相关性肺损伤风险,改善呼吸衰竭患者的氧合,并改善中、重度ARDS患者的预后<sup>[7]</sup>。然而,鉴于临床实践中长时间维持俯卧位通气所面临的挑战,探索具有俯卧位通气类似功效的其他治疗措施显得尤为重要。

胸壁压迫是指将重物(通常是沙子或水袋)放置于仰卧位患者腹侧的胸壁区域<sup>[8]</sup>,维持数分钟至数小时不等。在潮气量(tidal volume,  $V_T$ )及呼气末正压(positive-end expiratory pressure, PEEP)恒定的前提下维持此操作,预期反应将会是增加平台压(plat pressure,  $P_{plat}$ )和驱动压(driving pressure, DP),进而导致 $C_{RS}$ 的下降。然而,在近期全球新型冠状病毒(COVID-19)大流行背景下,一些文献报道了胸壁或腹部按压以及改变身体体位等操作对肺顺应性较低的COVID-19相关ARDS(COVID-19 associated ARDS, C-ARDS)的患者 $C_{RS}$ 产生了不同于前的“矛盾”反应(即 $C_{RS}$ 增加)<sup>[9-18]</sup>。进一步观察发现,此类患者在接受胸壁压迫后,不仅 $C_{RS}$ 有所提升,其气体交换指标、肺泡死腔比例和呼吸力学指标都得到了改善<sup>[15,17]</sup>。这些发现揭示了胸壁压迫在不同病理生理状态下的不同效果,提示其可能具备潜在的临床获益能力。与俯卧位通气策略相类似,胸壁外压迫通过加固ARDS患者相对脆弱的胸骨周围区域,为肺组织提供了额外的支撑,从而改善患者的呼吸力学指标。鉴于此,胸壁压迫有望成为当前肺保护性通气策略的重要补充。本综述基于当前研究成果,从生理及临床角度分析胸壁压迫在ARDS

患者通气中的应用,并探讨其机制与临床意义,旨在为ARDS患者的治疗提供新思路 and 依据。

## 1 胸壁压迫的生理学机制

**1.1 胸壁压迫缓解部分肺泡过度扩张** 重力对肺容量、通气分布和 $C_{RS}$ 有重要影响<sup>[19]</sup>。当体位从坐位转变为水平仰卧位时,背部肺组织所承受的重力负荷逐渐增加,进而加剧了肺部的受压状态,导致功能残气量(functional residual capacity, FRC)显著下降,降幅可达30%(即600~900 mL)<sup>[20]</sup>。相比之下,当患者处于半卧位(床头抬高 $30^{\circ}$ ~ $45^{\circ}$ )时,这一体位可促进膈肌向下移动,进而增加呼气末跨肺压(transpulmonary pressure, PL),有助于肺泡的扩张与气体交换<sup>[21-24]</sup>。因此,在大多数重症监护室中,半卧位被认为是一种标准的护理方式。然而,对于ARDS患者而言,半卧位的益处尚未明确。既往研究虽表明体位倾斜可能对ARDS患者的气体交换产生正面效应,但在呼吸力学层面的影响却未形成统一结论<sup>[22-24]</sup>。最近对接受机械通气的中、重度ARDS患者进行的研究表明,当患者处于半卧位时,其气道压将会升高,而 $C_{RS}$ 则同步降低<sup>[16,25]</sup>。这可能是因为ARDS患者的“婴儿肺”可能已经位于其压力-容积曲线的最上段附近<sup>[26]</sup>。因此,PL增加的总体效果将取决于原本扩张不良肺泡的复张与开放肺泡的过度扩张的平衡。中、重度ARDS患者肺部炎症从水肿和肺不张的初始阶段发展为肺部实变及纤维化,导致大量肺泡功能丧失<sup>[27]</sup>。因此,PL的进一步增加更倾向于加剧开放肺泡的过度通气,从而可能恶化低氧血症状况。针对中、重度ARDS患者,施加短暂的胸壁压迫可以降低PL<sup>[28]</sup>。在这种情况下,胸壁压迫减少了ARDS“婴儿肺”在吸气末的肺泡过度扩张,进而实现了 $C_{RS}$ 的改善。

**1.2 胸壁压迫改善跨肺压分布** 肺泡呼气末塌陷诱导的肺泡反复开合会引起正常的肺泡表面活性物质减少并失活,导致肺泡功能丧失,最终形成“肺不张”<sup>[26]</sup>。由于重力依赖区域的肺不张,患者在非重力依赖区和重力依赖区之间的气体分布呈现出显著差异<sup>[29]</sup>,通常表现为非重力依赖区的过度通气更严重。ARDS肺泡实变的不均一性会引起PL的分布不均匀,从而导肺顺应性梯度异常,尤其在中、重度ARDS患者中这种改变更大<sup>[30]</sup>。Bastia等<sup>[17]</sup>通过构建ARDS动物模型,并对其实施胸壁压迫操作<sup>[17]</sup>,发现胸壁压迫的实施降低了胸膜腔内压(pleu-

ral pressure,  $P_{pl}$ )梯度(即背侧 $P_{pl}$ —腹侧 $P_{pl}$ )。胸壁压迫以不对称的方式增加了 $P_{pl}$ ,腹侧相较于背侧受胸壁压迫的影响更大。上述发现提示胸壁压迫的实施有效地改善了低肺顺应性患者非重力依赖区的 $C_{RS}$ ,同时也更好地改善了此类患者的跨肺压分布。

## 2 ARDS患者床边胸壁压迫

胸壁压迫是指将重物(通常是沙子或水袋)放置于仰卧位患者腹侧的胸壁<sup>[8]</sup>,通常位于胸骨正中央,面积约20 cm×20 cm,维持数分钟至数小时不等(图1)。在COVID-19大流行之前,仅有少数的病例报道描述了胸壁压迫这类临床干预措施对患者的影响<sup>[31-34]</sup>。虽然这种类似于俯卧位的干预措施可能

会给特定的患者带来获益<sup>[34]</sup>,但是能否带来积极的结果通常无法被可靠地预测。最近的报道发现,对C-ARDS患者胸壁施加短暂的按压可以改善DP并同步改善 $C_{RS}$ (表1)。

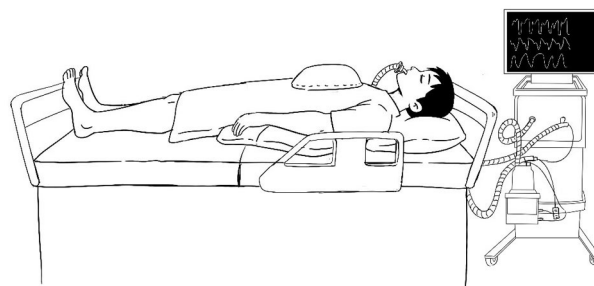


图1 胸壁压迫示意图

表1 近期有关胸壁压迫在ARDS患者通气中应用的研究

作者	年份	方法	基线 $C_{RS}$ / (mL/cmH <sub>2</sub> O)	主要发现
Kummer等 <sup>[9]</sup>	2021	对7例C-ARDS患者进行仰卧位腹壁压迫,然后与下调PEEP进行比较	13.6±4.0	腹壁压迫与PEEP减少具有相似的效果
Rezoagli等 <sup>[11]</sup>	2021	对4例ARDS患者进行仰卧位胸壁压迫、腹壁压迫和体位改变,比较呼吸力学指标	18.0±7.0	胸壁压迫、腹壁压迫和体位改变可以改善呼吸力学,降低EELV,降低过度充气,最终改善肺顺应性
Selickman等 <sup>[14]</sup>	2022	对17例主要是C-ARDS的患者进行仰卧位胸壁压迫,然后与下调PEEP和 $V_T$ 进行比较	25.70±11.80	对胸壁压迫有矛盾反应的患者在 $V_T$ 或PEEP减少后表现出相似的呼吸力学变化
Umbrello等 <sup>[15]</sup>	2022	对40例C-ARDS患者分别进行仰卧位、仰卧位+胸壁压迫、俯卧位、俯卧位+胸壁压迫,每项持续6 h;根据肺顺应性分组,比较呼吸力学、气体交换指标	低 $C_{RS}$ 组:23.9±3.56 高 $C_{RS}$ 组:64.8±10.0	仅低 $C_{RS}$ 患者对胸壁压迫会出现 $C_{RS}$ 、气体交换或肺泡死腔改善,且基线越低,改善越明显
Selickman等 <sup>[16]</sup>	2022	对17例主要是C-ARDS的患者进行体位调整并实施胸壁压迫	31.90±10.2	半卧位时, $C_{RS}$ 降低,胸壁压迫可使 $C_{RS}$ 回到基线值
Bastia等 <sup>[17]</sup>	2022	对11例C-ARDS患者分别进行仰卧位、胸壁压迫、终止胸壁压迫和下调PEEP,比较呼吸力学、气体交换、血流动力学指标;对4只ARDS猪进行胸壁压迫,比较胸膜腔压力梯度	25.90±5.90	胸壁压迫可以急剧降低DP,改善 $C_{RS}$ 并降低 $P_{pl}$ 梯度;胸壁压迫与PEEP减少具有相似的呼吸力学变化;胸壁压迫的益处会随时间而减小
Elmufdi等 <sup>[18]</sup>	2021	对7例C-ARDS患者进行俯卧位背推,比较呼吸力学指标	-	低 $C_{RS}$ 患者实施背推可改善 $C_{RS}$ ;长时间腹推是可行的,益处不会消失
Moncomble等 <sup>[35]</sup>	2024	对20例ARDS患者进行仰卧位胸壁压迫,根据两个水平PEEP分组,比较呼吸力学指标	高PEEP组:38 <sup>[33-44]</sup> 低PEEP组:47 <sup>[35-60]</sup>	胸壁压迫期间 $P_{pl}$ 的变化与肺过度扩张的百分比相关

1 cmH<sub>2</sub>O=0.98 kPa。

**2.1 胸壁压迫与 $C_{RS}$**  Umbrello等<sup>[15]</sup>招募了40例ARDS患者,并依据肺顺应性分组,观察接受6 h胸壁压迫前后患者呼吸力学指标及气体交换指标的变化,旨在评估胸壁压迫对ARDS通气的影响。结果显示,在 $C_{RS}$ 较高的患者中,氧分压等气体交换指

标在实施胸壁压迫前、后未观察到统计学差异,并且 $C_{RS}$ 随着胸壁压迫的进行呈下降趋势<sup>[15]</sup>。然而,在 $C_{RS}$ 较低的患者(即 $C_{RS}$ 低于40 mL/cmH<sub>2</sub>O)中,胸壁压迫展现出了显著的效果。这些患者的呼吸力学指标得到了改善,同时气体交换指标及肺泡死腔等



方面也观察到了积极的变化。这一发现与既往文献<sup>[14-17]</sup>报道的结果一致。同时, Umbrello等<sup>[15]</sup>还揭示了 $C_{RS}$ 改善程度与患者初始 $C_{RS}$ 水平之间的联系。他们发现, 患者的 $C_{RS}$ 初始值越低, 即肺部顺应性越差, 在接受胸壁压迫后, 其 $C_{RS}$ 的改善幅度往往更为显著。并且, 研究结果排除了疾病阶段作为影响 $C_{RS}$ 改善程度的关键因素。这些发现提示对部分ARDS患者实施仰卧位胸壁压迫可能带来益处。

**2.2 胸壁压迫与体位** 如前所述, 倾斜体位对ARDS患者的气体交换可能带来有利影响, 但该体位对于呼吸力学的影响仍存在争议<sup>[22-24]</sup>。基于此背景, Selickman等<sup>[16]</sup>招募了17例ARDS患者, 旨在探讨体位变化结合胸壁压迫对ARDS患者呼吸力学特性的影响。其研究发现, 与常规的仰卧位相比, 转换至半卧位后, 中至重度ARDS患者的 $C_{RS}$ 降低(由 $(31.9 \pm 10.2)$  mL/cmH<sub>2</sub>O降至 $(28.8 \pm 12.3)$  mL/cmH<sub>2</sub>O,  $P < 0.05$ ), 这一发现提示了体位变化对呼吸力学参数的直接影响。随后在半卧位状态下实施胸壁压迫干预, 患者的 $C_{RS}$ 能够迅速恢复至仰卧位时的基线水平, 提示胸壁压迫或可作为改善体位导致 $C_{RS}$ 下降的有效手段。

为了进一步验证胸壁压迫在不同体位下的效果是否具有普遍性, Umbrello等<sup>[15]</sup>与Selickman等<sup>[16]</sup>进行了更为深入的研究, 他们评估了在俯卧位时实施胸壁压迫对ARDS患者呼吸力学的影响。结果显示,  $C_{RS}$ 较低的ARDS患者在俯卧位时接受胸壁压迫后, 同样能够观察到 $C_{RS}$ 的改善, 这与先前在仰卧位中观察到的效应相类似。

**2.3 胸壁压迫与 $V_T$ 、PEEP** 有学者进一步发现,  $V_T$ 或PEEP的微小变化对此类患者(同样是 $C_{RS}$ 较低的ARDS患者)的 $C_{RS}$ 和DP均会产生类似于胸壁压迫的影响<sup>[14]</sup>。Bastia等<sup>[17]</sup>应用电阻抗断层扫描(electrical impedance tomography, EIT)发现靠近压迫部位的非重力依赖区显示出呼气末肺阻抗减少, 同时改善此区域的 $C_{RS}$ 。这一发现提示胸壁压迫以不对称的方式改善 $C_{RS}$ , 更好地调节了此类患者的跨肺压分布。

为了消除胸壁压迫的个体化差异, Moncomble等<sup>[35]</sup>对20例ARDS患者实施了标准化的胸壁压迫, 即在胸骨上放置1个含有1L盐水的水袋, 并通过手动按压维持其内部压力在7.85 kPa。在此基础上,

结合EIT技术进行PEEP的个体化滴定, 设定了两个不同的PEEP水平(高PEEP: 维持 $P_{plat}$  28~30 cmH<sub>2</sub>O,  $V_T$  6 mL/kg; 低PEEP: 维持肺泡过度扩张的百分比在较低水平), 以探索胸壁压迫在不同PEEP条件下的效果。结果发现, 在高PEEP时, 肺泡塌陷的百分比比较低, 而肺泡过度扩张的百分比比较高, 此时施加胸壁压迫将会降低大多数患者的 $P_{plat}$ <sup>[35]</sup>。这一结果提示, 胸壁压迫对ARDS患者呼吸力学产生的积极影响, 其机制可能更多地与减少肺泡的过度充气相关, 提示胸壁压迫或可作为一种简便、直观的诊断手段, 用于识别并评估ARDS患者中的肺泡过度充气现象。

### 3 胸壁压迫与腹壁压迫

IAP是影响肺顺应性的重要因素<sup>[36-37]</sup>。在IAP升高至0.6 kPa之前,  $P_{pl}$ 与 $C_{RS}$ 往往保持相对稳定, 无明显变化。当IAP升高大于0.6 kPa后, IAP的增加通常会伴随 $P_{plat}$ 的增加和 $C_{RS}$ 的平行降低<sup>[37]</sup>。然而, 在新冠流行期间, 针对ARDS患者的治疗实践中, 多份文献报道了采用腹壁压迫操作后, 出现了与常规预期相悖的现象——即 $P_{plat}$ 的降低与 $C_{RS}$ 的升高<sup>[9,12]</sup>。出现此类“矛盾”现象的患者的 $C_{RS}$ 也非常低。一个病例系列中报道了7例患者, 其中有6例患者的 $C_{RS} < 15$  mL/cmH<sub>2</sub>O, 这一发现与胸壁压迫观察到的现象相似<sup>[18]</sup>。此外, 在减小PEEP或 $V_T$ 的情况下, 也能观察到类似结果, 这些数据表明腹壁压迫对呼吸力学的影响与肺泡过度通气的程度相关。并且, 这些益处并没有随着时间的推移而消失。

胸壁压迫与腹壁压迫作为两种不同形式的胸腔外压迫手段, 其施加压力的方式及其对胸腔生理状态的影响存在差异。在施加压力的过程中, 两者均会促使 $P_{pl}$ 的上升, 进而引发呼气末静息气体的一定程度排出。然而, 胸壁压迫与腹壁压迫对FRC和IAP的影响不同<sup>[13,37]</sup>。胸壁压迫在实施时, 往往仅导致FRC或IAP发生相对较小的变化。相反, 腹壁压迫则通过直接增加IAP, 并促使膈肌向头侧方向移动, 进而对FRC产生更为显著的影响, 导致FRC的损失相对较大。因此, 当存在广泛吸气末过度通气的情况下, 对中重度ARDS患者实施腹壁压迫导致肺容量减小引起的反应预计将更加显著<sup>[37]</sup>。

## 4 胸壁压迫的临床应用

目前有观点认为,在接受机械通气的ARDS患者中,特别是中重度ARDS患者,短暂性手动胸壁按压可以作为其日常临床实践中诊断肺泡过度通气的方法之一。

**4.1 胸壁压迫与气体交换** 胸壁压迫对气体交换的影响尚不明确。Bastia等<sup>[17]</sup>观察到,在短时间内( $<1\text{ h}$ )胸壁压迫展现出良好的机械效益,具体表现为 $C_{RS}$ 、 $P_{plat}$ 、 $DP$ 等指标的改善。然而,尽管机械效益明显,但患者的氧分压未出现相应的提升。Umbrello等<sup>[15]</sup>招募了40例C-ARDS患者,让患者依次接受4个步骤(仰卧位、仰卧位+胸壁压迫、俯卧位、俯卧位+胸壁压迫),每个步骤持续6 h。研究结果显示,肺顺应性较低的ARDS患者( $C_{RS}<40\text{ mL/cmH}_2\text{O}$ )不仅 $C_{RS}$ 等呼吸力学指标逐步改善,氧分压等气体交换指标也呈现出改善趋势。其中,“俯卧位+胸壁压迫”这一组合展现出了最为显著的效果,与仰卧位相比,氧分压提升了47%, $C_{RS}$ 则改善了58%。此外,胸壁压迫的实施还观察到对二氧化碳分压的降低作用,这可能与非重力依赖区肺泡吸气末过度通气的减少有关。然而,这两项研究的样本量相对有限,其结论的稳健性尚需进一步验证。

**4.2 胸壁压迫与循环** 胸壁压迫对体循环与肺循环的影响尚不明确。胸壁压迫可能会导致静脉回流受阻,进而引发心脏前负荷的降低,对于合并心血管疾病的患者可能不利于血流动力学的稳定。尽管多数现有研究因受限于较短的压迫时间与有限的参与人数,尚未能明确揭示胸壁压迫对患者血流动力学产生的直接负面影响,但不排除在长期应用或特定患者群体中可能存在的风险。此外,肺血流灌注在ARDS患者中扮演重要角色<sup>[38]</sup>。例如,肺血流的分布和区域性通气血流比例对患者预后至关重要<sup>[39]</sup>。然而,迄今为止尚无研究描述胸壁压迫对此类患者肺血流的影响。

**4.3 胸壁压迫的安全性** 研究发现,针对重度哮喘患者,在呼气期间间断施加胸壁压迫,可以减少肺泡过度通气现象,改善患者的呼吸力学参数,并同时展现出对血流动力学的积极效应<sup>[32-33]</sup>。一项2014年的报道提到,对两例因故无法采取俯卧位的危重创

伤患者,在其胸壁施加适当重物压迫,成功改善了氧分压<sup>[34]</sup>。尽管上述研究展示了胸壁压迫的潜在益处,但其安全性问题仍不容忽视。Bastia等<sup>[17]</sup>发现,压迫1 h对患者血流动力学和气体交换没有影响。Umbrello等<sup>[15]</sup>认为,连续压迫6 h是安全的,因为他们未观察到患者出现任何不适或疼痛的迹象。尽管如此,鉴于当前研究在样本量以及观察时长等方面的局限性,胸壁压迫的安全性尚未得到全面的验证。因此,我们需要更多设计精良、大样本、多中心的临床研究来明确最佳的施加重量、持续时间以及可能的个体化调整方案。除了关注患者的呼吸力学、气体交换和血流动力学外,我们还需关注患者局部皮肤状况以及压迫对腹腔内器官的影响,需要权衡胸壁压迫对这类患者的益处和风险。

## 5 小结与展望

综上所述,最近的研究表明,胸壁压迫可以改善部分ARDS患者的 $C_{RS}$ ,其生理学机制可能与缓解吸气末肺泡过度膨胀以及改善跨肺压分布有关。有观点认为,短暂性手动胸壁按压可以作为中重度ARDS患者诊断肺泡过度通气的方法之一。虽然患者的呼吸力学指标得到改善,但是胸壁压迫对预后的影响尚不明确,将胸壁压迫作为一种治疗方法仍存在一定争议。因此,需要前瞻性临床研究进一步探讨胸壁压迫对ARDS患者生理学和预后等方面的影响。

## 参考文献:

- [1] BELLANI G, LAFFEY J G, PHAM T, et al. Epidemiology, patterns of care, and mortality for patients with acute respiratory distress syndrome in intensive care units in 50 countries [J]. *Jama*, 2016, 315(8): 788-800.
- [2] CONSTANTIN J M, JABAUDON M, LEFRANT J Y, et al. Personalised mechanical ventilation tailored to lung morphology versus low positive end-expiratory pressure for patients with acute respiratory distress syndrome in France (the LIVE study): a multicentre, single-blind, randomised controlled trial [J]. *The lancet respiratory medicine*, 2019, 7(10): 870-880.
- [3] GATTINONI L, CAIRONI P, CRESSONI M, et al. Lung recruitment in patients with the acute respiratory distress

- syndrome [J]. *The New England journal of medicine*, 2006, 354(17): 1775-1786.
- [4] GRASSELLI G, CALFEE C S, CAMPOROTA L, et al. ESICM guidelines on acute respiratory distress syndrome: definition, phenotyping and respiratory support strategies [J]. *Intensive care medicine*, 2023, 49(7): 727-759.
- [5] GATTINONI L, TACCONE P, CARLESSO E, et al. Prone position in acute respiratory distress syndrome. Rationale, indications, and limits [J]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 2013, 188(11): 1286-1293.
- [6] PELOSI P, TUBIOLO D, MASCHERONI D, et al. Effects of the prone position on respiratory mechanics and gas exchange during acute lung injury [J]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 1998, 157(2): 387-393.
- [7] HADAYA J, BENHARASH P. Prone positioning for acute respiratory distress syndrome (ARDS) [J]. *Jama*, 2020, 324(13): 1361.
- [8] REZOAGLI E, BASTIA L, BROCHARD L, et al. Physical manoeuvres in patients with ARDS and low compliance: bedside approaches to detect lung hyperinflation and optimise mechanical ventilation [J]. *The European respiratory journal*, 2023, 61(5): 2202169.
- [9] KUMMER R L, SHAPIRO R S, MARINI J J, et al. Paradoxically improved respiratory compliance with abdominal compression in COVID-19 ARDS [J]. *Chest*, 2021, 160(5): 1739-1742.
- [10] LASSOLA S, MIORI S, SANNA A, et al. Effect of chest wall loading during supine and prone position in a critically ill covid-19 patient: a new strategy for ARDS? [J]. *Critical care*, 2021, 25(1): 442.
- [11] REZOAGLI E, BASTIA L, GRASSI A, et al. Paradoxical effect of chest wall compression on respiratory system compliance: a multicenter case series of patients with ards, with multimodal assessment [J]. *Chest*, 2021, 160(4): 1335-1339.
- [12] STAVI D, GOFFI A, AL SHALABI M, et al. The Pressure paradox: abdominal compression to detect lung hyperinflation in COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 2022, 205(2): 245-247.
- [13] CARTEAUX G, TUFFET S, MEKONTSO DESSAP A. Potential protective effects of continuous anterior chest compression in the acute respiratory distress syndrome: physiology of an illustrative case [J]. *Critical care*, 2021, 25(1): 187.
- [14] SELICKMAN J, TAWFIK P, CROOKE P S, et al. Paradoxical response to chest wall loading predicts a favorable mechanical response to reduction in tidal volume or PEEP [J]. *Critical care*, 2022, 26(1): 201.
- [15] UMBRELLO M, LASSOLA S, SANNA A, et al. Chest wall loading during supine and prone position in patients with COVID-19 ARDS: effects on respiratory mechanics and gas exchange [J]. *Critical care*, 2022, 26(1): 277.
- [16] SELICKMAN J, CROOKE P S, TAWFIK P, et al. Paradoxical positioning: does "head up" always improve mechanics and lung protection? [J]. *Critical care medicine*, 2022, 50(11): 1599-1606.
- [17] BASTIA L, REZOAGLI E, GUARNIERI M, et al. External chest-wall compression in prolonged COVID-19 ARDS with low-compliance: a physiological study [J]. *Annals of intensive care*, 2022, 12(1): 35.
- [18] ELMUFDI F S, MARINI J J. Dorsal push and abdominal binding improve respiratory compliance and driving pressure in proned coronavirus disease 2019 acute respiratory distress syndrome [J]. *Critical care explorations*, 2021, 3(11): e0593.
- [19] FROESE A B. Gravity, the belly, and the diaphragm: you can't ignore physics [J]. *Anesthesiology*, 2006, 104(1): 193-196.
- [20] MARINI J J, TYLER M L, HUDSON L D, et al. Influence of head-dependent positions on lung volume and oxygen saturation in chronic air-flow obstruction [J]. *The American review of respiratory disease*, 1984, 129(1): 101-105.
- [21] HOSTE E A, ROOSENS C D, BRACKE S, et al. Acute effects of upright position on gas exchange in patients with acute respiratory distress syndrome [J]. *Journal of intensive care medicine*, 2005, 20(1): 43-49.
- [22] RICHARD J C, MAGGIORE S M, MANCEBO J, et al. Effects of vertical positioning on gas exchange and lung volumes in acute respiratory distress syndrome [J]. *Intensive care medicine*, 2006, 32(10): 1623-1626.
- [23] ROBAK O, SCHELLONGOWSKI P, BOJIC A, et al. Short-term effects of combining upright and prone positions in patients with ARDS: a prospective randomized study [J]. *Critical care*, 2011, 15(5): R230.
- [24] DELLAMONICA J, LEROLLE N, SARGENTINI C, et al. Effect of different seated positions on lung volume and oxygenation in acute respiratory distress syndrome [J]. *Inten-*

- sive care medicine, 2013, 39(6): 1121-1127.
- [25] MARRAZZO F, SPINA S, FORLINI C, et al. Effects of trunk inclination on respiratory mechanics in patients with COVID-19-associated acute respiratory distress syndrome: let's always report the angle! [J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2022, 205(5): 582-584.
- [26] GATTINONI L, MARINI J J, PESENTI A, et al. The "baby lung" became an adult [J]. Intensive care medicine, 2016, 42(5): 663-673.
- [27] ROSSI S, PALUMBO M M, SVERZELLATI N, et al. Mechanisms of oxygenation responses to proning and recruitment in COVID-19 pneumonia [J]. Intensive care medicine, 2022, 48(1): 56-66.
- [28] MARINI J J, GATTINONI L. Improving lung compliance by external compression of the chest wall [J]. Critical care, 2021, 25(1): 264.
- [29] ZHANG R, HE H, YUN L, et al. Effect of postextubation high-flow nasal cannula therapy on lung recruitment and overdistension in high-risk patient [J]. Critical care, 2020, 24(1): 82.
- [30] SHEN Y, CAI G, GONG S, et al. Interaction between low tidal volume ventilation strategy and severity of acute respiratory distress syndrome: a retrospective cohort study [J]. Critical care, 2019, 23(1): 254.
- [31] EBERLEIN M, SCHMIDT G A, BROWER R G. Chest wall strapping. An old physiology experiment with new relevance to small airways diseases [J]. Annals of the American thoracic society, 2014, 11(8): 1258-1266.
- [32] FISHER M M, BOWEY C J, LADD-HUDSON K. External chest compression in acute asthma: a preliminary study [J]. Critical care medicine, 1989, 17(7): 686-687.
- [33] WATTS J I. Thoracic compression for asthma [J]. Chest, 1984, 86(3): 505.
- [34] SAMANTA S, SAMANTA S, SONI K D. Supine chest compression: alternative to prone ventilation in acute respiratory distress syndrome [J]. The American journal of emergency medicine, 2014, 32(5): 489.
- [35] MONCOMBLE E, TUFFET S, BOUJELBEN M, et al. Paradoxical response to standardized chest loading may unveil occult overdistension during protective ventilation [J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2024, 209(2): 221-223.
- [36] CORTES-PUENTES G A, GARD K E, ADAMS A B, et al. Value and limitations of transpulmonary pressure calculations during intra-abdominal hypertension [J]. Critical care medicine, 2013, 41(8): 1870-1877.
- [37] SELICKMAN J, MARINI J J. Chest wall loading in the ICU: pushes, weights, and positions [J]. Annals of intensive care, 2022, 12(1): 103.
- [38] GATTINONI L, COPPOLA S, CRESSONI M, et al. COVID-19 Does not lead to a "typical" acute respiratory distress syndrome [J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2020, 201(10): 1299-1300.
- [39] CRONIN J N, CROCKETT D C, FARMERY A D, et al. Mechanical ventilation redistributes blood to poorly ventilated areas in experimental lung injury [J]. Critical care medicine, 2020, 48(3): e200-e208.

本文引用格式:

柳宇华,张钊培,刘晓青,等.胸壁压迫在急性呼吸窘迫综合征通气中的应用前景[J].广西医科大学学报, 2024, 41(8): 1193-1199. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.013

LIU Y H, ZHANG Z P, LIU X Q, et al. The application of chest wall compression in ventilation of acute respiratory distress syndrome patients [J]. Journal of Guangxi medical university, 2024, 41(8): 1193-1199. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.013